

УДК 621.311

Параметрическая идентификация двухцепных линий электропередачи

В.П. Закарюкин^{1 a}, А.В. Крюков^{1 b}, А.А. Кушов^{2 c}¹Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия²Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия^azakar49@mail.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^cKushovAlexey@yandex.ru

Статья получена 2.07.2015, принята 26.08.2015

Исходные параметры воздушных линий электропередачи (ЛЭП) часто определяются с погрешностями до десятков процентов. 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 конце линии. Однако существующие методы идентификации ЛЭП разработаны применительно к трехпроводным линиям и не применимы для определения параметров двухцепных линий электропередачи. В статье представлен подход к идентификации параметров двухцепной трехфазной линии электропередачи на основе измерения комплексов напряжений и токов проводов на отправном и приемном концах. Метод базируется на предварительном расчетном определении взаимных емкостных проводимостей и составляющих взаимных сопротивлений проводов с дальнейшим расчетом остальных параметров по измеренным напряжениям и токам. На основе компьютерного моделирования, выполненного с помощью программного комплекса Fazonord, разработанного в Иркутском университете путей сообщения, показана применимость метода для практического определения параметров двухцепных линий.

Ключевые слова: электроэнергетические системы; линии электропередачи; идентификация двухцепных линий.

Parametrical identification of dual circuit power transmission lines

V.P. Zakaryukin^{1 a}, A.V. Kryukov^{1 b}, A.A. Kushov^{2 c}¹Irkutsk State Transport University; 15, Chernishevsky St., Irkutsk, Russia²Institute State Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^azakar49@mail.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^cKushovAlexey@yandex.ru

Received 2.07.2015, accepted 26.08.2015

The initial parameters of overhead power transmission lines are often determined with errors up to tens of percent. Refinement of parameters and obtaining adequate mathematical model of the real conditions of transmission lines can be made on the basis of methods of parametric identification, measurements carried out on the complex voltages and currents at the beginning and end of the line. However, existing methods for identification of power transmission lines are designed with reference to three-wire lines and are not applicable for determining the parameters of dual circuit power transmission lines. The article presents the approach to parameter identification of a dual circuit three-phase power transmission line based on measuring voltage complexes and currents on the starting and reception ends. The method is based on the previously calculated certain mutual capacitance admittances and mutual components of cable resistance to a further calculation of other parameters from the measured voltages and currents. On the basis of computer simulations performed with the help of the software package Fazonord, developed at Irkutsk Transport University, practical applicability of the method for determining the parameters of double circuit lines has been shown.

Key words: electric power systems; power lines; identification of dual circuit power transmission lines.

Введение. Расчеты режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) проводятся как в эксплуатационной практике, так и при проектировании. Точность моделирования при этом определяется адекватностью используемых математических моделей и погрешностями исходных данных. Адекватное моделирование ЭЭС в фазных координатах обеспечивается разработками авторов [1–3]; в то же время исходные параметры линий электропередачи, во многом определяющие точность расчетов режимов, часто определяются с погрешностями до десятков процентов [4]. Уточнение параметров и получение адекватной реальным условиям математиче-

ской модели ЛЭП может быть выполнено на основе методов параметрической идентификации [5–15], осуществляемой по измерениям комплексов напряжений и токов в начале и в конце линии. Однако существующие методы идентификации параметров ЛЭП разработаны применительно к трехпроводным линиям [5; 9; 11; 12] и не применимы для определения параметров двухцепных трехфазных линий электропередачи.

Методика идентификации. Представляемый далее подход предполагает получение нескольких параметров расчетным путем, поскольку все параметры ЛЭП не могут быть определены на основе измерений. Алго-

ритм идентификации шестипроводной линии предполагает 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 по рис. 1). При этом предполагаются предварительно заданными следующие данные:

1) параметры каждого провода (омическое сопротивление 1 км, радиус провода, координаты расположения провода с учетом стрелы провеса, площадь се-

чения); провода каждой цепи линии предполагаются одинаковыми;

2) длина ЛЭП;

3) ориентировочная удельная проводимость земли по трассе расположения ЛЭП.

При идентификации предполагается, что ЛЭП не имеет повреждений и погрешности измерений параметров нагрузочного режима (шесть комплексных напряжений и токов) не превышают 0.5 %, 0.5°.

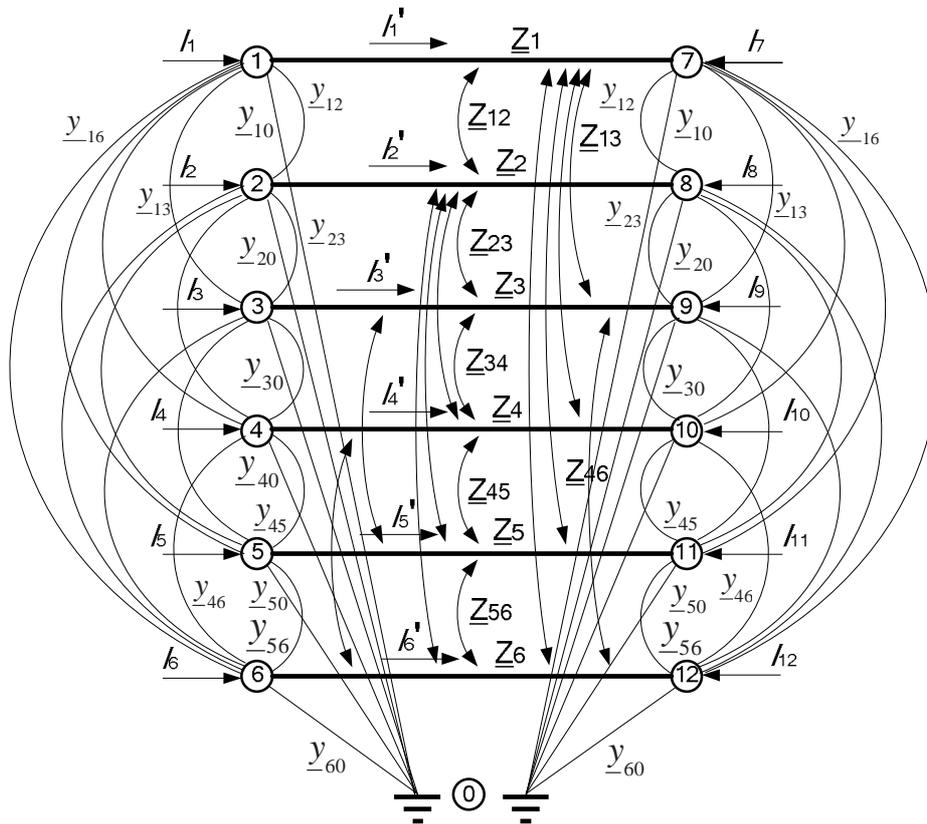


Рис. 1. Схема модели

Алгоритм идентификации включает следующие этапы.

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

$$\alpha_{ii} = 1.80 \cdot 10^7 \ln \frac{200 h_i}{r}, \text{ км/Ф};$$

$$\alpha_{ik} = 1.80 \cdot 10^7 \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}, \text{ км/Ф},$$

где h — высота провода над землей с учетом стрелы провеса, м; D_{ik} , d_{ik} — расстояния от провода i до изображения провода k и до самого провода k , м; r — радиус провода, см.

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

3. Вычисление взаимных емкостей и емкостных проводимостей проводов из емкостных коэффициентов: $C_{ik} = -b_{ik}l$, $y_{ik} = j\omega C_{ik}$; l — длина линии.

4. Определение собственных емкостных проводимостей 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:

$$y_{k0} = \frac{\dot{I}_k'' + \dot{I}_{k+6}''}{\dot{U}_k + \dot{U}_{k+6}};$$

$$\dot{I}_k'' = \dot{I}_k - \sum_{i=1, i \neq k}^6 (\dot{U}_k - \dot{U}_i) y_{ik}, \quad k = 1 \dots 6;$$

$$\dot{I}_k'' = \dot{I}_k - \sum_{i=7, i \neq k}^{12} (\dot{U}_k - \dot{U}_i) y_{i-6, k-6}, \quad k = 7 \dots 12.$$

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

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

$$\dot{I}_k' = \dot{I}_k'' - \dot{U}_k \underline{y}_{k-6,0}, k = 7 \dots 12.$$

6. Вычисление составляющих полных сопротивлений проводов, Ом/км, не зависящих от удельной проводимости земли:

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

где f — частота, Гц.

Сопротивления 1 км проводов:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{o11} + \underline{Z}_{in1} - \underline{Z}_{g1},$$

где $\underline{Z}_{g1} = j f 0.000628 \ln \gamma$, Ом/км; γ — удельная проводимость земли, См/м; $\underline{Z}_{in1} = R_{in1} + j X_{in1}$ — внутреннее сопротивление провода, Ом/км.

7. Определяются 15 слагаемых взаимных сопротивлений проводов, Ом/км:

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

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

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

8. Для корректировки погрешности длины линии из системы уравнений:

$$[\underline{Z}_1 \dot{I}_k' + \sum_{i=1, i \neq k}^6 \underline{Z}_{ik} \dot{I}_i'] l = \dot{U}_k - \dot{U}_{k+6}, k = 1 \dots 3,$$

$$[\underline{Z}_2 \dot{I}_k' + \sum_{i=1, i \neq k}^6 \underline{Z}_{ik} \dot{I}_i'] l = \dot{U}_k - \dot{U}_{k+6}, k = 4 \dots 6$$

методом наименьших квадратов определяется длина l :

$$l = \frac{\sum_{k=1}^6 (A_{ka} B_{ka} + A_{kr} B_{kr})}{\sum_{k=1}^6 (A_{ka}^2 + A_{kr}^2)},$$

где $\underline{A}_k = A_{ka} + j A_{kr} = \underline{Z}_{1,2} \dot{I}_k' + \sum_{i=1, i \neq k}^6 \underline{Z}_{Mik} \dot{I}_i'$;

$\underline{B}_k = B_{ka} + j B_{kr} = \dot{U}_k - \dot{U}_{k+6}$.

9. По скорректированному значению длины l определяются величины собственных и взаимных сопро-

тивлений проводов двух цепей:

$$\underline{z}_{1,2} = \underline{Z}_{1,2} l; \underline{z}_{ik} = (\underline{Z}_{Mik} - \underline{Z}_{g1}) l.$$

10. По значениям емкостных проводимостей и сопротивлений формируется решетчатая схема замещения линии. Для этого обращается матрица сопротивлений:

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{z}_1 & \dots & \underline{z}_{1,6} \\ \dots & \dots & \dots \\ \underline{z}_{1,6} & \dots & \underline{z}_2 \end{bmatrix}$$

и составляется матрица решетчатой схемы:

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

Коэффициенты матрицы \underline{Y} представляют собой проводимости ветвей полносвязной решетчатой схемы замещения без учета емкостей системы проводов. Проводимость ветви между узлами i, k (нумерация узлов по рис. 1) 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.

Результаты идентификации. Пример идентификации выполнен на основе расчетов режимов в программном комплексе Fazonord [3], результаты которых приняты в качестве данных, отвечающих измерениям. Такой подход позволяет оценить точность идентификации и влияние погрешностей измерений режимных параметров. В качестве примера рассмотрен участок двухцепной нетранспонированной линии 220 кВ с проводами АСО-300 длиной 100 км с координатами расположения проводов (рис. 2). Удельная проводимость земли принята равной 0.01 См/м. Параметры исходного режима линии по напряжениям и токам приведены в табл. 1, в которой узлы пронумерованы в соответствии с последовательностью указания координат с начала линии с продолжением нумерации в конце линии.

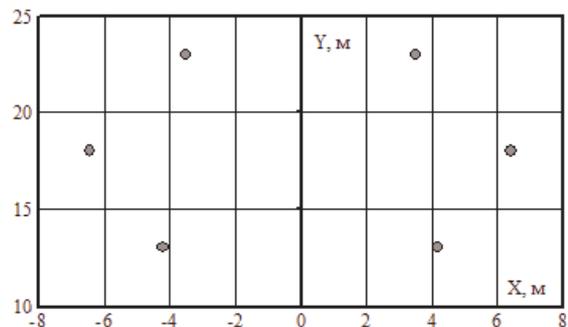


Рис. 2. Координаты расположения проводов

Таблица 1

*Исходный режим двухцепной линии
для идентификации параметров*

| Номер узла | Угол U , ° | U , кВ | I , А | Угол I , ° |
|------------|--------------|----------|---------|--------------|
| 1 | 0 | 133,00 | 59,07 | -13,71 |
| 2 | -120,0 | 133,00 | 61,82 | -127,77 |
| 3 | 120,0 | 133,00 | 63,89 | 109,84 |
| 4 | 0 | 133,00 | 33,30 | 95,68 |
| 5 | -120,0 | 133,00 | 38,77 | -31,17 |
| 6 | 120,0 | 133,00 | 35,89 | -154,14 |
| 7 | -0,88 | 130,90 | 76,4 | 142,25 |
| 8 | -120,98 | 131,19 | 76,22 | 22,15 |
| 9 | 118,98 | 131,47 | 76,06 | -97,89 |
| 10 | -0,12 | 133,50 | 0 | -105,17 |
| 11 | -120,13 | 133,79 | 0 | -129,26 |
| 12 | 119,86 | 133,79 | 0 | -122,19 |

В табл. 2 представлены результаты идентификации параметров линии по режиму, представленному в табл. 1.

Данные табл. 2 показывают большую точность определения длины линии. Наибольшие погрешности приходятся на сопротивления нулевой последовательности, поскольку в исходном режиме токи нулевой последовательности сравнительно малы.

Влияние погрешностей режимных параметров на точность идентификации. Результаты реальных измерений обычно содержат погрешности. Наибольшие погрешности вносятся измерительными трансформаторами. При наиболее распространенном классе точности 0.5 погрешности измерения модулей величин не превышают 0.5 %, погрешности измерения углов — 0.4°. В табл. 3 представлены результаты расчетов первичных параметров линии при соответствующем искажении одного из параметров, указанных в верхней строке.

Таблица 2

Результаты идентификации первичных параметров двухцепной ЛЭП

| Параметр | Y_{10} , мкСм/км | Длина, км | Реактивная генерация Q , Мвар / 100 км | R_1 , Ом | X_1 , Ом | R_0 , Ом | X_0 , Ом |
|---------------------|-----------------------|-----------|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Идентификация | $-0,0002 + j0,5219$ | 100,0 | 28,644 | 10,96 | 42,90 | 41,36 | 220,7 |
| По исходным данным | $0 + j0,5216$ | 100,0 | 28,644 | 10,97 | 42,91 | 40,15 | 222,2 |
| Различия модулей, % | 0,1 | 0 | 0 | -0,1 | 0,0 | 3,0 | -0,7 |

ПРИМЕЧАНИЕ: Y_{10} — собственная емкостная проводимость первого провода линии; Q — реактивная генерация двух цепей линии при входном напряжении 230 кВ; R_1, X_1, R_0, X_0 — входные сопротивления первой цепи линии прямой и нулевой последовательностей при указанных в табл. 1 параметрах режима второй цепи и коротком замыкании всех проводов на конце линии

Таблица 3

*Оценки изменений параметров идентификации, %
при возрастании модулей напряжений на 0.5 % и увеличении углов напряжений на 0.5°*

| Параметр | U_1 | U_2 | U_3 | U_4 | U_7 | U_{12} | Φ_1 | Φ_2 | Φ_3 | Φ_4 | Φ_7 | Φ_{12} |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| $\Delta Y_{10} / Y_{10}$ | -5,5 | -4,4 | -3,7 | 1,4 | 4,9 | -1,9 | -1,1 | -1,2 | -1,4 | -1,1 | 9,6 | 1,4 |
| $\Delta l / l$ | 5,3 | 4,6 | 3,9 | -1,3 | -5,1 | 2,0 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,2 | -8,7 | -1,4 |
| $\Delta Q / Q$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\Delta R_1 / R_1$ | 5,3 | 4,6 | 3,9 | -1,3 | -5,3 | 1,9 | 1,1 | 1,3 | 1,4 | 1,1 | -8,9 | -1,5 |
| $\Delta X_1 / X_1$ | 5,3 | 4,6 | 3,9 | -1,3 | -5,2 | 2,0 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,2 | -8,8 | -1,4 |
| $\Delta R_0 / R_0$ | 8,6 | 7,9 | 7,1 | 1,7 | -2,4 | 5,1 | 4,3 | 4,4 | 4,5 | 4,3 | -6,2 | 1,6 |
| $\Delta X_0 / X_0$ | 4,7 | 4,0 | 3,2 | -1,9 | -5,8 | 1,3 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,5 | -9,4 | -2,1 |

Данные (табл. 3) свидетельствуют о том, что наибольшие погрешности возникают при наличии погрешностей в величинах, характеризующих режим верхнего провода (номера 1 и 7, соответствующие началу и концу провода), причем алгоритм наиболее чувствителен к погрешностям определения угла конца провода.

Результаты расчетов режимов по исходной модели линии и по идентифицированной модели, соответ-

ствующей погрешностям определения модуля $U_1 +0.5\%$ (табл. 4), свидетельствуют об очень высокой точности восстановления режима, несмотря на достаточно большие погрешности определения первичных параметров линии: модули напряжений и токов отличаются от исходных не более чем на 0.1 %, а углы — не более чем на 0.1°.

Погрешности восстановления режима по результатам идентификации при погрешностях измерений модулей напряжений $+0.5\%$ и углов $+0.5^\circ$

| Узел | Точный расчет | | Расчет по идентифицированной модели | | Погрешности | | Точный расчет | | Расчет по идентифицированной модели | | Погрешности | |
|------|---------------|----------------|-------------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|---------------|-------------|-------------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|
| | $U, ^\circ$ | $U, \text{кВ}$ | $U, ^\circ$ | $U, \text{кВ}$ | $\Delta U, ^\circ$ | $\Delta U / U, \%$ | $I, \text{А}$ | $I, ^\circ$ | $I, \text{А}$ | $I, ^\circ$ | $\Delta I / I, \%$ | $\Delta I, ^\circ$ |
| 1 | 0,00 | 133,00 | 0,00 | 133,00 | 0,00 | 0,00 | 59,07 | -13,71 | 59,13 | -13,80 | 0,10 | -0,09 |
| 2 | -120,00 | 133,00 | -120,00 | 133,00 | 0,00 | 0,00 | 61,82 | -127,77 | 61,86 | -127,87 | 0,06 | -0,10 |
| 3 | 120,00 | 133,00 | 120,00 | 133,00 | 0,00 | 0,00 | 63,89 | 109,84 | 63,92 | 109,75 | 0,05 | -0,09 |
| 4 | 0,00 | 133,00 | 0,00 | 133,00 | 0,00 | 0,00 | 33,30 | 95,68 | 33,30 | 95,67 | 0,00 | -0,01 |
| 5 | -120,00 | 133,00 | -120,00 | 133,00 | 0,00 | 0,00 | 38,77 | -31,17 | 38,78 | -31,17 | 0,03 | 0,00 |
| 6 | 120,00 | 133,00 | 120,00 | 133,00 | 0,00 | 0,00 | 35,89 | -154,14 | 35,89 | -154,15 | 0,00 | -0,01 |
| 7 | -0,88 | 130,90 | -0,93 | 130,78 | -0,05 | -0,09 | 76,40 | 142,25 | 76,46 | 142,20 | 0,08 | -0,05 |
| 8 | -120,98 | 131,19 | -121,03 | 131,09 | -0,05 | -0,08 | 76,22 | 22,15 | 76,28 | 22,10 | 0,08 | -0,05 |
| 9 | 118,98 | 131,47 | 118,93 | 131,39 | -0,06 | -0,06 | 76,06 | -97,89 | 76,11 | -97,94 | 0,07 | -0,05 |
| 10 | -0,12 | 133,50 | -0,12 | 133,53 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | -105,17 | 0,00 | -105,32 | - | - |
| 11 | -120,13 | 133,79 | -120,13 | 133,83 | -0,01 | 0,03 | 0,00 | -129,26 | 0,00 | -129,65 | - | - |
| 12 | 119,86 | 133,79 | 119,86 | 133,83 | -0,01 | 0,03 | 0,00 | -122,19 | 0,00 | -122,44 | - | - |

Заключение

1. Предложена методика параметрической идентификации двухцепных линий электропередачи.

2. Результаты компьютерного моделирования показали высокую точность расчетов по идентифицированной модели ЛЭП. Модули напряжений и токов отличаются от исходных не более чем на 0.1% , а углы — не более чем на 0.1° .

Литература

1. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.

2. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Компьютерные технологии для моделирования систем электроснабжения железных дорог переменного тока // Транспорт Российской Федерации (Наука и транспорт). 2010. № 3(28). С. 60-64.

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

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

5. Шульгин М.С., Крюков А.В., Закарюкин В.П. Параметрическая идентификация линий электропередачи на основе фазных координат // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1 (29). С. 140-147.

6. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация трансформаторов // Вестник ИрГУ. 2011. № 12 (59). С. 219-227.

7. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация силовых трансформаторов в фазных координатах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4 (32). С. 141-147.

8. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация силовых трансформаторов // Изв. Транссиба. 2013. № 1(13). С. 54-63.

9. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация линий электропередачи и транс-

форматоров. Иркутск, ИрГУПС, 2012. 95 с.

10. 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.2012. Vol. 1. P. 1-4.

11. Шульгин М.С., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Идентификация параметров высоковольтных линий электропередачи // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2011. Т. 1 С. 503-508.

12. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация линий электропередачи и трансформаторов для формирования моделей интеллектуальных сетей // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2012. Т. 1. С. 209-217.

13. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Кушов А.А. Параметрическая идентификация многопроводной тяговой сети // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2(46). С. 157-165.

14. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Кушов А.А. Параметрическая идентификация тяговых сетей железных дорог переменного тока // Вестн. РГУПС. 2014. № 4. С. 97-103.

15. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Кушов А.А. Параметрическая идентификация систем тягового электроснабжения $2 \times 25 \text{ кВ}$ // Вестн. РГУПС. 2015. № 2. С. 121-129.

References

1. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex-asymmetrical modes of electric systems. Irkutsk: Irkut. un-t. 2005. 273 p.

2. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Computer technologies for modeling of systems of power supply of the railroads of alternating current // Transport Rossiiskoi federatsii (Nauka i transport). 2010. № 3 (28). P. 60-64.

3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Methods of joint modeling of systems of traction and external power supply of the railroads of alternating current. Irkutsk: IrGUPS. 2011. 160 p.

4. Shelyug S.N. Methods of adaptive identification of parameters of an equivalent circuit of elements of an electric network: avtoref. dis. ... kand. tekhn. Ekaterinburg, 2000. 23 p.

5. Shul'gin M.S., Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Parametric identification of lines of an electricity transmission on the basis

of phase coordinates // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2011. № 1 (29). P. 140-147.

6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. Parametrical identification of transformers // Vestnik IrGTU. 2011. № 12 (59). P. 219-227.

7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. Parametrical identification of power transformers in phase coordinates // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2011. № 4 (32). P. 141-147.

8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. Parametrical identification of power transformers // Journal of Transsib Railway Studies. 2013. № 1 (13). P. 54-63.

9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. Parametrical identification of lines of an electricity transmission and transformers. Irkutsk, IrGUPS, 2012. 95 p.

10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. Parametrical identification of power grid elements based on phase measurements // Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future. Proceedings. 2012. Vol. 1. P. 1-4.

11. Shul'gin M.S., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Identification of parameters of high-voltage power lines // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2011. T. 1. P. 503-508.

12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. Parametrical identification of lines of an electricity transmission and transformers for formation of models of intellectual networks // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2012. T. 1. P. 209-217.

13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kushov A.A. Parametrical identification of a multiwire traction network // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. № 2 (46). P. 157-165.

14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kushov A.A. Parametrical identification of traction networks of the railroads of alternating current // Vestn. RGUPS. 2014. № 4. P. 97-103.

15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kushov A.A. Parametrical identification of systems of traction power supply 2×25 kV // Vestn. RGUPS. 2015. № 2. P. 121-129.