СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СУДОВОЖДЕНИЯ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ

УДК 621.3

В.В. Кирюха [1], Ю.М. Горбенко [2], А.Ю. Сащенко [2], В.С. Яблокова [2]
[1] Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690086, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б
[2] Дальневосточный федеральный университет,
690090, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Рассматривается алгоритм диагностики электрических цепей при неточных измерениях и «шуме» параметров по методу наименьших квадратов. В алгоритме предусматривается корректировка решения на основе точного выполнения компонентных уравнений. Даны рекомендации по формированию системы уравнений и получены формулы для определения значения корректирующего коэффициента.
Ключевые слова: *электрическая цепь, диагностика, метод наименьших квадратов, корректирующие коэффициенты, компонентные уравнения.*

V.V. Kiryuha, Yu.M. Gorbenko, A.Yu. Sashenko, V.S. Yablokova

THE ADJUSTING METHOD OF THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF ELECTRICAL CIRCUITS DIAGNOSTICS

An algorithm for diagnosing electric circuits at inaccurate measurements and noise parameters according to the least squares technique. The algorithm provides the correction of the solution based on the exact implementation of the component equations. Recommendations are given on the formation of a system of equations and formulas are obtained for determining the value of the corrective coefficient.
Key words: *electric circuit, diagnosing, least squares technique, corrective coefficient, component equations.*

Введение

Развитие судовых электроэнергетических систем выдвигает задачи, связанные с диагностикой сложных электрических цепей и использованием результатов диагностирования для повышения надежности и качества работы таких систем. Решение данной задачи часто осуществляется для объектов, находящихся в рабочем режиме. Следовательно, исходная информация – это измерительная информация, содержащая погрешности, и «расплывчатая» априорная. Такая неопределенность не позволяет получить точное решение, а только лишь оценку. Для его улучшения требуется привлекать дополнительную информацию, корректирующую решение. В данной работе предлагается способ корректировки при использовании компонентных уравнений.

Объекты и методы исследований

Решение задачи диагностики электрических цепей (ДЭЦ) в условиях недостаточного количества измерительной и априорной информации – приблизительное. Один из методов решения задачи ДЭЦ при таких исходных данных – метод наименьших квадратов (МНК) при детерминированной постановке [1, 2]. Решение задачи ДЭЦ по МНК есть точечная оценка, лежащая внутри симплекса, определяемого активными ограничениями, входящими в набор рассматриваемых в задачах ограничений, сформированных на основе интервальных оценок измеренных величин и параметров. Это решение не всегда удовлетворяет всем ограничениям электрической цепи (ЭЦ). Этому в немалой степени способствует тот факт, что функционал МНК в равной мере учитывает как активные, так и все остальные ограничения. В результате за счет действия неактивных ограничений решение по МНК может оказаться за пределами симплекса.

Кроме этого, следует учитывать, что в систему уравнений, описывающих задачу ДЭЦ, входят величины, имеющие различные физические размерности (имеются в виду токи, напряжения, сопротивления, проводимости, безразмерные коэффициенты). Тогда невязки суммы квадратов, сильно отличающихся по порядку числовых значений величин, будут доминировать над остатками величин, измеряемых малыми числовыми значениями, и информация, заключенная в последних, не может должным образом повлиять на решение.

Далее может быть известно, что результаты некоторых измерений менее достоверны, чем остальные, и появляется естественное требование уменьшить их влияние на решение.

Среди ограничений есть и другие, например, принцип тождественности [1, 2].

Таким образом, при использовании МНК для решения задачи ДЭЦ необходимо разработать методику корректировки коэффициентов и правых частей исходных уравнений, учитывающую необходимость выполнения требований инженерной постановки задачи.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим еще одно ограничение, ранее не рассматриваемое. В системе уравнений есть компонентные уравнения $u_k = \pi_{ê} \cdot v_k$, а следовательно, критерием адекватности полученных результатов является их точное выполнение (или приближенное с высокой степенью совпадения).

Рассмотрим систему уравнений задачи ДЭЦ [1, 2], представленную в блочном виде:

$$\begin{array}{|c|c|}\hline \boldsymbol{A}_{11} & \boldsymbol{A}_{12} \\ \hline \boldsymbol{A}_{21} & \boldsymbol{A}_{22} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|}\hline \boldsymbol{X}_1 \\ \hline \boldsymbol{X}_2 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|}\hline \boldsymbol{F}_1 \\ \hline \boldsymbol{F}_2 \\ \hline \end{array},$$

где $\boldsymbol{A}_{11}$ – подматрица размера [(2*p*-*n*), *n*];

p – количество ветвей ЭЦ;

n – количество неизвестных параметров;

$\boldsymbol{A}_{12}$ – подматрица размера [(2*p*-*n*), (2*p*-*n*)];

$\boldsymbol{A}_{21}$ – подматрица размера [2($m_I + m_U + n$), (2*p*-*n*)];

m_I – количество измеренных токов;

m_U – количество измеренных напряжений;

$\boldsymbol{A}_{22}$ – подматрица размера [2($m_I + m_U + n$), (2*p*-*n*)];

$\boldsymbol{X}_1$ – вектор неисключаемых переменных размера [*n*,1];

$\boldsymbol{X}_2$ – вектор исключаемых переменных размера [(2*p*-*n*), 1];

$\boldsymbol{F}_1$ – подматрица правой части системы уравнений размера [(2*p*-*n*), 1];

$\boldsymbol{F}_2$ – подматрица правой части системы уравнений размера [2($m_I + m_U + n$), 1].

Связи, обусловленные уравнением, запишем в виде двух уравнений

$$\boldsymbol{X}_2 = \boldsymbol{A}_{12}^{-1} \cdot \boldsymbol{F}_1 - \boldsymbol{A}_{12}^{-1} \cdot \boldsymbol{A}_{11} \cdot \boldsymbol{X}_1 ,$$
$$\boldsymbol{A}_\lambda \cdot \boldsymbol{X}_1 = \boldsymbol{F}_\lambda ,$$

где $\boldsymbol{A}_\lambda = \boldsymbol{A}_{21} - \boldsymbol{A}_{22} \cdot \boldsymbol{A}_{12}^{-1} \cdot \boldsymbol{A}_{11}$, $\boldsymbol{F}_\lambda = \boldsymbol{F}_2 - \boldsymbol{A}_{22} \cdot \boldsymbol{A}_{12}^{-1} \cdot \boldsymbol{F}_1$.

Пусть измерены две переменные x_1 и x_2, заданные нижней и верхней границами: $f_{1\alpha} \le x_1 \le f_{1\beta}$, $f_{2\alpha} \le x_2 \le f_{2\beta}$, входящие в компонентное уравнение $x_2 = \pi \cdot x_1$ (индексы α и β определяют нижнюю и верхнюю границы переменной соответственно). По отношению к каждой переменной применимы корректирующие коэффициенты λ_1 и λ_2**.** При этом матрицы $\boldsymbol{A}_\lambda$ и $\boldsymbol{F}_\lambda$ будут иметь вид

$$\boldsymbol{A}_\lambda = \begin{array}{|c|c|c|c|c|}
\hline
a_{11} & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1\ell} \\
\hline
a_{21} & a_{22} & \vdots & \vdots & a_{2\ell} \\
\hline
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\hline
a_{2n,1} & a_{2n,2} & \cdots & \cdots & a_{2n,\ell} \\
\hline
 & \lambda_2 & & & \\
\hline
 & \lambda_2 & & & \\
\hline
\lambda_1 & & & & \\
\hline
\lambda_1 & & & & \\
\hline
\end{array} = \begin{array}{|c|c|}
\hline
\boldsymbol{A}_1 & \boldsymbol{A}_2 \\
\hline
\lambda_1 & \\
\lambda_1 & \boldsymbol{O} \\
\hline
\end{array} ,$$

$$\boldsymbol{F}_\lambda = \begin{array}{|c|}
\hline
f_1 \\
\hline
f_2 \\
\hline
\vdots \\
\hline
f_{2n} \\
\hline
\lambda_2 \cdot f_{2\alpha} \\
\hline
\lambda_2 \cdot f_{2\beta} \\
\hline
\lambda_1 \cdot f_{1\alpha} \\
\hline
\lambda_1 \cdot f_{2\beta} \\
\hline
\end{array} = \begin{array}{|c|}
\hline
\overline{\boldsymbol{F}}_1 \\
\hline
\lambda_1 \cdot f_{1\alpha} \\
\hline
\lambda_1 \cdot f_{2\beta} \\
\hline
\end{array} .$$

Используя правило обращения окаймленных матриц, получаем решение

$$\widetilde{\boldsymbol{X}}_1 = [\frac{1}{\overline{k}_1 + 2\lambda_1^2} \begin{array}{|c|c|}
\hline
1 & \text{-}\boldsymbol{Ì}_1 \\
\hline
\text{-}\boldsymbol{Ì}_1^{Ò} & \boldsymbol{Ì}_1^{Ò} \cdot \boldsymbol{Ì}_1 \\
\hline
\end{array} + \begin{array}{|c|c|}
\hline
0 & \boldsymbol{O} \\
\hline
\boldsymbol{O} & \boldsymbol{S}_1^{-1} \\
\hline
\end{array}] \cdot \begin{array}{|c|}
\hline
\boldsymbol{A}_1^{Ò} \cdot \overline{\boldsymbol{F}}_1 + \lambda_1^2 \cdot \mu_1 \\
\hline
\boldsymbol{A}_2^{Ò} \cdot \boldsymbol{F}_1 \\
\hline
\end{array} ,$$

где $\boldsymbol{S}_1 = \boldsymbol{A}_2^{Ò} \cdot \boldsymbol{A}_2$, $\boldsymbol{Ì}_1 = \boldsymbol{A}_1^{Ò} \cdot \boldsymbol{A}_2 \cdot \boldsymbol{S}_1^{-1}$, $\overline{k}_1 = \boldsymbol{A}_1^{Ò} \cdot \boldsymbol{A}_1 - \boldsymbol{Ì}_1 \cdot \boldsymbol{A}_2^{Ò} \cdot \boldsymbol{A}_1$, $\mu_1 = f_{1\alpha} + f_{1\beta}$.

Первый элемент $\widetilde{x}_1$ вектора $\widetilde{\boldsymbol{X}}_1$ равен

$$\widetilde{x}_1 = \frac{1}{\bar{\mathrm{k}}_1 + 2\lambda_1^2}\{[\boldsymbol{A}_1^{\grave{O}} - \grave{\boldsymbol{I}}_1 \cdot \boldsymbol{A}_2^{\grave{O}}]\cdot \bar{\boldsymbol{F}}_1 + \lambda_1^2\mu_1\}.$$

Все остальные элементы вектора $\widetilde{\boldsymbol{X}}_1$ получаются через $\widetilde{x}_1$ линейно:

$$\widetilde{\boldsymbol{X}}_1^{(1)} = (\boldsymbol{A}_2^{\grave{O}} \cdot \boldsymbol{A}_2)^{-1} \cdot \boldsymbol{A}_2^{\grave{O}} \cdot [\, \boldsymbol{A}_1 \cdot (-\widetilde{\boldsymbol{x}}_1) + \bar{\boldsymbol{F}}_1],$$

где $\widetilde{\boldsymbol{X}}_1^{(1)}$ – подвектор вектора $\widetilde{\boldsymbol{X}}_1$ без его элемента $\widetilde{x}_1$.

Представим матрицу $\boldsymbol{A}_2$ в блочном виде

$$\boldsymbol{A}_2 = \begin{array}{|c|c|}\hline \boldsymbol{A}_3 & \boldsymbol{A}_4 \\ \hline \lambda_2 & \\ \cline{1-1} \lambda_2 & \boldsymbol{O} \\ \hline \end{array}\ .$$

Запишем решение для $\widetilde{\boldsymbol{X}}_1^{(1)}$ в развернутом виде

$$\widetilde{\boldsymbol{X}}_1^{(1)} = [\frac{1}{\bar{\mathrm{k}}_2 + 2\lambda_2^2} \begin{array}{|c|c|}\hline 1 & -\grave{\boldsymbol{I}}_2 \\ \hline -\grave{\boldsymbol{I}}_2^{\grave{O}} & \grave{\boldsymbol{I}}_2^{\grave{O}} \cdot \grave{\boldsymbol{I}}_2 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|}\hline 0 & \boldsymbol{O} \\ \hline \boldsymbol{O} & \boldsymbol{S}_2^{-1} \\ \hline \end{array}\ ] \cdot \begin{array}{|c|}\hline \boldsymbol{A}_3^{\grave{O}} \cdot [\, \boldsymbol{A}_1 \cdot (-\boldsymbol{x}_1) + \bar{\boldsymbol{F}}_1] + \lambda_2^2 \cdot \mu_2 \\ \hline \boldsymbol{A}_4^{\grave{O}} \cdot [\, \boldsymbol{A}_1 \cdot (-\widetilde{\boldsymbol{x}}_1) + \bar{\boldsymbol{F}}_1] \\ \hline \end{array},$$

где $\boldsymbol{S}_2 = \boldsymbol{A}_4^T \cdot \boldsymbol{A}_4$, $\grave{\boldsymbol{I}}_2 = \boldsymbol{A}_3^T \cdot \boldsymbol{A}_4 \cdot \boldsymbol{S}_2^{-1}$, $\bar{\mathrm{k}}_2 = \boldsymbol{A}_3^{\grave{O}} \cdot \boldsymbol{A}_3 - \grave{\boldsymbol{I}}_2 \cdot \boldsymbol{A}_4^{\grave{O}} \cdot \boldsymbol{A}_3$, $\mu_2 = \mathrm{f}_{2\alpha} + \mathrm{f}_{2\beta}$.

Из этого выражения определяем элемент $\widetilde{\boldsymbol{x}}_2$ вектора $\widetilde{\boldsymbol{X}}_1$

$$\widetilde{\boldsymbol{x}}_2 = \frac{1}{\bar{\mathrm{k}}_2 + 2\lambda_2^2}\{[\boldsymbol{A}_3^{\grave{O}} - \grave{\boldsymbol{I}}_2 \cdot \boldsymbol{A}_4^{\grave{O}}]\cdot[\, \boldsymbol{A}_1 \cdot (-\boldsymbol{x}_1) + \bar{\boldsymbol{F}}_1] + \lambda_2^2 \cdot \mu_2\} =$$

$$= \frac{1}{\bar{\mathrm{k}}_2 + 2\lambda_2^2}\{[\boldsymbol{A}_3^{\grave{O}} - \grave{\boldsymbol{I}}_2 \cdot \boldsymbol{A}_4^{\grave{O}}]\cdot \boldsymbol{A}_1 \cdot (-\boldsymbol{x}_1) + [\boldsymbol{A}_3^{\grave{O}} - \grave{\boldsymbol{I}}_2 \cdot \boldsymbol{A}_4^{\grave{O}}]\cdot \bar{\boldsymbol{F}}_1] + \lambda_2^2 \cdot \mu_2\}.$$

Между переменными $\widetilde{\boldsymbol{x}}_2$ и $\widetilde{x}_1$ существует линейная связь

$$\widetilde{\boldsymbol{x}}_2 = \mathrm{c}_2 \widetilde{\mathrm{x}}_1 + \mathrm{b}_2,$$

где $\mathrm{c}_2 = \frac{1}{\bar{\mathrm{k}}_2 + 2\lambda_2^2}[\boldsymbol{A}_3^{\grave{O}} - \grave{\boldsymbol{I}}_2 \cdot \boldsymbol{A}_4^{\grave{O}}]\cdot(-\boldsymbol{A}_1)$,

$$\mathrm{b}_2 = \frac{1}{\bar{\mathrm{k}}_2 + 2\lambda_2^2}\{[\boldsymbol{A}_3^{\grave{O}} - \grave{\boldsymbol{I}}_2 \cdot \boldsymbol{A}_4^{\grave{O}}]\cdot \bar{\boldsymbol{F}}_1 + \lambda_2^2 \cdot \mu_2\}.$$

Параметр компонентного уравнения определяется из соотношения

$$\pi = \frac{\widetilde{x}_2}{\widetilde{x}_1}\ (\widetilde{\boldsymbol{x}}_2,\ \widetilde{x}_1 \in \mathrm{M_I} \cup \mathrm{M_U}).$$

Следовательно, коэффициент $b_2 = 0$.

Имеем

$$\frac{1}{\overline{k}_2 + 2\lambda_2^2}\{[\boldsymbol{A}_3^{\text{Ò}} - \boldsymbol{\grave{I}}_2 \cdot \boldsymbol{A}_4^{\text{Ò}}] \cdot \overline{\boldsymbol{F}_1} + \lambda_2^2 \cdot \mu_2\} = 0.$$

Значение корректирующего коэффициента λ_2^2

$$\lambda_2^2 = \frac{(\boldsymbol{M}_2 \cdot \boldsymbol{A}_4^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{A}_3^{\mathrm{T}}) \cdot \overline{\boldsymbol{F}_1}}{\mu_2}.$$

Выводы

В результате проведенных исследований предложен алгоритм корректировки решения задачи ДЭЦ при неточных измерениях и «расплывчатой» априорной информации о параметрах по МНК. Реализация алгоритма осуществлена путем введения корректирующих коэффициентов для обеспечения точного выполнения компонентных уравнений. Предложена структура описания задачи ДЭЦ и получено выражение для определения корректирующего коэффициента.

Список литературы

1. Киншт Н.В., Герасимова Г.Н., Кац М.А. Диагностика электрических цепей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 192 с.

2. Горбенко Ю.М., Яблокова В.С., Кирюха В.В. Корректировка решения задачи диагностики электрических цепей. (Формирование несовместной переопределенной системы уравнений). Международный издательский дом LAMBERT Academic Publishing, 2015. 63 с.

Сведения об авторах: Кирюха Владимир Витальевич, доцент; e-mail: vkiryuha@list.ru;

Горбенко Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент; e-mail: gorbenko.um@mail.ru;

Сащенко Анна Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент; e-mail: sashenko8@yandex.ru;

Яблокова Виктория Сергеевна, кандидат технических наук, доцент; e-mail: victoryapple@andex.ru.