

УДК 621.311

Д. Н. КАЛЮЖНЫЙ (канд. техн. наук, доц.)

Харьковская национальная академия городского хозяйства  
KalyuzhniyDN@mail.ru

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ОШИБКАХ ВКЛЮЧЕНИЯ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ЕЕ КАЧЕСТВА\*

*В статье рассмотрена оценка погрешности определения действительного электропотребления при ошибках включения счетчиков электроэнергии, которая обусловлена несимметрией параметров режима работы сети.*

**Счетчик электроэнергии, ошибка схемы включения счетчика электроэнергии, действительное электропотребление, погрешность.**

**Введение.** В практике эксплуатации систем учета электроэнергии достаточно часто встречаются случаи их неправильного включения. Учитывая, что финансовые расчеты, составление балансов мощностей и прогнозирование электрических нагрузок [1] основываются на показаниях счетчиков электроэнергии, задача по определению действительного электропотребления при ошибках их включения является актуальной.

На сегодняшний день существует несколько подходов по определению действительного электропотребления. Первый из них предполагает использование расчетного коэффициента, на который следует умножать показания счетчика электроэнергии, включенного по схеме отличной от правильной [2]. Существенным недостатком данного подхода является погрешность определения действительного электропотребления, которая обусловлена зависимостью значений расчетных коэффициентов от  $\cos\varphi$ , в общем случае не являющимся постоянной величиной и допущением о симметрии параметров режима работы сети. Второй подход, ориентированный на современные системы учета электроэнергии, предполагает проведение математических корректировок измеряемых напряжений и токов [3-5] непосредственно в момент времени, когда выявлена ошибка включения. Данный способ определения действительного электропотребления также обладает погрешностью, но обусловленной только несимметрией параметров режима работы сети.

**Постановка задачи.** Оценим погрешность определения действительного электропотребления счетчиками электроэнергии при использовании математических корректировок измеряемых напряжений и токов в случае ошибочных включений, обусловленную несимметрией параметров режима работы сети.

**Решение.** Согласно [3, 4], математическая корректировка измеряемых напряжений и токов позволяет в допущении симметрии определять с различной степенью точности все реальные параметры режима работы сети. При этом для случая трехэлементного учета электроэнергии по токовым цепям в рамках 20 наиболее вероятных геометрически различных схем включения в восьми случаях возможно точное определение всех реальных фазных токов, а в 12 случаях – только двух. По цепям напряжения в рамках 40 наиболее вероятных геометрически различных схем включения в восьми случаях можно точно определить все реальные фазные напряжения. В 24 случаях точно можно определить только два реальных напряжения из трех. В оставшихся восьми случаях все три реальных напряжения определяются приближенно. Для случая двухэлементного учета по токовым цепям в рамках шести наиболее вероятных геометрически различных схем включения в четырех случаях точно можно определить все требуемые реальные фазные токи. В двух случаях точно можно определить только один из двух требуемых реальных токов. По цепям напряжения в рамках восьми наиболее вероятных геометрически различных схем включения в двух случаях возможно точное определение всех требуемых реальных линейных напряжений. В четырех случаях – только одного напряжения, и в двух случаях – все требуемые реальные напряжения определяются приближенно.

Таким образом, погрешность определения действительного электропотребления может быть вызвана ошибками как отдельного, так и совместного включения цепей напряжения и тока.

Для решения поставленной задачи введем комплексную величину  $\underline{\delta}_F$ , которая будет определяться разностью между точным и приближенным значением электрической величины напряжения ( $F = U$ ) или тока ( $F = I$ ):

$$\underline{\delta}_F = \underline{F}^T - \underline{F}^{\text{II}}. \quad (1)$$

\* Публикується в порядку обговорення

© Калюжний Д.Н., 2011

Так, для трехэлементного учета электроэнергии имеем [3, 4]:

$$\underline{\delta}_{U(3)} = \begin{cases} 3 \cdot U_1 \cdot K_{0U}^* \cdot e^{j\varphi_{0U}}; \\ U_1 \cdot K_{0U}^* \cdot e^{j\varphi_{0U}}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\underline{\delta}_{I(3)} = 3 \cdot I_1 \cdot K_{0I}^* \cdot e^{j\varphi_{0I}},$$

где  $U_1$  и  $I_1$  – модули фазного напряжения и тока прямой последовательности;  $\varphi_{0U}$  и  $\varphi_{0I}$  – аргументы напряжения и тока нулевой последовательности;  $K_{0U} = K_{0U}/100\%$  – коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности [6], выраженный в относительных единицах;  $K_{0I}$  – коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности, аналогичный  $K_{0U}$ .

Для двухэлементного учета электроэнергии [3, 4]:

$$\underline{\delta}_{I(2)} = I_1 \cdot \left[ K_{2I}^* \cdot e^{j\varphi_{2I}} \cdot (1-a) + K_{0I}^* \cdot e^{j\varphi_{0I}} \cdot (1-a^2) \right]; \quad (3)$$

$$\underline{\delta}_{U(2)} = 3 \cdot U_1 \cdot K_{2U}^* \cdot e^{j(\varphi_{2U}-30)},$$

где  $K_{2U}$  и  $K_{2I}$  – коэффициенты несимметрии напряжений и токов по обратной последовательности, выраженные в относительных единицах;  $\varphi_{2U}$  и  $\varphi_{2I}$  – аргументы напряжения и тока обратной последовательности;  $a = e^{j120}$  – оператор поворота.

Запишем выражение для мощности, измеряемой каждым элементом, в следующем виде:

$$\underline{S}_{эл} = \underline{U}_{эл} \cdot \underline{I}_{эл}^*, \quad (4)$$

где  $\underline{I}_{эл}^*$  – сопряженный комплексный ток.

С учетом приближенных значений напряжений ( $\underline{U}_{эл}^{\Pi}$ ) и токов ( $\underline{I}_{эл}^{\Pi}$ ) выражение (4) представим в следующем виде:

$$\underline{S}_{эл}^{\Pi} = \underline{U}_{эл}^{\Pi} \cdot (\underline{I}_{эл}^{\Pi})^* = \underline{S}_{эл}^T - \underline{\delta}_S, \quad (5)$$

где  $\underline{\delta}_S$  – величина, характеризующая разность между точным  $\underline{S}_{эл}^T$  и приближенным  $\underline{S}_{эл}^{\Pi}$  значением мощности:

$$\underline{\delta}_S = \underline{\delta}_U \cdot \underline{\delta}_I^* - (\underline{I}_{эл}^T)^* \cdot \underline{\delta}_U - \underline{U}_{эл}^T \cdot \underline{\delta}_I^*. \quad (6)$$

Таким образом, модули вещественной и мнимой части  $\underline{\delta}_S$  представляют собой абсолютные погрешности определения активной ( $|\operatorname{Re}(\underline{\delta}_S)|$ ) и реактивной ( $|\operatorname{Im}(\underline{\delta}_S)|$ ) мощности.

Проведем анализ погрешностей определения мощностей для трех- и двухэлементного учета электроэнергии по каждому элементу. При этом будем рассматривать только наиболее тяжелые случаи с наибольшими значениями  $\underline{\delta}_U$  и  $\underline{\delta}_I$ , которые соответствуют ошибкам включения, приводящим к приближенному определению напряжения и тока по каждому элементу.

Так, для трехэлементного учета электроэнергии имеем:

$$\left\{ \begin{aligned} \underline{\delta}_{S(3)}^A &= 3U_1 I_1 \cdot \left[ \begin{aligned} &K_{0U}^* \cdot K_{0I}^* \cdot \left( 3e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{0I})} - e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{0I})} - e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{0I})} \right) - K_{0U}^* \cdot K_{2I}^* \cdot e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{2I})} - \\ &- K_{2U}^* \cdot K_{0I}^* \cdot e^{j(\varphi_{2U}-\varphi_{0I})} - K_{0U}^* \cdot e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{1I})} - K_{0I}^* \cdot e^{-j\varphi_{0I}} \end{aligned} \right]; \\ \underline{\delta}_{S(3)}^B &= 3U_1 I_1 \cdot \left[ \begin{aligned} &K_{0U}^* \cdot K_{0I}^* \cdot \left( 3e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{0I})} - e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{0I}-120)} - e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{0I}+120)} \right) - K_{0U}^* \cdot K_{2I}^* \cdot e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{2I}-240)} - \\ &- K_{2U}^* \cdot K_{0I}^* \cdot e^{j(\varphi_{2U}-\varphi_{0I}+240)} - K_{0U}^* \cdot e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{1I})} - K_{0I}^* \cdot e^{-j\varphi_{0I}} \end{aligned} \right]; \\ \underline{\delta}_{S(3)}^C &= 3U_1 I_1 \cdot \left[ \begin{aligned} &K_{0U}^* \cdot K_{0I}^* \cdot \left( 3e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{0I})} - e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{0I}-240)} - e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{0I}+240)} \right) - K_{0U}^* \cdot K_{2I}^* \cdot e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{2I}-120)} - \\ &- K_{2U}^* \cdot K_{0I}^* \cdot e^{j(\varphi_{2U}-\varphi_{0I}+120)} - K_{0U}^* \cdot e^{j(\varphi_{0U}-\varphi_{1I})} - K_{0I}^* \cdot e^{-j\varphi_{0I}} \end{aligned} \right]. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Построим функцию  $\Delta_{S(3)}$ , которая будет являться оценкой сверху для вещественных и мнимых частей  $\underline{\delta}_{S(3)}$  одновременно для всех фаз:

$$\Delta_{S(3)} = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \left[ 5 \cdot K_{0U}^* \cdot K_{0I}^* + K_{0U}^* K_{2I}^* + K_{2U}^* K_{0I}^* + K_{0U}^* + K_{0I}^* \right]. \quad (8)$$

Полученная зависимость  $\Delta_{S(3)}$  представляет собой квадратичную функцию четырех переменных с неотрицательными членами. Учитывая ограничения, накладываемые на коэффициенты несимметрии  $K_{0I}^* + K_{2I}^* < 0,258$  [3],  $K_{0U}^* < 0,086$  и  $K_{2U}^* < 0,086$  [4], можно оценить сверху данную зависимость (8) путем максимизации следующей линейной функции:

$$\Delta_{S(3)} = \alpha_1 \cdot K_{0I}^* + \alpha_2 \cdot \left( K_{2I}^* + 1 \right), \quad (9)$$

где  $\alpha_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \left( 5 K_{0U}^* + K_{2U}^* + 1 \right)$ ,  $\alpha_2 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot K_{0U}^*$ .

Таким образом, если мы оценим сверху полученную линейную функцию при указанных ограничениях, то это будет являться той же оценкой сверху для вещественных и мнимых частей  $\underline{\delta}_{S(3)}$ , т.е. оценкой сверху абсолютных погрешностей определения активной  $\delta_{P(3)}$  и реактивной  $\delta_{Q(3)}$  мощности каждым элементом трехэлементного счетчика электрической энергии. Поставленная задача является типичной задачей линейного программирования, которую можно решить симплекс-методом [7]. Результаты оценки сверху функции  $\Delta_{S(3)}$  при единичных токах и напряжениях прямой последовательности приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты оценки сверху функции  $\Delta_{S(3)}$

$K_{0I}^* + K_{2I}^* < C_1$	$K_{0U}^* < C_2$	$K_{2U}^* < C_3$	$\Delta_{S(3)}^{\max}$ , В·А	$\Delta_{S(3)}$ достигает максимума при значениях			
				$K_{2I}^*$	$K_{0I}^*$	$K_{2U}^*$	$K_{0U}^*$
0,01	0,005	0,005	0,046	0	0,01	0,005	0,005
0,02	0,02	0,02	0,127	0	0,02	0,02	0,02
0,06	0,03	0,03	0,302	0	0,06	0,03	0,03
0,1	0,04	0,04	0,492	0	0,1	0,04	0,04
0,14	0,05	0,05	0,696	0	0,14	0,05	0,05
0,18	0,06	0,06	0,914	0	0,18	0,06	0,06
0,22	0,07	0,07	1,145	0	0,22	0,07	0,07
0,25	0,08	0,08	1,350	0	0,25	0,08	0,08
0,258	0,086	0,086	1,431	0	0,258	0,086	0,086

Для двухэлементного учета имеем:

$$\begin{cases} \delta_{S(2)}^I = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \left[ K_{2I}^* \cdot K_{2U}^* \cdot e^{j(\varphi_{2U} - \varphi_{2I} + 120)} - K_{2I}^* \cdot e^{-j(\varphi_{2I} - 60)} - K_{2U}^* \cdot e^{j(\varphi_{2U} - \varphi_{1I})} \right]; \\ \delta_{S(2)}^{II} = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \left[ K_{2I}^* \cdot K_{2U}^* \cdot e^{j(\varphi_{2U} - \varphi_{2I} - 120)} + K_{2I}^* \cdot e^{-j\varphi_{2I}} + K_{2U}^* \cdot e^{j(\varphi_{2U} - \varphi_{1I} - 60)} \right]. \end{cases} \quad (10)$$

Функция  $\Delta_{S(2)}$  для обоих элементов имеет следующий вид:

$$\Delta_{S(2)} = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \left[ K_{2I}^* \cdot K_{2U}^* + K_{2I}^* + K_{2U}^* \right]. \quad (11)$$

Таким образом,  $\Delta_{S(2)}$  также является оценкой сверху абсолютных погрешностей определения активной  $\delta_{P(2)}$  и реактивной  $\delta_{Q(2)}$  мощности каждым элементом двухэлементного счетчика электрической энергии, которая определяется значениями коэффициентов несимметрии напряжений и токов по обратной последовательности  $K_{2U}^*$  и  $K_{2I}^*$  и не зависит от их соотношения.

**Выводы.** 1. Получены оценки сверху абсолютных погрешностей определения активной и реактивной мощности по каждому элементу трех- и двухэлементного счетчиков электрической энергии в случае применения математических корректировок для измеряемых ими токов и напряжений, которая обусловлена допущением о симметрии параметров режима работы сети. 2. Максимум оценки сверху погрешности определения активной и реактивной мощности по каждому элементу трехэлементного счетчика электрической энергии зависит от соотношения коэффициентов несимметрии напряжений и токов  $K_{2U}^*$ ,  $K_{0U}^*$ ,  $K_{2I}^*$  и  $K_{0I}^*$  и достигается при  $K_{2U}^* = K_{0U}^*$  и  $K_{2I}^* = 0$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила користування електричною енергією. НКРЕ. Зареєстровано: Мін'юст України 2 серпня 1996 р. за N 417/1442.
2. Вострокнутов Н.Г. Электрические счетчики и их эксплуатация / Вострокнутов Н.Г. – М.-Л.: Госэнергоиздат. 1959.
3. Калюжный Д.Н. Определение схемы включения двух- и трехэлементного счетчика электроэнергии по токовым цепям в условиях несимметрии / Д.Н. Калюжный // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2008. – №4(50). – С. 32–36.
4. Методика и алгоритм определения схем включения систем учета электроэнергии по цепям напряжения с учетом качества электроэнергии / [В.И. Васильченко, О.Г. Гриб, Д.Н. Калюжный и др.] // Промислова електроенергетика та електротехніка. – Київ: ВАТ Інститут “Київпромелектропроект”. – 2009. – № 5. – С. 57–62.
5. Калюжный Д.Н. Определение схем включения счётчиков совместно по цепям тока и напряжения с учётом качества электрической энергии / Д.Н. Калюжный // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – №7(77). – С. 13–19.
6. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения: ГОСТ 13109-97 – [Действующий с 01.01.1999]. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с. – (Национальный стандарт Украины).
7. Таха Х. Введение в исследование операций / Таха Х. – М.: Издательский дом "Вильямс". 2001.

Надійшла до редколегії 16.03.2011

Рецензент: Е.Г.Курінний

Д. М. КАЛЮЖНИЙ

Харківська національна академія міського господарства

**Оцінка похибки визначення дійсного електроспоживання у разі помилкових включень лічильників електричної енергії з урахуванням її якості** У статті розглянуто оцінку похибки визначення дійсного електроспоживання у разі помилкових включень лічильників електричної енергії, яка обумовлена несиметрією параметрів режиму роботи мережі.

**Лічильник електроенергії, помилка схеми включення лічильника електроенергії, дійсне електроспоживання, похибка.**

D. KALYUZHNIY

Kharkiv National Academy of Municipal Economy

**Errors Estimation of Determining Real Energy Consumption in Case of Wrongs Switch of Power Meters Taking into Account Power Quality.** The issues of errors estimation of determining real energy consumption in case of wrongs switch of power meters caused by parameters asymmetry of electric network mode have been considered in the article.

**Power meters, case of wrongs switch of power meters, real energy consumption, errors.**