

УДК 621.311

Д. Н. Калюжный, канд. техн. наук, доцент

Харьковская национальная академия городского хозяйства, г. Харьков

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ СЧЁТЧИКОВ СОВМЕСТНО ПО ЦЕПЯМ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЁТОМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*В статье рассмотрена задача определения схем включения двух- и трехэлементных счетчиков электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения с учётом несимметрии параметров режима работы сети и случайного характера нагрузки.*

*У статті розглянута задача визначення схем включення двох- та трьохелементних лічильників електроенергії спільно по ланцюгах струму й напруги з урахуванням несиметрії параметрів режиму роботи мережі й випадкового характеру навантаження.*

### Введение

При эксплуатации счетчиков электрической энергии в ходе их проверок, а также пуско-наладочных работ достаточно часто встречаются случаи их неправильного включения. Это приводит к некорректному учету электрической энергии в широком диапазоне. Своевременное выявление и устранение такого рода ошибок является актуальной задачей.

Основной метод определения схем включения (ОСВ) систем учета электроэнергии заключается в анализе векторных диаграмм [1-3]. При этом предполагает проведение измерений токов, напряжений и фазовых соотношений между ними с последующим их сравнением относительно правильной схемы включения. Существенным недостатком данного подхода являются допущение о симметрии параметров режима работы сети, ограничивающее область однозначного решения. Кроме этого, возможно ошибочное решение, вызванное неточным заданием угла нагрузки  $\varphi_{нагр}$  или коэффициентом мощности  $\cos \varphi_{нагр}$ , которые в общем случае носят случайный характер.

Несмотря на указанные недостатки, большинство современных систем учета электроэнергии имеют функциональные возможности по определению простых видов ошибок включения, связанных с обрывом или шунтированием измерительных цепей, неправильным чередованием фаз, а также отдельной полярностью токовых цепей. Более сложные ошибки, связанные с ОСВ совместно по цепям тока и напряжения при отдельном их неправильном включении, остаются неопределенными.

### Постановка задачи

Рассмотрим задачу определения схемы включения двух- и трехэлементных счетчиков электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения в условиях несимметрии параметров режима работы и неизвестного угла нагрузки.

### Решение

Решение поставленной задачи будем рассматривать при условии, что обрыв или шунтирование двух и более цепей тока и напряжения, а также подключение к различным входам по току и напряжению систем учета электроэнергии одноименных фаз электрических величин являются маловероятными событиями [3]. Тогда, согласно [4], для метода трех ваттметров существует 40 геометрически различных комбинаций включения цепей напряжения и 20 комбинаций – цепей тока. Воспользовавшись правилом произведения [5] можно определить количество совместных способов включения, которое составит:  $40 \cdot 20 = 800$  комбинаций. Для метода двух ваттметров:  $6 \cdot 8 = 48$  комбинаций. Очевидно, что задача по ОСВ при таком количестве комбинаций является затруднительной. Поэтому её решение целесообразно вести при условии предварительного ОСВ отдельно по цепям тока и напряжения с учетом их математических корректировок [6, 7]. Это позволит свести

количество различных способов включения к шести геометрически различным комбинациям для обоих методов учета электроэнергии.

Рассмотрим векторные диаграммы напряжений и токов шести геометрически различных способов включения систем учета электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения относительно метода трех ваттметров (рис. 1). Предположим, что параметры режима работы симметричны и характер нагрузки неизменный. Как видно из данных диаграмм, аргументы векторов токов, характеризующие различные способы включения, могут быть описаны следующими диапазонами:

$$(n + \varphi_{нагр} - 30 + \Delta\varphi^H; n + \varphi_{нагр} + 30 + \Delta\varphi^K), \quad (1)$$

где  $n = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ$  или  $300^\circ$  - величина, зависящая от принадлежности вектора тока к различным фазам;  $\varphi_{нагр}$  - угол нагрузки, характеризующий сдвиг тока относительно напряжения;  $\Delta\varphi^H$  и  $\Delta\varphi^K$  углы корректировок границ диапазона (1), обеспечивающие соблюдение сдвига тока относительно напряжения в рамках  $\pm 90^\circ$ :

$$\Delta\varphi^H = \begin{cases} -90 - (\varphi_{нагр} - 30), & \text{если } (\varphi_{нагр} - 30) > -90; \\ 0, & \text{если } (\varphi_{нагр} - 30) \leq -90; \end{cases}$$

$$\Delta\varphi^K = \begin{cases} 90 - (\varphi_{нагр} + 30), & \text{если } (\varphi_{нагр} + 30) > 90; \\ 0, & \text{если } (\varphi_{нагр} + 30) \leq 90. \end{cases}$$

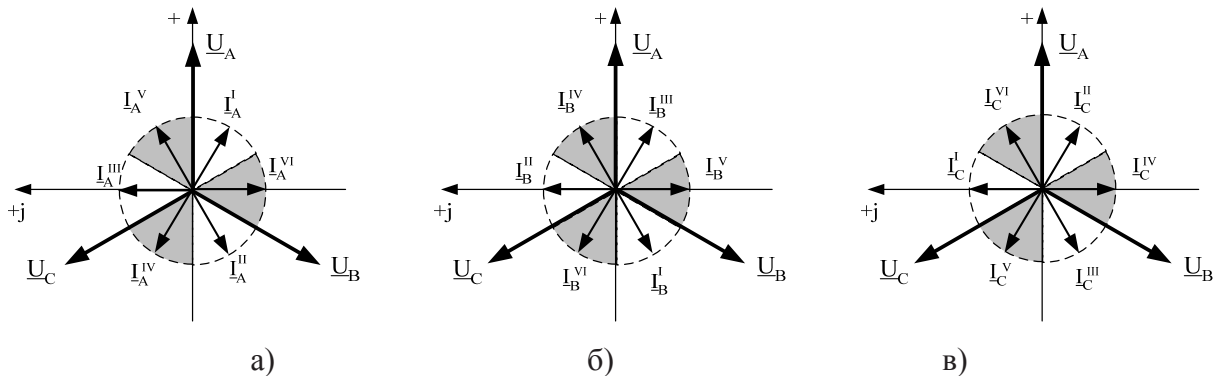


Рис. 1. Эквивалентные положения систем векторов токов и напряжений для метода трех ваттметров

В условиях измерения несимметричные составляющие токов и напряжений в общем случае являются неизвестными величинами. Поэтому, для однозначного решения задачи по ОСВ диапазоны аргументов фаз токов (1) должны быть уменьшены на величину  $\Delta\varphi_{нсм}$ , характеризующую неизвестную несимметрию как по напряжению, так и по току:

$$\Delta\varphi_{нсм} = \Delta\varphi_U + \Delta\varphi_I, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi_U$  и  $\Delta\varphi_I$  максимальные углы смещения напряжения и тока от симметричного положения (системы прямой последовательности), которые будут иметь место, например, для фазы А в случае совпадения фаз векторов обратной и нулевой последовательности при одновременном их перпендикулярном положении относительно вектора прямой последовательности (рис. 2).

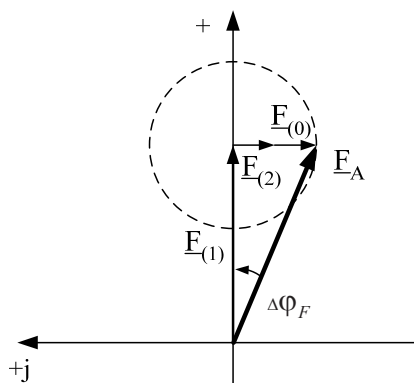


Рис. 2. Положение векторов симметричных составляющих

Согласно рис. 2 составляющие выражения (2) по напряжению и току могут быть определены следующим образом:

$$\Delta\varphi_U = \arctg\left(\frac{U_2 + U_0}{U_1}\right); \quad \Delta\varphi_I = \arctg\left(\frac{I_2 + I_0}{I_1}\right). \quad (3)$$

Если вектора обратной и нулевой последовательностей выразить через соответствующие коэффициенты несимметрии, то выражения (3) можно записать следующим образом:

$$\Delta\varphi_U = \arctg\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right); \quad \Delta\varphi_I = \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right), \quad (4)$$

где  $K_{0U}^* = K_{0U}/100\%$  и  $K_{2U}^* = K_{2U}/100\%$  – коэффициенты несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательностям [8], выраженные в относительных единицах;  $K_{0I}^*$ ,  $K_{2I}^*$  – коэффициенты несимметрии токов по нулевой и обратной последовательностям, аналогичные коэффициентам несимметрии напряжений.

Таким образом, с учетом (4) выражение (1) может быть записано так:

$$\begin{aligned} & \left( n + \varphi_{нагр} - \left[ 30 - \arctg\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right) - \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right) \right] + \Delta\varphi^H; \right. \\ & \left. n + \varphi_{нагр} + \left[ 30 - \arctg\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right) - \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right) \right] + \Delta\varphi^K \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Учтём, что  $\varphi_{нагр}$  является случайной величиной. Тогда разность в квадратных скобках выражения (5) будет определять предельное значение отклонения угла нагрузки от некоторого среднего значения  $\varphi_{нагр}^{cp}$ , с которым можно задавать  $\varphi_{нагр}$  для получения точного и однозначного решения:

$$\Delta\varphi_{нагр} < 30 - \arctg\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right) - \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right). \quad (6)$$

Очевидно, что при таком задании угла нагрузки  $\varphi_{нагр}$  говорить о точном решении можно с определенной вероятностью, которая будет определяться вероятностью нахождения случайной величины в интервале  $P(\varphi_{нагр} - \varphi_{нагр}^{ср} | < \Delta\varphi_{нагр})$ .

Оценим отклонение угла нагрузки  $\Delta\varphi_{нагр}$  для трехэлементных счетчиков электроэнергии. Согласно [7, 9], для однозначного решения задачи по ОСВ трехэлементных систем учета электроэнергии отдельно по цепям напряжения и тока коэффициенты несимметрии должны удовлетворять следующим условиям:  $K_{2U} < 8,6\%$ ,  $K_{0U} < 8,6\%$ ,  $K_{2I} < 12,9\%$  и  $K_{0I} < 12,9\%$ .

Подставив предельные значения коэффициентов  $K_{0U}^*$ ,  $K_{2U}^*$ ,  $K_{0I}^*$  и  $K_{2I}^*$  в выражение (6), получим минимальное значение отклонения угла нагрузки:

$$\Delta\varphi_{нагр}^{min} < 5,7^\circ. \tag{7}$$

Максимальное значение  $\Delta\varphi_{нагр}$  будет иметь место в случае симметрии параметров режима работы сети:

$$\Delta\varphi_{нагр}^{max} < 30^\circ. \tag{8}$$

Для счетчиков, способ учета электроэнергии которых основан на методе двух ваттметров, диапазоны нахождения векторов токов относительно напряжений с учетом несимметрии параметров режима работы определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} & (n + \varphi_{нагр} - \varphi_{фл} - (30 - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) + \Delta\varphi^H); \\ & n + \varphi_{нагр} - \varphi_{фл} + (30 - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) + \Delta\varphi^K, \end{aligned} \tag{9}$$

где  $\varphi_{фл} = 30^\circ$  - угол сдвига между векторами фазного и линейного напряжения прямой последовательности.

В диапазонах (9) углы корректировок  $\Delta\varphi^H$  и  $\Delta\varphi^K$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi^H &= \begin{cases} -120 - (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I), & \text{если } (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) > -120; \\ 0, & \text{если } (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) \leq -120; \end{cases} \\ \Delta\varphi^K &= \begin{cases} 60 - (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I), & \text{если } (\varphi_{нагр} - \varphi_{фл} + 30 - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) > 60; \\ 0, & \text{если } (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) \leq 60. \end{cases} \end{aligned}$$

Условие точного и однозначного решения задачи по ОСВ двухэлементного счетчика электроэнергии совместно по цепям тока и аналогично неравенству (6) за исключением отсутствия несимметрии напряжений по нулевой последовательности:

$$\Delta\varphi_{нагр} < 30 - \arctg\left(K_{2U}^*\right) - \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right). \tag{10}$$

Подставляя предельные значения коэффициентов несимметрии, ограничивающие однозначное решение задачи ОСВ двухэлементных счетчиков электроэнергии отдельно по цепям напряжения и тока [7, 9] ( $K_{2U} < 25,8\%$ ,  $K_{2I} < 12,9\%$  и  $K_{0I} < 12,9\%$ ), в выражение (10) получим минимальную погрешность задания угла нагрузки  $\varphi_{нагр}$ :

$$\Delta\varphi_{\text{нагр}}^{\min} < 1^{\circ}. \quad (11)$$

Таким образом, для решения задачи ОСВ систем учета электроэнергии совместно по цепям напряжения и тока необходимо знать максимально-возможную несимметрию напряжений и токов, а также угол нагрузки с учетом его случайного характера изменения.

На основе вышеизложенного можно предложить обобщенный алгоритм решения задачи ОСВ двух- и трехэлементных систем учета электроэнергии совместно по цепям напряжения и тока (рис. 3).

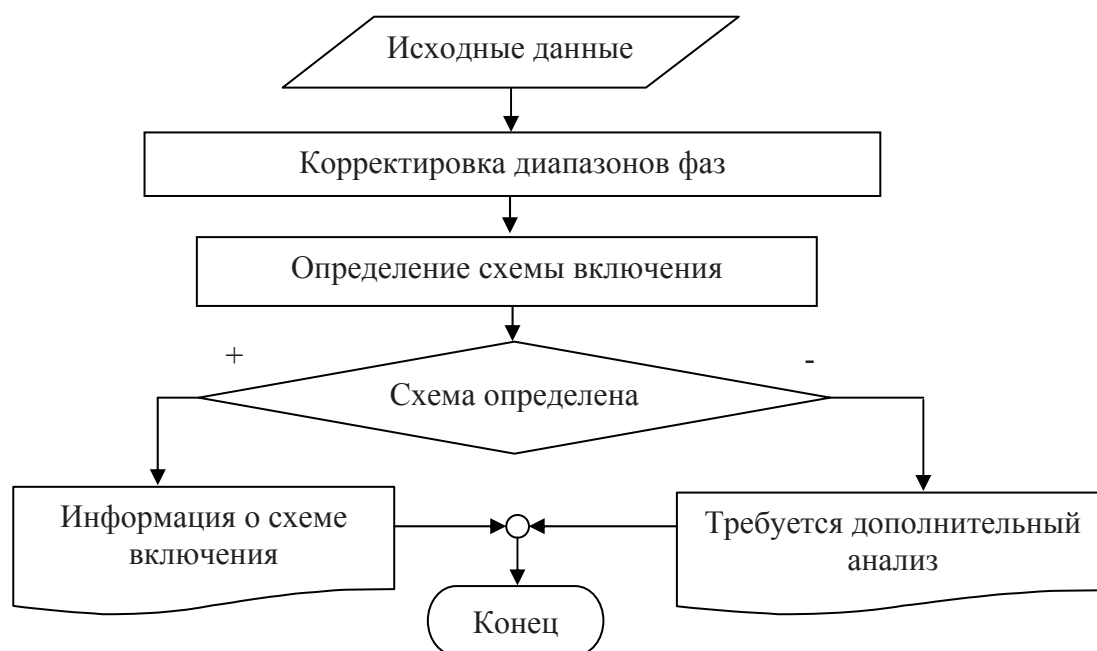


Рис. 3. Блок-схема обобщенного алгоритма ОСВ счетчиков электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения

В качестве исходных данных рассматриваемого алгоритма выступают токи и напряжения, максимально возможные коэффициенты несимметрии напряжений и токов по обратной и нулевой последовательностям, а также величина угла нагрузки. В блоке «Корректировка диапазонов фаз» определяются диапазоны возможного нахождения фаз модулей токов относительно напряжений с учетом несимметрии параметров режима и заданного угла нагрузки. В блоке «Определение схемы включения» непосредственно производится ОСВ совместно по цепям напряжения и тока. В случае положительного решения выдается информация о схеме включения. В противном случае требуется дополнительный анализ схемы включения с привлечением квалифицированного персонала и возможно дополнительных средств измерения.

Для современных систем учета электроэнергии при положительном ОСВ в случае неправильного включения представляется возможным определить параметры режима работы, соответствующие правильному включению, без каких-либо физических переключений, т.е. производить математическую корректировку измеряемых токов и напряжений. Для этого достаточно провести математические преобразования системы токов при фиксированной системе напряжений, которые показаны в табл. 1 и табл. 2. Полученная таким образом информация может оказаться более приемлемой по сравнению с исходной.

Таблица 1  
Математическая корректировка для трехэлементного счетчика электроэнергии

Комбинация	Схема включения по цепям				Математическая корректировка
	напряжения		тока		
	$\varphi_A$	$\varphi_B$	$\varphi_C$	$\varphi_0$	
1					$\underline{I}_A^{pc} = \underline{I}_A; \underline{I}_B^{pc} = \underline{I}_B; \underline{I}_C^{pc} = \underline{I}_C$
2					$\underline{I}_A^{pc} = \underline{I}_B; \underline{I}_B^{pc} = \underline{I}_C; \underline{I}_C^{pc} = \underline{I}_A$
3					$\underline{I}_A^{pc} = \underline{I}_C; \underline{I}_B^{pc} = \underline{I}_A; \underline{I}_C^{pc} = \underline{I}_B$
4	$\varphi'_A$	$\varphi'_B$	$\varphi'_C$	$\varphi'_0$	$\underline{I}_A^{pc} = -\underline{I}_A; \underline{I}_B^{pc} = -\underline{I}_B; \underline{I}_C^{pc} = -\underline{I}_C$
5					$\underline{I}_A^{pc} = -\underline{I}_B; \underline{I}_B^{pc} = -\underline{I}_C; \underline{I}_C^{pc} = -\underline{I}_A$
6					$\underline{I}_A^{pc} = -\underline{I}_C; \underline{I}_B^{pc} = -\underline{I}_A; \underline{I}_C^{pc} = -\underline{I}_B$

Таблица 2

Математическая корректировка для двухэлементного счетчика электроэнергии

Комбинация	Схема включения по цепям				Математическая корректировка
	напряжения		тока		
	$\varphi_I$	$\varphi_{II}$	$\varphi_C$	$\varphi_0$	
1					$\underline{I}_I^{pc} = \underline{I}_I; \underline{I}_{II}^{pc} = \underline{I}_{II}$
2					$\underline{I}_I^{pc} = -(\underline{I}_I + \underline{I}_{II}); \underline{I}_{II}^{pc} = \underline{I}_I$
3					$\underline{I}_I^{pc} = \underline{I}_{II}; \underline{I}_{II}^{pc} = -(\underline{I}_I + \underline{I}_{II})$
4	$\varphi'_A$	$\varphi'_B$	$\varphi'_C$		$\underline{I}_I^{pc} = -\underline{I}_I; \underline{I}_{II}^{pc} = -\underline{I}_{II}$
5					$\underline{I}_I^{pc} = \underline{I}_I + \underline{I}_{II}; \underline{I}_{II}^{pc} = -\underline{I}_I$
6					$\underline{I}_I^{pc} = -\underline{I}_{II}; \underline{I}_{II}^{pc} = \underline{I}_I + \underline{I}_{II}$

### Выводы

1. Разработан метод ОСВ счетчиков электроэнергии совместного по цепям напряжения и тока, учитывающий несимметрию параметров режима работы и случайный характер изменения угла нагрузки.
2. Определены условия точного и однозначного решения задачи ОСВ систем учета электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения в зависимости от несимметрии параметров режима работы и случайного характера изменения угла нагрузки.
3. Разработан алгоритм ОСВ счетчиков электроэнергии совместного по цепям тока и напряжения, учитывающий несимметрию параметров режима работы и случайный характер изменения угла нагрузки.
4. Предложен метод математической корректировки измеряемых счетчиком электроэнергии напряжений и токов при неправильной схеме его включения.

### Список литературы

1. Схемы включения счетчиков электрической энергии: Практическое пособие / Под ред. Я. Т. Загорского. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006.
2. Труб И. И. Обслуживание индукционных счетчиков и цепей учета в электроустановках. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Вострокнутов Н. Г. Электрические счетчики и их эксплуатация. Изд. 6-е, перераб. М.–Л. Госэнергоиздат. 1959.
4. Калюжный Д. Н. Анализ схем подключения счетчиков электрической энергии // Світлотехніка та електроенергетика. – 2007. – № 3–4. – С. 58–63.
5. М. Холл Комбинаторика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1970.
6. Калюжный Д.Н. Определение схемы включения двух- и трехэлементного счетчика электроэнергии по токовым цепям в условиях несимметрии // Энергосбережение · Энергетика · Энергоаудит. – 2008. – № 4 (50). – С. 32–36.
7. Васильченко В. И., Гриб О. Г., Гринченко А. А., Калюжный Д. Н. Методика и алгоритм определения схем включения систем учета электроэнергии по цепям напряжения с учетом качества электроэнергии // Промислова електроенергетика та електротехніка. – Київ: ВАТ Інститут “Київпромелектропроект”. – 2009. – № 5. – С. 57–62.
8. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. Киев: Госстандарт Украины, 1999.
9. Калюжный Д. Н. Методика и алгоритм определения схемы включения систем учета электроэнергии по токовым цепям // Наукові праці Донецького Національного технічного університету. Серія “Електротехніка і енергетика”. – Донецьк: ДонНТУ. – 2009. Випуск 9 (158). – С. 11–120.

### DETERMINING THE SCHEME OF SWITCHING ELECTRICITY METERS JOINTLY ON VOLTAGE AND CURRENT CIRCUITS TAKING INTO ACCOUNT POWER QUALITY

D. N. Kalyuzhniy, Cand.Tech. Sci., associate professor

*The problem of determining the scheme of switching two- and three-element electricity meters jointly on voltage and current circuit taking into account asymmetry parameters of power mode of operation and random loading character has been considered in the article.*

*Поступила в редакцию 22. 06 2010 г.*