

УДК 621.311

Калюжный Д.Н.\*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОГО СЧЕТЧИКА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ЦЕПЯМ НАПРЯЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИИ  
НАПРЯЖЕНИЙ**

*В статье рассмотрена задача определения схемы подключения трехэлементного счетчика электроэнергии по цепям напряжения в условиях несимметрии напряжений. Выявлены критерии определения схемы подключения трехэлементного счетчика электроэнергии по цепям напряжения. Определены диапазоны их значений и предельные коэффициенты несимметрии напряжений, при которых данная задача решается однозначно.*

Ошибка в схеме подключения, преднамеренное или непреднамеренное изменение схемы подключения счетчиков электрической энергии в большинстве случаев может приводить к некорректному учету электроэнергии в широком диапазоне. На сегодняшний день определение схем подключения и устранение ошибок подключения счетчиков электроэнергии проводится на основе анализа векторных диаграмм. При этом параметры режима работы сети считаются симметричными [1, 2].

В действительности несимметрия напряжений имеет место практически всегда. Во многих случаях её величина превышает нормируемые значения [3]. Относительно рассматриваемого вопроса данный факт остается неучтенным и может являться причиной неоднозначного решения в случаях значительной несимметрии напряжений.

Исходя из вышеизложенного, актуальной задачей является разработка методов и средств определения схем подключения счетчиков электроэнергии, в частности по цепям напряжения в условиях несимметрии.

Рассмотрим поставленную задачу для трехэлементного счетчика электроэнергии, подключенного через измерительные трансформаторы напряжения. Измерителем параметров режима работы сети будем считать сам счетчик электрической энергии.

Согласно [4] можно выделить 40 наиболее вероятных геометрически различных комбинаций подключения счетчика по цепям напряжения. Все они математически описываются с помощью известных соотношений для соединений треугольник – треугольник с и без нулевого провода [5].

В условиях симметрии напряжений различные комбинации подключения счетчика могут быть охарактеризованы следующими значениями измеряемых векторов напряжений:

1. Типы подключения с  $\varphi_{3T} = \varphi'_{3T}$  и  $\varphi_{3T} = \varphi'_{3T0}$  (рис. 1, а; б), где  $\varphi_{3T}$  - вход счетчика электроэнергии, соответствующий заземленной точке,  $\varphi'$  - выход трансформатора напряжения, соответствующий подключенному потенциалу, символ «0» соответствует обрыву канала напряжения, характеризуются тем, что модули, как минимум двух векторов напряжений, равны фазному значению, а их сдвиг друг относительно друга составляет угол  $120^\circ$ . Нулевое значение модуля вектора напряжения имеет место в случае обрыва канала напряжения.

2. Тип подключения с  $\varphi_{3T} = \varphi'_i$  (рис. 1, в), где  $i = A, B$  и  $C$ , характеризуется тем, что максимальное количество векторов напряжения с нулевым значением равно одному, в случае обрыва канала напряжения, а оставшиеся вектора по модулю могут принимать величины равные фазному и линейному или двум линейным значениям. При отсутствии обрыва каналов напряжения один из модулей векторов напряжения равен фазному значению, а два других – линейным. Сдвиг

---

\* Харьковская национальная академия городского хозяйства, канд. техн. наук, доц.

векторов фазных напряжений, при различных способах подключения, составляет угол  $120^\circ$ , а линейных – угол  $60^\circ$ .

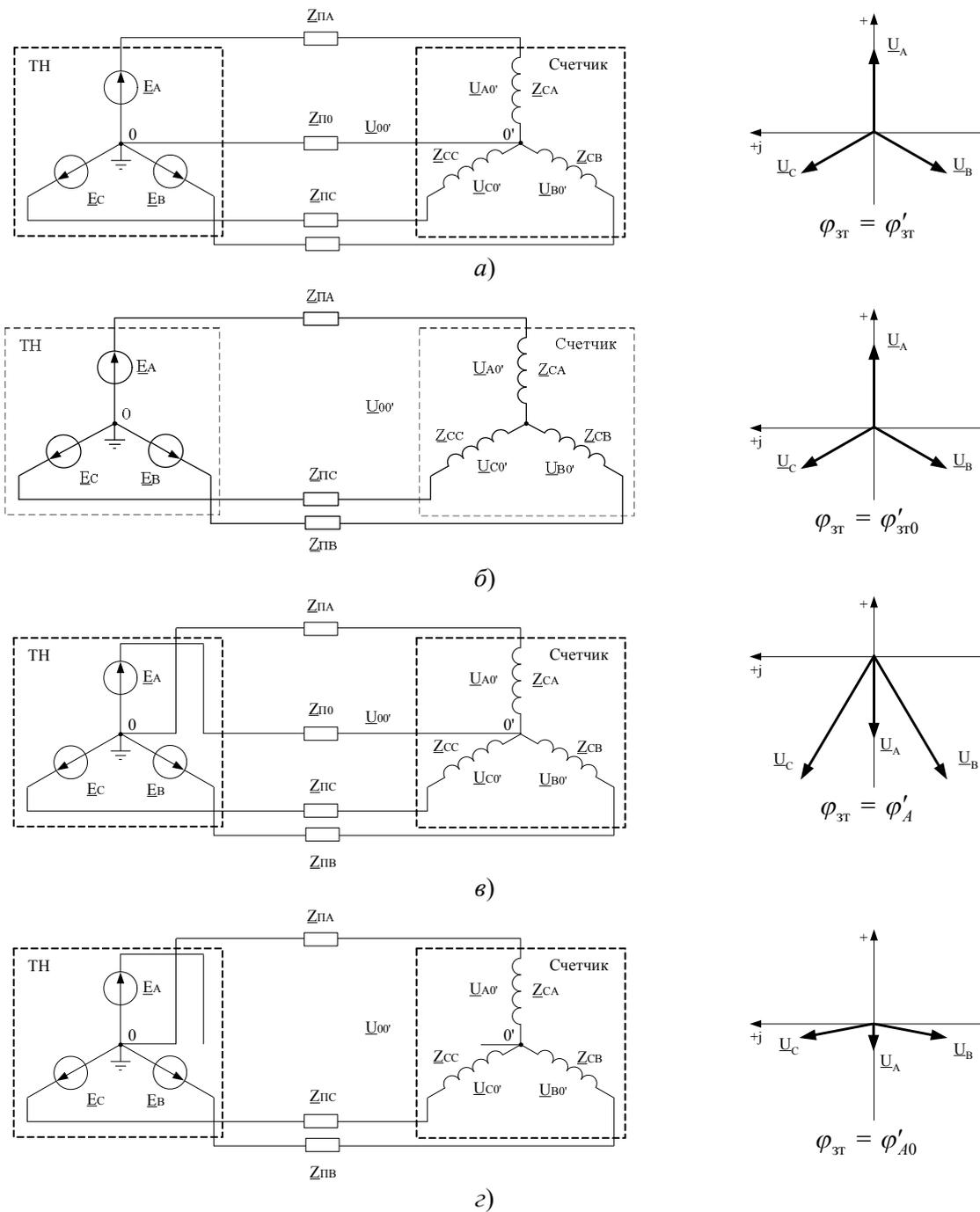


Рис. 1 – Типы подключений счетчика электроэнергии по цепям напряжения и соответствующие им векторные диаграммы:

- a* – тип подключения с  $\varphi_{зт} = \varphi'_{зт}$ ; *б* – тип подключения с  $\varphi_{зт} = \varphi'_{зт0}$ ;
- в* – тип подключения с  $\varphi_{зт} = \varphi'_i$ ; *г* – тип подключения с  $\varphi_{зт} = \varphi'_{i0}$

3. Тип подключения с  $\varphi_{зт} = \varphi'_{i0}$  (рис. 1, *г*) характеризуется наличием одного вектора с модулем  $\frac{1}{3}U_\phi$  и двух векторов с модулями  $-\frac{\sqrt{7}}{3}U_\phi$ . Сдвиг векторов напряжений с модулями  $\frac{1}{3}U_\phi$ , при различных способах подключения, составляет угол  $120^\circ$ . Значения фаз векторов с

модулями  $\frac{\sqrt{7}}{3}U_\phi$  принимают следующие значения:  $\arctg(3 \cdot \sqrt{3}) - 180 = -100,89^\circ$ ;  $180 - \arctg(3 \cdot \sqrt{3}) = 100,89^\circ$ ;  $-\arctg(\sqrt{3}/5) = -19,1^\circ$ ;  $\arctg(\sqrt{3}/5) = 19,1^\circ$ ;  $\arctg(\sqrt{3}/2) = -139,1^\circ$  и  $-\arctg(\sqrt{3}/2) = 139,1^\circ$ .

Как следует из характеристик каждого способа подключения счетчика электроэнергии его можно идентифицировать по уникальному набору значений двух критериев - модуля и фазы измеряемых напряжений.

Так различные типы схем подключения могут быть определены следующими логическими выражениями:

- тип подключения с  $\varphi_{зт} = \varphi_i$ :

$$(U_A = U_\lambda) \vee (U_B = U_\lambda) \vee (U_C = U_\lambda) = true; \quad (1)$$

- тип подключения с  $\varphi_{зт} = \varphi'_{i0}$ :

$$\left(U_A = \frac{1}{3} \cdot U_\phi\right) \vee \left(U_B = \frac{1}{3} \cdot U_\phi\right) \vee \left(U_C = \frac{1}{3} \cdot U_\phi\right) = true; \quad (2)$$

- тип подключения с  $\varphi_{зт} = \varphi'_{зт}$  или  $\varphi_{зт} = \varphi'_{зт0}$ :

$$(\text{условие (1)} = false) \& (\text{условие (2)} = false) = true. \quad (3)$$

Для определения схем с обрывом канала напряжения в подключениях с  $\varphi_{зт} = \varphi'_{зт}$  и  $\varphi_{зт} = \varphi_i$  необходимо выполнение следующего условия:

$$(U_A < \varepsilon_U) \vee (U_B < \varepsilon_U) \vee (U_C < \varepsilon_U) = true, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_U$  - максимально возможное остаточное напряжение при обрыве канала напряжения.

Дальнейшее определение схем подключения следует производить исключительно по критерию величины фазы векторов напряжений.

В условиях несимметрии, измеряемые вектора напряжений будут отклоняться от своего симметричного положения. При этом идентификация схемы подключения по уникальному набору значений критериев будет определяться не конкретными величинами, а некоторыми диапазонами их находений.

Для однозначного решения поставленной задачи диапазоны изменения значений критериев не должны превышать следующих величин:

- для схем с  $\varphi_{зт} = \varphi'_{зт}$  и  $\varphi_{зт} = \varphi'_{зт0}$  максимально допустимое значение отклонения фаз напряжений от симметричного положения не должно превышать величины  $60^\circ$ ;

- для схем с  $\varphi_{зт} = \varphi'_i$  максимально допустимое отклонение модулей напряжений от симметричного положения со значением  $\sqrt{3}U_\phi$  не должно превышать величины  $\frac{\sqrt{3}-1}{2}U_\phi$ , а фаз с линейными напряжениями -  $30^\circ$  и  $60^\circ$  - с напряжением равным фазному значению;

- для схем с  $\varphi_{зт} = \varphi'_{i0}$  максимально допустимое отклонение модуля напряжения от симметричного положения со значением  $\frac{1}{3}U_\phi$  не должно превышать  $\frac{\sqrt{7}-1}{6}U_\phi$ , а фаз напряжений

с модулем  $\frac{1}{3}U_\phi$  -  $60^\circ$  и  $\arctg(\sqrt{3}/5)$  - с модулями  $\frac{\sqrt{7}}{3}U_\phi$ .

В условиях измерения симметричное положение системы векторов напряжений является величиной неизвестной, поэтому в качестве базового вектора остается использовать один из измеряемых векторов. Исходя из этого, определенные выше диапазоны значений критериев однозначного определения схемы подключения следует изменить в сторону их уменьшения на величину смещения от симметричного положения, как по модулю  $\Delta U$ , так и по фазе  $\Delta \vartheta$ . Значения  $\Delta U' = \Delta U/U_1$  и  $\Delta \vartheta$  приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таким образом, при выборе в качестве базового вектора одного из измеряемых векторов напряжений решение поставленной задачи будет однозначным в случае выполнения следующих условий:

Таблица 1 – Значения  $\Delta U'$  при различных типах подключения и произвольном выборе базового вектора

Тип подключения с	Базовый вектор с модулем			
	$\frac{1}{3}U_\phi$	$\frac{\sqrt{7}}{3}U_\phi$	$U_\phi$	$\sqrt{3}U_\phi$
$\varphi_{3T} = \varphi'_{3T}$	-	-	$K_{2U}^* + K_{0U}^*$	-
$\varphi_{3T} = \varphi'_{3T0}$	-	-	$K_{2U}^*$	-
$\varphi_{3T} = \varphi'_i$	-	-	$K_{2U}^* + K_{0U}^*$	$\sqrt{3} K_{2U}^*$
$\varphi_{3T} = \varphi'_{i0}$	$\frac{K_{2U}^* + 2 \cdot K_{0U}^*}{3}$	$\frac{\sqrt{7}}{3} \cdot K_{2U}^* + \frac{1}{3} \cdot K_{0U}^*$	-	-

Таблица 2 - Значения  $\Delta \vartheta$  при различных типах подключения и произвольном выборе базового вектора

Тип подключения с	Базовый вектор с модулем			
	$\frac{1}{3}U_\phi$	$\frac{\sqrt{7}}{3}U_\phi$	$U_\phi$	$\sqrt{3}U_\phi$
$\varphi_{3T} = \varphi'_{3T}$	-	-	$\arcsin\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right)$	-
$\varphi_{3T} = \varphi'_{3T0}$	-	-	$\arcsin\left(K_{2U}^*\right)$	-
$\varphi_{3T} = \varphi'_i$	-	-	$\arcsin\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right)$	$\arcsin\left(K_{2U}^*\right)$
$\varphi_{3T} = \varphi'_{i0}$	$\arcsin\left(K_{2U}^* + 2 \cdot K_{0U}^*\right)$	$\arcsin\left(K_{2U}^* + \frac{1}{\sqrt{7}} \cdot K_{0U}^*\right)$	-	-

$$K_{2U}^* < \frac{\sqrt{3}-1}{2} - \sqrt{3} \cdot K_{2U}^* ; \quad K_{2U}^* + 2 \cdot K_{0U}^* < \frac{\sqrt{7}-1}{6} - \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot K_{0U}^* ;$$

$$K_{2U}^* + K_{0U}^* < \sin\left[60 - \arcsin\left(3 \cdot K_{0U}^*\right)\right] ; \quad K_{2U}^* < \sin\left[60 - \arcsin\left(K_{2U}^*\right)\right] ;$$

$$K_{2U}^* + K_{0U}^* < \sin\left[60 - \arcsin\left(3 \cdot K_{0U}^*\right)\right] ; \quad K_{2U}^* < \sin\left[30 - \arcsin\left(K_{2U}^*\right)\right] ;$$

$$K_{2U}^* + 2 \cdot K_{0U}^* < \sin\left[60 - \arcsin\left(3 \cdot K_{0U}^*\right)\right] ; \quad K_{2U}^* + \frac{1}{\sqrt{7}} \cdot K_{0U}^* < \sin\left[19,1 - \arcsin\left(3 \cdot K_{0U}^*\right)\right] ,$$

где  $K_{2U} = K_{2U}/100\%$  и  $K_{0U} = K_{0U}/100\%$  - коэффициенты несимметрий напряжений по обратной и нулевой последовательностям [6] в относительных единицах.

Как следует из данных условий, однозначное решение поставленной задачи по определению схемы подключения трехэлементного счетчика электроэнергии по цепям напряжения при выборе в качестве базового вектора одного из измеряемых векторов ограничено коэффициен-

тами несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности  $K_{2U}$  и  $K_{0U}$ , которые одновременно не должны превышать величину 7,7 %.

#### *Выводы*

1. Определены критерии идентификации схем подключения трехэлементного счетчика электроэнергии по цепям напряжения. Ими являются модули и фазы измеряемых векторов напряжений.

2. Определены диапазоны нахождения значений критериев однозначного определения схем подключения трехэлементного счетчика по цепям напряжения при выборе в качестве базового вектора одного из измеряемых векторов напряжений.

3. Определены максимально допустимые значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, которые ограничивают однозначное решение задачи по определению схемы подключения трехэлементного счетчика электроэнергии в случае выбора в качестве базового вектора одного из измеряемых векторов напряжений. Значения  $K_{2U}$  и  $K_{0U}$  одновременно не должны превышать величину 7,7 %.

#### *Перечень ссылок*

1. Труб И.И. Обслуживание индукционных счетчиков и цепей учета в электроустановках. – 2-е изд., перераб. и доп / И.И. Труб. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Схемы включения счетчиков электрической энергии: практическое пособие / Под ред. Я.Т. Загорского. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006.
3. Гриб О.Г. Оценка качества электроэнергии в электрических сетях Харьковского региона / О.Г. Гриб, Г.А. Сендерович, О.Н. Довгалоук, Д.Н. Калюжный // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: V міжнародна науково-технічна конф.: 75-річчю Приазов. Держ. Техн. ун-ту присвячується: зб. праць. / ПДТУ. – Маріуполь, 2005. – с. 124-126.
4. Калюжный Д.Н. Анализ схем подключения счетчиков электрической энергии / Д.Н. Калюжный // Світлотехніка та електроенергетика. – 2007. – № 3-4. – С. 58-63.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. школа, 1973.
6. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – В замен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.1999. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с.

Рецензент: А.И. Колбасин,  
канд. техн. наук, старший научн. сотр,  
ННЦ «Институт метрологии»

Статья поступила 14.02.2008