

**Г.А. СЕНДЕРОВИЧ**, д-р техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;  
**П.Г. ЩЕРБАКОВА**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

### ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЯЗИ С СИСТЕМОЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛЕВОГО УЧАСТИЯ СУБЪЕКТОВ В НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ

В работе проведены исследования методической погрешности определения долевого участия субъектов в нарушении симметрии напряжений, вызванной ошибкой в оценке сопротивления связи с системой.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, нарушение симметрии напряжений, долевого участия субъектов, сопротивления связи с системой.

**Постановка задачи и анализ публикаций.** Последние годы в Украине большое внимание уделяется вопросам качества электроэнергии (КЭ). Детерминированное определение долевого участия субъектов распределения и потребления электрической энергии в нарушении ее качества позволяет автоматизировать процесс определения ответственности, и, тем самым, повысить заинтересованность потребителей и поставщиков в соблюдении требований ГОСТ [1] к показателям качества электроэнергии (ПКЭ). Одним из основных требований по КЭ является обеспечение симметрии напряжений, которое характеризуется двумя ПКЭ: коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности  $K_{2U}$  и коэффициентом несимметрии напряжения по нулевой последовательности  $K_{0U}$ .

Те же проблемы актуальны в других странах СНГ, где состояние электрических сетей и электрооборудование потребителей традиционно не учитывает многих требований, необходимых для поддержания КЭ в системах электроснабжения. Поэтому, Госэнергонадзором министерства энергетики Российской Федерации утвержден метод определения фактического вклада субъекта, имеющего искажающие приемники, обусловившие несоответствие ПКЭ [2].

В основе метода в части его применения к несимметричным режимам лежит определение источника искажений симметрии по направлению активной мощности обратной последовательности. Но этот метод не дает детерминированного решения и может давать большую погрешность в определении долевого участия потребителей в нарушении симметрии на сборных шинах.

© Г.А. Сендерович, П.Г. Щербакова, 2013

В разработках украинских ученых найдены решения, близкие к детерминированным. Предложен метод определения долевого участия субъектов в нарушениях симметрии напряжений на границе раздела балансовой принадлежности (ГРБП), использующий параметрический подход для модели, выполненной в фазных координатах [3, 4]. При определении долевого участия в нарушении симметрии напряжений по нулевой последовательности ( $K_{0U}$ ) метод обеспечивает определение долевого участия потребителей без методических погрешностей. В случае определения долевого участия в нарушении симметрии напряжений по обратной последовательности ( $K_{2U}$ ) должно быть учтено влияние системы. Это выполняется путем расчета коэффициентов участия обобщенной нагрузки ( $K_{2_{уч\Sigma}}$ ) и системы ( $K_{2_{уч\text{сист}}}$ ) в искажении симметрии по обратной последовательности на сборных шинах по формулам

$$K_{2_{уч\Sigma}} = \frac{K_{2U}''}{K_{2U}' + K_{2U}''}; K_{2_{уч\text{сист}}} = \frac{K_{2U}'}{K_{2U}' + K_{2U}''}, \quad (1)$$

где  $K_{2U}'$  – составляющая коэффициента несимметрии на ГРБП, определяемая системой;  $K_{2U}''$  – составляющая коэффициента несимметрии на ГРБП, определяемая нагрузкой.

Определение  $K_{2U}'$  и  $K_{2U}''$  требует введения сопротивления связи ( $Z_C$ ) между ГРБП и ЭДС системы. При подключении потребителей к мощной энергосистеме обычно принимают, что  $Z_C$  равно сопротивлению понижающего трансформатора. В общем случае  $Z_C$  является величиной расчетной (эквивалентной), поэтому могут иметь место неточности по его оценке.

**Целью статьи** является оценка влияния ошибки задания сопротивления связи с системой на определение долевого участия субъектов в нарушении симметрии напряжений на ГРБП.

**Основной материал исследований.** На математической модели [5] проведены опыты, в которых определены зависимости от погрешности введения сопротивления связи  $\Delta Z_C$  следующих параметров [6]: коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  на ГРБП; коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, создаваемого системой на ГРБП  $K_{2U}'$ ; коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой на ГРБП  $K_{2U}''$ ; коэффициента участия системы в создании несимметрии на ГРБП  $K_{2_{уч\text{сист}}}$  и коэффициента участия нагрузки в создании несимметрии на ГРБП  $K_{2_{учн}}$ .

Для обеспечения возможности приведения погрешностей, полученных в разных опытах, к одинаковым условиям опыты выполнены при условии постоянства суммы коэффициентов  $K_{2U}''$  и  $K_{2U}'$  ( $K_{2U}'' + K_{2U}' = 0,3$ ). В качестве факторов несимметрии в системе использованы изменения амплитуды фазного напряжения  $U_A$ , у потребителя – модуля сопротивления нагрузки фазы  $Z_{нА}$ . Регулирование факторов несимметрии в модели осуществляется через коэффициенты  $f, k$ :

$$\underline{U}_A = \underline{U}_A - f \cdot \Delta U; \underline{Z}_{нА} = \underline{Z}_{нА} - k \cdot \Delta Z_{нА}.$$

Ошибка определения сопротивления связи вводится в модель через коэффициент  $d$ :  $\underline{\Delta Z}_C = d \cdot \underline{\Delta Z}_C$ . Диапазон изменения погрешностей составляет  $\pm 50\%$ . Результаты опытов сведены в табл. 1. Изменения показателей несимметрии в зависимости от относительной погрешности  $\Delta Z_C^*$  проиллюстрированы на рис. 1. Как видно из приведенных графиков, значения коэффициентов участия системы  $K_{2уч\ сис\т}$  и нагрузки  $K_{2уч\ н}$  в создании несимметрии на сборных шинах заметно зависят от сопротивления связи. Представляет интерес точность определения участия субъектов в нарушении симметрии по обратной последовательности. С этой целью выполнены расчеты погрешностей коэффициента участия системы –  $\Delta K_{2уч\ сис\т}$  и погрешности его составляющих –  $\Delta K_{2U}''$  и  $\Delta K_{2U}'$  (табл. 2) в функции от  $\Delta Z_C^*$ . Погрешности коэффициента участия системы приведены к сумме коэффициентов участия:

$$\Delta K_{2уч\ сис\т} = \frac{K_{2уч\ сис\т} - K_{2уч\ сис\т}(0)}{K_{2уч\ сис\т} + K_{2уч\ н}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где в силу условия для коэффициентов участия [5]

$$K_{2уч\ сис\т} + K_{2уч\ н} = 1.$$

Погрешности коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой в ТОП, –  $K_{2U}'$  и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой в ТОП, –  $K_{2U}''$  приведены в соответствии к их сумме:

$$\Delta K_{2U}' = \frac{K_{2U}' - K_{2U}'(0)}{K_{2U}' + K_{2U}''} \cdot 100\%; \quad \Delta K_{2U}'' = \frac{K_{2U}'' - K_{2U}''(0)}{K_{2U}' + K_{2U}''} \cdot 100\%. \quad (4)$$

В диапазоне изменения ошибки сопротивления связи  $\Delta Z_C^* = \pm 50\%$  погрешность определения участия системы  $\Delta K_{2уч\ сис\т}$  составляет от  $-23,2\%$  до  $30,7\%$  (рис. 2). Погрешность в оценке участия субъектов приблизительно в два раза ниже, чем ошибка задания сопротивления связи.

Таблица 1 – Изменение параметров, характеризующих несимметрию, в зависимости от  $\Delta Z_C^*$

$K_{2уч\ сис\т}(0)$	Параметры	$\Delta Z_C^*$											
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
1	$K_{2U}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	$K_{2U}'$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	$K_{2U}''$	0,021	0,016	0,012	0,008	0,004	0,0	0,002	0,008	0,012	0,016	0,02	0,02
	$K_{2уч\ сис\т}$	0,936	0,948	0,961	0,974	0,987	1,0	0,987	0,974	0,962	0,95	0,938	0,938
	$K_{2уч\ \Sigma}$	0,064	0,052	0,039	0,026	0,013	0,0	0,013	0,026	0,038	0,05	0,062	0,062
0,75	$K_{2U}$	0,253	0,258	0,262	0,266	0,27	0,274	0,277	0,28	0,284	0,286	0,289	0,289
	$K_{2U}'$	0,201	0,207	0,212	0,216	0,221	0,225	0,229	0,233	0,236	0,24	0,243	0,243
	$K_{2U}''$	0,094	0,09	0,086	0,082	0,079	0,075	0,071	0,068	0,064	0,06	0,057	0,057
	$K_{2уч\ сис\т}$	0,682	0,696	0,71	0,724	0,737	0,75	0,762	0,775	0,787	0,799	0,81	0,81
	$K_{2уч\ \Sigma}$	0,312	0,304	0,29	0,276	0,263	0,25	0,238	0,225	0,213	0,201	0,19	0,19
0,5	$K_{2U}$	0,222	0,233	0,242	0,25	0,258	0,265	0,272	0,278	0,283	0,289	0,293	0,293
	$K_{2U}'$	0,093	0,106	0,119	0,13	0,14	0,15	0,159	0,167	0,175	0,182	0,189	0,189
	$K_{2U}''$	0,166	0,163	0,16	0,156	0,153	0,15	0,147	0,143	0,14	0,137	0,134	0,134
	$K_{2уч\ сис\т}$	0,359	0,395	0,426	0,454	0,478	0,5	0,52	0,538	0,555	0,57	0,585	0,585
	$K_{2уч\ \Sigma}$	0,641	0,605	0,574	0,546	0,522	0,5	0,48	0,462	0,445	0,43	0,415	0,415
0,25	$K_{2U}$	0,21	0,226	0,24	0,253	0,264	0,274	0,283	0,291	0,298	0,305	0,311	0,311
	$K_{2U}'$	0,022	0,004	0,023	0,042	0,059	0,075	0,089	0,102	0,114	0,125	0,135	0,135
	$K_{2U}''$	0,239	0,236	0,233	0,231	0,228	0,225	0,222	0,22	0,217	0,214	0,212	0,212
	$K_{2уч\ сис\т}$	0,084	0,018	0,091	0,155	0,207	0,25	0,286	0,317	0,344	0,368	0,389	0,389
	$K_{2уч\ \Sigma}$	0,916	0,982	0,909	0,845	0,793	0,75	0,714	0,683	0,656	0,632	0,611	0,611
0	$K_{2U}$	0,222	0,243	0,261	0,276	0,289	0,3	0,31	0,319	0,326	0,333	0,34	0,34
	$K_{2U}'$	0,138	0,103	0,072	0,045	0,021	0,0	0,019	0,037	0,053	0,067	0,08	0,08
	$K_{2U}''$	0,311	0,308	0,306	0,304	0,302	0,3	0,298	0,296	0,294	0,292	0,289	0,289
	$K_{2уч\ сис\т}$	0,307	0,25	0,191	0,13	0,066	0,0	0,061	0,111	0,152	0,187	0,217	0,217
	$K_{2уч\ \Sigma}$	0,693	0,75	0,809	0,87	0,934	1,0	0,939	0,889	0,848	0,813	0,783	0,783

Таблица 2 – Погрешности параметров, характеризующих несимметрию, в зависимости от  $\Delta Z_C$

$K_{2 \text{ уч сист}}(0)$	Погрешности параметров	$\Delta Z_C^*$										
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	$\Delta K'_{2U}, \%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	7,0	5,33	4,0	2,67	1,33	0,0	0,67	2,67	4,0	5,33	6,67
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	6,4	5,2	3,9	2,6	1,3	0,0	1,3	2,6	3,8	5,0	6,2
0,75	$\Delta K'_{2U}, \%$	-8,0	-6,0	-4,33	-3,0	-1,33	0,0	1,33	2,67	3,67	5,0	6,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	6,33	5,0	3,67	2,33	1,33	0,0	-1,33	-2,33	-3,67	-5,0	-6,0
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	-6,8	-5,4	-4,0	-2,6	-1,3	0,0	1,2	2,5	3,7	4,9	6,0
0,5	$\Delta K'_{2U}, \%$	-19,0	-14,7	-10,3	-6,7	-3,3	0,0	3,0	5,7	8,3	10,7	13,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	6,3	4,3	3,3	2,0	0,1	0,0	-0,1	-0,23	-3,3	-4,3	-5,3
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	-14,1	-10,5	-7,4	-4,6	-2,2	0,0	2,0	3,8	5,5	7,0	8,5
0,25	$\Delta K'_{2U}, \%$	-17,6	-23,6	-17,3	-11,0	-5,33	0,0	4,67	9,0	13,0	16,7	20,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	4,67	3,67	2,67	2,0	1,0	0,0	-1,0	-1,67	-2,67	-3,67	-4,33
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	-16,6	-23,2	-15,9	-9,5	-4,3	0,0	3,6	6,7	9,4	11,8	13,9
0	$\Delta K'_{2U}, \%$	46,0	34,3	24,0	15,0	7,0	0,0	6,33	12,3	17,7	22,3	26,7
	$\Delta K''_{2U}, \%$	3,67	2,67	2,0	1,33	0,67	0,0	-0,67	-1,33	-2,0	-2,67	-3,67
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	30,7	25,0	19,1	13,0	6,6	0,0	6,1	11,1	15,2	18,7	21,7

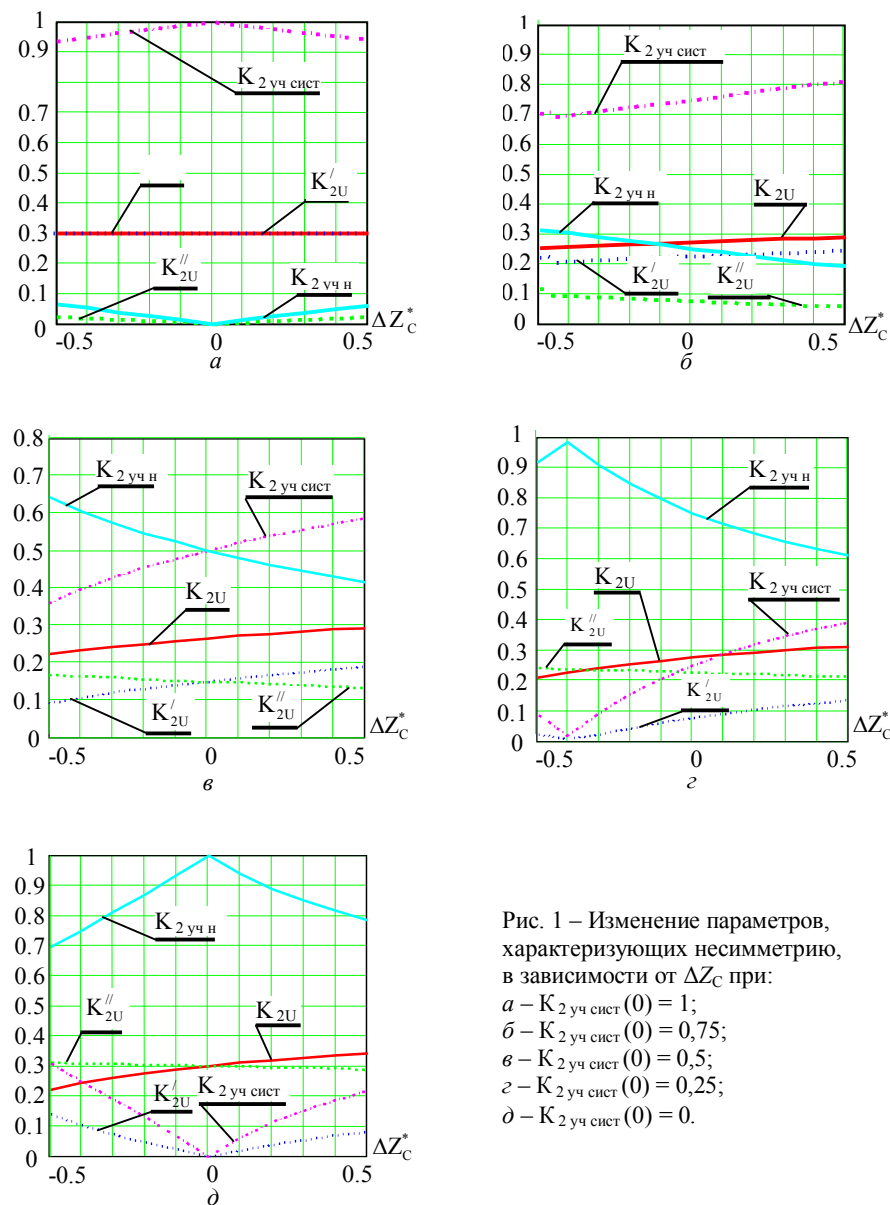


Рис. 1 – Изменение параметров, характеризующих несимметрию, в зависимости от  $\Delta Z_C$  при:  
 а –  $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 1$ ;  
 б –  $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0,75$ ;  
 в –  $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0,5$ ;  
 г –  $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0,25$ ;  
 д –  $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0$ .

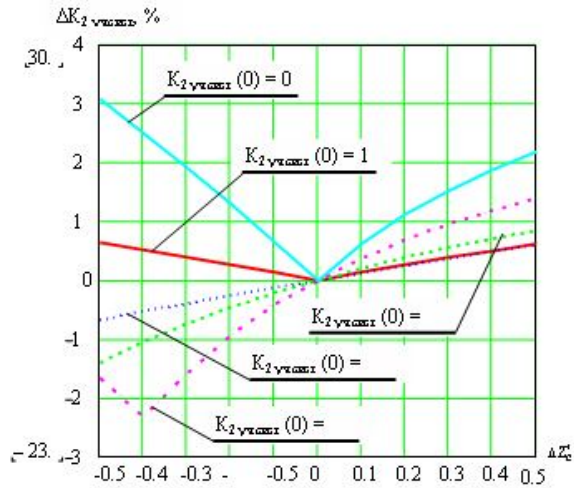


Рис. 2 – Зависимость погрешности расчета коэффициентов участия от ошибки задания сопротивления связи

Рассмотрим, чем определяются погрешности коэффициентов участия. Для этого сопоставим в функции от  $\Delta Z_C^*$  изменения  $\Delta K_{2уч сист}$ , с изменениями погрешностей коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой в ТОП, –  $\Delta K'_{2U}$ , и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой в ТОП, –  $\Delta K''_{2U}$ , (рис. 3).

Из графиков следует, что погрешности возрастают по мере увеличения участия нагрузки в нарушении симметрии по обратной последовательности. Характер изменения погрешности  $\Delta K_{2уч сист}$  определяется, в основном, погрешностью коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой –  $\Delta K'_{2U}$  (рис. 3, б – д). Это объясняется тем, что при нахождении составляющей  $K'_{2U}$  погрешность вносится непосредственно в определение падения напряжения на сопротивлении связи. В тоже время, при симметричной нагрузке характер изменения  $\Delta K_{2уч сист}$  определяется исключительно погрешностью коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой –  $\Delta K''_{2U}$  (рис. 3, а). В данном случае проявляются признаки нарушения симметрии по обратной последовательности только в системе [4].

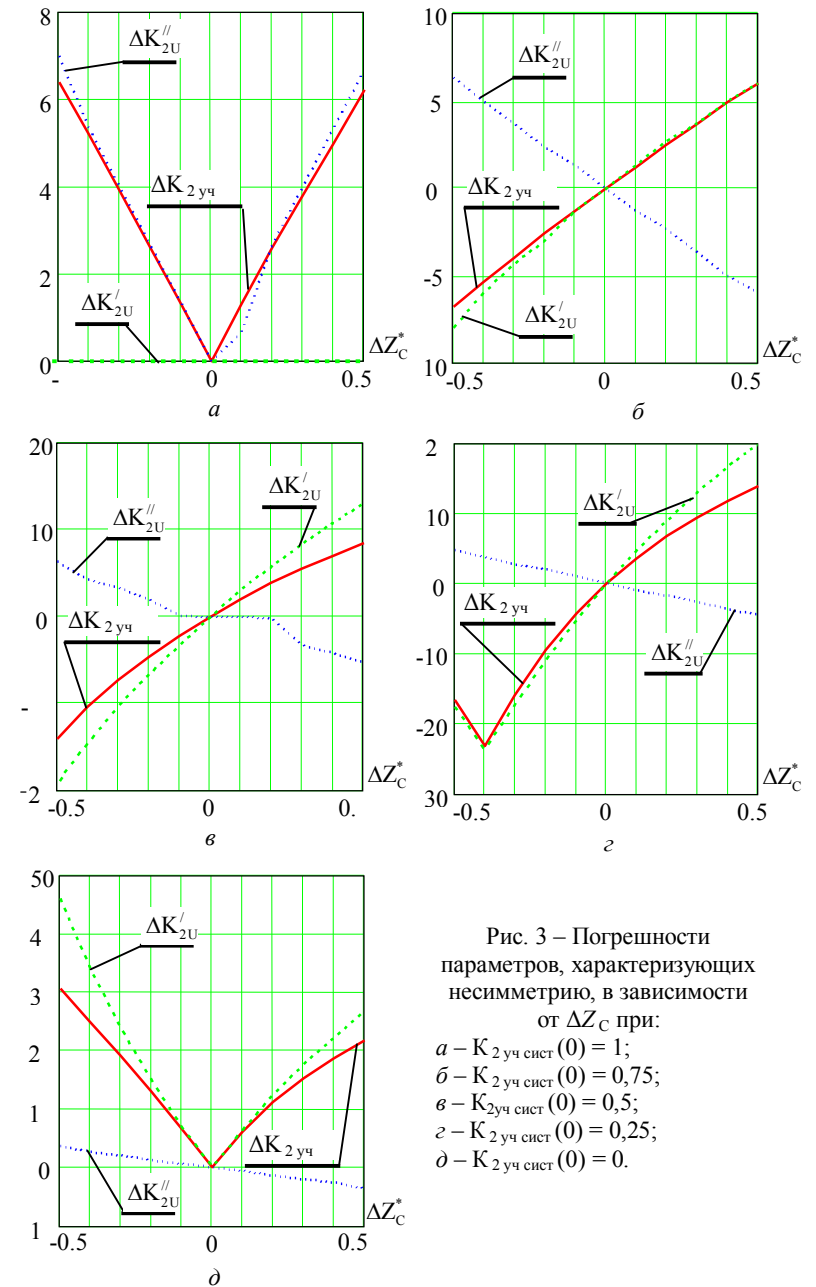


Рис. 3 – Погрешности параметров, характеризующих несимметрию, в зависимости от  $\Delta Z_C^*$  при:  
 а –  $K_{2уч сист}(0) = 1$ ;  
 б –  $K_{2уч сист}(0) = 0,75$ ;  
 в –  $K_{2уч сист}(0) = 0,5$ ;  
 г –  $K_{2уч сист}(0) = 0,25$ ;  
 д –  $K_{2уч сист}(0) = 0$ .

**Выводы.** Ошибка введения сопротивления связи с системой ( $\Delta Z_C^*$ ) может оказывать существенное влияние на погрешность определения участия поставщика и обобщенного потребителя сборных шин в нарушении симметрии напряжений ( $\Delta K_{2\text{уч}}$ ). При этом приведенное значение  $\Delta K_{2\text{уч}}$  приблизительно в два раза меньше, чем  $\Delta Z_C^*$ . Для реальной ошибки введения информации, находящейся в пределах  $\Delta Z_C^* \leq \pm 10\%$ , следует ожидать погрешность определения участия субъектов  $\Delta K_{2\text{уч}} \leq \pm 5\%$ .

**Список литературы:** 1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введ. в Украине 01.01.2000]. – Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт стран СНГ). 2. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии РД 153-34.0-15.501-01. Разработано научно-методическим центром 000 « Научный центр ЛИНВИТ». – Москва: 2001 – 23с. 3. Сендерович Г.А. Определение долевого участия субъектов в ответственности за нарушение симметрии напряжений / Г.А. Сендерович // Наукові праці Донецького Національного технічного університету. Серія “Електротехніка і енергетика”. – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. Випуск 11 (186). – С. 330-335. 4. Сендерович Г.А. Анализ влияния потребителей не симметрию по обратной последовательности в точке общего присоединения / Г.А. Сендерович // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 1/2 (13). – С. 89 – 94. 5. Сендерович Г.А. Математическая модель для исследования несимметричных режимов в трехфазной сети / Г.А. Сендерович, В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. - 2005. – №57. – С. 86-93. 6. Щербакова П.Г. Развитие методов определения долевого вклада субъектов электрической системы в ухудшении качества электроэнергии: дис. на соискание степени канд. техн. наук: 05.14.02 / Щербакова Полина Геннадиевна. – Х., 2009. – 214 с.

Поступила в редколлегию 22.10.12

УДК 621.315

**Влияние погрешности сопротивления связи с системой на определение долевого участия субъектов в нарушении симметрии напряжений / Сендерович Г.А., Щербакова П.Г.** // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. –№.17 (990). – С.119-127. Бібліогр.: 6 назв. Іл.3.

У роботі проведені дослідження методичної похибки визначення часткової участі суб'єктів у порушенні симетрії напруг, яка викликана помилкою в оцінці опору зв'язку із системою.

**Ключові слова:** якість електричної енергії, порушення симетрії напруг, часткова участь суб'єктів, опір зв'язку із системою.

Studies of methodical error of determination of equity participation of subjects are at process undertaken in violation of symmetry of tensions, by the caused error in the estimation of resistance of connection with the system at the article.

**Keywords:** quality of electricity, symmetry breaking stress, partial part subjects supports communication with the system.

УДК 621.31

**Ю.А.СИРОТИН**, канд. тех. наук, доц., НТУ «ХПИ»

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ТРЕХФАЗНОЙ ТРЕХПРОВОДНОЙ ЦЕПИ

Для трехфазной сети в точке подключения несимметричной нагрузки рассмотрены неуравновешенный и несбалансированный режимы потребления электроэнергии. Показано, что при синусоидальных процессах эти режимы определяют разные уравнения мощности. Получены формулы для вычисления мощности небаланса и неуровновешенности для синусоидальных процессов в трехпроводной цепи при несимметричном напряжении.

**Ключевые слова:** трехфазная цепь, мгновенная мощность, активная мощность, реактивная мощность, комплексная мощность, мощность небаланса, мощность пульсаций

В многофазной цепи с симметричными синусоидальными напряжениями и токами (в симметричном режиме) *мгновенная мощность* (ММ) не имеет переменной (пульсирующей) компоненты - режим *уравновешен* [1-3]. В реальной ситуации нарушение, как симметрии напряжений, так и симметрии токов приводит к пульсации ММ. Режим (синусоидальный или несинусоидальный) *неуравновешен*, если ММ имеет колебательную (пульсирующую) компоненту.

Мгновенная мощность (*активная* ММ) равна скорости передачи энергии. Однако скорость передачи энергии не полностью характеризует качество потока энергии и режим многофазной цепи. В трехфазной цепи *векторная* ММ (векторное произведение векторов мгновенных значений (м.з.) фазных напряжений и токов) дополняет характеристику энергетических процессов. Векторная ММ интерпретируется как *неактивная мгновенная мощность* [4]. Если *неактивная* ММ имеет колебательную составляющую - режим *несбалансирован*. *Активная* и *неактивная* ММ связаны уравнением мощности.

В многофазной цепи процессы *синусоидального* режима определены векторами комплексных *действующих величин* (д.в.) тока и напряжения, которые определяют *комплексные мощности* (КМ) сбалансированного и несбалансированного режимов. Стандартная КМ определяется как комплексное скалярное произведение (СП) векторов комплексных д.в. напряжений и токов. *Векторное произведение* (ВП) векторов комплексных д.в. напряжений и токов определяет комплексный вектор несбалансированной мощности [5]. ВП комплексно-сопряженного вектора напряжений и вектора токов определяет - комплексный вектор неппульсирующей мощности [6-8].

© Ю. А.Сиротин, 2013