

\* \* \*

## Исследование влияния источников высших гармоник на качество электроэнергии в электроэнергетических системах 220–500 кВ\*

КАРТАШЕВ И.И., НАСЫРОВ Р.Р., ОЛЕКСЮК Б.В., СИМУТКИН М.Г.,  
ТУЛЬСКИЙ В.Н., ШАМОНОВ Р.Г.

*Предлагается учитывать влияние отдельных устройств, являющихся источниками высших гармоник, на качество электроэнергии по относительному вкладу этих устройств в ухудшение показателей качества электроэнергии (ПКЭ). Приводятся результаты измерений ПКЭ в действующих сетях 220 – 500 кВ и оценка влияния управляемых шунтирующих реакторов и статических тиристорных компенсаторов на КЭ в точках их присоединения к электрической сети.*

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы, качество электроэнергии, искажение синусоидальности, источники высших гармоник, измерение

В электроэнергетических системах (ЭЭС) для компенсации реактивной мощности применяют такие управляемые статические устройства, как статические тиристорные компенсаторы (СТК) и управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШР). Эти устройства по своему принципу действия являются нелинейными электроприемниками (ЭП) и, следовательно, источниками высших гармоник тока, что ухудшает качество электроэнергии (КЭ) по следующим показателям: коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  и коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ .

В большинстве случаев эти устройства присоединены к шинам 220 и 500 кВ, где нет других источников искажений и нет существенной местной

*It is proposed to take into account the influence of individual devices generating higher harmonic components on the quality of electric power according to the relative contribution of these devices in the deterioration of electric power quality indicators (EPQIs). The results obtained from measurements of EPQIs in operating 110–500 kV networks are given, and the influence of controlled shunt reactors and static compensators on the quality of electric power at the points of their connection to the electric network is estimated.*

**Key words:** electric power systems, quality of electric power, distortion of the sine-wave shape, sources of higher harmonics, measurements

нагрузки. Это позволяет достаточно просто оценить влияние УШР и СТК на КЭ в точке их присоединения.

На схеме рис. 1,а подсистема S1 является эквивалентом ЭЭС, в то время как источник высших гармоник (устройство) представлен в виде подсистемы S2. На рис. 1,б устройство показано как источник тока  $J_y$ , шунтированный сопротивлением  $z_y$ . Принято, что устройство обладает неограниченно большим внутренним сопротивлением.

В соответствии с [1] вклад устройства, являющегося источником высших гармоник, в искажение синусоидальности кривой напряжения определяется по следующему соотношению:

$$\dot{U}_y = J_y \frac{z_c z_y}{z_c + z_y}, \quad (1)$$

\* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-6416.2012.8.

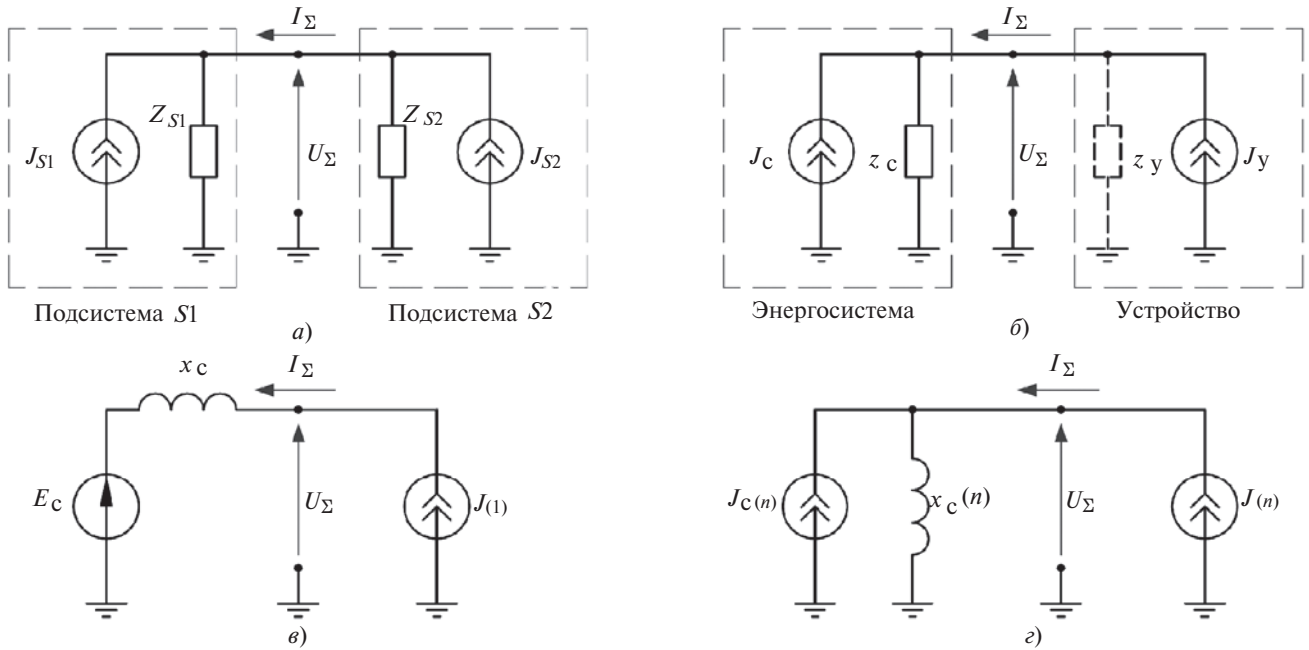


Рис. 1. Модель сети для определения относительного вклада отдельных источников высших гармоник тока в ухудшение ПКЭ

где  $\underline{z}_c$  – эквивалентное сопротивление системы; при принятых допущениях  $|\underline{z}_{-y}| \gg \underline{z}_c$ .

Нетрудно показать, что при стремлении сопротивления устройства к бесконечности вклад источника искажений будет определяться только эквивалентным сопротивлением системы и током устройства:

$$\begin{aligned} \dot{U}_y &= \lim_{|\underline{z}_{-y}| \rightarrow \infty} \dot{J}_y \frac{\underline{z}_c \underline{z}_y}{\underline{z}_c + \underline{z}_y} = \dot{J}_y \lim_{|\underline{z}_{-y}| \rightarrow \infty} \frac{\underline{z}_c \underline{z}_y}{\underline{z}_c + \underline{z}_y} \\ &= \dot{J}_y \lim_{|\underline{z}_{-y}| \rightarrow \infty} \frac{\underline{z}_c}{\frac{\underline{z}_c}{\underline{z}_y} + 1} = \dot{J}_y \underline{z}_c. \end{aligned} \quad (2)$$

На основной частоте ЭЭС можно представить напряжением  $E_c$  с внутренним сопротивлением  $x_c$  (рис. 1, в). Значение этого сопротивления может быть определено из известного значения тока трехфазного короткого замыкания  $I_K^{(3)}$  на шинах подстанции, к которым присоединено устройство:

$$x_c = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} I_K^{(3)}}, \quad (3)$$

где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение на шинах подстанции.

Значение  $I_K^{(3)}$  рассчитывается для всех узлов электрической сети на этапе проектирования и известно для шин всех классов напряжения подстанции. При этом следует отметить, что для сетей

220 кВ и выше эквивалентное сопротивление системы допустимо считать чисто индуктивным [2].

Для эквивалентной схемы, показанной на рис. 1, в,  $E_c$  может быть определено по известному напряжению основной частоты  $U_{S(1)}$  на зажимах устройства и току устройства:

$$E_c = U_{S(1)} + \sqrt{3} I_{S(1)} x_c, \quad (4)$$

где  $I_{S(1)}$  – ток основной частоты, потребляемый устройством.

В (4) использованы действительные числа ввиду того, что для средств компенсации реактивной мощности направление вектора тока отличается от направления вектора напряжения на  $90^\circ$ . При этом вектор падения напряжения на индуктивном эквивалентном сопротивлении сети, обусловленный протеканием этого тока, всегда имеет ту же фазу, что и вектор напряжения (направление тока, потребляемого устройством, отражено в формуле с учетом его индуктивного характера).

При наличии результатов измерений напряжения и тока – значений  $U_{S(1)изм}$  и  $I_{S(1)изм}$  – можно оценить в процентах погрешность результатов, получаемых по (4):

$$\begin{aligned} d_U &= \frac{U_{S(1)изм} - U_{S(1)}}{U_{S(1)изм}} 100 = \\ &= \frac{U_{S(1)изм} - (E_c - \sqrt{3} I_{S(1)изм} x_c)}{U_{S(1)изм}} 100. \end{aligned} \quad (5)$$

Как было сказано выше, для сетей 220 кВ и выше эквивалентное сопротивление системы имеет

индуктивный характер. Исходя из этого, можно заключить, что эквивалентное сопротивление системы  $z_c$  на  $n$ -й гармонике также будет индуктивным (рис. 1,з), а его значение может быть определено по следующей формуле:

$$z_{c(n)} = x_{c(n)} = x_c n. \quad (6)$$

Для оценки вклада устройства в ухудшение показателей КЭ на высших гармониках удобно применять схему, представленную на рис. 1,з. Для этого необходимо рассчитать действующее значение напряжения  $n$ -й гармонической составляющей, вызываемого протеканием измеренного тока  $n$ -й гармонической составляющей устройства, и таким образом определить абсолютный вклад устройства. После этого необходимо вычислить отношение рассчитанного значения абсолютного вклада устройства и уровня фона (суммарного измеренного напряжения  $n$ -й гармонической составляющей  $U_{S(n)}$  в точке присоединения устройства к электрической сети). Полученное значение будет определять *относительный вклад устройства* в коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения. Таким образом, относительный вклад показывает, какая часть искажения синусоидальности формы кривой напряжения определяется током устройства.

В соответствии с [3]

$$K_{U(n)} = \frac{U_{S(n)}}{U_{S(1)}} 100. \quad (7)$$

Соответственно, действующее значение напряжения  $n$ -й гармонической составляющей (фон системы) можно определить по измеренному значению  $K_{U(n)}$ :

$$U_{S(n)} = \frac{K_{U(n)}}{100} U_{S(1)}. \quad (8)$$

Исходя из схемы на рис. 1,з и соотношений (2) и (6), абсолютный вклад устройства в трехфазной сети можно определить по формуле (без учета фазовых углов токов и напряжений):

$$U_{y(n)} = I_{S(n)} x_c n \sqrt{3}. \quad (9)$$

Тогда относительный вклад устройства в процентах уровня фона системы

$$\begin{aligned} U_{y(n)\text{отн}} &= \frac{U_{y(n)}}{U_{S(n)}} 100 = \frac{I_{S(n)} x_c n \sqrt{3}}{U_{S(1)} \frac{K_{U(n)}}{100}} 100 = \\ &= \frac{I_{S(n)} x_c n \sqrt{3} 100}{U_{S(1)} K_{U(n)}} 100. \end{aligned} \quad (10)$$

Предлагаемый метод был апробирован в сетях 220 и 500 кВ, где было проведено инструментальное обследование на ряде подстанций (ПС), оснащенных УШР и СТК. Исследование каждого устройства проводилось для пяти режимов, соответствующих различным значениям потребляемой и генерируемой реактивной мощности, в течение которых фиксировались значения ПКЭ. Каждый режим работы исследуемых устройств имел длительность 5 мин, что позволяет сделать допущение о том, что режим работы внешней системы не изменялся в течение эксперимента. Нагрузка выбранных для измерений участков энергосистемы представляет собой коммунальную нагрузку, в составе которой отсутствуют мощные искажающие ЭП. В таких условиях следует ожидать низкий фон искажений, создаваемых нагрузкой сети.

Измерения проводились на ПС 220 кВ, входящих в состав участков сети 220–500 кВ. В качестве точек контроля были выбраны шины ПС, к которым подключены исследуемые устройства. Схемы участков сети представлены на рис. 2.

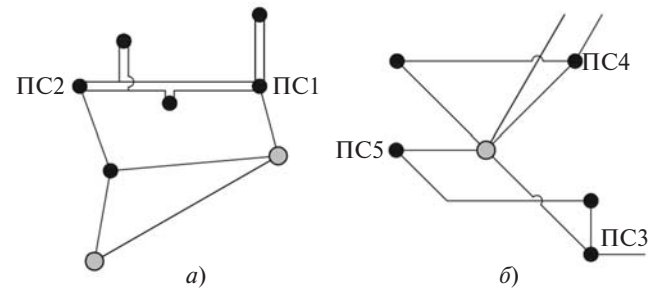


Рис. 2. Схема участков электрической сети: а — содержащих подстанции с УШР; б — подстанции с СТК: ● — ПС 500 кВ; ● — ПС 220 кВ

На ПС1 и 2 установлены УШР типа РТДУ-100000/220-УХЛ1. Этот тип реакторов представляет собой трехобмоточный управляемый реактор [4, 5] со следующими основными номинальными параметрами: мощность 100 Мвар; напряжение 242 кВ; ток 238,6 А.

Электрическая схема исследуемых УШР с указанием мест подключения средств измерения показателей качества электроэнергии (СИ ПКЭ) представлена на рис. 3.

Электрическая схема СТК, установленных на ПС3, 4 и 5, представлена на рис. 4.

Основные технические параметры (номинальные) исследуемых СТК: мощность БСК 46,9 Мвар; мощность ТРГ 52,5 Мвар; напряжение 10,5 кВ.

Результаты измерений ПКЭ приведены в табл. 1. Такие ПКЭ, как установившееся отклонение напряжения ( $dU_y$ ), размах изменения напряжения ( $dU_I$ ), коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности ( $K_{2U}$ ), провалы и импульсы напряжения, не приведены в табл. 1, так как УШР и СТК являются средствами

Таблица 1

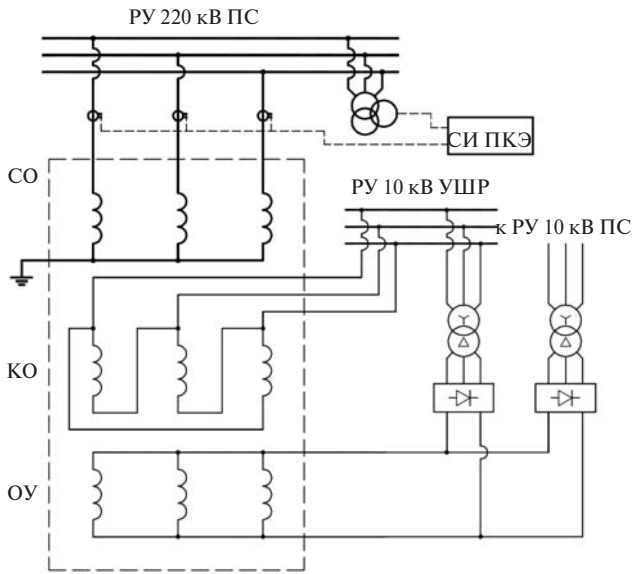


Рис. 3. Электрическая схема УШР серии РТДУ-100000/220-УХЛ1: СО – сетевая обмотка; КО – компенсационная обмотка; ОУ – обмотка управления; СИ ПКЭ – средство измерения ПКЭ

регулирования напряжения и изменение режима их работы (значения потребляемой реактивной мощности) автоматически приводит к изменению напряжения в точке их присоединения к сети. При этом в нормальных режимах работы эти устройства обеспечивают поддержание напряжения в точке присоединения на уровне заданной уставки и не вызывают ухудшения перечисленных ПКЭ.

Для удобства в табл. 1 также приведены (в процентах напряжения основной частоты) нормально и предельно допустимые значения соответствующих ПКЭ, указанные в стандарте [3].

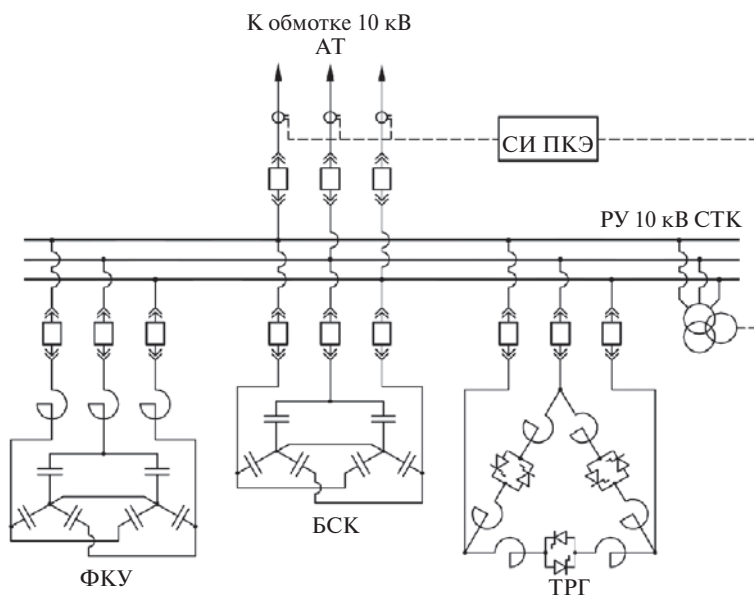


Рис. 4. Электрическая схема СТК 50 Мвар 10 кВ: ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство; БСК – батарея статических конденсаторов; ТРГ – тиристорно-реакторная группа; СИ ПКЭ – средство измерения ПКЭ

Показатель качества электроэнергетики	Значение ПКЭ		
	нормально допустимое	предельно допустимое	наибольшее измеренное
УШР			
$K_U$	2,0	3,0	2,08
$K_{U(3)}$	1,5	2,25	1,29
$K_{U(5)}$	1,5	2,25	1,39
$K_{U(7)}$	1,0	1,5	0,60
СТК			
$K_U$	5,0	8,0	5,90
$K_{U(3)}$	3,0	4,5	5,81
$K_{U(5)}$	4,0	6,0	0,41
$K_{U(7)}$	3,0	4,5	1,25

Как видно из табл. 1, превышение нормально допустимых значений зафиксировано по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения как в случае УШР, так и СТК. Также на одной из подстанций, оснащенных СТК, было зафиксировано значение коэффициента третьей гармонической составляющей напряжения, превышающее нормально допустимое и предельно допустимое значения.

Для наглядности на рис. 5 показаны изменения спектра тока УШР и СТК в зависимости от заданного режима.

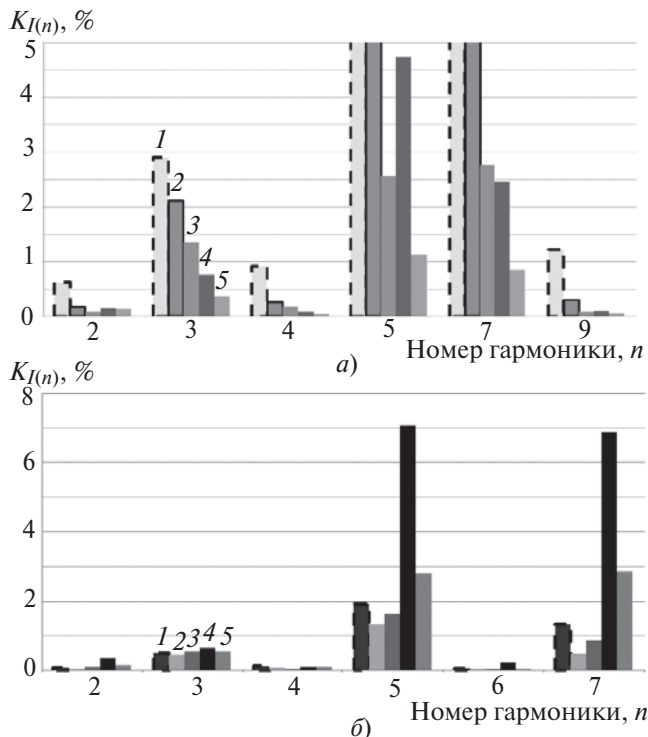
Результаты расчетов для 3-, 5- и 7-й гармоник при различных значениях потребляемой УШР реактивной мощности приведены в табл. 2. Гармоники напряжения более высокого порядка не представлены из-за их малости.

Из анализа результатов измерений и расчетов для УШР, приведенных в табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1. Погрешность расчета напряжения на шинах подстанции в соответствии с предложенным подходом, определенная по формуле (5), не превышает 0,4% измеренного значения.

2. Относительный вклад УШР в 3-ю гармонику напряжения не превышает 10% фона. На основании приведенных расчетов можно утверждать, что УШР практически не вносит искажения кривой напряжения на 3-й гармонике.

3. Относительный вклад УШР в 5-ю и 7-ю гармоники напряжения в трех режимах из пяти превышает 60% фона. Следовательно, УШР является основным источником искажений на указанных частотах. При этом следует отметить, что в режиме, соответствующем потреблению номинального тока,



**Рис. 5.** Спектр гармоник: *a* — тока УШР на ПС 1; значения коэффициента 5-й и 7-й гармонической составляющей тока УШР достигают 69,3 и 34,7 соответственно в режиме минимального потребления реактивной мощности (при уставке по току реактора в %  $I_{ном}$ ): 1 — 0%; 2 — 25%; 3 — 50%; 4 — 75%; 5 — 100%; *б* — тока СТК на ПС 4 для пяти режимов (1–5) ( $K_{I(5)}$  и  $K_{I(7)}$  в 1-м и 2-м режимах работы УШР существенно превышают 5% и на рисунке не показаны)

искажение тока реактора практически исчезает и вклад УШР в искажение напряжения стремится к нулю. Это обусловлено особенностью устройства УШР, которая заключается в том, что в режиме потребления номинальной мощности, как и в режиме потребления минимальной мощности, ток реактора является практически синусоидальным [4].

4. Относительный вклад УШР в 5-ю и 7-ю гармоники напряжения в режиме потребления 75% мощности превышает 100% фона. Это может быть объяснено двумя факторами: во-первых, увеличением погрешности средства измерения тока на высших гармониках; во-вторых, тем, что в данном режиме другие источники высших гармоник тока, расположенные в сети, создают напряжение, противоположное по фазе напряжению, рассчитанному по измеренному току УШР; таким образом, общий фон на 5-й и 7-й гармониках в точке подключения УШР будет ниже, чем вклад самого УШР, что обуславливает значение относительного вклада реактора выше 100% фона.

Результаты расчетов для 3-, 5- и 7-й гармоник в различных режимах работы СТК приведены в табл. 3. Гармоники напряжения более высокого порядка не представлены из-за их малости.

Анализ результатов измерений и расчетов для СТК, приведенных в табл. 3, позволяет сделать следующие выводы.

Таблица 2

Режим (см. рис. 5,а)	Уставка по току реактора $I/I_{ном}$ , %	Потребляемая мощность $Q$ , Мвар	Результаты расчета для 3-, 5- и 7-й гармоник											
			$K_{U(3)}$	$U_{S(3)}$ , В	$U_{y(3)}$	$U_{y(3)отн}$ , %	$K_{U(5)}$	$U_{S(5)}$ , В	$U_{y(5)}$ , В	$U_{y(5)отн}$ , %	$K_{U(7)}$	$U_{S(7)}$ , В	$U_{y(7)}$ , В	$U_{y(7)отн}$ , %
1	0	1,2	1,29	3,09	0,02	<b>0,7</b>	0,92	2,19	0,63	<b>28,7</b>	0,49	1,17	0,53	<b>45,6</b>
2	25	16,7	1,27	3,01	0,15	<b>5,0</b>	1,39	3,27	2,02	<b>61,6</b>	0,60	1,42	1,38	<b>97,1</b>
3	50	42,9	1,24	2,90	0,24	<b>8,2</b>	0,46	1,07	0,77	<b>71,7</b>	0,52	1,22	1,12	<b>92,4</b>
4	75	66,5	1,16	2,67	0,21	<b>7,9</b>	0,65	1,49	1,84	<b>123,4</b>	0,45	1,04	1,47	<b>141,5</b>
5	100	85,5	1,12	2,54	0,18	<b>6,9</b>	0,78	1,76	0,03	<b>1,5</b>	0,30	0,67	0,03	<b>4,2</b>

Таблица 3

Режим СТК (см. рис. 5,б)	Потребляемая мощность $Q$ , Мвар	Результаты расчета для 3-й, 5- и 7-й гармоник											
		$K_{U(3)}$	$U_{S(3)}$ , В	$U_{y(3)}$	$U_{y(3)отн}$ , %	$K_{U(5)}$	$U_{S(5)}$ , В	$U_{y(5)}$ , В	$U_{y(5)отн}$ , %	$K_{U(7)}$	$U_{S(7)}$ , В	$U_{y(7)}$ , В	$U_{y(7)отн}$ , %
1	-14,83	5,06	523,20	3,82	<b>0,7</b>	0,32	33,09	24,33	<b>73,5</b>	0,31	32,05	23,41	<b>73,0</b>
2	-20,18	5,53	575,67	4,35	<b>0,8</b>	0,29	30,19	22,43	<b>74,3</b>	0,09	9,37	11,09	<b>118,4</b>
3	-16,11	5,81	601,92	4,55	<b>0,8</b>	0,35	36,26	22,19	<b>61,2</b>	0,21	21,76	16,67	<b>76,6</b>
4	-7,97	4,35	445,88	2,72	<b>0,6</b>	0,21	21,53	47,85	<b>222,3</b>	0,34	34,85	65,28	<b>187,3</b>
5	-0,44	4,00	403,20	0,12	<b>0</b>	0,35	35,28	1,06	<b>3,0</b>	0,53	53,42	1,52	<b>2,8</b>



1. Абсолютное значение погрешности расчета напряжения на шинах подстанции, к которым подключен СТК, определенное по формуле (5), не превышает 0,2%.

2. В спектре напряжения на шинах, к которым подключен СТК, преобладающей является 3-я гармоника. Значения  $K_{U(5)}$  и  $K_{U(7)}$  на порядок ниже, чем значения  $K_{U(3)}$ .

3. Относительный вклад СТК в 3-ю гармонику напряжения не превышает 1%. Это объясняется тем, что в электрической схеме СТК (рис. 4) отсутствует путь для протекания тока 3-й гармоники, так как элементы СТК соединены в треугольник и звезду с изолированной нейтралью. Ненулевые значения вклада СТК в напряжение 3-й гармоники получены на основании ненулевых значений тока СТК, которые можно объяснить инструментальной погрешностью средства измерения тока. Таким образом, СТК приведенной конструкции не является источником 3-й гармоники напряжения в электрической сети.

4. Относительный вклад СТК в 5-ю и 7-ю гармоники напряжения в четырех режимах из пяти превышает 60%. Следовательно, СТК является основным источником искажений на указанных частотах. Здесь важно отметить, что в 5-м режиме, в котором СТК генерирует 0,44 Мвар, значение нелинейных искажений тока существенно ниже, чем в других режимах. Это обусловлено тем, что в 5-м режиме тиристорные вентили ТРГ практически полностью открыты и ток ТРГ практически синусоидален.

5. Относительный вклад СТК в 5-ю и 7-ю гармоники напряжения в 4-м режиме превышает 100%. Возможные объяснения этого факта аналогичны случаю с УШР.

**Выводы.** 1. Предложенный подход позволяет оценить влияние одиночного источника искажений на качество электроэнергии в точке присоединения к электрической сети по измеренным значениям тока и напряжения в точке подключения источника.

2. Погрешность результатов расчета напряжения на основной частоте не превышает 0,4% измеренного напряжения на шинах подстанции, что позволяет ожидать высокой точности результатов на частотах высших гармоник.

3. Устройства УШР и СТК ухудшают качество электроэнергии по коэффициенту 5-ю и 7-й гармонической составляющей напряжения. Другие показатели качества электроэнергии при работе этих устройств не ухудшаются. Гармоники более высокого порядка не рассматривались ввиду их малости в спектрах напряжения, полученных при проведении измерений в энергосистеме.

4. В спектре напряжения в большинстве рассмотренных случаев преобладает 3-я гармоника. При этом СТК не является источником тока 3-й гармоники, а относительный вклад УШР в 3-ю гармонику напряжения незначителен (не превышает 10% фона). Таким образом, высокий уровень 3-й гармоники напряжения обусловлен действием других источников в электрической сети.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др.** Управление качеством электроэнергии/Под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издат. дом МЭИ, 2006.
2. **РД 153-34.0-20.527–98.** Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. – М.: НЦ ЭНАС, 2002.
3. **Межгосударственный стандарт 13109–97.** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск: ИПК Изд-во стандартов, 1998.
4. **Управляемые подмагничиванием электрические реакторы:** Сб. статей/Под ред. А.М. Брянцева. 2-е изд., доп. – М.: Знак, 2010.
5. **Долгополов А.Г.** Релейная защита управляемых шунтирующих реакторов. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011.

[18.06.12]

*Авторы: **Карташев Илья Ильич** окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1962 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию «Статические источники реактивной мощности». Заместитель заведующего кафедрой электроэнергетических систем по научной работе «НИУ «МЭИ».*

***Насыров Ринат Ришатович** окончил Институт электроэнергетики (ИЭЭ) в 2010 г. Младший научный сотрудник кафедры электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».*

***Олексюк Борис Викторович** окончил ИЭЭ МЭИ (ТУ) в 2010 г. Инженер кафедры электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».*

***Симуткин Максим Геннадьевич** окончил ИЭЭ НИУ «МЭИ» в 2012 г. Инженер кафедры электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».*

***Тульский Владимир Николаевич** окончил ЭЭФ МЭИ (ТУ) в 2001 г. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения». Заместитель заведующего кафедрой электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».*

***Шамонов Роман Геннадьевич** окончил ЭЭФ МЭИ (ТУ) в 2000 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка методики оценки влияния качества электроэнергии на потери мощности и энергии в электрических сетях». Заместитель начальника службы организации систем оперативно-диспетчерского управления ОАО «ФСК ЕЭС».*