

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БАТАРЕЙ СТАТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

АВТОР:

ШАМОНОВ Р.Г.,  
К.Т.Н.,  
ОАО «ФСК ЕЭС»

**Р**азмещение в энергосистеме электроустановок с нелинейными характеристиками, являющихся источниками высших гармоник тока и напряже-

ния в электрических сетях, может привести к резонансу напряжений или резонансу токов на частотах высших гармоник на подстанциях, на которых установлены БСК.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, высшие гармонические составляющие напряжения и тока, батареи статических конденсаторов, резонанс.



Батарея статических конденсаторов (БСК)

## ВВЕДЕНИЕ

Оценка условий возникновения резонансов напряжений и токов на частотах высших гармонических составляющих при использовании батарей статических конденсаторов (БСК), как правило, выполняется при проектировании и анализе режимов работы электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий [1].

Однако широкое применение БСК на напряжениях 110 и 220 кВ наряду с высокими уровнями гармонических составляющих напряжения в магистральных сетях приводят к необходимости всестороннего анализа влияния данных электроустановок на КЭ в точке их присоединения.

Анализ результатов масштабного обследования ЕНЭС по КЭ, проведенного в 2011–2012 гг. [2], позволяет сделать ряд выводов о влиянии БСК высокого напряжения на уровни гармонических составляющих в электрических сетях, а также сформировать рекомендации по оптимизации применения БСК в сетях 110–220 кВ.

## УКРУПНЕННАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСОВ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

В зависимости от расположения в энергосистеме электроустановок с нелинейными характеристиками, являющихся источниками высших гармоник тока и напряжения в электрических сетях, возможно возникновение резонанса напряжений или резонанса токов на частотах

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ НАЛИЧИИ БСК И УДАЛЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ГАРМОНИК

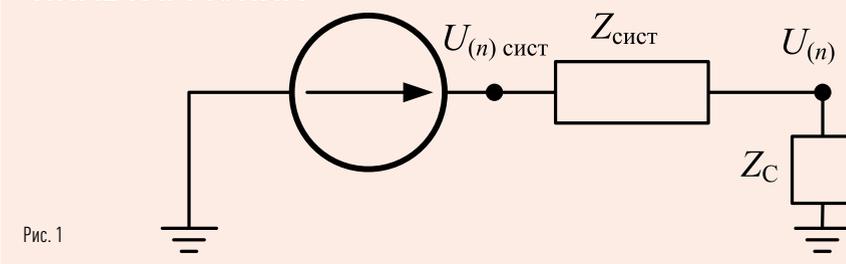


Рис. 1

высших гармоник на подстанции, на которой установлена БСК.

При выборе параметров фильтрокомпенсирующих устройств, необходимых для снижения уровней  $K_U$  и  $K_{U(n)}$ , требуется детальный учет характеристик и режимов работы электрической сети. Однако при решении эксплуатационных задач укрупненная оценка условий возникновения резонансов может быть проведена на основе упрощенных схем, представленных на рис. 1 и 2, где  $Z_{сист}$  – комплексное эквивалентное сопротивление системы по отношению к узлу подключения БСК;  $Z_c$  – комплексное сопротивление

БСК;  $U_{(n)сист}$  – напряжение высшей гармоники в системе;  $U_{(n)}$  – напряжение высшей гармоники в узле, к которому присоединена БСК;  $I_{(n)}$  – ток высшей гармоники искажающей нагрузки.

Схема рис. 1 соответствует случаю, при котором доминирующий источник гармоник удален от узла присоединения БСК и представлен источником напряжения на частоте высшей гармоники. При такой схеме возможно возникновение резонанса напряжений. При этом даже при сравнительно небольшом уровне  $U_{(n)сист}$  напряжение в узле включения БСК  $U_{(n)}$  может быть очень велико.

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ НАЛИЧИИ БСК И ИСТОЧНИКЕ ГАРМОНИК, СОЕДИНЕННЫХ В ОДНОМ УЗЛЕ С БСК

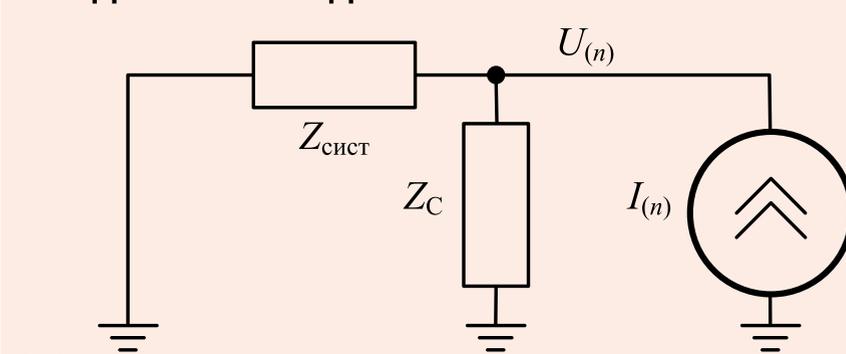


Рис. 2

### СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ НАЛИЧИИ БСК И УДАЛЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ГАРМОНИК БЕЗ УЧЕТА АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

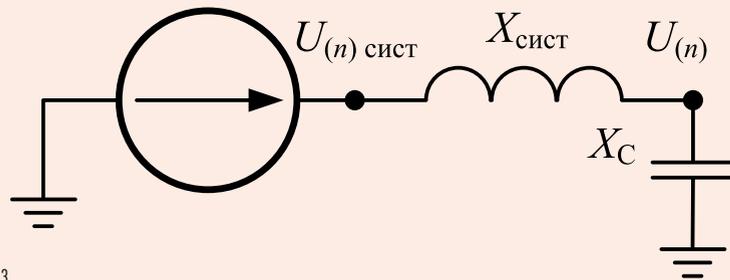


Рис. 3

Во втором случае (см. рис. 2) доминирующий источник гармоник присоединен непосредственно к узлу подключения БСК и представлен источником тока на частоте высшей гармоники. При данной схеме возможно возникновение резонанса токов, при котором при небольших значениях  $U_{(n)}$  и  $I_{(n)}$  токи гармоник, протекающие через  $Z_{сист}$  и  $Z_c$ , будут очень велики, что может привести к повреждению батареи и прочих элементов сети.

При укрупненной оценке условий возникновения резонансов для электрических сетей 110 кВ и выше активными сопротивлениями элементов можно пренебречь. Соответственно, схемы рис. 1 и 2 можно упростить до схем, представленных на рис. 3 и 4, где:

$X_{сист}$  – эквивалентное индуктивное сопротивление системы, вычисляемое по формуле

$$X_{сист} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} I_{кз}}, \quad (1)$$

где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение в узле присоединения БСК, кВ;

$I_{кз}$  – ток трехфазного короткого замыкания в узле присоединения БСК, кА;

$X_c$  – емкостное сопротивление БСК, вычисляемое по формуле

$$X_c = \frac{(U_{ном})^2}{Q_{ном}}, \quad (2)$$

где  $Q_{ном}$  – номинальная мощность БСК, Мвар.

Для обоих случаев угловая резонансная частота равна:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

где индуктивность системы равна:

$$L = \frac{X_{сист}}{2\pi f_{ном}},$$

где  $f_{ном}$  – номинальная частота 50 Гц; емкость БСК равна:

$$C = \frac{1}{2\pi f_{ном} X_c},$$

Соответственно, порядок гармоники, на которой возможен резонанс, равен:

$$n_0 = \frac{\omega_0}{2\pi f_{ном}}, \quad (4)$$

Таким образом, имея информацию о расположении в энергосистеме основных источников высших гармоник, по данным выражениям достаточно просто выполнить приближенную оценку условий возникновения резонансов при принятии решения об установке дополнительных БСК в сети, а также при необходимости изменения схемы сети и структуры энергосистемы

(при выводе оборудования в ремонт или из эксплуатации, строительстве новых объектов электроэнергетики).

### ОЦЕНКА ПОРЯДКОВ ГАРМОНИК, НА КОТОРЫХ ВОЗМОЖНЫ РЕЗОНАНСЫ, В СЕТЯХ 110 И 220 КВ ПРИ РАБОТЕ БСК

В ЕНЭС распространены БСК следующих единичных типовых мощностей: на номинальном напряжении 220 кВ – 100 Мвар; на номинальном напряжении 110 кВ – 25, 42 и 52 Мвар.

В соответствии с формулами (1) – (4) построены зависимости порядка резонансной частоты от тока трехфазного короткого замыкания, отражающего эквивалентное индуктивное сопротивление системы в узле присоединения БСК (рис. 5–8).

Аналогичным образом можно построить соответствующие зависимости для БСК произвольной мощности. Данные зависимости удобны при проведении экспресс-оценки возможного влияния БСК на уровни гармоник в сети как при анализе результатов контроля КЭ, так и при оперативном управлении с оптимизацией числа БСК, находящихся в работе, для снижения в сети уровней показателей, характеризующих искажения синусоидальности кривой напряжения,  $K_U$  и  $K_{U(n)}$  в сети.

Из представленных графиков можно определить значения  $I_{кз}$ , характеризующие эквивалентные сопротивления системы, при которых следует ожидать резонансные повышения

### СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ НАЛИЧИИ БСК И ИСТОЧНИКЕ ГАРМОНИК, СОЕДИНЕННЫХ В ОДНОМ УЗЛЕ С БСК, БЕЗ УЧЕТА АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

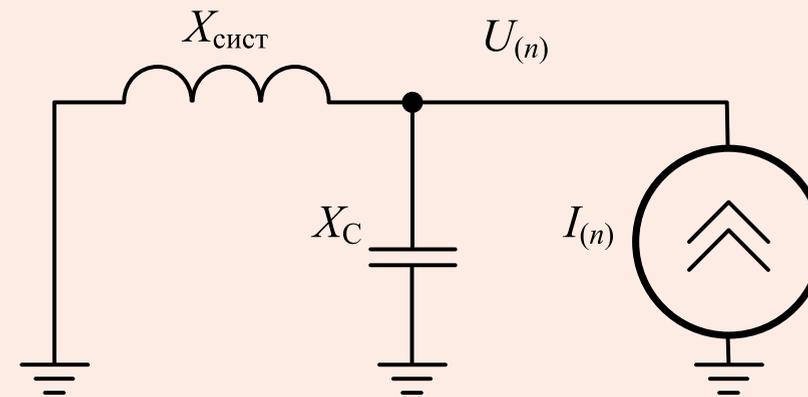


Рис. 4

### ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 25 МВАР ПРИ КОЛИЧЕСТВЕ ВКЛЮЧЕННЫХ БАТАРЕЙ ОТ 1 ДО 2

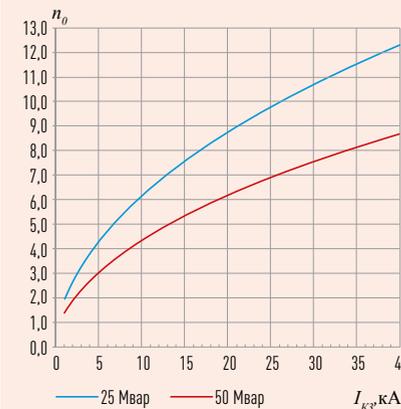


Рис. 6

### ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 42 МВАР ПРИ КОЛИЧЕСТВЕ ВКЛЮЧЕННЫХ БАТАРЕЙ ОТ 1 ДО 2

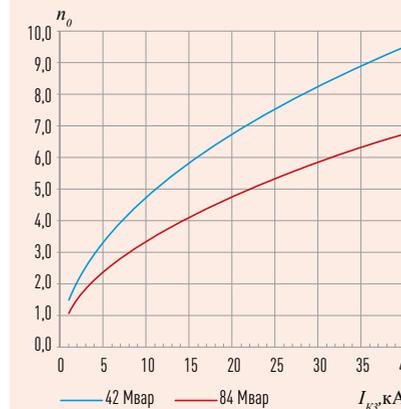


Рис. 7

### ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ БСК 220 КВ МОЩНОСТЬЮ 100 МВАР ПРИ КОЛИЧЕСТВЕ ВКЛЮЧЕННЫХ БАТАРЕЙ ОТ 1 ДО 4

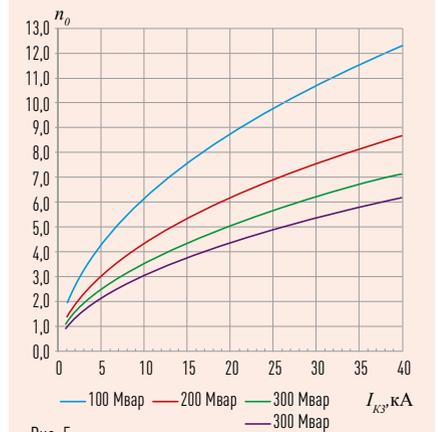


Рис. 5

### ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 52 МВАР ПРИ КОЛИЧЕСТВЕ ВКЛЮЧЕННЫХ БАТАРЕЙ ОТ 1 ДО 2

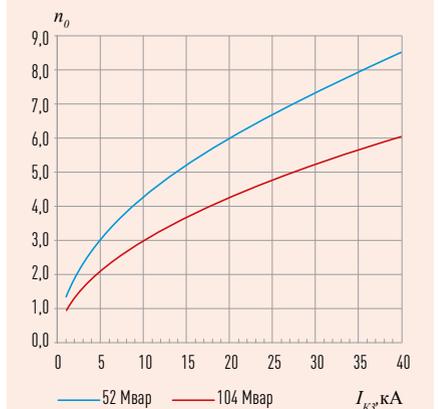


Рис. 8

напряжения или повышенную нагрузку БСК токами высших гармоник.

Так, например, для одной БСК 220 кВ мощностью 100 Мвар следует ожидать резонансов на характерных наиболее значимых в сетях порядках гармоник при  $I_{кз}$ , близких к следующим значениям: для  $n_0 = 3$  при  $I_{кз} = 2,5$  кА; для  $n_0 = 5$  при  $I_{кз} = 7$  кА; для  $n_0 = 7$  при  $I_{кз} = 13$  кА; для  $n_0 = 11$  при  $I_{кз} = 32$  кА.

Общие закономерности, демонстрируемые данными зависимостями, следующие:

- чем мощнее система (меньше  $X_{сист}$  и больше  $I_{кз}$  в узле), тем в зону более высоких частот смещается резонанс при одной и той же мощности БСК;
- при увеличении мощности БСК в узле резонансная частота снижается.

В электрических сетях БСК, как правило, устанавливаются в узлах с большими эквивалентными сопротивлениями системы (малыми значениями  $I_{кз}$ ), т.е. там, где потребность в регулировании напряжения наибольшая. На напряжении 110 кВ большая доля БСК в ЕНЭС установлена в узлах с  $I_{кз}$  меньше 13 кА. Соответственно, условия для резонансов возникают на частотах гармоник 3 и 5 порядков, значения напряжений которых в сетях и так преобладают над гармониками прочих порядков.

Однако БСК, проводимость которой возрастает с ростом частоты, может оказывать и положительный эффект, шунтируя часть гармоник более высоких порядков. В связи с этим представляет интерес фактическое изменение уровней  $K_U$  и  $K_{U(n)}$  в узле при присоединении БСК.

Далее представлены результаты анализа измерений высших гармо-

### ИЗМЕНЕНИЕ $K_U$ И $K_{U(n)}$ НА ПС 1 ПРИ КОММУТАЦИИ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 25 МВАР ( $n_0 = 5,1$ )

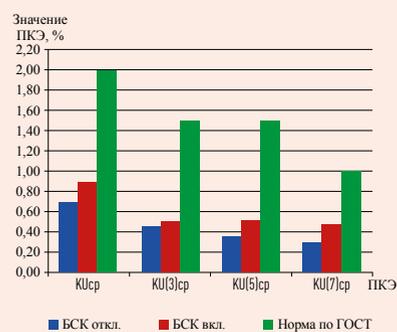


Рис. 9

### ИЗМЕНЕНИЕ $K_U$ И $K_{U(n)}$ НА ПС 2 ПРИ КОММУТАЦИИ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 46 МВАР ( $n_0 = 5,2$ )

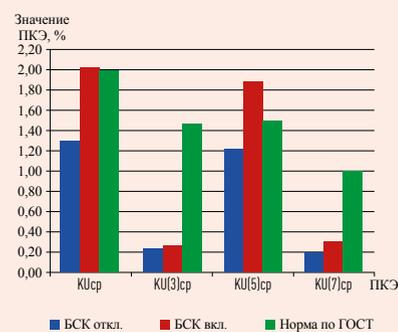


Рис. 10

### ИЗМЕНЕНИЕ $K_U$ И $K_{U(n)}$ НА ПС 3 ПРИ КОММУТАЦИИ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 55 МВАР ( $n_0 = 6,2$ )

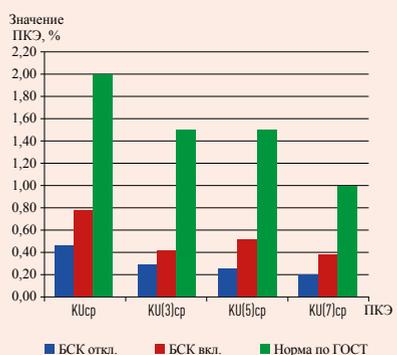


Рис. 11

### ИЗМЕНЕНИЕ $K_U$ И $K_{U(n)}$ НА ПС 4 ПРИ КОММУТАЦИИ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 52 МВАР ( $n_0 = 3,2$ )

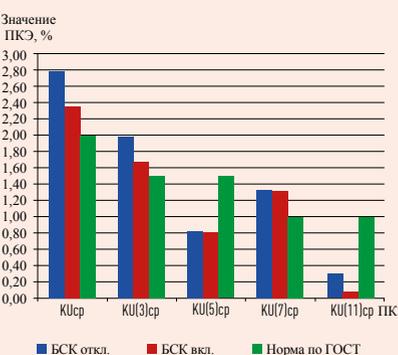


Рис. 12

### ИЗМЕНЕНИЕ $K_U$ И $K_{U(n)}$ НА ПС 5 ПРИ КОММУТАЦИИ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 52 МВАР ( $n_0 = 4,2$ )

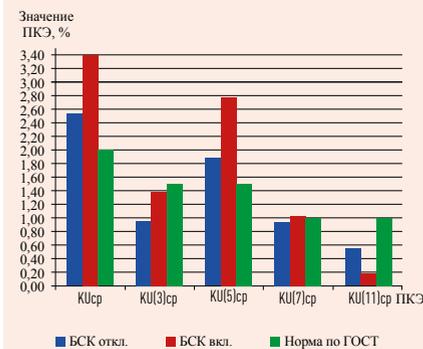


Рис. 13

### ИЗМЕНЕНИЕ $K_U$ И $K_{U(n)}$ НА ПС 6 ПРИ КОММУТАЦИИ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 42 МВАР ( $n_0 = 4,1$ )

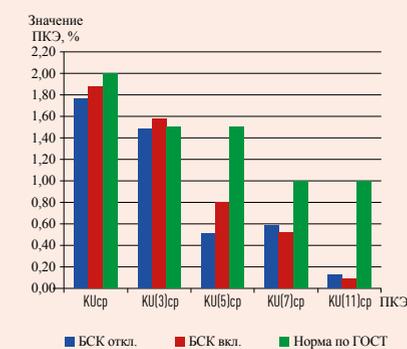


Рис. 14

### ИЗМЕНЕНИЕ $K_U$ И $K_{U(n)}$ НА ПС 7 ПРИ КОММУТАЦИИ БСК 110 КВ МОЩНОСТЬЮ 38 МВАР ( $n_0 = 6,3$ )

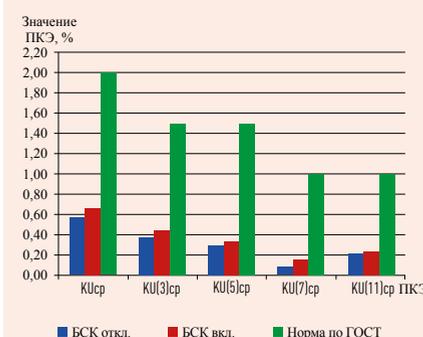


Рис. 15

### ИЗМЕНЕНИЕ $K_U$ И $K_{U(n)}$ НА ПС 8 ПРИ КОММУТАЦИИ БСК 220 КВ МОЩНОСТЬЮ 200 МВАР ( $n_0 = 5,1$ )

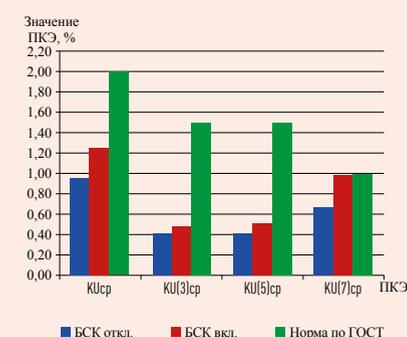


Рис. 16

ник на шинах 110–220 кВ подстанций ЕНЭС с установленными БСК.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕНЕНИЙ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ПОДСТАНЦИЙ С УСТАНОВЛЕННЫМИ БСК 110–220 КВ

В ходе инструментального обследования ЕНЭС по КЭ проведены измерения на шинах 43 подстанций с установленными БСК 110–220 кВ. Наиболее показательными являются измерения, в течение которых осуществлялись коммутации БСК на подстанции.

На рис. 9–16 отражены результаты измерений, характеризующие изменения средних для трех фаз значений  $K_U$  и  $K_{U(n)}$  (3, 5, 7 и 11-го порядков) на шинах различных подстанций при коммутации БСК.

Как следует из представленных результатов, во всех случаях, кроме одного (ПС 4, рис. 12), отключение БСК приводило к снижению  $K_U$  на 15–25% и  $K_{U(n)}$  на 30–40% (для гармоник порядков, близких к расчетной резонансной частоте) от исходных уровней показателей КЭ (ПКЭ) в узле при включенных БСК. Наибольшее влияние БСК проявлялось на шинах подстанций, на которых уровни  $K_U$  и  $K_{U(n)}$  были близки к нормативным значениям по ГОСТ [3] или превышали их. Из этого следует вывод о том, что если в сети без БСК уровни  $K_U$  и  $K_{U(n)}$  достигают 70% и выше от нормативных значений, установка (включение) БСК наиболее вероятно приведет к росту гармоник напряжения и нарушению нормативных требований

на частотах, близких к резонансной. Соответственно, при сверхнормативных уровнях  $K_U$  и  $K_{U(m)}$  в сети следует по возможности избегать включений БСК в работу, регулируя напряжение на шинах подстанции преимущественно с помощью РПН трансформаторов.

В табл. 1 представлены результаты измерений  $K_U$  и  $K_{U(m)}$  (средние для трех межфазных напряжений) на шинах подстанций с включенными БСК, на которых не производились коммутации батарей в период проведения контроля КЭ.

Как следует из представленных результатов, во многих узлах с присоединенными БСК нарушались нормативные требования по показателям  $K_U$  и/или  $K_{U(m)}$ . Несмотря на то что наибольшие уровни гармоник напряжения не всегда фиксировались на частотах, ближайших к резонансной частоте, с учетом предыдущих выводов, сделанных по итогам измерений ПКЭ при коммутациях БСК, можно утверждать, что ряду зафиксированных нарушений способствовала работа БСК на подстанции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА В ПРИСОЕДИНЕНИЯХ БСК 110 КВ

При проведении измерений ПКЭ в ЕНЭС контроль характеристик токов в присоединениях БСК 110–220 кВ выполнялся лишь на небольшом числе подстанций. В связи с этим для данной статьи отсутствовало достаточное количество данных, необходимых для подведения целостного заключения об условиях возникновения резонансов токов с участием таких устройств. Тем не менее ряд имеющихся результа-

## УРОВНИ ПКЭ В УЗЛАХ ПОДКЛЮЧЕНИЯ БСК

№ п/п	U <sub>ном</sub> , кВ	Q <sub>ном</sub> , Мвар	n <sub>0</sub>	K <sub>U</sub> , %	K <sub>U(3)</sub> , %	K <sub>U(5)</sub> , %	K <sub>U(7)</sub> , %
1	220	100	9,8	1,54	0,98	1,20	0,33
2	110	104	4,7	1,55	0,37	0,83	<b>1,26</b>
3	110	100	3,3	1,19	1,08	0,60	0,30
4	110	58	3,4	<b>2,91</b>	<b>2,50</b>	1,44	0,65
5	110	58	5,8	1,78	1,10	1,48	0,34
6	110	56	6,4	1,62	0,71	0,55	0,28
7	110	56	4,3	1,14	0,37	0,97	0,44
8	110	54	4,8	<b>2,60</b>	<b>2,20</b>	0,82	0,70
9	110	54	5,1	1,55	0,21	<b>1,52</b>	0,36
10	110	52	3,0	1,88	0,81	1,42	0,52
11	110	52	3,8	<b>3,31</b>	<b>1,61</b>	<b>2,38</b>	<b>2,11</b>
12	110	52	4,9	<b>2,09</b>	0,43	<b>1,81</b>	0,98
13	110	52	6,5	0,94	0,32	0,85	0,34
14	110	52	4,2	1,08	1,04	0,38	0,18
15	110	52	5,3	<b>2,12</b>	<b>2,33</b>	1,16	0,70
16	110	52	3,3	1,76	0,55	<b>1,83</b>	0,30
17	110	50	5,2	0,56	0,61	0,65	0,44
18	110	47	6,1	0,99	0,51	0,82	0,40
19	110	46	7,7	<b>2,31</b>	<b>3,49</b>	1,04	<b>1,27</b>
20	110	46	7,5	1,66	0,59	1,24	0,68
21	110	40	7,8	1,23	0,37	1,05	0,50
22	110	40	5,7	1,44	0,44	1,21	0,82
23	110	20	4,5	1,20	0,35	0,84	0,54
24	110	20	8,5	<b>2,27</b>	0,99	1,21	<b>1,69</b>

Таблица 1 Примечание: жирным шрифтом выделены значения ПКЭ, для которых нарушались требования ГОСТ

тов измерений позволяет сделать некоторые выводы.

В табл. 2 приведены результаты измерений во вводах нескольких БСК 110 кВ.

Здесь  $I$  – ток в присоединении БСК, в % от номинального тока батареи;  $\delta U$  – установившееся отклонение напряжения в узле;  $K_I$  – коэффициент искажения синусоидальности кривой тока в присоединении БСК;  $K_{I(n)}$  – коэффициент n-й гармонической составляющей тока в присоединении БСК. Все значения параметров – это средние за весь период измерений (2–3 суток) для трехфазных (межфазных) значений.

Как следует из полученных результатов, токи в присоединениях БСК на 10–14% превышали номинальные токи батарей. При этом при измерениях № 5 и 6 в узлах превышались нормально допустимые значения  $K_U$  и  $K_{U(m)}$ , установленные для сетей 110–220 кВ в [3], но не превышались предельно допустимые значения.

В соответствии с инструкциями по эксплуатации БСК токи в них не должны превышать номинальный ток более чем на 30% как за счет повышения напряжения (не более чем до 1,1 от номинального), так и за счет высших гармоник тока.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЖИМА В ПРИСОЕДИНЕНИЯХ БСК 110 КВ

№ п/п	n0	I, %	δU, %	K <sub>U</sub> , %	K <sub>I</sub> , %	K <sub>I(3)</sub> , %	K <sub>I(5)</sub> , %	K <sub>I(7)</sub> , %	K <sub>I(11)</sub> , %	K <sub>I(13)</sub> , %
1	8,5	113,7	5,6	1,8	13,7	2,2	4,6	9,1	7,3	3,5
2	4,9	109,8	6,4	1,8	10,9	1,1	7,6	6,3	2,5	2,6
3	4,2	111,6	9,6	1,7	2,8	2,1	0,8	0,8	0,5	0,5
4	4,5	112,1	7,1	0,9	7,8	1,0	3,1	2,9	6,2	1,2
5	3,4	110,2	6,1	2,4	10,4	5,9	6,2	4,4	1,5	0,6
6	3,8	113,8	9,0	2,2	14,0	3,3	7,6	8,6	1,7	1,2

Таблица 2

Следовательно, выявленная перегрузка БСК допустима.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что, если на вводе БСК 110–220 кВ  $K_U$  и  $K_{U(m)}$  не превышают предельно допустимых значений, установленных в [3], перегрузка БСК токами высших гармоник маловероятна. Это косвенно подтверждает малое количество аварийных отключений и повреждений БСК 110–220 кВ на участках ЕНЭС, на которых  $K_U$  и  $K_{U(m)}$  не выходят за указанные пределы. В то же время на участках сети, на которых без батарей наблюдаются уровни  $K_U$  и  $K_{U(m)}$  выше предельно допустимых значений, решения о включении БСК должны приниматься с оценкой возможных условий возникновения резонанса токов и перегрузки батарей токами высших гармоник.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен упрощенный подход для оценки условий возникновения резонансов напряжений и токов на частотах высших гармонических составляющих в электрических сетях 110–220 кВ. Данный подход может быть использован при анализе результатов измерений показателей КЭ в сетях, а также при управлении БСК с целью снижения уровней гармоник.

На основе анализа результатов измерений гармоник на шинах 110–220 кВ подстанций ЕНЭС с БСК сделаны следующие выводы:

- отключение БСК в большинстве случаев приводит к снижению  $K_U$  на 15–25% и  $K_{U(m)}$  на 30–40 % (для гармоник порядков близких к расчетной резонансной частоте) от исходных уровней ПКЭ в узле при включенных БСК;
- если в сети без БСК уровни  $K_U$  и  $K_{U(m)}$  достигают 70% и выше от нормативных значений, установка (включение) БСК наиболее вероятно приведет к росту гармоник напряжения и нарушению нормативных требований на частотах, близких к резонансной;
- если на вводе БСК 110–220 кВ  $K_U$  и  $K_{U(m)}$  не превышают предельно допустимых значений, установленных в ГОСТ, перегрузка БСК токами высших гармоник маловероятна;
- на участках сети, на которых возможны уровни  $K_U$  и  $K_{U(m)}$  выше предельно допустимых значений,

решения о включении БСК должны приниматься с оценкой возможных условий возникновения резонанса токов и перегрузки батарей токами высших гармоник; при сверхнормативных уровнях  $K_U$  и  $K_{U(m)}$  в сети следует по возможности избегать включений БСК в работу, регулируя напряжение на шинах подстанции преимущественно с помощью РПН трансформаторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в сетях промпредприятий. 4-я ред. – М.: Энергоатомиздат, 2000.
2. Большаков О., Воронин В., Шамонов Р., Тульский В., Толстов М. Автоматизация анализа качества электроэнергии в ЕНЭС // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2013. № 1(16). – С. 56–62.
3. ГОСТ Р 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2013.