

УДК 621.314.26

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-131-142

Применение устройств ограничения высших гармоник на основе батарей статических конденсаторов в автономной энергосистеме*

В.М. ЗЫРЯНОВ¹, Н.Г. КИРЬЯНОВА², Н.А. МИТРОФАНОВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: zvtov@ngs.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: kiryanova-ng@ya.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: n.mitrofanov@elprotect.net

Для современных автономных энергосистем нефтегазодобывающих регионов характерна высокая доля двигательной нагрузки с синхронными и асинхронными двигателями единичной мощности, соизмеримой с мощностью генераторных агрегатов электростанций, с устройствами плавного пуска, частотно-регулируемыми электроприводами и выпрямительной нагрузкой. Для них существенной является проблема высших гармоник тока и напряжения, которые значительно ухудшают условия эксплуатации основных элементов силового оборудования энергосистем и негативно влияют на устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Проведено экспериментальное исследование качества электроэнергии в автономной системе электроснабжения одного из предприятий нефтегазодобывающей отрасли на шинах 6 кВ подстанции 35/6 кВ. Выявлен гармонический состав токов и напряжений. Предложены схемные конфигурации фильтрокомпенсирующих устройств, которые применимы при разных условиях эксплуатации электрооборудования и в зависимости от поставленных целей, могут использоваться как обособленно, так и в виде системного комплекса. Рассчитаны параметры этих устройств. Показана эффективность рассчитанного резонансного фильтра высших гармоник.

Ключевые слова: высшие гармоники, анализатор качества, гармонический состав, коэффициент искажения, частотный спектр, фильтрокомпенсирующие устройства, качество электроэнергии

ВВЕДЕНИЕ

В структуре современного электропотребления неуклонно растет доля нелинейной нагрузки прежде всего за счет широкого применения различного рода и назначения преобразователей на полупроводниковой элементной базе.

* Статья получена 21 декабря 2017 г.

Вследствие этого возрастает и ее негативное влияние на один из важнейших показателей качества электроэнергии – коэффициент искажения синусоидальной формы кривой напряжения. В свою очередь, несинусоидальность напряжения негативно влияет на силовое оборудование, устройства релейной защиты, автоматику, средства телемеханики и связи.

Экономический ущерб от высших гармоник (ВГ) напряжения в системах электроснабжения обусловлен ухудшением условий функционирования оборудования энергосистем и потребителей, что приводит к повышенным потерям мощности, снижению надежности функционирования энергосистемы и сокращению срока службы оборудования. Задача повышения качества электроэнергии становится всё более актуальной.

Несинусоидальность напряжения и тока вызывает дополнительные потери в основных силовых элементах энергосистемы, затрудняет компенсацию реактивной мощности с помощью устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ), сокращает срок службы изоляции электрических машин, приводит к возникновению дополнительной вибрации электрических машин, снижает эффективность функционирования устройств автоматики, телемеханики и связи [1]. Всё это обусловлено тем, что большая часть оборудования – генераторы, трансформаторы, двигатели, кабели, УКРМ – проектируются для работы с синусоидальной формой кривых токов и напряжений. В их конструкции, как правило, не учитывается дополнительное воздействие токов высших гармоник, что в итоге нередко приводит к серьезным технологическим сбоям и значительным экономическим издержкам, учитывая неуклонный рост количества и мощности нелинейных аппаратов в электроэнергетике.

Перетоки мощности на высших гармониках в сети значительно загружают установленные на подстанциях (ПС) и у потребителей батареи статических конденсаторов (БСК) со сторонами 6 и 0,4 кВ соответственно. В связи с загрузкой токами ВГ в большей части возможных режимов БСК 0,4 кВ не способны обеспечить полную расчетную компенсацию реактивной мощности в узле нагрузки. При подключении автоматической системой управления ступеней БСК возникает переходной процесс, вызванный изменением параметров сети. В результате в конденсаторной установке помимо расчетных токов основной гармоники, на которые установка рассчитана, протекают дополнительные токи высших гармоник, что в итоге может привести к перегрузке БСК токами ВГ с выходом из строя автоматов и конденсаторов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Анализ работы системы в условиях несинусоидальных напряжений и токов проведен в одной из автономных энергосистем, обслуживающих нефтегазодобывающую отрасль, в составе которой имеется значительная доля нелинейной нагрузки. В сети 6 и 0,4 кВ установлены устройства компенсации реактивной мощности, выполненные без защитных реакторов. Проблема качества электроэнергии на напряжении 0,4 кВ актуальна и для городских распределительных сетей [2, 3].

Решение установки БСК на стороне 6 кВ для компенсации реактивной мощности является обоснованным, но при выборе установок не были учтены

особенности работы в условиях автономной энергосистемы, а именно то, что в такой сети значительная часть нагрузки имеет нелинейную вольт-амперную характеристику. БСК, в свою очередь, является элементом сети, который способствует распространению ВГ по энергосистеме.

Степень искажения кривых тока и напряжения количественно характеризуется суммарным коэффициентом гармонических составляющих и коэффициентом n -й гармонической составляющей. Первый описывает влияние всего высокочастотного спектра высших гармоник в сети на искажение основной гармоники напряжения или тока. Коэффициент n -й гармонической составляющей отражает долю рассматриваемой гармоники в составе кривой по отношению к основной частоте. Стандартами РФ и зарубежных стран регламентированы допустимые значения для этих коэффициентов в энергосистеме, превышение которых приводит к значительному технологическому и экономическому ущербу. В табл. 1 и 2 приведены выдержки из ГОСТ 32144-2013 РФ [4], а в табл. 3 и 4 – из Стандартов Австралии (AS 2279.2) [5] и США (IEEE Std 519) [6].

Таблица 1

Выдержки из ГОСТ 32144-2013 РФ

Нормально допустимое значение k_{HCl} , %, при $U_{ном}$, кВ				Предельно допустимое значение k_{HCl} , %, при $U_{ном}$, кВ			
0,38	6...20	35	110...330	0,38	6...20	35	110...330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Таблица 2

Выдержки из ГОСТ 32144-2013 РФ

Нечетные гармоники U_v , %, не кратные трем при $U_{ном}$, кВ				Нечетные гармоники U_v , %, кратные трем при $U_{ном}$, кВ				Четные гармоники U_v , %, при $U_{ном}$, кВ			
v	0,38	6...20	35	v	0,38	6...20	35	v	0,38	6...20	35
5	6,0	4,0	3,0	3	5,0	3,0	3,0	2	2,0	1,5	1,0
7	5,0	3,0	2,5	9	1,5	1,0	1,0	4	1,0	0,7	0,5
11	3,5	2,0	2,0	15	0,3	0,3	0,3	6	0,5	0,3	0,3
13	3	2,0	1,5	21	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3
17	2	1,5	1,0	>21	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3

Таблица 3

Выдержки из Стандарта Австралии AS 2279.2

$U_{сети}$, кВ	Максимально допустимые значения токов ВГ, мА/кВт							
	5	7	11	13	17	19	23	> 23
6,6	3,5	2,5	1,6	1,3	1,0	0,9	0,76	5,0
22	1,8	1,3	0,82	0,69	0,53	0,47	0,39	0,7
33	1,2	0,86	0,55	0,46	0,35	0,32	0,26	0,24

Таблица 4

Выдержки из стандарта США IEEE Std 519

Максимально допустимые значения токов ВГ в % от тока нагрузки I_L						
I_v/I_L	$v < 11$	$11 \leq v < 17$	$17 \leq v < 23$	$23 \leq v < 35$	$v \geq 35$	$k_{НС}$
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5
20...50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8
50...100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12
100...1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15

В рассматриваемой автономной энергосистеме имеется газопоршневая (ГПЭС) и газотурбинная (ГТЭС) электростанции, работающие на попутном газе, суммарной мощностью 170 МВт, которые обеспечивают электроэнергией всю инфраструктуру добычи и транспортировки нефти, включая жилой и административный секторы. Для нефтедобывающих регионов характерна следующая структура электропотребления: синхронная и асинхронная нагрузка с двигателями значительной единичной мощности, с устройствами плавного пуска и частотно-регулируемыми электроприводами, выпрямительная нагрузка с устройствами подогрева скважин и станциями управления электроцентробежных насосов (ЭЦН), осветительная и бытовая. В состав энергосистемы 10 ПС 35/6 кВ и более входит 100 комплектных трансформаторных подстанций (КТПН).

Для оценки степени искажения синусоидальности напряжения и тока в распределительной сети на одной из подстанций 35/6 кВ на часть отходящих фидеров, вводе и БСК на напряжении 6 кВ устанавливался анализатор качества электроэнергии «Ресурс-UF2М». Результаты замеров представлены в табл. 5 и 6, где $k_{НСuAB}$ – значение суммарного коэффициента гармонических составляющих линейного напряжения, $k_{НСun}$ – значения коэффициентов n -й гармонической составляющей по напряжению. Аналогично описанным выше коэффициентам по напряжению в табл. 5 и 6 отображены значения коэффициентов по току.

Осциллограммы токов, полученные с помощью осциллографа Hantek DSO 1102B, приведены на рис. 1.

Результаты замеров показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ПС 35/6 кВ на стороне 6 кВ превышает регламентированные ГОСТ 32144-2013 РФ нормативы. Значение коэффициента 5-й гармоники также выходит за нормированные стандартом пределы. Ввиду отсутствия единого стандарта в РФ по предельно допустимым гармоникам тока для сопоставления гармонического состава тока используем зарубежные стандарты: Австралийский стандарт AS 2279.2 и стандарт США IEEE Std 519. Здесь, так же как и в случае с напряжением, наблюдается превышение нормативов, но, в отличие от гармоник напряжения, в процентном отношении частотные искажения по току имеют весьма существенные значения и в некоторых случаях составляют больше половины основной гармоники. Такое искажение формы кривой тока, согласно стандарту США, считается недопустимым, так как оборудование энергосистемы не рассчитано на эксплуатацию при таком качестве электроэнергии. Очевидно, что в РФ норми-

рование степени искажения формы кривой тока также со временем будет введено.

Таблица 5

**Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и тока
ПС 35/6 кВ на стороне 6 кВ**

Узел замера	$k_{HClA}, \%$	$k_{HClB}, \%$	$k_{HClC}, \%$	$k_{HClAB}, \%$	$k_{HClBC}, \%$	$k_{HClCA}, \%$
ф. 284-17	34,1	33,1	35,1	7,4	7	7,1
ф. 284-08	61,1	59,3	63,5	7,1	7,6	7,5
ПС 284-ввод	11,4	10	10,5	7,1	6,9	7
ПС 284-БСК	40,5	42,5	41,5	7,3	6,9	7

Таблица 6

**Коэффициенты ν -й гармонической составляющей напряжения и тока
ПС 35/6 кВ на стороне 6 кВ**

Узел замера	$k_{HCl\nu}, \% / k_{HCl\nu}, \% / I_{\nu}, A$					
	$\nu = 2$	$\nu = 3$	$\nu = 5$	$\nu = 7$	$\nu = 11$	$\nu = 13$
ф. 284-17	0,12/2,06 /1,53	0,60/1,92 /1,43	7,3/30,62 /22,84	2,03/14,66 /10,9	1,05/5,96 /4,44	0,55/4,02 /3,07
ф. 284-08	0,15/6,91 /2,71	0,25/4,68 /2,47	7,0/60,33 /31,85	2,42/12,68 /6,69	1,22/7,32 /3,86	0,32/1,93 /1,02
ПС 284-ввод	0,12/0,67 /3,42	0,36/0,7 /3,5	7,04/10,94 /55,8	1,9/4,56 /23,3	1,07/0,33 /1,7	0,78/1,02 /5,1
ПС 284-БСК	0,17/0,33 /0,20	0,35/0,75 /0,46	8,06/41,18 /25,3	2,5/18,4 /11,3	1,03/12,8 /7,86	0,56/7,8 /4,8

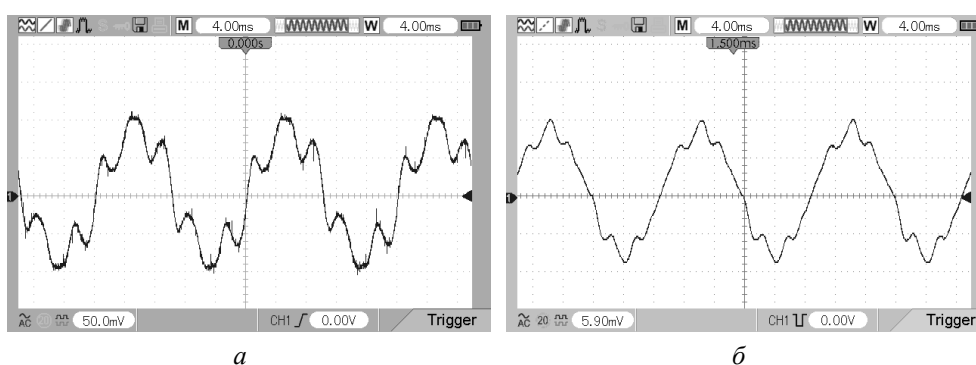


Рис. 1. Осциллограммы токов ПС 35/6 кВ на отходящих фидерах 6 кВ:
а – фидер № 1; б – фидер № 2

2. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Для снижения уровня высших гармоник применяются силовые резонансные фильтры. Рассматриваются несколько различных конфигураций этих устройств. На рис. 2, б представлена типовая схема резонансного фильтра. При равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений на частоте настройки фильтра ν_p наступает резонанс напряжений и реактивное сопротивление цепи становится практически равным нулю, а ток резонансной частоты закорачивается фильтром, не попадая в сеть [7].

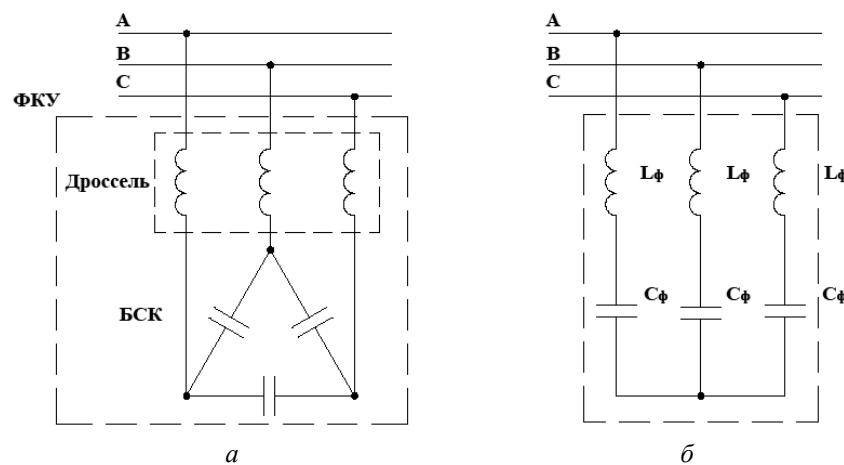


Рис. 2. Конфигурация фильтров:

а – модернизация БСК; б – вновь вводимое ФКУ

Такой тип фильтра является весьма эффективным, так как необходимая мощность батарей конденсаторов, устанавливаемых в фильтр, в некотором приближении равна мощности той гармоники тока, на которую настроен фильтр. При выборе мощности фильтра необходимо также учесть долю тока основной гармоники и токов остальных ВГ [8], которые также попадают в фильтр. Учитывая особенности исследуемой автономной энергосистемы, предлагается один из двух вариантов размещения резонансного фильтра на подстанциях 35/6 кВ дополнить БСК 6 кВ дросселями, включаемыми в цепь последовательно с конденсаторными батареями (рис. 2, а), и установить в дополнение к БСК новое фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) на шинах той же подстанции (рис. 2, б).

Применение фильтров на ПС со стороны 6 кВ предотвратит распространение ВГ по энергосистеме, локализуя искажения, генерируемые нелинейной нагрузкой, в пределах каждого из фидеров. Также вопрос использования силовых фильтрах поднимается в [9]. Дополнение действующих БСК дросселями упрощает этапы ввода оборудования в эксплуатацию. Использование ФКУ совместно с реконструкцией БСК повысит компенсирующую способность данного узла системы и в большей степени снизит распростра-

нение ВГ по сети 6 кВ. Кроме того, повысится надежность работы оборудования энергосистемы и произойдет разгрузка БСК по токам ВГ, тем самым увеличится их срок службы.

В электрических сетях 6...35 кВ во всех случаях БСК защищаются от перегрузки токами ВГ с помощью последовательно включенного реактора [10]. При $k_{НСuAB} > k_{НСun}$ цепь «реактор–батарея» должна обеспечить снижение уровней ВГ и рассчитывается как ФКУ [10]. В рассматриваемом случае БСК в системе уже установлены и требуется лишь их реконструкция – дополнение реакторами.

Техническими условиями на эксплуатацию БСК предусматриваются ограничения превышения напряжения и тока сверх номинальных значений коэффициентами c_u, c_i [11]. Исследования гармонического состава различных типов преобразователей рассмотрены в работах [12–15]. Расчет приводится для схемы, изображенной на рис. 2, б.

а) Условие ограничения перегрузки по напряжению

Напряжение на БК не превышает допустимого, если выполняется условие

$$K_Q \cdot k_u \cdot \alpha_p < c_u, \quad (1)$$

где $\alpha_p = v_p^2 / (v_p^2 - 1)$, $K_Q = 1 + Q_p / S_k$, $k_u = U_m / U_{ном p}$;

$$v_1 = 5 : 1.005 < 1.3,$$

$$v_2 = 7 : 0.977 < 1.3,$$

$$v_3 = 11 : 0.964 < 1.3.$$

б) Условие ограничения перегрузки по току

$$\sqrt{I_{1p}^2 + I_{vp}^2} < c_i \cdot I_{ном p}, \quad (2)$$

где I_{1p} – ток 1-й гармоники, I_{vp} – ток v -й гармоники, $I_{ном p}$ – номинальный ток;

$$v_1 = 5 : 115.3 < 123,$$

$$v_2 = 7 : 47.8 < 61.5,$$

$$v_3 = 11 : 43 < 61.5.$$

Определение мощности БК ФКУ v -й гармоники:

$$Q_{vp} = 1.2 \cdot k_c \cdot U_{ном p} \cdot I_{vp}, \quad (3)$$

где $k_c = \sqrt{3}$;

$$v_1 = 5 : Q_{5p} = 1000 \text{ кВар},$$

$$v_2 = 7 : Q_{7p} = 306 \text{ кВар},$$

$$v_3 = 11 : Q_{11p} = 119 \text{ кВар}.$$

в) *Условие ограничения БК по мощности*

Для отсутствия перегрузки БК по мощности необходимо выполнение неравенства

$$Q_p < Q_{1p} + Q_{vp}. \quad (4)$$

Это условие выполняется, если

$$\alpha_p^2 \cdot k_u^2 \leq \sqrt{1 - \frac{0.7}{v_p^2}}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_1 = 5 : 0.979 < 0.986, \\ v_2 = 7 : 0.941 < 0.993, \\ v_3 = 11 : 0.917 < 0.997. \end{aligned}$$

Так как расчетная мощность фильтра в рассматриваемом примере оказалась выше фактической, необходимо скорректировать резонансную частоту настройки фильтра следующим образом:

$$v'_p = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{расч}}} v_p = \frac{900}{1001} 5 = 4.5.$$

Определение индуктивности дросселя, устанавливаемого последовательно конденсаторной батарее:

$$\frac{1}{C \cdot \omega \cdot v_p} = L \cdot \omega \cdot v_p; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_1 = 5 : L_5 = 6.93 \text{ мГ}, \\ v_2 = 7 : L_7 = 5.73 \text{ мГ}, \\ v_3 = 11 : L_{11} = 2.32 \text{ мГ}. \end{aligned}$$

з) *Определение загрузки ФКУ v_p -й гармоники током этой гармоники*

Коэффициент загрузки p -го ФКУ токов ВГ k_{ip} определяется отношением полной проводимости ФКУ и ФКУ совместно с нагрузкой и питающей сетью [7]:

$$k_{ip} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_p} \chi_{vp} + \frac{1}{k_p} \sum_{s=1}^n k_s \frac{\chi_{vp}}{\chi_{vs}}}. \quad (7)$$

Так как на подстанции уже установлены БСК, то в силу экономических соображений целесообразней выполнить ФКУ, внося как можно меньше изменений в существующую схему. В связи с данным обстоятельством преобразовать имеющийся БСК в ФКУ 5, 7, 11-й гармоники. Тогда параметры для определения будут иметь следующие значения:

$$\begin{aligned} n_1 = 5 : k_{5p} = 0.35, \\ n_2 = 7 : k_{7p} = 0.57, \\ n_3 = 11 : k_{11p} = 0.56. \end{aligned}$$

Эффективность работы ФКУ оценивается относительным остаточным напряжением

$$k_{\text{эп}} = 1 - k_{ip}, \quad (8)$$

$$n_1 = 5 : k_{\text{э}5p} = 1 - 0.35 = 0.65,$$

$$n_2 = 7 : k_{\text{э}7p} = 1 - 0.57 = 0.43,$$

$$n_3 = 11 : k_{\text{э}11p} = 1 - 0.56 = 0.44.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно судить о целесообразности применения предложенных конфигураций силовых фильтров для улучшения синусоидальности токов и напряжений в энергосистеме, что подтверждает расчет резонансного фильтра ВГ, эффективность которого оценена соответствующими коэффициентами.

Предложенные схемные конфигурации фильтрокомпенсирующих устройств однозначно применимы при требуемых условиях эксплуатации электрооборудования и в зависимости от поставленных целей, могут использоваться как обособленно, так и в виде системного комплекса.

Модернизация БСК позволит достичь снижения уровня высших гармоник также и в сети 0,4 кВ и предотвратит их дальнейшее распространение в сети 6 и 35 кВ. Централизованная реконструкция конденсаторных батарей в ФКУ ограничит переходные процессы в энергосистеме и повысит ее надежность, так как узкополосные фильтры предотвратят перетоки реактивной мощности высших гармоник в энергосистеме.

Различие с ФКУ 0,4 кВ состоит в отсутствии автоматики срабатывания ступеней и порога задерживания высокочастотной составляющей, которая в этом случае будет ограничиваться лишь фидером 6 кВ, не проникая в оставшуюся распределительную сеть.

Для ограничения высших гармоник непосредственно в узле подключения нелинейной нагрузки рекомендуется использовать фильтр нижних частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
2. Проблемы обеспечения качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ / Н.П. Боярская, Я.А. Кунгс, С.А. Темербаев, В.П. Довгун, А.Ф. Синяговский // Ползуновский вестник. – 2012. – № 4. – С. 89–94.
3. Скакунов Д.А. Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4–6 кВ Ачинского НПЗ // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2012. – № 7. – С. 37–42.
4. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
5. AS 2279.2–1991. Disturbances in mains supply networks. Part 2. Limitation of harmonics caused by industrial equipment. – Homebush, N.S.W.: Standards Australia, 1991.

6. IEEE Std 519–2014. IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. – [S. l.]: IEEE Standards Association, 2014. – 29 p.

7. Добрусин Л.А. Оптимальные фильтрокомпенсирующие устройства для силовых полупроводниковых преобразователей // Современная электроника. – 2005. – № 6. – С. 56–59.

8. Широкополосные фильтры гармоник / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Е.С. Шевченко, Д.Э. Егоров // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 34–38.

9. Митрофанов Н.А. Использование силовых фильтров для ограничения высших гармоник в сети // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов: в 9 ч., Новосибирск, 1–5 декабря 2015 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 4. – С. 35–37.

10. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах промышленного электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

11. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

12. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Анализ гармонического состава тока и напряжения на шинах 0,4 кВ КТПН и применение устройств ограничения высших гармоник // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 2. – С. 61–68.

13. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Исследование гармонического состава напряжения преобразователя частоты // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 1. – С. 24–29.

14. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Анализ гармонического состава напряжения частотного электропривода // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 154–159.

15. Митрофанов Н.А. Анализ гармонического состава напряжения преобразователя частоты MITSUBISHI FR-A540ECR // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сборник научных трудов 7 Международной научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 3. – С. 71–74

Зырянов Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – применение накопителей энергии в составе энергосистем. Имеет более 80 публикаций. E-mail: zvtnov@ngs.ru

Кирьянова Наталья Геннадьевна, аспирант второго года обучения кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – применение накопителей энергии в составе энергосистем. Имеет 18 публикаций. E-mail: kiryanova-ng@ya.ru

Митрофанов Николай Александрович, аспирант второго года обучения кафедры электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – разработка модели комбинированной защиты генератора. Имеет более 10 публикаций. E-mail: n.mitrofanov@elprotect.net

The use of higher harmonics limiting devices based on static capacitor batteries in an autonomous power system*

V.M. ZYRYANOV¹, N.G. KIRYANOVA², N.A. MITROFANOV³

¹Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), associate professor. E-mail: zvmov@ngs.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: kiryanova-ng@ya.ru

³Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: n.mitrofanov@elprotect.net

A high motive load proportion in synchronous and induction motors of unit capacity commensurate with the capacity of power generating units, with soft starters, variable frequency drives and rectifier load are typical of modern autonomous power systems of the oil and gas industry. The essential problem is higher harmonics of current and voltage, which greatly influence the conditions of operation of the main elements of the power equipment of power systems and have a negative impact on the relay protection devices, automation, remote control and communication. An experimental study of power quality in the autonomous power supply system was carried out for a company in the oil and gas industry which uses 6 kV buses of the 35/6 kV substation. A harmonic structure of currents and voltages is revealed. A circuit configuration of filter compensating devices is also proposed. This circuit configuration is applicable for different operating conditions of electrical equipment and can be used separately or as a complex system. The parameters of these devices are calculated. The efficiency of the proposed higher harmonics resonant filter is shown.

Keywords: higher harmonics, quality analyzer, harmonic composition, distortion factor, frequency spectrum, filter compensating devices, power quality

REFERENCES

1. Arrillaga J., Bradley D., Bodger P. *Power systems harmonics*. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 1985 (Russ. ed.: Arrillaga Dzh., Bredli D., Bodzher P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.).
2. Boyarskaya N.P., Kungs Ya.A., Temerbaev S.A., Dovgun V.P., Sinyagovskii A.F. Problemy obespecheniya kachestva elektroenergii v gorodskikh raspredelitel'nykh setyakh 0,4 kV [Problems of ensuring the quality of electricity in urban distribution networks 0,4 kV]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2012, no. 4, pp. 89–94.
3. Skakunov D.A. Metody i sredstva obespecheniya kachestva elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh setyakh 0,4–6 kV Achinskogo NPZ [Methods and means of quality assurance in electricity distribution network 0,4–6 kV Achinsk refinery]. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii – World of Oil Products. The Oil Companies' Bulletin*, 2012, no. 7, pp. 37–42.
4. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144–2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p.
5. AS 2279.2–1991. *Disturbances in mains supply networks. Part 2. Limitation of harmonics caused by industrial equipment*. Homebush, N.S.W, Standards Australia, 1991.
6. IEEE Std 519–2014. *IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems*. IEEE Standards Association, 2014. 29 p.

* Received 21 December 2017.

7. Dobrusin L.A. Optimal'nye fil'trokompensiruyushchie ustroystva dlya silovykh poluprovodnikovyykh preobrazovatelei [Optimum filter compensating devices for power semiconductor converters]. *Sovremennaya elektronika*, 2005, no. 6, pp. 56–59.
8. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Shevchenko E.S., Egorov D.E. Shirokopolosnye fil'try garmonik [Broadband harmonic filters]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2013, no. 4-2, pp. 34–38.
9. Mitrofanov N.A. [Use of power filters to limit the higher harmonics in the network]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik nauchnykh trudov* [Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers]. Novosibirsk, 1–5 December 2016, pt. 4, pp. 35–37. (In Russian).
10. Zhezhenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyatii* [Higher harmonics in industrial power supply systems for industrial enterprises]. 4th ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 331 p.
11. Zhezhenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Indicators of power quality and their control in industrial enterprises]. 3rd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000, 252 p.
12. Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A., Sokolovskii Yu.B. Analiz garmonicheskogo sostava toka i napryazheniya na shinakh 0,4 kV KTPN i primeneniye ustroystv ogranicheniya vysshikh garmonik [Analysis of the harmonic composition of current and voltage on the tire 0,4 kv substations 6/0,4 kv and the use of limiting devices of higher harmonics]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2016, no. 2, pp. 61–68.
13. Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A., Sokolovskii Yu.B. Issledovanie garmonicheskogo sostava napryazheniya preobrazovatelya chastoty [Research of voltage harmonic contain in frequency converter]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2015, no. 1, pp. 24–29.
14. Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A., Sokolovskii Yu.B. Analiz garmonicheskogo sostava napryazheniya chastotnogo elektroprivoda [Research of voltage harmonic contain in frequency converter]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2015, no. 1, pp. 154–159.
15. Mitrofanov N.A. [Analysis of the harmonic composition of the voltage of the frequency converter MITSUBISHI FR-A540ECR]. *Elektrotehnika. Elektrotehnologiya. Energetika: sbornik nauchnykh trudov 7 Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh* [Electrical Engineering. Electrotechnology. Energy: a collection of scientific papers of the 7th International Scientific Conference of Young Scientists], Novosibirsk, 9–12 June 2015, pt. 3, pp. 71–74. (In Russian).

Для цитирования:

Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Митрофанов Н.А. Применение устройств ограничения высших гармоник на основе батарей статических конденсаторов в автономной энергосистеме // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 2 (71). – С. 131–142. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-131-142.

For citation:

Zyryanov V.M., Kiryanova N.G., Mitrofanov N.A. Primeneniye ustroystv ogranicheniya vysshikh garmonik na osnove batarei staticheskikh kondensatorov v avtonomnoi energosisteme [The use of higher harmonics limiting devices based on static capacitor batteries in an autonomous power system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 2 (71), pp. 131–142. doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-131-142.