

нического состава. Существенно снизился престиж инженера и ученого на производстве. В учебных заведениях по подготовке и переподготовке кадров для электроэнергетики требуется корректировка учебных программ в сторону повышения качества образования с учетом современных требований и выдвигаемых задач. Без устранения возникших за последнее время отмеченных сдерживающих факторов в развитии и функционировании отечественной электроэнергетики трудно рассчитывать на практическое воплощение концепции инновационного развития Smart Grid в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобец Б.Б., Волкова И. Интеллектуальные сети. – Энергорынок. Профессиональный журнал, 2010, март.
2. Алексеев Б.А. Электрические сети противостоят авариям. – Энергоэксперт, 2009, № 5.
3. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть. – М.: Энергоатомиздат, 2009.
4. Абдурахманов А.М., Мисриханов М.Ш., Федоров В.Е., Шунтов А.В. О надежности ячеек элегазовых выключателей

110–750 кВ подстанций. – Материалы Международ. науч. семинара «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Ялта (АР Крым, Украина), 13–19 сентября 2010 г.

5. Ситников В.Ф., Скопинцев В.А. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации. – Электричество, 2007, № 11.

6. РД 03–418–01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. – М.: Госгортехнадзор России, 2001.

7. ГОСТ Р 51901–2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – М.: Госстандарт РФ, 2002.

[22.08.11]

Авторы: Ситников Владимир Федорович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1984 г. В 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию «Источники питания на магнитных ключах» в МЭИ.

Скопинцев Владимир Алексеевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1965 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию по анализу аварийности электроэнергетических систем. Начальник департамента ОАО «Институт «Энергосетьпроект».

* * *

Повышение качества электрической энергии с помощью параллельного активного фильтра в системах электроснабжения промышленных предприятий

АБРАМОВИЧ Б.Н., СЫЧЕВ Ю.А.

Рассматривается проблема повышения качества электрической энергии в интеллектуальных системах электроснабжения промышленных предприятий с интенсивным распространением нелинейной нагрузки. Показана эффективность выявления и компенсации высших гармоник параллельным активным фильтром с разработанным алгоритмом на примере электрических сетей нефтедобывающих предприятий.

Ключевые слова: система электроснабжения, электрическая энергия, качество, нелинейная нагрузка

Разработка и внедрение технологий интеллектуальных электрических сетей в системах электроснабжения промышленных предприятий РФ позволят создавать интеллектуальные системы электроснабжения в любой отрасли промышленности. При этом новые интеллектуальные системы электроснабжения должны быть приспособлены к особенностям технологических потребителей промышленных предприятий, и при возникновении нарушений установленного режима электроснабжения эффективно их выявлять и устранять. Результаты

The problem of improving the quality of electric power in intellectual systems for supplying power to industrial enterprises with intensive use of nonlinear loads is considered. The effectiveness of using a parallel active filter furnished with the developed algorithm for revealing and compensating higher harmonics is shown taking as an example the electric networks of oil producing enterprises.

Key words: electric power supply system, electric power, quality, nonlinear load

многочисленных теоретических и экспериментальных исследований [1–3] показали, что основной причиной нарушений установленного режима электроснабжения промышленных предприятий являются электромагнитные помехи различной природы, вызывающие несоответствие уровня качества электрической энергии и нарушение электромагнитной совместимости электрооборудования.

Основной тенденцией в электрических сетях современных промышленных предприятий является интенсивное распространение нелинейной на-

грузки в виде различного типа преобразователей частоты систем регулируемого электропривода технологического оборудования. В частности, в системах электроснабжения нефтедобывающих предприятий в условиях высокодебитных скважин получила широкое применение нелинейная нагрузка в виде преобразователей частоты систем регулируемого электропривода погружных электродвигателей электроцентробежных насосов (ПЭД ЭЦН). Результаты многочисленных экспериментальных исследований в электрических сетях ОАО «Татнефть», ОАО «Оренбургнефть» и ООО «РН-Юганскнефтегаз» показали [1–5], что следствием внедрения преобразователей частоты является искажение формы кривой напряжения, уровень которого превышает допустимую норму ГОСТ 13109–97.

Превышение допустимого уровня гармонических искажений приводит к сокращению срока службы силовых трансформаторов и конденсаторов, некорректному срабатыванию систем релейной защиты, электросетевой и технологической автоматики, помехам в системах связи, управления и телемеханики, что является причиной возникновения аварийных ситуаций и длительных перерывов электроснабжения ответственных потребителей [1–5].

Существующие традиционные технические средства и решения, направленные на коррекцию коэффициента мощности сети и компенсацию высших гармоник (ВГС) тока и напряжения, имеют ряд существенных недостатков, которые делают их применение в интеллектуальных системах электроснабжения промышленных предприятий технически неэффективным и экономически нецелесообразным [6]. Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства способны компенсировать одну или несколько высших гармоник, порядок которых определяется частотой настройки резонансных цепей [6]. Установка сглаживающих реакторов, как и установка фильтрующих конденсаторов, приводит к потерям напряжения сети [6, 7]. Ограничение мощности нелинейной нагрузки до уровня 15–20% номинальной мощности питающего трансформатора, которое используется в сетях нефтепромыслов, не всегда технически осуществимо и экономически целесообразно. Техническое средство или решение по компенсации ВГС, предназначенное для применения в интеллектуальных системах электроснабжения, должно обладать гибкой и адаптивной системой управления, которая способна интегрироваться в централизованные управляющие сети и реагировать на изменение конфигурации распределительной сети.

Одним из наиболее эффективных и перспективных технических средств повышения качества

электрической энергии за счет компенсации реактивной мощности и коррекции формы кривых тока и напряжения являются параллельные активные фильтры (ПАФ), лишенные вышеперечисленных недостатков [7]. Такие фильтры состоят из трех основных частей [6, 7]: силовой части, системы управления и накопительного элемента. Силовая часть включает в себя инвертор на базе IGBT транзисторов и пассивный выходной активно-индуктивно-емкостный фильтр. В состав системы управления входят первичные датчики тока и напряжения и программируемый контроллер, реализующий алгоритм коррекции коэффициента мощности и компенсации высших гармоник тока и напряжения ПАФ. В качестве накопительного элемента используется конденсатор, включенный на стороне постоянного тока инвертора.

На основании обработки и анализа измерительной информации, полученной от первичных датчиков тока и напряжения, система управления формирует управляющие импульсы для силовых IGBT ключей инвертора, к которому приложено напряжение накопительного конденсатора. В результате через инвертор в сеть генерируется ток, форма кривой и спектральный состав которого определяются законом управления силовыми IGBT ключами [5, 6]. Спектральный состав генерируемого ПАФ тока идентичен спектральному составу тока компенсируемой нелинейной нагрузки по амплитуде, но противоположен по фазе. Система управления поддерживает определенный уровень напряжения накопительного конденсатора, формируя задание по току компенсации с учетом изменения тока нелинейной нагрузки и значения компенсируемой реактивной мощности. Выходной пассивный фильтр, состоящий из индуктивностей, емкостей и резисторов, служит для повышения эффективности компенсации высших гармоник ПАФ.

Структура системы управления ПАФ определяется заложенным в нее алгоритмом, который, в свою очередь, зависит от поставленных практических целей применения ПАФ. Алгоритм может включать только компенсацию ВГС или реактивной мощности или совместную коррекцию коэффициента мощности и формы кривой тока и напряжения сети [7, 8].

Для реализации поставленных целей система управления ПАФ должна содержать фильтр для выделения основной гармоники напряжения сети, формировать синусоидальный опорный ток и в зависимости от гармонического спектра тока нелинейной нагрузки формировать соответствующий ток коррекции. Функциональная схема разработанной системы управления ПАФ приведена на рис. 1, где U_{ab} , U_{bc} – измерительные сигналы линейных

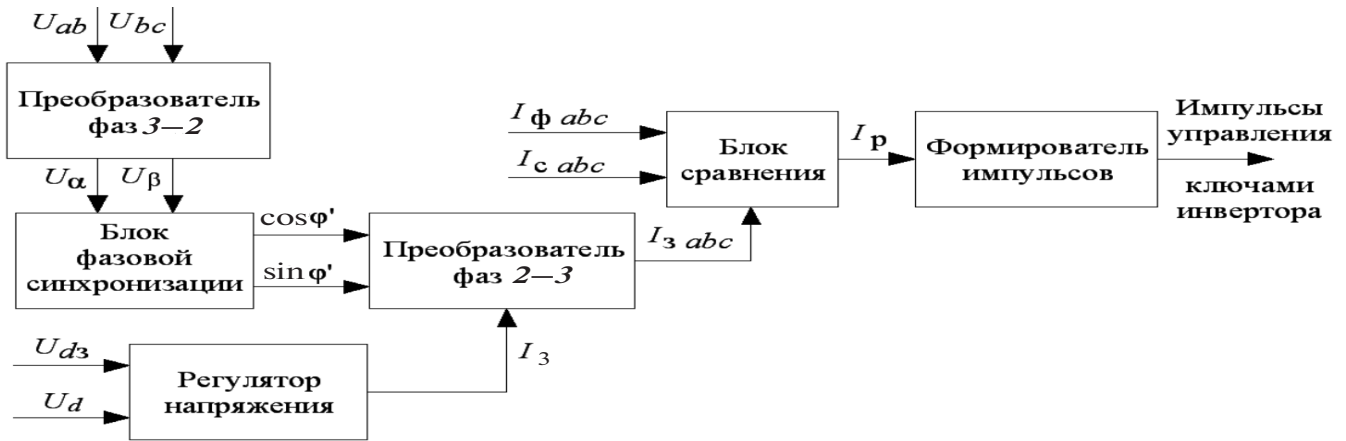


Рис. 1. Функциональная схема системы управления ПАФ с использованием фазовых преобразований для компенсации ВГС тока и напряжения

напряжений сети; U_α, U_β – сигналы преобразованных линейных напряжений в системе координат $\alpha\beta$; $\cos\phi', \sin\phi'$ – косинус и синус угла между изображающим вектором напряжения и его проекциями на оси α и β соответственно; U_{d3} – сигнал заданного напряжения накопительного конденсатора; U_d – измерительный сигнал фактического напряжения накопительного конденсатора; I_3 – сигнал задания по току; $I_{\phi abc}$ – измерительные сигналы фактического тока ПАФ по фазам; $I_{c abc}$ – измерительные сигналы фактического тока компенсируемой сети по фазам; $I_{3 abc}$ – сигнал опорного тока по фазам; I_p – сигнал рассогласования по токам [7, 8].

При формировании опорного сигнала тока ($I_{3 abc}$) система управления ПАФ использует преобразование из трехфазной системы a, b, c в двухфазную систему α, β . С помощью датчиков напряжения измеряются линейные напряжения компенсируемой сети U_{ab} и U_{bc} , которые затем преобразовываются в систему координат α, β с помощью следующих выражений [7, 8]:

$$U_\alpha = (2U_{ab} + U_{bc}) / 3; U_\beta = U_{bc} / \sqrt{3}.$$

На схеме рис. 1 данные вычисления выполняет преобразователь фаз 3–2, на вход которого поступают измерительные сигналы с датчиков напряжения [7, 8].

Линейные напряжения сети U_{ab} и U_{bc} содержат спектральный состав гармонических искажений, вносимых нелинейной нагрузкой. Для выделения из этих напряжений основной составляющей необходим специальный фильтр, который не вносит запаздывания. В качестве такого фильтра используется специальный вектор-фильтр, который генерирует два напряжения синусоидальной формы и единичной амплитуды, причем фаза этих сигналов с помощью регулятора подстраивается под фазу входных сигналов искаженных линейных напряже-

ний сети. На основе такого вектор-фильтра выполнен блок фазовой синхронизации, входные сигналы которого преобразуются в сигналы единичной амплитуды согласно следующим формулам [7, 8]:

$$\cos\phi = U_\alpha / U_{sm}; \sin\phi = U_\beta / U_{sm}; U_{sm} = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2}.$$

Здесь ϕ соответствует углу между вектором напряжения U_{sm} и его составляющими по осям α и β ; угол ϕ подстраивается блоком фазовой синхронизации до значения ϕ' , соответствующего синусоидальной форме кривых напряжения и тока сети.

Напряжение на накопительном конденсаторе поддерживается на заданном уровне с помощью ПИ-регулятора, который формирует задание по генерируемому инвертором компенсационному току, на основании информации о фактическом U_d и заданном U_{d3} напряжении конденсатора. Заданный регулятором ток I_3 сначала преобразуется в двухфазную систему [7, 8]:

$$I_{3\alpha} = I_3 \cos\phi'; I_{3\beta} = I_3 \sin\phi',$$

а затем, из двухфазной системы преобразуется в трехфазную согласно формулам [7, 8]:

$$I_{3a} = I_{3\alpha}; I_{3b} = (\sqrt{3}I_{3\beta} - I_{3\alpha}) / 2; \\ I_{3c} = (-\sqrt{3}I_{3\beta} - I_{3\alpha}) / 2.$$

Полученные заданные значения токов $I_{3 abc}$ сравниваются с искаженными токами нелинейной нагрузки $I_{c abc}$ и фактическим током ПАФ $I_{\phi abc}$ блоком сравнения. Сигналы рассогласования по токам на выходе блока сравнения поступают на вход формирователя импульсов, выполненного на основе релейных регуляторов, который генерирует импульсы управления силовыми ключами инвертора.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма выявления и компенсации высших гармо-

ник разработана математическая модель ПАФ в сети 0,4 кВ нефтепромысла с нелинейной нагрузкой. Система управления ПАФ выполнена на основе разработанного алгоритма выявления и компенсации высших гармоник с использованием фазовых преобразований в соответствии с функциональной схемой рис. 1. В качестве нелинейной нагрузки при моделировании использован трехфазный мостовой выпрямитель, входящий в состав преобразователей частоты систем регулируемого электропривода ПЭД ЭЦН нефтепромыслов. Математическое моделирование проводилось в системе Matlab Simulink. Полученные в результате моделирования осциллограммы форм кривых тока и напряжения представлены на рис. 2 и 3. Эффективность снижения коэффициентов искажения синусоидальности формы кривой тока и напряжения ПАФ характеризуется следующими данными:

Коэффициент	Значение коэффициента, %	
	до компенсации	после компенсации
k_I	24,14	2,30
k_U	9,10	4,14

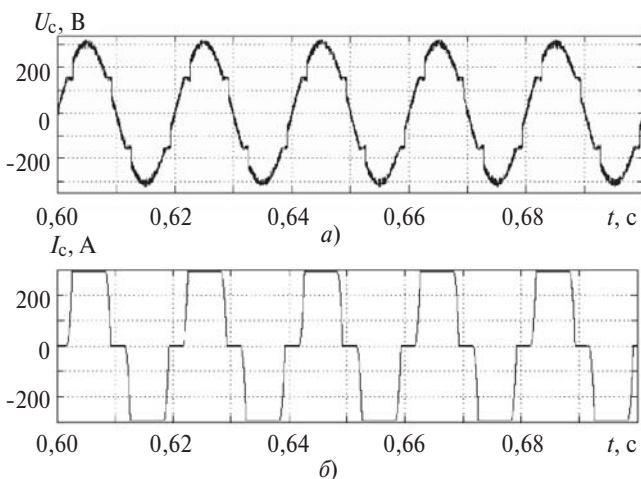


Рис. 2. Осциллограмма искаженного напряжения сети U_c (а) и искаженного тока сети I_c (б) до подключения ПАФ

Приведенные данные показывают эффективность коррекции формы кривых тока и напряжения сети ПАФ с разработанным алгоритмом выявления и компенсации высших гармоник и соответствие значения k_U норме ГОСТ 13109–97.

Для подтверждения достоверности полученных результатов проведены экспериментальные исследования эффективности выявления и компенсации высших гармоник ПАФ с разработанным алгоритмом управления в электрических сетях ОАО «Оренбургнефть» и ООО «РН-Юганскнефтегаз». В процессе экспериментальных исследований оценивалась эффективность работы ПАФ с различными номинальными токами при фиксированном значении мощности нелинейной нагрузки и при нали-

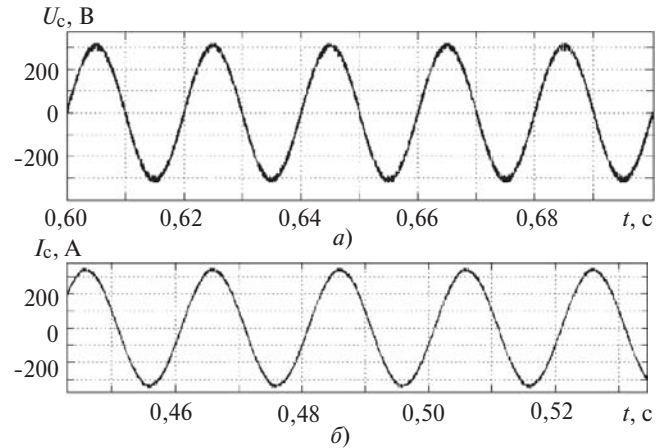


Рис. 3. Осциллограмма напряжения сети U_c (а) и тока сети I_c (б) после подключения ПАФ

чии конденсаторных установок компенсации реактивной мощности.

В табл. 1 приведены результаты исследований эффективности работы ПАФ с различными номинальными токами при фиксированной мощности нелинейной нагрузки в промышленной распределительной сети 0,4 кВ Курманаевского месторождения ОАО «Оренбургнефть» (U_c – фазное напряжение сети; I_c – фазный ток сети) [1, 3].

Таблица 1

Параллельный активный фильтр (ПАФ)	Значение параметра			
	$U_c, В$	$k_U, \%$	$I_c, А$	$k_I, \%$
Отсутствует	223	8,8	243	25,5
ПАФ с номинальным током 400 А	226	7,1	232	14,3
ПАФ с номинальным током 160 А	227	3,5	236	3,3

Таблица 2

Номер скважины (номер ПАФ)	Значение коэффициента, %			
	k_U		k_I	
	до установки ПАФ	после установки ПАФ	до установки ПАФ	после установки ПАФ
7791 (30)	14,3	4,0	33,4	6,9
8365 (36)	12,1	4,3	34,8	8,8
7820 (38)	8,7	5,8	25,0	7,1
8263 (29)	8,7	5,8	44,7	13,3
7819 (37)	9,2	6,4	45,2	14,0
8824 (35)	9,4	6,0	34,3	8,6
8852 (34)	10,7	7,7	27,4	11,3
8818 (33)	12,1	5,4	37,2	7,5
8820 (32)	12,1	5,4	33,7	9,4
8392 (31)	8,7	2,9	35,8	5,9

В табл. 2 приведены результаты исследований эффективности работы десяти ПАФ, установленных на скважинах в промышленной распределительной сети 0,4 кВ Приобского месторождения ООО «РН-Юганскнефтегаз».

В табл. 3 приведены результаты исследований эффективности работы ПАФ в промышленной распределительной сети 0,4 кВ Докучаевского месторождения ОАО «Оренбургнефть» [5] при наличии в сети 6 кВ близко расположенной конденсаторной установки (КУ) компенсации реактивной мощности (U_c – линейное напряжение сети).

Таблица 3

Номер скважины	Значение параметра (в числителе – при отключении ПАФ, в знаменателе – при включении)			
	$U_c, В$	$k_U, \%$	$I_c, А$	$k_I, \%$
Конденсаторная установка (450 квар) отключена				
1614	358/360	11,7/7,3	242/241	30,5/9,0
1627	355/362	12,8/7,6	521/522	26,4/11,8
Конденсаторная установка (450 квар) включена				
1614	371/377	6,4/6,7	233/231	31,5/7,0
1627	369,5/377	5,9/6,9	508/510	30,6/9,0

Данные табл. 1 и 2 доказывают эффективность функционирования ПАФ с разработанным алгоритмом управления. Данные табл. 3 показывают негативное влияние близко расположенных конденсаторных установок на эффективность работы ПАФ.

Таким образом, результаты математического моделирования и экспериментальных исследований на примере электрической сети нефтепромысла показывают эффективность применения параллельного активного фильтра с разработанным алгоритмом выявления и компенсации высших гармоник как основного технического средства повышения качества электрической энергии в интеллектуальных системах электроснабжения промышлен-

ных предприятий с интенсивным распространением нелинейной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамович Б.Н., Медведев А.В., Старостин В.В. и др.** Коррекция коэффициента мощности в сетях нефтепромыслов с помощью активного фильтра. – Нефтяное хозяйство, 2008, № 5.
2. **Сычев Ю.А.** Измерение и анализ показателей качества электрической энергии в сетях нефтедобывающих предприятий. – Записки Горного института (СПб), 2007, т. 173.
3. **Абрамович Б.Н., Медведев А.В., Старостин В.В. и др.** Промышленные испытания активного фильтра в промышленных сетях ОАО «Оренбургнефть» ТНК-ВР. – Промышленная энергетика, 2008, № 10.
4. **Сычев Ю.А.** Экспериментальные исследования режимов работы параллельного активного фильтра в сетях ОАО «Оренбургнефть». – Записки Горного института (СПб), 2009, т. 182.
5. **Абрамович Б.Н., Медведев А.В., Старостин В.В. и др.** Проблема обеспечения электромагнитной совместимости конденсаторных установок и активных фильтров в сетях нефтепромыслов. – Нефтяное хозяйство, 2010, № 4.
6. **Сычев Ю.А.** Системы коррекции кривых тока и напряжения. – Записки Горного института (СПб), 2006, т. 1(167).
7. **Патент РФ № 2354025.** Способ компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети/Б.Н. Абрамович, В.В. Полищук, Ю.А. Сычев. Оpubл. 27.04.2009.
8. **Патент РФ № 2413350.** Способ компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети/Б.Н. Абрамович, В.В. Полищук, Ю.А. Сычев. Оpubл. 27.02.2011.

[23.07.11]

Авторы: Абрамович Борис Николаевич окончил горно-электромеханический факультет Ленинградского горного института им. Г.В. Плеханова в 1961 г. В 1986 г. во ВНИИ «Электромаш» защитил докторскую диссертацию «Создание систем возбуждения для крупных синхронных двигателей (теория, разработка, применение)». Профессор кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета (СПГГУ).

Сычев Юрий Анатольевич окончил СПГГУ в 2007 г. В 2010 г. в СПГГУ защитил кандидатскую диссертацию «Активные системы коррекции формы кривых тока и напряжения в сетях нефтепромыслов». Ассистент кафедры электротехники и электромеханики СПГГУ.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).