

---

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

УДК 628.517.2

А.С. Плехов <sup>1</sup>, Д.Ю. Титов <sup>1</sup>,  
Ю.В. Шевырев <sup>2</sup>, Н.Ю. Шевырева <sup>3</sup>

### УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СЛАБЫХ СЕТЕЙ ПОСРЕДСТВОМ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

<sup>1</sup> Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСИС»

<sup>3</sup> РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина

На показатели качества электроэнергии в электротехнических системах существенное отрицательное влияние оказывает входящее в состав систем преобразовательное оборудование. Одним из наиболее распространенных типов преобразователей являются выпрямители. Статья посвящена вопросам влияния активных выпрямителей напряжения на показатели качества электроэнергии и величину реактивной мощности в «слабой» сети электроснабжения. Выполнены измерения и проведен анализ показателей качества электроэнергии в нефтепромысловых электрических сетях с долей частотно-регулируемых приводов около 80 % от мощности всех потребителей. Установлено превышение допустимого уровня нелинейных искажений формы напряжения, что делает обоснованным применение преобразователей частоты с активным выпрямителем для улучшения качества электроэнергии в таких сетях. Разработана математическая модель системы управления активного выпрямителя напряжения. Синтез регуляторов системы управления выполнен на основе принципов подчиненного регулирования с учетом компенсации влияния перекрестных связей и возмущающих воздействий. Показана эффективность применения отрицательной обратной связи по величине реактивной мощности и по напряжению в системе управления активного выпрямителя напряжения.

**Ключевые слова:** активные выпрямители напряжения, показатели качества электроэнергии, реактивная мощность, частотно-регулируемый привод.

## **I. Введение**

Распространенным типом преобразователей, оказывающих существенное влияние на показатели качества электроэнергии систем электроснабжения, являются выпрямители.

Несомненные достоинства частотно-регулируемого асинхронного электропривода привели к массовому применению на горных и металлургических предприятиях полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока. Для добычи нефти широко применяются доказавшие свою высокую эффективность установки центробежных электронасосов (УЦЭН) с частотно-регулируемым приводом (ЧРП). В то же время преобразователь частоты, являясь нелинейной нагрузкой, ухудшает качество электроэнергии в нефтепромысловых электрических сетях и вызывает искажение синусоидальной формы напряжения питания УЦЭН.

## **II. Анализ качества электрической энергии в нефтепромысловой сети**

В работе Б.И. Абрамова приведены результаты измерений и анализа показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на Приобском месторождении ООО «РН-Юганскнефтегаз», выполненные сотрудниками ООО «Электротехническая промышленная компания» (г. Москва) [1]. Объектом исследования был участок распределительной сети 35 кВ с центром питания – подстанция 110/35кВ «Озерная». Доля ЧРП на данном месторождении составляет примерно 80% от мощности всех потребителей.

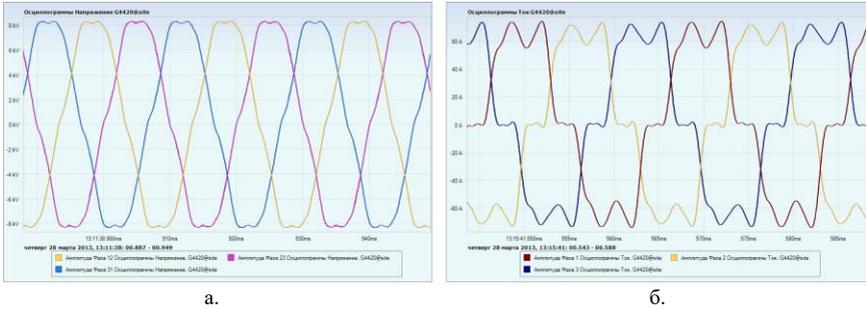
Питание кустов скважин осуществляется по трем двухцепным воздушным линиям 35 кВ: «Дружная», «Талая» и «Вербная». На кустовых площадках установлены понижающие подстанции (ПС) 35/6 кВ, от которых по линиям 6 кВ получают питание комплектные трансформаторные подстанции (КТП) – 6/0,4 кВ. От распределительных устройств низкого напряжения (РУНН) 0,4 кВ этих КТП осуществляется распределение электрической энергии непосредственно к насосным установкам УЦЭН.

В качестве примера на рис. 1 показаны формы напряжения на сборных шинах 6 кВ и тока на вводе РУ-6 кВ. Из графиков видно, что формы напряжений и токов на вводах РУ-6 кВ существенно искажены.

Исследования показали, что в спектре напряжения и тока в сетях 6 кВ ярко выражены 5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармоники, а также нечетные гармоники более высокого порядка, что характерно для нелинейной нагрузки в виде станций управления с частотным преобразователем.

Проведенный анализ показателей качества электрической энергии в нефтепромысловой сети позволяют сделать следующие выводы.

1. Частотные приводы УЦЭН являются причиной возникновения искажений синусоидальности кривых тока и напряжения в сети.



а.

б.

Рис. 1. Формы напряжения и тока:

напряжения на сборных шинах 6 кВ (а); тока на вводе РУ – 6 кВ (б)

2. В спектре кривых напряжения и тока наиболее ярко выражены 5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармоники, что характерно для преобразователей частоты с неуправляемым шести-пульсным выпрямителем во входной цепи.

3. Уровень нелинейных искажений формы напряжения на сборных шинах 6 кВ подстанций 35/6 кВ превышал нормально допустимый по ГОСТ 32144-2013.

Допустимый уровень высших гармоник в напряжении сети может быть обеспечен без дополнительных средств повышения качества электроэнергии, если отношение мощности короткого замыкания сети  $S_{кз}$  в узле подключения преобразователя к его полной мощности  $S_{ТП}$ , в зависимости от пульсности преобразователя, равно или больше значений, указанных в табл. 1. Если отношение  $S_{кз}/S_{ТП}$  меньше указанных в табл. 1, то необходимо применение дополнительных средств повышения качества электроэнергии [2].

Таблица 1

Предельные значения отношения  $S_{кз}/S_{ТП}$

Пульсность схемы	$S_{кз}/S_{ТП}$
6	90
12	65
24	38
32	15

### III. Преобразователи частоты с активным выпрямителем

Современным способом улучшения качества электроэнергии при работе частотно-регулируемого электропривода переменного тока является применение преобразователей частоты с активным выпрямителем [3, 4]. Под активным выпрямителем напряжения (АВН) понимается выпрямитель на полностью управляемых полупроводниковых приборах (например, си-

ловые транзисторы), работающих в релейном режиме или в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это даёт возможность обеспечить требуемые значения таких ПКЭ, как отклонение напряжения на вводе электротехнического комплекса и коэффициент искажения синусоидальной формы напряжения сети, получить коэффициент мощности, равный единице. Требуемые ПКЭ обеспечиваются за счёт алгоритмов управления полупроводниковыми приборами в релейном режиме или режиме ШИМ.

АВН позволяют реализовать двухсторонний обмен энергией с питающей сетью и тем самым улучшить энергетические показатели электропривода, обеспечить практически синусоидальный сетевой ток, плавно регулировать коэффициент мощности. При управлении преобразователем частоты используется прямое микропроцессорное управление. Поэтому усложнение системы управления преобразователем частоты с АВН будет касаться только программного обеспечения.

В основу математической модели системы автоматического регулирования (САР) АВН положена векторная САР, предложенная в работах А.Б. Виноградова, Р.Т. Шрейнера, А.А. Ефимова [5, 6]. Система управления реализована в синхронной ортогональной системе координат  $(x, y)$ , ориентированной по вектору напряжения сети  $\vec{U}$ , что позволяет отдельно управлять активной  $i_x$  и реактивной  $i_y$  составляющими вектора входного тока выпрямителя  $\vec{I}$  [5].

На рис. 2 показано разложение вектора входного тока выпрямителя  $\vec{I}$  на составляющие в системе координат  $(x, y)$ , ориентированной по вектору напряжения сети  $\vec{U}$ , где  $\omega_u$  – угловая частота напряжения сети;  $\varphi_u$  – угол поворота вектора напряжения питающей сети в неподвижной системе координат А, В, С [5].

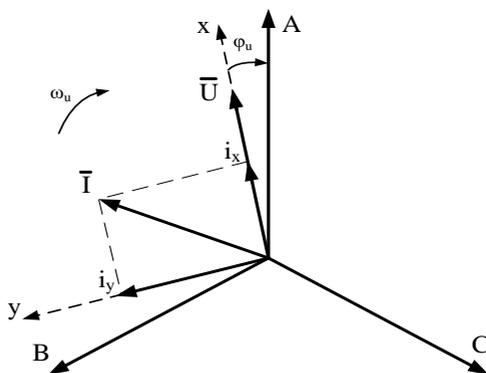


Рис. 2. Разложение вектора тока  $\vec{I}$  на составляющие в осях  $x, y$

При ориентации вращающейся системы координат по вектору напряжения питающей сети  $\vec{U}$ :

$$u_x = U; \quad u_y = 0, \quad (1)$$

где  $U$  – модуль вектора напряжения питающей сети.

Функциональная схема векторной САП АВН представлена на рис. 3 [5, 6].

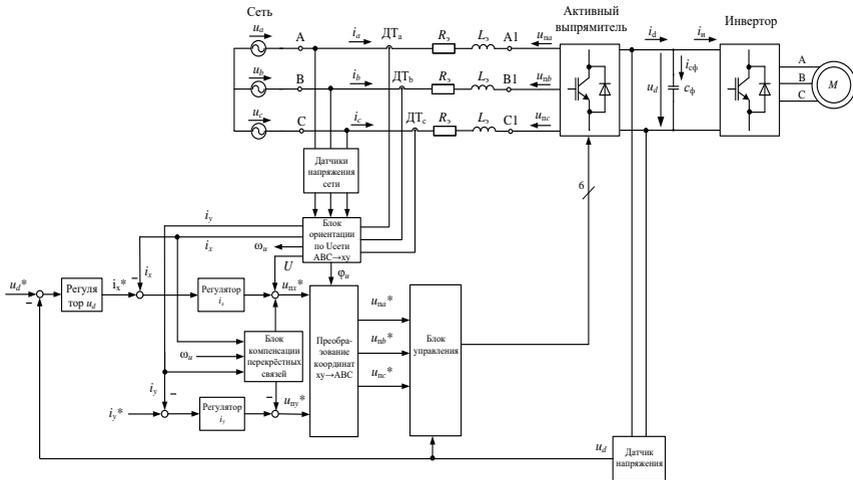


Рис. 3. Функциональная схема векторной САП АВН

Блок «Блок ориентации по  $U_{\text{сети}} ABC \rightarrow xy$ » выполняет вычисление параметров сетевого напряжения  $U$ ,  $\omega_u$  по результатам измерения мгновенных значений напряжений в фазах сети, а также осуществляет преобразование входных токов в координатную систему  $(x, y)$ , ориентированную по вектору сетевого напряжения  $\vec{U}$ .

Блок компенсации перекрестных связей компенсирует взаимное влияние активной  $i_x$  и реактивной  $i_y$  составляющих вектора входного тока выпрямителя  $\vec{I}$ . Блок «Преобразование координат  $xy \rightarrow ABC$ » выполняет преобразование заданных напряжений выпрямителя из синхронной системы координат  $(x, y)$  в трехфазную систему координат  $(A, B, C)$ .

Векторная САП содержит одноконтурную САП реактивного тока  $i_y$  и двухконтурную САП выпрямленного напряжения АВН  $U_d$ , внутренним контуром которой является контур регулирования активного тока  $i_x$ . Для уменьшения ошибки регулирования, вызванной изменением напряжения сети  $U$ , по нему как по возмущающему воздействию вводится коррекция.

Сигналы рассогласований между заданными ( $i_x^*$ ,  $i_y^*$ ) и фактически ( $i_x$ ,  $i_y$ ) значениями преобразованных токов поступают на вход пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов токов. Выходные сигналы регуляторов тока после дополнения сигналами компенсирующих связей поступают на входы преобразователя координат вектора управляющих напряжений  $xу \rightarrow ABC$ . После преобразования координат формируются управляющие воздействия  $una^*$ ,  $unb^*$  и  $unc^*$ , поступающие на блок управления АВН. Регулирование коэффициента мощности преобразователя осуществляется путём задания реактивной составляющей входного тока  $i_y^*$ . При  $i_y^* = 0$  реактивная мощность выпрямителя равна нулю.

#### IV. Эквивалентная модель АВН

Синтез регуляторов системы векторного управления АВН выполняется на основе принципов подчиненного регулирования с учетом компенсации влияния перекрестных связей и возмущающих воздействий [5, 6].

Учитывая высокую частоту коммутации ключей в режиме ШИМ, при синтезе системы автоматического управления АВН используется его более простая эквивалентная непрерывная модель [5].

Эквивалентную непрерывную модель АВН удобно представить в системе координат  $(x, y)$ , ориентированной по вектору напряжения сети  $\bar{U}$ . В этом случае уравнения непрерывной модели АВН имеют следующий вид:

$$u_x = U = u_{nx} + R_s \cdot i_x + L_s \cdot \frac{di_x}{dt} - \omega_u \cdot L_s \cdot i_y \quad (2)$$

$$u_y = 0 = u_{ny} + R_s \cdot i_y + L_s \cdot \frac{di_y}{dt} + \omega_u \cdot L_s \cdot i_x \quad (3)$$

$$f_{nx} = \frac{u_{nx}^*}{2 \cdot U_0}; \quad (4)$$

$$f_{ny} = \frac{u_{ny}^*}{2 \cdot U_0}; \quad (5)$$

$$u_{nx} = f_{nx} \cdot u_d; \quad (6)$$

$$u_{ny} = f_{ny} \cdot u_d; \quad (7)$$

$$i_d = \frac{3}{2} (f_{nx} \cdot i_x + f_{ny} \cdot i_y); \quad (8)$$

$$i_d - i_n = C \frac{du_d}{dt}; \quad (9)$$

$$\omega_u = \frac{d\Theta_u}{dt}, \quad (10)$$

где  $L_3$  – эквивалентная индуктивность, равная сумме индуктивностей на стороне переменного тока между АВН и напряжением сети, по вектору которого ориентируется вектор входного тока АВН  $\vec{I}$ ;

$R_3$  – эквивалентное активное сопротивление, равное сумме активных сопротивлений на стороне переменного тока между АВН и напряжением сети, по вектору которого ориентируется вектор входного тока АВН  $\vec{I}$ ;

$U_0$  – амплитуда несущего сигнала ШИМ в схеме управления;

$f_{пх}, f_{пу}$  – представление в эквивалентной непрерывной модели АВН по осям  $x, y$  дискретной вектор – функции, описывающей управляющие сигналы и состояния полупроводниковых ключей АВН.

Эквивалентная индуктивность  $L_3$  равна:

$$L_3 = L_{23} + L_{л} + L_{р} , \quad (11)$$

где  $L_{23}$  – эквивалентная индуктивность трансформатора, приведённая к вентильной обмотке трансформатора;

$L_{л} = L_{л6} + L_{с3}$  – индуктивность системы электроснабжения при питании от линии 6 кВ (при питании от синхронного генератора (СГ) – индуктивность СГ), приведённая к вентильной обмотке трансформатора;

$L_{л6}$  – индуктивность линии 6 кВ;

$L_{с3}$  – индуктивность элементов системы электроснабжения от центральной понизительной подстанции (ЦПП) 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6кВ;

$L_{р}$  – индуктивность сетевого (буферного) реактора.

Эквивалентное активное сопротивление  $R_3$ , равно:

$$R_3 = R_{23} + R_{л} + R_{р} , \quad (12)$$

$R_{23}$  – эквивалентное активное сопротивление трансформатора, приведённое к вентильной обмотке трансформатора;

$R_{л} = R_{л6} + R_{с3}$  – активное сопротивление системы электроснабжения при питании от линии 6 кВ (при питании от СГ – активное сопротивление СГ), приведённое к вентильной обмотке трансформатора;

$R_{л6}$  – активное сопротивление линии 6 кВ;

$R_{с3}$  – активное сопротивление элементов системы электроснабжения от ЦПП 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6 кВ;

$R_{р}$  – активное сопротивление сетевого (буферного) реактора.

Уравнения непрерывной аппроксимации справедливы при условии, отмеченном А.Б. Виноградовым [5]:

$$|u_{nj}^*| \leq U_0; \quad j = a, b, c . \quad (13)$$

В этом случае насыщение узла ШИМ отсутствует. Поэтому ни один из фазных широтно-импульсных модуляторов не потеряет управляемости.

Коэффициент мощности АВН определяется формулой:

$$\cos \varphi = \frac{i_x}{\sqrt{i_x^2 + i_y^2}}. \quad (14)$$

Для получения  $\cos \varphi = 1$  необходимо получить с помощью системы регулирования величину  $i_y = 0$ .

При постоянном значении реактивного тока АВН напряжение и реактивная мощность на вводе 6 кВ БУ зависят от длины питающей линии и нагрузки электроприводов. Для поддержания заданного значения напряжения независимо от длины питающей линии 6 кВ и нагрузки электроприводов необходимо его автоматическое регулирование. Оно возможно при помощи отрицательной обратной связи (о.о.с.) по напряжению на вводе 6 кВ БУ и на стороне высокого напряжения преобразовательного трансформатора  $T$ . Аналогично, для обеспечения постоянства  $Q$  независимо от длины питающей линии 6 кВ и нагрузки электроприводов необходимо её автоматическое регулирование при помощи о.о.с. по реактивной мощности на вводе 6 кВ БУ.

### V. Результаты исследований

Ниже приведены результаты исследований АВН с о.о.с. по напряжению и о.о.с. по реактивной мощности [7]. Сигнал задания по напряжению равен 6000 В, по реактивной мощности – 0 квар. Длина линии увеличивается от 1 до 9 км включительно. Несущая частота ШИМ  $f_{\text{нес ШИМ}} = 2400$  Гц. На стороне переменного напряжения АВН включён фильтр.

На рис. 4, а приведена зависимость  $Q$  от длины линии. Из графиков следует, что кривая  $Q$  при регулировании по напряжению плавно снижается от плюс 875 до минус 1160 квар. При длине линии примерно 3 км происходит перекомпенсация  $Q$ . При регулировании по реактивной мощности её значение неизменно при увеличении длины линии и равно заданному значению 0 квар. На рис. 4, б приведена зависимость  $\cos \varphi$  от длины линии. Из графиков следует, что кривая  $\cos \varphi$  при регулировании. По напряжению сначала возрастает от 0,93 до 1 при изменении длины линии от 1 до 3 км, затем при изменении длины линии от 3 до 9 км снижается от 1 до 0,885. Это связано с тем, что при длине линии примерно 3 км происходит перекомпенсация  $Q$  и изменение её знака. При регулировании по реактивной мощности  $\cos \varphi$  не изменяется и равен 1 при изменении длины линии.

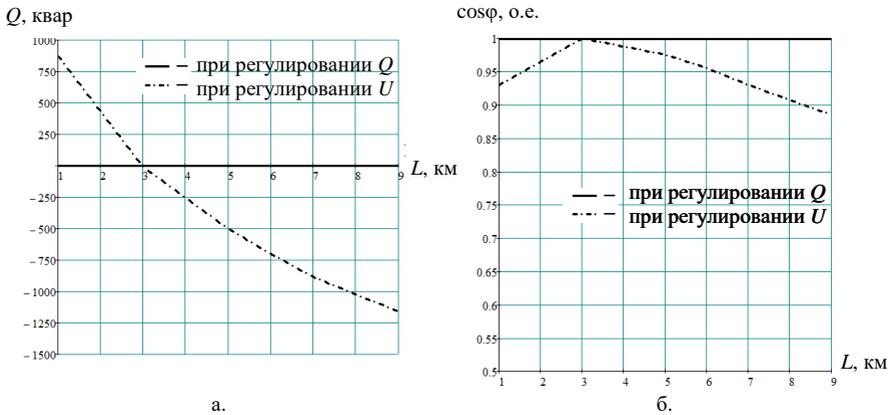


Рис. 4. Графики реактивной мощности (а) и коэффициента мощности (б) в зависимости от длины линии при регулировании по  $Q$  и  $U$

На рис. 5, а приведена зависимость  $\delta U$  от длины линии. Из графиков следует, что кривая при регулировании по напряжению изменяется в пределах от минус 0,7 до 0,5 %, т.е. практически постоянна. При регулировании по  $Q$  график меняется в пределах от 2,3 до минус 12,5 % при увеличении длины линии от 1 до 9 км включительно. При длине линии равной 3 км  $\delta U$  становится отрицательным. На рис. 5, б приведена зависимость коэффициента  $K_U$  от длины линии. Из графиков следует, что кривая при регулировании по напряжению изменяется в пределах от 1,5 до 2,5 %. При регулировании по реактивной мощности кривая изменяется в пределах от 2 до 3 % при увеличении длины линии от 1 до 9 км включительно.

## VI. Заключение

Анализ полученных результатов исследования влияния АВН на величину реактивной мощности и ПКЭ позволяет сделать следующие выводы. Применение АВН позволяет получить коэффициент  $K_U$  меньше 5 % при изменении длины линии от одного до девяти километров независимо от вида обратной связи.

Применение о.о.с. по  $Q$  в системе управления АВН позволяет получить коэффициент мощности равным 1, а реактивную мощность равную нулю при изменении длины линии от 1 до 9 км.

Применение о.о.с. по  $U$  в системе управления АВН позволяет получить отклонение напряжения при изменении длины линии от 1 до 9 км в пределах от 1,5 до 2,5 %, что меньше нормативного значения 10 %.

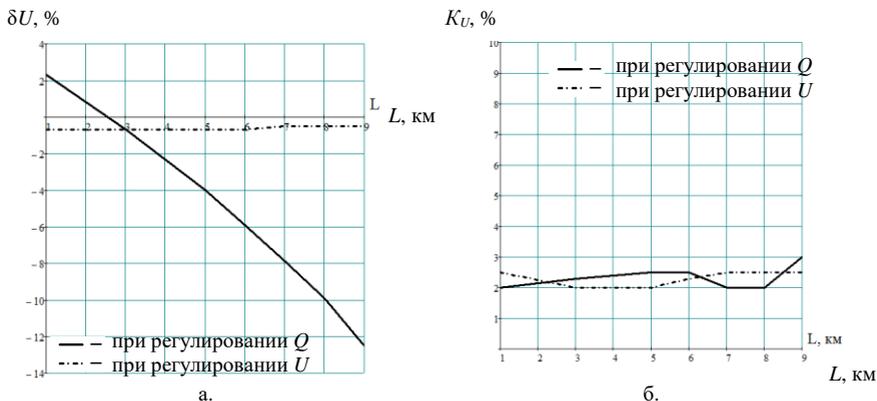


Рис. 5. Графики отклонения напряжения электропитания (а) и коэффициента  $K_U$  (б) в зависимости от длины линии при регулировании по  $Q$  и  $U$

© Плехов А.С., 2018  
 © Титов Д.Ю., 2018  
 © Шевырев Ю.В., 2018  
 © Шевырева Н.Ю., 2018

### Библиографический список

- [1] Абрамов Б.И. Инструментальные исследования качества электроэнергии на нефтепромыслах в условиях широкого применения частотно-регулируемых приводов // Нефтяное хозяйство. 2016. №1. С. 90-92.
- [2] Добрусин Л.А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 84 с.
- [3] Козярук А.Е. Технично-экономические показатели ЭЭС горных машин при использовании преобразователей частоты с активным выпрямителем // Электросила, Приложение к сборнику № 42, 2003. С. 57-64.
- [4] Шевырёва Н.Ю. Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем // Главный энергетик. 2015. № 8. С.69-74.
- [5] Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
- [6] Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты // Электричество. 2000. № 3. С. 46-54.
- [7] Шевырева, Н.Ю. Закономерности влияния частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем на качество электроэнергии // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2015. № 4. С. 26-35.

A.S. Plekhov <sup>1</sup>, D.Yu. Titov <sup>1</sup>,  
Yu.V. Shevyrev <sup>2</sup>, N.Yu. Shevyreva <sup>3</sup>

## POWER QUALITY MANAGEMENT OF WEAKNESS NETWORKS BY ACTIVE VOLTAGE RECTIFIER

<sup>1</sup> Nizhy Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev

<sup>2</sup> National University of Science and Technology «MISiS»

<sup>3</sup> National University of Oil and Gas «Gubkin University»

**Abstract.** The conversion equipment of electrical systems has a significant negative impact on power quality parameters. One of the most common types of converters is rectifiers. The article is devoted to the impact of an active voltage rectifiers on the power quality parameters and the reactive power value in a «weak» power supply network. Measurements and the analysis of power quality parameters have been conducted in oil-field electrical networks with a share of variable-frequency drives of about 80% of the power of all consumers. An excess of the permissible level of nonlinear distortion of the voltage waveform has been established, which makes it reasonable to use frequency converters with an active rectifier to improve the quality of electricity in such networks. A mathematical model of a control system for the active voltage rectifier has been developed. Synthesis of the control system regulators is based on the principles of subordinate regulation, taking into account compensation for the effects of cross-links and disturbing effects. The effectiveness of applying negative feedback on the magnitude of reactive power and on the voltage in the control system of the active voltage rectifier is shown.

**Keywords:** active voltage rectifiers, power quality parameters, reactive power, variable-frequency drive.

### References

- [1] B.I. Abramov. Instrumental research of electric power quality in oil fields in conditions of wide application of frequency – controlled drives // Oil industry, vol.1, pp. 90-92, 2016.
- [2] L.A. Dobrusin, Filter-compensating devices for converter technology. M.: Energoprogress, 2003.
- [3] A.E. Kozyaruk and A.V. Kulygin. Technical and economic indicators of EPS of mining machines using frequency converters with an active rectifier // Electrosila, vol. 42, pp. 57-64, 2003.
- [4] N. Shevyrev. Justification of the application of a frequency-controlled electric drive with an active rectifier // Chief Power Engineer, vol. 8, pp. 69-74, 2015.
- [5] A.B. Vinogradov. Vector control of AC electric drives. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University n.a. V.I. Lenin, 2008.
- [6] R.T. Shreiner and A.A. Efimov. Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters // Electricity, vol. 3, pp. 46-54, 2000.
- [7] N. Yu. Shevyryova. Laws of the influence of a frequency – regulated electric drive with an active rectifier on the quality of electricity // News of higher educational institutions of the Chernozen region, vol. 4, pp. 26-35, 2015.