

## Инструментальные исследования качества электроэнергии на нефтепромыслах в условиях широкого применения частотно-регулируемых приводов

Б.И. Абрамов,

Д.А. Державин,

А.М. Чуриков, к.т.н.

(ООО «Электротехническая промышленная компания»),

Ю.Б. Новоселов, к.т.н.,

М.А. Суслов

(ОАО «Гипротюменнефтегаз», Группа ГМС),

Ю.В. Шевырев, д.т.н.

(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»)

Адрес для связи: uvshev@yandex.ru

**Ключевые слова:** центробежный электронасос (ЭЦН), частотно-регулируемый привод, качество электроэнергии, измерение

В настоящее время для добычи нефти широко применяются доказавшие свою высокую эффективность установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) с частотно-регулируемым приводом (ЧРП). Вместе с тем преобразователь частоты, являясь нелинейной нагрузкой, ухудшает качество электроэнергии в нефтепромысловых электрических сетях и искажает синусоидальную форму напряжения питания УЭЦН [1, 2]. Негативное воздействие нелинейных искажений на элементы системы электроснабжения проявляется в следующем:

- сокращение сроков службы силовых трансформаторов и другого электротехнического оборудования;
- высокая вероятность резонанса в системе электроснабжения и выход из строя батарей статических конденсаторов;
- сбой в работе систем релейной защиты и автоматики (РЗА).

В статье приведены результаты измерений и анализа показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на Приобском месторождении ООО «РН-Юганскнефтегаз», дана оценка влияния батарей статических конденсаторов (БСК) на коэффициент мощности и форму напряжения сети, предложены решения по повышению качества электроэнергии в нефтепромысловых электрических сетях.

Объектом исследования был участок распределительной сети 35 кВ с центром питания – подстанцией 110/35 кВ «Озерная». Мощность ЧРП составляет примерно 80 % мощности всех потребителей. Питание кустов скважин осуществляется по трем двухцепным воздушным линиям 35 кВ: «Дружная», «Талая» и «Вербная». На кустовых площадках установлены понижающие подстанции

**Instrumental studies of the electrical energy quality for oil field under conditions of wide-spread application of frequency-regulated electrical drives**

B.I. Abramov, D.A. Derzhavin, A.M. Churikov (Electrotechnical Industrial Company Ltd., RF, Moscow), Yu.B. Novoselov, M.A. Suslov (Giprotyumenneftegaz OOO, HMS Group, RF, Tyumen), Yu.V. Shevryev (National University of Science and Technology MISIS, RF, Moscow)

E-mail: uvshev@yandex.ru

**Key words:** centrifugal pump, variable frequency drive, quality of electricity, measuring

Currently, for the extraction of oil are widely used the installation of centrifugal pumps with variable frequency drive. The frequency Converter degrades the quality of electricity in the oilfield electrical networks and causes distortion of the sinusoidal supply voltage. The investigations showed that the level of non-linear distortions of the bus voltage 6 kV substation 35/6 kV exceeds the normal allowable according to GOST R 54149-2010. On the 6 kV bus connected to the battery of static condensers, exceeded the maximum permissible level. The power factor measured at 6 kV bus when disabled static capacitor Bank is in the range of 0.95 to 0.97. Therefore, the main task is to filter harmonics. To combat the higher harmonics and eliminate their negative impact suggests the following activities. Semiconductor converters are recommended to connect to the mains through a network reactor; to apply the harmonic filters on the side of the 0.4 kV; to apply frequency drives with 12-pulse rectification circuit for powerful pumping systems; to ensure reliable operation of capacitor banks to establish protective choke, excluding the resonance phenomena.

ПС 35/6 кВ, от которых по линиям 6 кВ получают питание трансформаторные подстанции КТП-6/0,4 кВ. От распределительных устройств низкого напряжения (РУНН) 0,4 кВ этих КТП осуществляется распределение электроэнергии непосредственно к УЭЦН.

В работе исследованы ПКЭ кустов № 286, 286 бис, 287 и 291 добывающих скважин, а также кустовой насосной станции КНС-6. Все объекты исследования подключены к ПС 110/35/6 кВ по общей ВЛ 35 кВ «Вербная», что позволяет рассмотреть взаимное влияние нелинейных нагрузок.

Показатели качества электроэнергии измерялись на вводах РУ-6 кВ кустовых подстанций ПС 35/6 кВ и на вводах РУ-0,4 кВ комплексной трансформаторной подстанции КТПН-6/0,4 кВ, а также на отходящих линиях 0,4 кВ РУНН КТПН-6/0,4 кВ, питающих отдельные УЭЦН.

### Программа измерений

Программой предусматривалось измерение загрузки силовых трансформаторов, коэффициента мощности на вводах РУ-6 кВ и РУ-0,4 кВ, коэффициентов искажений синусоидальной формы тока на вводах и напряжения на шинах РУ 6 кВ ПС 35/6 кВ, а также на сборных шинах 0,4 кВ КТПН-6/0,4 кВ. Степень влияния отдельных приводов оценивалась по величине тока и коэффициенту нелинейных искажений тока, измеряемых в отходящих линиях 0,4 кВ КТПН-6/0,4 кВ.

Для оценки влияния батарей статических конденсаторов БСК-6 кВ, предусмотренных проектом для компенсации реактивной мощности, были предусмотрены измерения соответствующих показателей как при работающем устройстве, так и при его отключении.

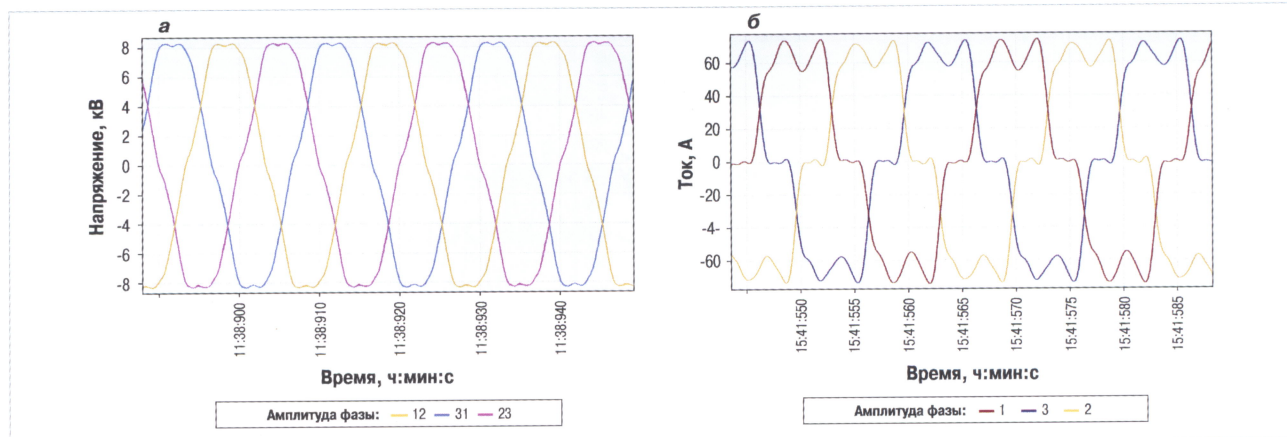


Рис. 1. Формы напряжения на сборных шинах 6 кВ (а) и тока на вводе РУ-6 кВ (б) ( 28.03.13 г.)

Таблица 1

Номер	Ток ввода, А	Напряжение, кВ	Коэффициент искажения синусоидальности кривой, %		Коэффициент мощности
			тока $K_I$ (ТНДИ)	напряжения $K_U$ (ТНДУ)	
286	1	84	6,27	19,5	0,95
	2	51	6,15	23	0,98
286 бис	1	63	6,28	12,5	0,98
	2	88	6,52	15,2	0,97
287	1	52	6,16	19	0,97
	2	99	6,23	52	0,86

### Исследование ПКЭ на сборных шинах 6 кВ ПС 35/6 кВ

ПКЭ на сборных шинах 6 кВ ПС 35/6 кВ мощностью 6300 кВА измерялись на кустах № 286, 286 бис и 287. На кустах № 286 и 286 бис БСК отключены, на вводе № 2 куста № 287 БСК включена постоянно. Из рис. 1 видно, что формы напряжения на сборных шинах 6 кВ и тока на вводе 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, 13-я гармоники, а также нечетные гармоники более высокого порядка, что характерно для нелинейной нагрузки в виде станций управления с частотным преобразователем.

Результаты измерений коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока показывают, что значения нелинейных искажений напряжения в сетях 6 кВ превышают допустимый по ГОСТ Р 54149-2010 уровень, который составляет 5 % (табл. 1). На кустах № 286 и 286 бис, где БСК отключены, коэффициент мощности на сборных шинах 6 кВ ПС 35/6 кВ превышает или равен 0,95, на вводе № 2 куста № 287 с постоянно включенной БСК коэффициент мощности составляет 0,86. Из табл. 1 следует, что широкое применение ЧРП для погружных насосных установок снижает потребление реактивной мощности даже при отсутствии БСК. При этом первоочередной является проблема фильтрации гармоник.

### Применение БСК-6 кВ для компенсации реактивной мощности

Предусмотренные проектом БСК-6 кВ установлены на общих шинах 6 кВ всех подстанций ПС-35/6 кВ, однако на момент проведения измерений большинство БСК было отключено.

Измерения ПКЭ на кустовых подстанциях ПС-35/6 кВ, где БСК были отключены, показали следующее: на стороне 6 кВ подстанций коэффициент искажения синусоидальности кривой тока находится в пределах 12,5–23 % (на вводе РУ-6 кВ), коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 5,85–6,35 %. На кусте № 287 с подключенной ко второй секции шин БСК коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения на вводе № 2 составили соответственно 52 и 9,7 % (см. табл. 1).

Для уточнения причин существенного увеличения искажений синусоидальности кривых тока и напряжения на вводе № 2 ПС35/6 кВ измерения были проведены повторно, БСК отключена. При этом существенно снизились коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения. Так, после отключения БСК коэффициент искажений напряжения составил 6,7 %, коэффициент искажений тока снизился с 52 до 20 % (рис. 2). Это улучшило формы напряжения и тока на вводе РУ-6 кВ. При отключении БСК несколько снизилось напряжение на общих шинах 6 кВ, ток ввода № 2 уменьшился с 100 до 83 А.

Анализ содержания высших гармоник в кривых тока и напряжения показывает, что при отключении БСК уровень 5-й гармоники снизился в 2,5 раза, 11-й – почти в 7 раз. Данные показатели свидетельствуют о том, что в системе с включенной БСК создаются благоприятные условия для развития параллельного резонанса токов в системе БСК – система электроснабжения – ЧРП на частотах, близких к 5-й и 7-й гармоникам. Параллельный резонанс

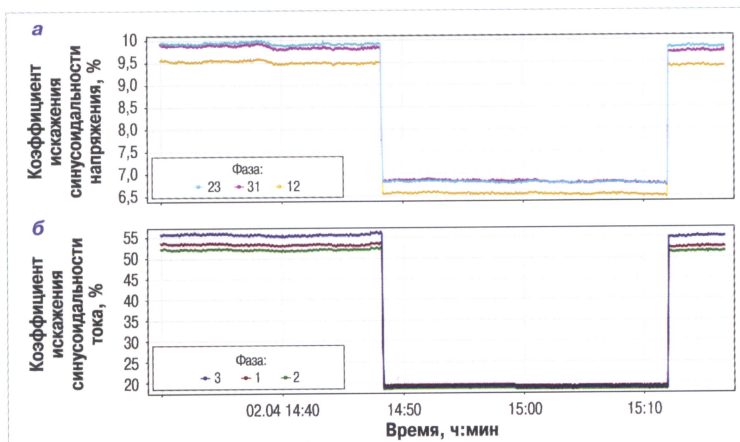


Рис. 2. Средние значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения (а) и тока (б) на вводе РУ-6 кВ за один период при включенной и отключенной БСК (02.04.13 г.)

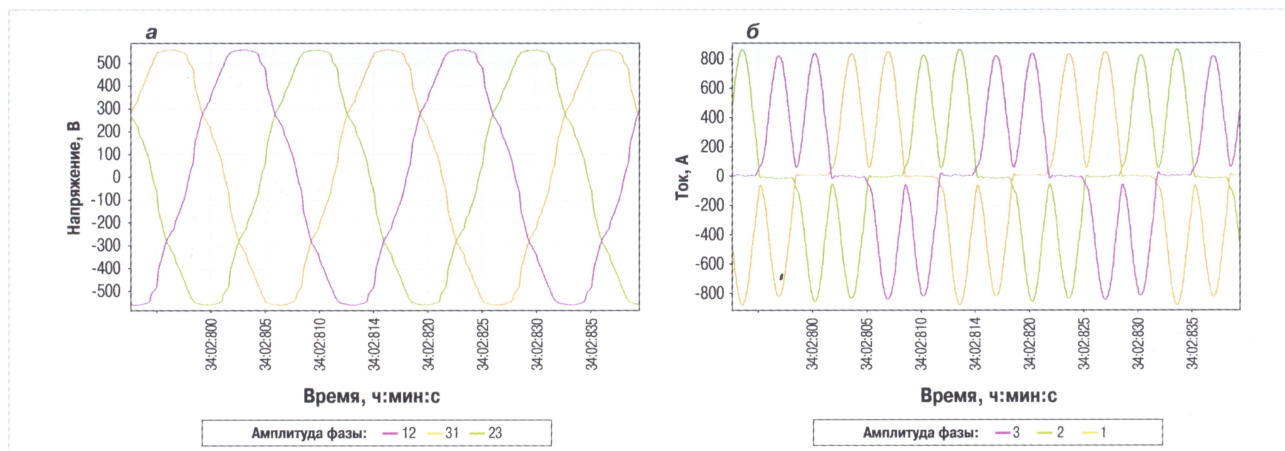


Рис. 3. Формы напряжения (а) и тока (б) на сборных шинах КТПН-1 (куст № 286 бис)

токов в указанной системе может привести к выходу из строя БСК, вызвать сбой в работе систем релейной защиты и автоматики, сократить срок службы силовых трансформаторов и кабелей.

### Измерения на вводах РУ-0,4 кВ КТПН-6/0,4 кВ

ПКЭ на вводах РУ-0,4 кВ КТПН-6/0,4 кВ измерялись на кустах № 286 бис и № 287. На рис. 3 представлены формы напряжения и тока на вводе РУ-0,4 кВ КТПН-6/0,4 кВ (КТПН-1) для куста № 286 бис. В табл. 2 приведены результаты измерений на вводах РУ-0,4 кВ КТПН-6/0,4 кВ.

Таблица 2

Номер		Напряжение, В	Ток, А	K <sub>υ</sub> , %	K <sub>ι</sub> , %
куста	КТПН				
286 бис	1	404	465	5,5	60
	2	413	575	6,3	40,4
287	1Б	407	660	11,0	29
	1	407	327	8,5	20
	3Б	405	245	6,5	23

Из табл. 2 следует, что уровень нелинейных искажений формы напряжения на сборных шинах КТПН-6/0,4 кВ может превышать нормально допустимый по ГОСТ Р 54149-2010, если на сборные шины 6 кВ включены БСК-6 кВ (куст № 287, КТПН № 1Б и КТПН № 1).

### Предложения по обеспечению требований ГОСТ Р 54149-2010 в электрических сетях нефтепромыслов

Проведенные исследования ПКЭ в нефтепромысловой сети позволяют сделать следующие выводы.

1. Частотные приводы УЭЦН являются причиной искажений синусоидальности кривых тока и напряжения в сети.
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 0,4 кВ может превышать нормально допустимый по ГОСТ Р 54149-2010.
4. Уровень нелинейных искажений формы напряжения на сборных шинах 6 кВ подстанций 35/6 кВ превышал нормально допустимый по ГОСТ Р 54149-2010. На шинах, к которым подключена БСК-6 кВ, также превышен предельно допустимый уровень.
5. Широкое применение ЧРП для УЭЦН насосных установок снижает потребление реактивной мощности.

Коэффициент мощности, измеренный на сборных шинах 6 кВ ПС 35/6 кВ при отключенном БСК, составляет 0,95–0,97. При этом главной является проблема фильтрации гармоник.

Для борьбы с высшими гармониками и устранения их негативного влияния предлагаются следующие мероприятия.

1. Полупроводниковые преобразователи рекомендуется подключать к питающей сети через специальный сетевой реактор.
2. На стороне 0,4 кВ применять фильтры гармоник. При проектировании систем электроснабжения нефтепромыслов включать фильтры гармоник в состав оборудования КТПН-6/0,4 кВ.
3. Для мощных насосных установок (ток более 630 А) применять частотные приводы с 12-пульсной схемой выпрямления, что позволяет снизить уровень высших гармоник в питающей сети. В новых проектах рекомендуется использовать схему с несколькими инверторами (приводами), питающимися от одного общего выпрямителя, выполненного по 12-пульсной схеме.
4. Для обеспечения надежной работы БСК-6 кВ проводить их доработку: устанавливать защитный дроссель, исключающий резонансные явления.
5. С целью нормализации искажений напряжения на сборных шинах 6 кВ ПС-35/6 кВ необходимо применять фильтры гармоник на всех КТПН-6/0,4 кВ с большой долей нелинейных нагрузок. Установка фильтров гармоник на сборных шинах отдельных КТПН не приводит к требуемому снижению искажений напряжения.

### Список литературы

1. Оценка влияния частотно-регулируемых электроприводов погружных насосов на качество электроэнергии в нефтепромысловых сетях/Б.И. Абрамов, В.М. Пономарев, Ю.Б. Новоселов (и др.)//Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2012. – С. 569–573.
2. Качество напряжения в сетях электроснабжения установок погружных электронасосов/В.П. Фрайштетер, М.А. Суслов, В.А. Ведерников, Р.Р. Лопатин//Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 4. – С. 102–104.

**References**

1. Abramov B.I., Ponomarev V.M., Novoselov Yu.B. et al., *Otsenka vliyaniya chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov pagruznykh nasosov na kachestvo elektraenergii v neftepromyslovyykh setyakh* (Assessing the impact of variable frequency drives of submersible pumps on the quality of the electricity in oilfield network), Proceedings of VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (VII International (VIII All-Russian) conferences on automated electric), Ivanovo, 2012, pp. 569–573
2. Frayshteter V.P., Suslov M.A., Vedernikov V.A., Lopatin R.R., *Quality of an electrical voltage in networks of power supply of submersible electric pump systems* (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2009, no. 4, pp. 102–104.