

Е.В. Пичкур, В.В. Козлов

УПРАВЛЕНИЕ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ ПО КРИТЕРИЮ ВЛИЯНИЯ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Рассматривается проблема влияния УЭЦН с ПЧ на качество электроэнергии в распределительных сетях нефтепромыслов. В результате массового применения преобразователей частоты происходит увеличение содержания высших гармонических составляющих тока и напряжения и реактивной составляющей электропотребления в сетях. Последствием данных негативных факторов является рост числа аварийных отключений. Поэтому необходимо исследование влияния питающей сети и системы УЭЦН с ПЧ, что даст возможность скорректировать имеющиеся методики и регламенты выбора оборудования.

Преобразователь частоты, установка электроцентробежных насосов, высшие гармонические составляющие, реактивная мощность, питающая сеть.

Среди потребителей электроэнергии на нефтяных промыслах Юганского региона, по данным ООО «ЮНГ — Энергонефть», наибольший процент составляют погружные установки добычи нефти с электроцентробежными насосами (ЭЦН) (57 %) (рис. 1).

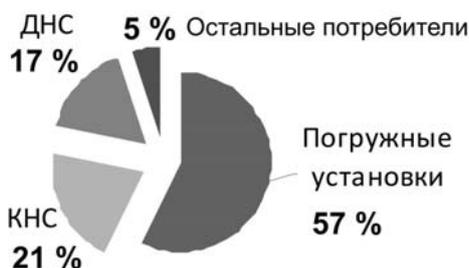


Рис. 1. Диаграмма основных потребителей электроэнергии на нефтяных промыслах ОАО «РН — Юганскнефтегаз» по данным за 2012 г.

Таким образом, специфика развития именно этого вида нагрузки сети определяет эволюцию энергосистемы месторождения в целом.

В последнее время в механизированной добыче нефти наблюдается массовое применение преобразователей частоты в составе УЭЦН, использование которых приводит к следующим негативным последствиям:

- увеличению содержания высших гармонических составляющих (ВГС) тока и напряжения в питающей сети;
- появлению помех в системах связи, управления и телемеханики, вызывающих аварийные ситуации и перерывы в электроснабжении указанных установок;
- дополнительному увеличению реактивной составляющей энергопотребления в сетях, что проявляется как снижение коэффициента мощности $\cos \varphi$ в сети электроснабжения;

— дополнительным потерям мощности в сетях, вызывающим глубокие отклонения напряжения питания погружных ЭЦН, что может быть причиной некоторых потерь добычи нефти на кустах;

— невозможности эффективного использования традиционных средств компенсации реактивной мощности в сетях из-за быстрого выхода из строя ввиду наличия в кривой напряжения высших гармонических составляющих.

Для обеспечения непрерывности процесса добычи нефти и повышения продолжительности использования погружного электрооборудования увеличивают мощность погружного электродвигателя (ПЭД) относительно значений согласно технологической схеме, что в свою очередь приводит к существенному снижению качества напряжения в электрических сетях. Это проявляется в увеличении реактивного электропотребления установок ЭЦН и содержания ВГС в кривых тока (напряжения). Важнейшее последствие перечисленных негативных факторов — рост числа аварийных отключений электроэнергии на месторождениях, вызванных преждевременным выходом из строя электрооборудования и ложными срабатываниями средств релейной защиты.

По данным ООО «РН — Юганскнефтегаз» за 2003 г., коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения достигал величин 7–10; 6,3 и 4,4 % для сетей 0,4; 6 и 35 кВ соответственно. В настоящее время ситуация существенно ухудшилась и данный коэффициент увеличился до 14; 7,5 и 4,5 % соответственно. Коэффициент $\cos \varphi$ в сетях 0,4 кВ на сегодняшний день достигает величин 0,3–0,4 при нагрузке ПЭД на 50–60 % [3], однако нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности напряжения по данным ГОСТ 13109-97 составляют 0,08–0,12 [4].

Из приведенных выше данных понятно, что в последние годы существенно возросло влияние преобразователей частоты на работу как самой установки, так и питающей ее сети, ресурсов которой становится недостаточно для компенсации всех негативных факторов, возникающих в процессе эксплуатации парка УЭЦН [6]. Это проявляется в фактах дефицита мощности на отдельных участках сети, снижении качества электрической энергии и частых необоснованных отключениях средств защитной автоматики в подстанциях 35/6 кВ, 6/0,4 кВ и станциях управления установок ЭЦН.

В нашей стране и за рубежом выполнено большое количество работ по созданию схем, исследованию режимов, математическому моделированию и методам расчета процессов в системах ПЧ. Решением этих вопросов занимались такие исследователи, как В.Ф. Бражников, Б.П. Соустин, Т.А. Глазенко и др. В.А. Ведерников, Ю.Б. Новоселов, В.А. Шпилева и др. уделяли внимание процессам управления УЭЦН с ПЧ. В современных публикациях рассматриваются вопросы, связанные с изучением преобразователей частоты и оборудованных ими установок ЭЦН, однако анализ взаимодействия электрической сети и потребителя (в случае нефтепромыслов) в должной мере не производился.

Таким образом, очевидна необходимость исследования взаимного влияния питающей сети и системы УЭЦН с ПЧ, которое даст возможность скорректировать методики и регламенты выбора технологического оборудования погружных электронасосных установок добычи нефти и режимов их работы.

Базовая концепция и критерии оперативного управления УЭЦН изложены в [1], где модель системы «УЭЦН — скважина» устанавливает связь основных технологических параметров в следующей форме:

$$q_i = \mathcal{P} (u_i, g_i, \xi_i, t_i),$$

где q_i — дебит жидкости скважины на i -м интервале управления, обеспечивающий выполнение скважиной задания на объем добычи для данного интервала управления; \mathcal{P} — принятая модель системы «УЭЦН — скважина»; i_i — вектор управляемых параметров системы на i -м интервале управления; g_i — вектор неуправляемых параметров системы на i -м интервале управления; ξ_i — вектор случайных воздействий на систему на i -м интервале управления; t_i — продолжительность i -го интервала управления.

Для дальнейших исследований данную модель необходимо дополнить следующими параметрами:

S_i — спектральная функция тока (напряжения) в цепи питания ПЭД на i -м интервале управления;

Q_i — реактивная мощность в электрических сетях на i -м интервале управления.

С позиции минимизации влияния ПЧ на сеть (и как следствие — сети на установку ЭЦН) оптимальным будет такой режим работы преобразователя, при котором его спектральная функция S_i близка к некоторой оптимальной функции S_o , описывающей спектр, соответствующий требованиям ГОСТ 13109-97. Также предполагается, что функция реактивной мощности Q_i будет сведена к минимуму, при условии что $\cos \varphi$ стремится к значениям, определяемым номинальными режимами работы силового электрооборудования добывающих скважин. Это позволяет сформулировать следующие дополнительные критерии управления, позволяющие достичь необходимых показателей качества электроэнергии в питающей сети:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n S_i \rightarrow n \cdot S_o ; \quad (1)$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^n Q_i \rightarrow \min . \quad (2)$$

Для установления точного вида функций S_i , S_o , Q_i и их связи с параметрами работы электрооборудования установок ЭЦН и скважины в целом необходимо провести комплекс испытаний, включающий в себя исследования работы системы «ПЧ — ПЭД» в различных режимах.

Ввиду большой сложности и трудоемкости полевых испытаний подобного характера, которые потребуют значительных капитальных затрат, целесообразно на начальном этапе ограничиться исследованием специально разработанной имитационной модели рассматриваемой системы.

Для решения данной проблемы предлагается рассмотреть систему «ПЧ — АД» с трехфазным мостовым автономным инвертором напряжения и короткозамкнутым асинхронным двигателем.

Моделирование такой системы является достаточно сложной задачей, однако существует большое количество работ, направленных на исследование характерных режимов, создание методов расчета процессов в системах с ПЧ и их математическое моделирование [8]. Этими вопросами занимались П. Гнедин, И.В. Черных, С.Г. Герман-Галкин и др.

В результате анализа данной литературы была построена модель ПЧ с асинхронным двигателем (АД) (рис. 2).

Для построения модели использовалась схема однофазного преобразователя частоты при допущении, что трехфазная сеть симметрична. В ее состав входят инвертор, выпрямитель и асинхронный двигатель со статической нагрузкой. Здесь инвертор имеет два плеча и построен на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT, выпрямитель представлен в виде элемента Universal Bridges, двигатель — в виде схемы замещения [7]. Также модель учитывает присутствие кабеля и повышающего трансформатора в цепи питания ПЭД, которые представлены соответствующими схемами замещения [5].

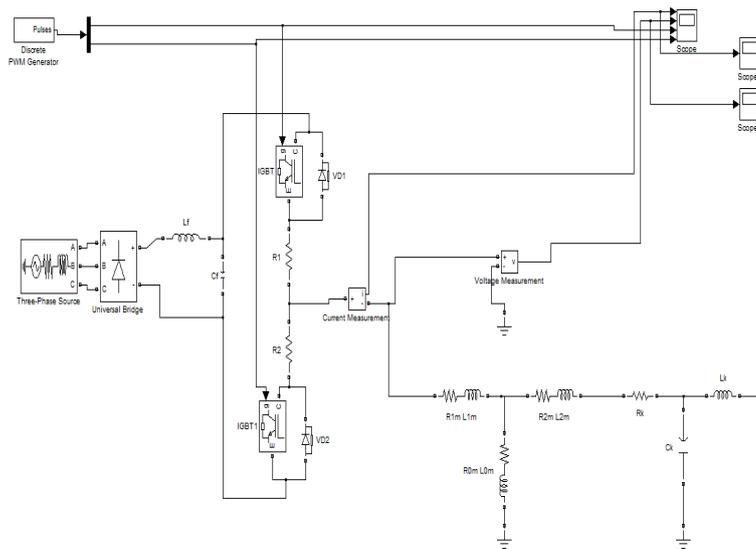


Рис. 2. Модель ПЧ с АД

Модель позволяет получить кривые тока и напряжения статора (рис. 3) и других характерных параметров исследуемого объекта.

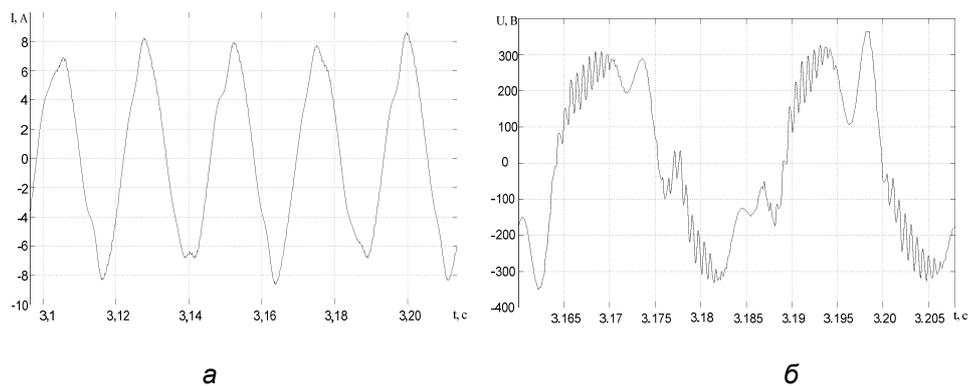


Рис. 3. Кривые тока (а) и напряжения (б) статора (42 Гц)

Модель дает возможность анализировать спектральный состав напряжения и тока (гармоники) на входе и выходе ПЧ, применяя быстрое преобразование Фурье (рис. 4), что позволяет сравнить их с фактическим материалом, полученным в ходе стендовых испытаний системы «УЭЦН — скважина» на технической базе ООО «РН — Юганскнефтегаз» (рис. 5) [2].

В качестве примера на рис. 4 и 5 показаны спектры кривых тока и напряжения, полученные для частоты 42 Гц, наиболее типичной для парка установок ЭЦН Юганского региона, которые преимущественно работают на частотах ниже номинальной.

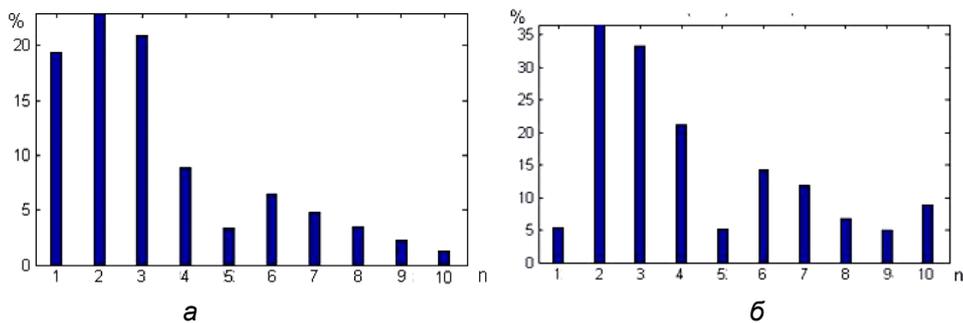


Рис. 4. Спектральный состав кривых тока (а) и напряжения (б), полученный путем моделирования работы регулируемого электропривода на частоте 42 Гц

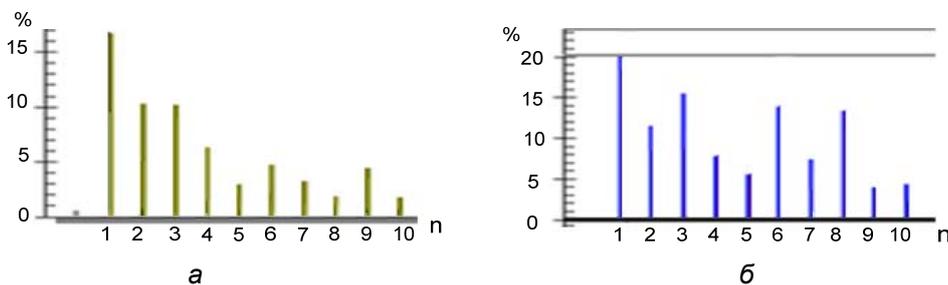


Рис. 5. Спектральный состав кривых тока (а) и напряжения (б), полученный для частоты 42 Гц на испытательном стенде «УЭЦН — скважина» ООО «РН — Юганскнефтегаз»

Так как полученные результаты имеют некоторые количественные отличия от данных эксперимента, очевидно, что данную модель необходимо совершенствовать, чтобы описание исследуемого процесса было более точным, а именно следует расширить ее до трехфазной. Это позволит учесть возникающие в системе эффекты, такие как гармоники, кратные трем, и явления, возникающие при асимметричных режимах работы цепи «ПЧ — ПЭД». Также предполагается учесть структуру источника питания инвертора и уточнить модель электрической сети, которая в естественных условиях не может быть представлена идеальным гармоническим сигналом частотой 50 Гц в силу присутствия большого числа силовых агрегатов разной мощности, работающих в различных режимах параллельно рассматриваемому объекту.

Такие исследования дадут возможность скорректировать методики и регламенты выбора технологического оборудования погружных электронасосных

установок добычи нефти и режимов их работы. Более рациональное решение задачи выбора ПЭД и параметров его питания позволит снизить электропотребление парка ЭЦН Юганского региона и повысить качество электроэнергии в распределительных сетях нефтяных промыслов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ведерников В.А.* Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок. Тюмень, 2007.
2. *Ведерников В.А.* Протокол испытаний УЭЦН с частотно-регулируемым приводом на стенде «скважина — УЭЦН». Нефтеюганск, 2006. 14 с.
3. *Ведерников В.А., Козлов В.В., Лысова О.А.* Разработка рекомендаций по энергосбережению в электрических сетях нефтяных месторождений за счет снижения запаса мощности ПЭД при выборе оборудования УЭЦН. Тюмень, 2010.
4. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. *Козлов В.В., Лопатин Р.Р., Лысова О.А.* Отчет по работам на тему: «Разработка методики расчета мощности ПЭД установок ЭЦН с учетом особенностей развития промысловых электрических сетей Среднего Приобья». Тюмень, 2011.
6. *Кудряшов Р.А., Новоселов Ю.Б., Фрайштетер В.П., Малкова З.А.* Нормативная база проектирования эл. снабжения нефтяных месторождений // Нефтяное хозяйство. 2004. № 3. С. 76–79.
7. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиконянца. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
8. *Черных И.В.* SimPowerSystem: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink. М.: ДМК Пресс, 2011.

Ye.V. Pichkur, V.V. Kozlov

The control of an electric submersible pump unit with frequency converter with a focus on influencing the quality of electric main

The article considers a problem of the ESP unit with FC, influencing the quality of electric power in oilfield distribution mains. The mass use of frequency converters results in the increasing of the higher harmonic components of the current and voltage, as well as of the reactive component of electric consumption in the mains. These negative factors result in the increase of emergency stops. That is why it is necessary to investigate the influence between the supply main and a system of the ESP unit with FC, which will allow to correct the available methods and regulations in the selection of equipment.

Frequency converter, ESP unit, higher harmonic components, reactive power, supply main.