

УДК 62-52

## УПРАВЛЕНИЕ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С АСИНХРОНИЗИРОВАННЫМ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

**Пичкур Е.В., Козлов В.В., Макарова Л.Н.**

*ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень,  
e-mail: chipalina141287@mail.ru*

Рассматривается проблема влияния установок ЭЦН с асинхронизированными вентильными двигателями двойного питания на качество электроэнергии в распределительных сетях нефтепромыслов. В результате массового применения преобразователей частоты происходит увеличение содержания высших гармонических составляющих тока и напряжения в сетях. Последствием данного негативного фактора является рост числа аварийных отключений. Применение двигателей новой конструкции таких, как АВД двойного питания, не решает данную проблему. Поэтому необходимо исследование взаимного влияния питающей сети и системы установок ЭЦН с АВД, что даст возможность скорректировать имеющиеся методики и регламенты выбора оборудования. Для решения поставленной задачи предлагается имитационная модель системы «ПЧ-ПЧ1-АВД» со статической нагрузкой, разработанная в пакете Matlab Simulink. Приведены предварительные результаты имитационного моделирования нелинейных процессов в системе и спектральный анализ формирующихся ВГС.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, установка электроцентробежных насосов, высшие гармонические составляющие, реактивная мощность, питающая сеть, асинхронизированный вентильный двигатель двойного питания

## CONTROL WITH ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS SELF-CONTROLLED INVERTER-BED ASYNCHRONOUS MOTOR WITH DOUBLE SUPPLY

**Pichkur Ye.V., Kozlov V.V., Makarova L.N.**

*FGBOU VO «Tyumen State Oil and Gas University», Tyumen, e-mail: chipalina141287@mail.ru*

The problem of the effect of the ESP systems with self-controlled inverter-bed asynchronous motor with double supply quality in distribution networks of oil fields. As a result of the massive use of frequency converters is an increase in the content of the higher harmonic components of current and voltage networks. The consequence of this negative factor is the growth of the number of outages. Application of new engine designs such as the SIAM double supply, does not solve the problem. Therefore, you must study the mutual influence of the mains system and ESP systems with an SIAM, which will give the opportunity to adjust existing methods and procedures equipment selection. To solve this problem is proposed simulation model of the system «FC-FC1- SIAM» with a static load, developed in the package Matlab Simulink. The preliminary results of the simulation of non-linear processes in the system and spectral analysis of emerging HCV.

**Keywords:** frequency converter installation of electric pumps, the higher harmonics, reactive power, mains, self-controlled inverter-bed, asynchronous motor with double supply

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).

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

Известно, что 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 электропитании указанных установок;

- дополнительному увеличению реактивной составляющей энергопотребления в сетях, что проявляется как снижение коэффициента мощности  $\cos\phi$  в сети электропитания;

- 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.

### Асинхронизированный вентильный двигатель в составе ЭЦН

В настоящее время на нефтяных промыслах активно внедряются установки на базе вентильных двигателей (ВД) различ-

ной конструкции, в том числе и асинхронизированных вентильных двигателей (АВД) двойного питания (рис. 2), которые оснащены ПЧ как в цепи статора, так и в цепи ротора [8]. Помимо улучшения, по сравнению с ПЭД классической конструкции, энергетических характеристик они предоставляют возможность регулирования частоты вращения в существенно расширенном диапазоне, превышающем технологические возможности при эксплуатации УЭЦН.

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,

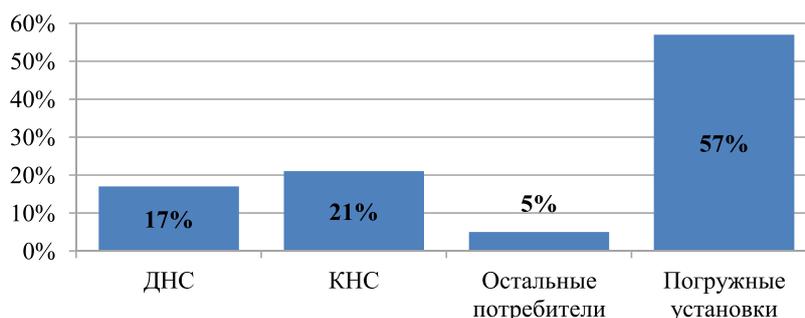


Рис. 1. Диаграмма основных потребителей электроэнергии на нефтяных промыслах ОАО «РН – Юганскнефтегаз», по данным за 2012 г.

Внедрение низкооборотных установок на базе ВД позволяет не только поднять наработку на отказ установок, но и ввести в эксплуатацию ряд скважин из бездействующего фонда. Однако следует отметить, что, несмотря на ряд преимуществ, электроприводы такого рода не решают проблему снижения качества электрической энергии в промышленной питающей сети, а даже усугубляют ее, так как число нелинейных элементов при неизменном размере парка ЭЦН удваивается.

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  $\cos\phi$  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

математическому моделированию и методам расчета процессов в системах ПЧ. Решением этих вопросов занимались такие исследователи, как В.Ф. Бражников, Б.П. Соустин, Т.А. Глазенок и др. В.А. Ведерников, Ю.Б. Новоселов, В.А. Шпилевой и др. уделяли внимание процессам управления УЭЦН. 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. Внедрение новых, малоизученных типов двигателей лишь усугубляет проблему.

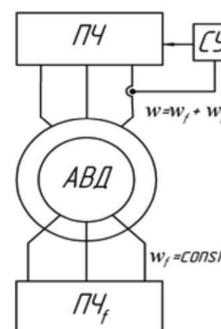


Рис. 2. Асинхронизированный вентильный двигатель двойного питания

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

### Дополнительные критерии оперативного управления УЭЦН с учетом качества напряжения питающей сети

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

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

где  $q_i$  – дебит жидкости скважины на  $i$ -м интервале управления, обеспечивающий выполнение скважиной задания на объем добычи для данного интервала управления;  $P$  – принятая модель системы «УЭЦН – скважина»;  $u_i$  – вектор управляемых параметров системы на  $i$ -м интервале управления;  $g_i$  – вектор неуправляемых параметров системы на  $i$ -м интервале управления;  $\xi_i$  – 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  $S_{o2}$ , описывающей спектр, соответствующий требованиям ГОСТ 13109-97. Также предполагается, что функция реактивной мощности  $Q_i$  будет сведена к минимуму, при условии, что  $\cos\phi$  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:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n S_i \rightarrow n \cdot S_0;$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^n Q_i \rightarrow \min.$$

Для установления точного вида функций  $S_p$ ,  $S_o$ ,  $Q_i$  и их связи с параметрами работы электрооборудования установок ЭЦН и скважины в целом необходимо провести комплекс испытаний, включающий в себя исследования работы системы «ПЧ – ПЧ1 – АВД» в различных режимах.

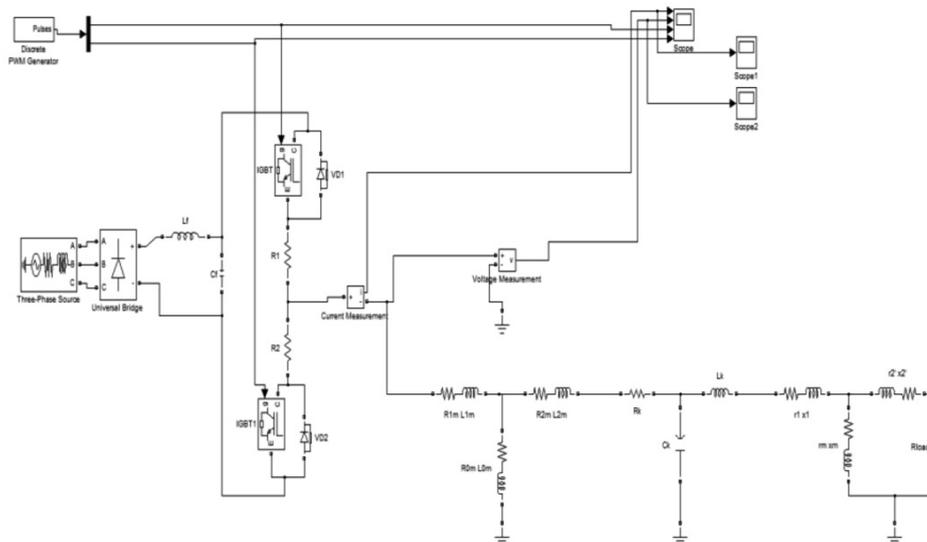


Рис. 3. Модель ПЧ в составе цепи питания двигателя

### Разработка имитационной модели системы «ПЧ-ПЧ1-АВД»

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 – ПЧ1 – АВД» с трехфазными мостовыми автономными инверторами напряжения и асинхронизированным вентильным двигателем двойного питания.

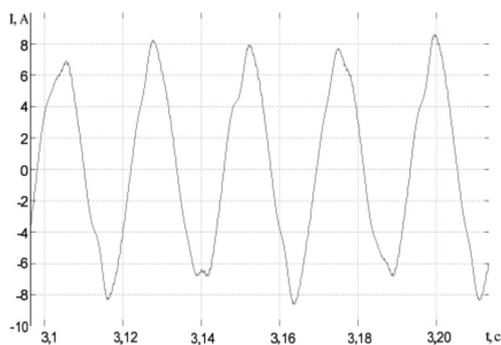
Моделирование такой системы является достаточно сложной задачей, однако существует большое количество работ, направленных на исследование характерных режимов, создание методов расчета процессов в системах с ПЧ и их математиче-

ское моделирование [9]. Этими вопросами занимались П. Гнедин, И.В. Черных, С.Г. Герман-Галкин и др.

В результате анализа данной литературы была построена модель ПЧ в составе цепи питания двигателя (рис. 3).

Для построения модели использовалась схема однофазного преобразователя частоты при допущении, что трехфазная сеть симметрична. В ее состав входят выпрямитель, инвертор, повышающий скважинный трансформатор, кабель и 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, остальные элементы – в виде схем замещения [5, 7].

Модель позволяет получить кривые тока и напряжения статора (рис. 4) и других характерных параметров исследуемого объекта.

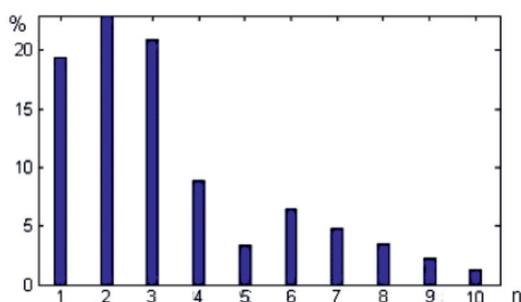


а)

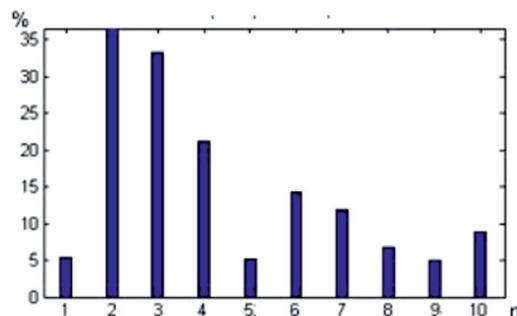


б)

Рис. 4. Кривые тока (а) и напряжения (б) статора (42 Гц)



а)



б)

Рис. 5. Спектральный состав кривых тока (а) и напряжения (б), полученный путем моделирования работы регулируемого электропривода на частоте 42 Гц

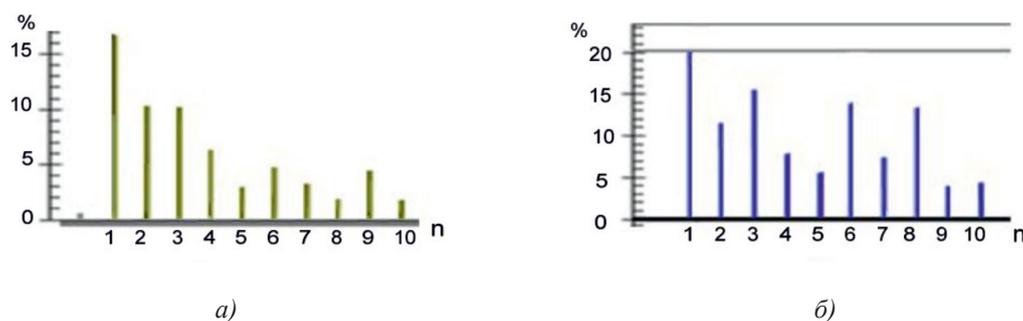


Рис. 6. Спектральный состав кривых тока (а) и напряжения (б), полученный для частоты 42 Гц на испытательном стенде «УЭЦН – скважина» ООО «РН – Юганскнефтегаз»

Также модель дает возможность анализировать спектральный состав напряжения и тока (гармоники) на входе и выходе ПЧ, применяя быстрое преобразование Фурье (рис. 5), что позволяет сравнить их с фактическим материалом, полученным в ходе стендовых испытаний системы «УЭЦН – скважина» на технической базе ООО «РН – Юганскнефтегаз» (рис. 6) в том числе и с применением погружных двигателей других типов [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.

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.

#### Список литературы

1. Ведерников В.А. Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок: Автореф. докт. техн. наук. – Тюмень, 2006. – 32 с.
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. – 41 с.
4. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 31 с.
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 промышленных электрических сетей Среднего Приобья». – Тюмень, 2011. – 82 с.
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. Сонин Ю.П., Гуляев И.В. Асинхронизированные вентиляльные двигатели. Саранск: изд-во Мордов. ун-та, 1998. – 68 с.
9. Черных И.В. SimPowerSystem: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2011.