

УДК 622.276:622.276.53-886:62-527

ОБЗОР И КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ В ПРЕРЫВИСТЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Кладиев Сергей Николаевич,
kladiev@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. В настоящее время активно проводится перевод нефтяных скважин с низким и средним дебитом на циклическую или кратковременную эксплуатацию скважин для уменьшения излишней производительности насоса, которая образовалась вследствие сокращения дебита скважины, вызванного снижением пластового давления при продолжительной эксплуатации месторождения. Необходимость такого перехода требует обоснования использования более сложной конфигурации источников регулируемого электропитания и систем автоматического управления электрическими приводами установок электроцентробежных насосов в автоматизированных системах управления технологических процессов. Локальные системы автоматического управления нижнего уровня при механизированном электроприводном способе подъема на поверхность из скважины нефтесодержащей жидкости, а именно установки регулируемых электрических приводов переменного тока, состоят из наземных устройств и специального погружного оборудования. Наземные устройства – это станции управления с преобразователями переменного напряжения или преобразователями частоты переменного тока, со встроенным блоком наземной телеметрии, внешний синус-фильтр, повышающий трансформатор. Специальное погружное оборудование включает асинхронный электродвигатель, силовой кабель, телеметрический блок, датчики технологических параметров, центробежный насос. Питание такой установки осуществляется от внешней электрической трехфазной сети 6 кВ через понижающую трансформаторную подстанцию 6/0,4 кВ. В режиме непрерывной эксплуатации установок откачки нефти из скважин электроприводы и другое оборудование работают в квазистатических режимах. Динамический режим циклической эксплуатации скважин сопровождается большими бросками пускового тока и электромагнитного момента погружного асинхронного двигателя. Нерегулируемый электропривод, а также разомкнутый регулируемый электропривод не способны обеспечить плавный разгон на номинальную производительность насосного оборудования для откачки нефти из скважины в осложненных условиях и ее плавное регулирование в процессе снижения дебита скважины из-за снижения притока нефти к забою. Поэтому основным способом плавного уменьшения излишней производительности погружного центробежного насоса является режим периодического его включения для откачки нефтяной смеси из скважины, и отключения – для ее накопления и восстановления пластового давления. Внедрение циклической технологии показывает, что невозможно повсеместно использовать разомкнутую систему регулируемого электропривода, где приемлемые показатели качества переходных процессов, сопоставимых с показателями качества замкнутых систем регулирования, объективно недостижимы. Из-за того что величина давления на приеме скважины, создаваемая центробежным насосом и необходимая для подъема скважинной жидкости на поверхность, зависит от квадрата частоты вращения ступеней насоса, рабочий диапазон регулирования его производительности ($Q_{\min} \dots Q_{\max}$), м³/сут достигается при изменении напряжения статорной обмотки погружного асинхронного двигателя (80...100) % от $\{U_{ном}\}$ при питании от тиристорного регулятора переменного напряжения. Если величина напряжения статорных обмоток погружного асинхронного двигателя меньше, чем 80 % от $U_{ном}$, скважинная жидкость не поднимается на поверхность и не выходит через устьевую арматуру. Поэтому при питании от преобразователя частоты с частотным законом управления $U_{ном}/f_{ном} = const$ напряжение питания и частота переменного тока погружного двигателя должны изменяться в том же диапазоне. Платой за использование циклической эксплуатации является снижение надежности погружного электромеханического оборудования. Актуальным является переход на специальные конструкции погружных электрических двигателей, совершенствование систем электропитания и синтез замкнутых по основным переменным состояниям систем автоматического управления электроприводом погружного насоса.

Цель: обзор и критический анализ современного состояния и путей совершенствования систем электропитания и автоматического управления установок электроцентробежных насосов в прерывистых режимах эксплуатации нефтяных скважин.

Объект: системы электропитания и автоматического управления установок электроцентробежных насосов в прерывистых режимах эксплуатации нефтяных скважин, системы телеметрии, энергоэффективные погружные двигатели и конструкции центробежных насосов.

Методы: методы теории автоматического управления для разработки концепции эксплуатации малodeбитного фонда скважин, анализа и синтеза разомкнутых и замкнутых систем управления установками электроцентробежных насосов.

Результаты. Представлена научная проблема разработки и внедрения моделей и методов идентификации технологических процессов, комплексов и интегрированных систем управления добычи нефти электроприводным способом при учете влияния длинного погружного кабеля, малом дебите скважин и осложненных условиях эксплуатации. Предложены научно обоснованные технические решения в виде структуры силового канала электромеханической системы с частотно-регулируемым асинхронным двигателем, длинным погружным кабелем и косвенным методом измерения переменных состояния по данным наземных измерений при изменениях нагрузки и характеристик измерительных каналов.

Ключевые слова:

силовой канал электропривода установки электроцентробежного насоса, интегрированные системы управления, регулируемый асинхронный двигатель, косвенные методы измерения переменных состояния, осложненные условия эксплуатации, варианты каналов обратной связи электропривода, энергоэффективные установки электроцентробежных насосов.

Введение

Анализ причин перехода на циклическую (ЦЭС) или кратковременную эксплуатацию (КЭС) нефтедобывающих скважин с низким и средним дебитами [1] очевидно требует обосновать переход на усложненную компоновку систем электропитания и систем управления электроприводов установок электроцентробежных насосов в технологиях автоматизированной добычи.

С позиции специалистов по разработке и эксплуатации локальных систем автоматического управления нижнего исполнительного уровня автоматизированных систем управления технологических процессов (АСУ ТП) скважинной нефтедобычи, а именно электроприводов переменного тока с источниками электропитания от внешней сети электроснабжения в составе наземных станций управления специальными погружными: электродвигателями, кабелями, блоками телеметрии, датчиками технологических параметров, насосами, – режим длительной эксплуатации оборудования является квазистатическим. Поэтому все переходные процессы при пуске установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) с использованием станций управления (СУ) в составе тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) и преобразователей частоты (ПЧ) переменного тока при выводе скважины на режим искусственно «растягиваются» на достаточно продолжительный период времени (единицы–десятки минут). ЦЭС или КЭС – динамический режим работы, который сопровождается большими бросками пускового тока и электромагнитного момента погружного асинхронного двигателя (АД). Нерегулируемый асинхронный электропривод, а также разомкнутый регулируемый асинхронный электропривод не способны обеспечить плавность выхода на номинальную производительность насосного оборудования для откачки нефти из скважины в режиме ЦЭС (КЭС) [2].

Внедрение технологии ЦЭС (КЭС) в скважинной электроприводной нефтедобычи показывает, что невозможно повсеместно использовать разомкнутую систему регулируемого электропривода, где приемлемые показатели качества переходных процессов токов, моментов и частот вращения ротора АД, сопоставимых с показателями качества замкнутых систем регулирования, объективно недостижимы. Применение классических систем разомкнутого регулирования при переходе от длительной эксплуатации на ЦЭС выявляет ряд недостатков:

1. Малый диапазон регулирования частоты вращения ротора погружного АД (ПЭД) $D_\omega=1,15:1,0$ при номинальной нагрузке и изменении напряжения статора $0...220$ В с частотой 50 Гц в электроприводе по схеме тиристорный регулятор напряжения – погружной АД (ТРН–ПЭД); и напряжения $0...220$ В и частоты переменного тока статора $0...50$ Гц – $D_\omega=1,25:1,0$ в электроприводе по схеме преобразователь частоты – погружной АД (ПЧ–ПЭД).
2. Проблемы с пуском ПЭД в осложненных условиях эксплуатации скважин на начальных этапах

разгона при низких частотах вращения из-за недостаточного развиваемого электромагнитного момента, возникающего вследствие низкого значения напряжения в соответствии с вольт-частотной характеристикой ПЧ.

Величина давления, создаваемая центробежным насосом, необходимая для подъема «столба» скважинной жидкости в насосно-компрессорных трубах (НКТ) на поверхность, зависящая от квадрата частоты вращения рабочих ступеней центробежного насоса, ограничивает диапазон регулирования производительности УЭЦН от минимальной до номинальной величины при номинальном напряжении и частоте переменного тока статора погружного электродвигателя величиной интервала регулирования частоты $40...60$ Гц. «...Согласно результатам испытаний по термодинамике и вибродиагностике работа на частотах ниже промышленной частоты характеризуется меньшими значениями нагрева и вибрации погружного оборудования. Допускается продолжительная работа погружного двигателя в диапазоне частот $40...60$ Гц, при условии обеспечения запаса мощности ПЭД (работа насоса с повышенной частотой вращения ротора). Допускается пуск импортных погружных электродвигателей (REDA, Centrilift) с частоты 35 Гц» [3 С. 1].

Плата за использование ЦЭС или КЭС – снижение надежности некоторых модулей погружного электромеханического оборудования (например, гидрозащита изнашивается более интенсивно) [4].

Наиболее перспективным способом добычи трудноизвлекаемых нефтяных запасов (ТРИЗ) в России на примере Баженовской свиты является электропривод по схеме «наземный силовой преобразователь – погружной кабель – погружной электродвигатель – электроцентробежный насос», обладающий излишней производительностью по откачке нефтяного флюида, но имеющий КПД в $2...2,5$ раза выше, чем насосы малой производительности.

Представляется своевременным и актуальным разрабатывать специальные конструкции ПЭД, совершенствовать системы электропитания и синтезировать замкнутые по основным переменным состояниям (току, моменту, частоте вращения, потокосцеплению) системы автоматического управления электроприводом погружного насоса.

С позиции теории адаптивных систем управления обоснована задача проектирования адаптивного электропривода УЭЦН, позволяющего приспособливаться к осложненным условиям эксплуатации скважин.

Сравнительный анализ вариантов построения силового канала электропривода установки электроцентробежного насоса

Рассмотрим реализованные и возможные варианты силового канала системы электропривода УЭЦН. Если электропривод УЭЦН является нерегулируемым и осуществляется прямой пуск ПЭД, то статический момент насосной нагрузки трудноизвлекаемой нефти в осложненных условиях может оказаться больше его пускового момента [5]. Поэтому в последнее время

для привода погружного насоса применяется система преобразователь частоты – погружной АД (ПЧ–ПЭД) [6–8], у которой к выходной обмотке повышающего

трансформатора Т2 подключен длинный нефтепогружной кабель (НПК). Влияние длинного НПК на силовой канал УЭЦН рассмотрено в работах [9–13].

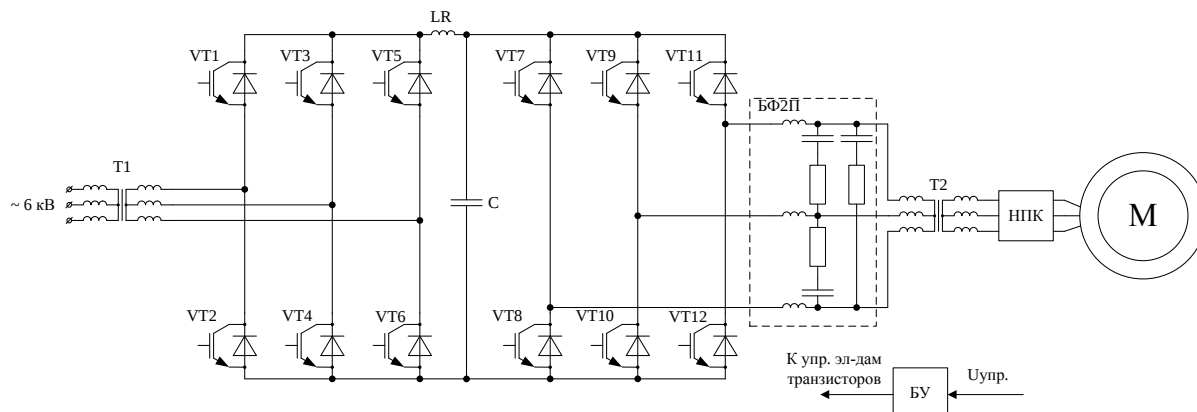


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема разомкнутой системы электропривода УЭЦН с ПЧ: БФ2П – выходной синус-фильтр ПЧ; НПК – длинный нефтепогружной кабель; БУ – блок управления ПЧ

Fig. 1. Schematic diagram of an open-loop electric drive system for a submersible centrifugal pump with a frequency converter: БФ2П – output sine filter of the frequency converter; НПК – long oil submersible cable; БУ – frequency converter control unit

На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема разомкнутой системы электропривода УЭЦН с входным трехфазным трансформатором Т1 напряжением 6/0,4 кВ понижающей подстанции для согласования питающей электрической сети 6 кВ от воздушных линий электропередачи к ПЧ–ПЭД. Преобразователь частоты состоит из управляемого трехфазного мостового выпрямителя на транзисторных IGBT ключах VT1...VT6, звена постоянного тока со сглаживающим L-R-C фильтром, автономным инвертором напряжения (АИН) на транзисторных IGBT ключах VT7...VT12 с широтно-импульсной (ШИМ)

модуляцией напряжения, осуществляемой блоком управления. Для улучшения гармонического состава выходного напряжения инвертора применяется синус-фильтр, который задерживает высшие гармоники. Далее подключен повышающий трансформатор Т2 0,4/1,5...3,0 кВ для согласования напряжения статорных обмоток ПЭД и компенсации падения напряжения на НПК в зависимости от его длины с помощью отпаек на вторичной обмотке [7]. Синус-фильтр входит в обязательную поставку станций управления ЗАО «Электон». В данной схеме ПЧ используется для плавного частотного пуска ПЭД.

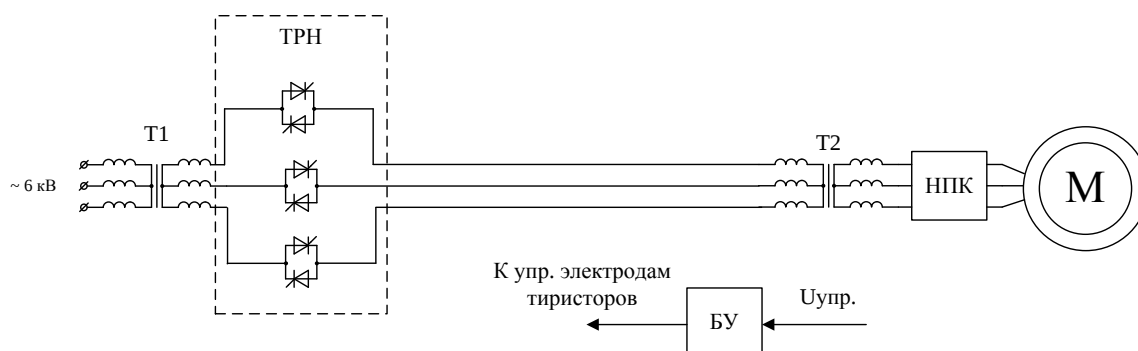


Рис. 2. Принципиальная схема разомкнутой системы электропривода УЭЦН с тиристорным регулятором напряжения (ТРН): НПК – длинный нефтепогружной кабель; БУ – блок управления тиристорным регулятором напряжения (ТРН)

Fig. 2. Schematic diagram of an open-loop electric drive system for a submersible centrifugal pump with an AC-AC converter with phase-fired control (PFC): НПК – long oil submersible cable; БУ – pulse phase control unit

По сравнению со схемой силового канала ПЧ–ПЭД на рис. 2 функцию регулирования переменного напряжения выполняет ТРН на номинальной частоте переменного тока 50 Гц с помощью БУ с фазоимпульсным способом регулирования. Более простой по исполнению и более дешевый ТРН находит применение на скважинах, где переходные режимы управле-

мого пуска и установившиеся режимы номинальной частоты вращения и производительности УЭЦН сопровождаются меньшими моментами нагрузки по управлению и возмущению, чем в схеме на рис. 1.

Станции управления ЭЦН добычи нефти Российских производителей, таких как корпорация «Триол», «Московская энергосберегающая компания», «Нефтя-

ная электронная компания», ОАО «Борец», ЗАО «Электон», оснащенные устройствами плавного пуска на базе тиристорных пусковых устройств (рис. 2), подробно рассмотрены в работе [7].

Там же приведены технические характеристики станций управления частотно-регулируемых электроприводов технологических установок механизированной добычи нефти ОАО «Борец», «Алнас» в содружестве с корпорацией «Триол», «Электон» – отечественных изготовителей, а также иностранных – «Reda» и «Centrilift» (США). Все они имеют двухтрансформаторную силовую схему с ПЧ.

Однотрансформаторная схема на рис. 3 с применением высоковольтного ПЧ с управлением АИН по алгоритму многозонной ШИМ-модуляции по технологии Perfect Harmony рассмотрена в работе [14]. Применение входного многообмоточного трансформатора и многоуровневого инвертора усложняет и удорожает такую схему силового канала. В настоящее время она находит применение в мощных высоковольтных частотно-регулируемых приводах ВЧРП-СМ, ВЧРП-Д и ВЧРП-ТМ производства ЗАО «ЧЭАЗ» для установок штанговых глубинных насосов [14]. Для массового применения УЭЦН на мало- и среднедебитных скважинах она пока является экономически недостаточно выгодной и технически более сложной [15–18]. В будущем при массовом выпуске подобные системы обязательно займут свою нишу в установках технологических процессов с двигателями различных мощностей, в том числе и для добычи нефти с глу-

бинным залеганием продуктивных нефтесодержащих пластов.

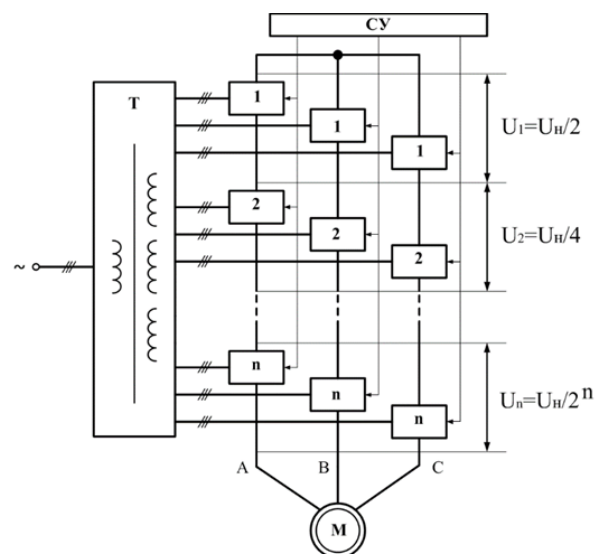


Рис. 3. Многоуровневый преобразователь частоты с дифференцированными напряжениями уровней: *T* – входной многообмоточный трансформатор; блок *CY* – блок системы управления; 1, 2, *n* – силовые ячейки 1, 2, ..., *n*-го уровня

Fig. 3. Multilevel frequency converter with differentiated level voltages: *T* – Input multi-winding transformer; *CY* – control system unit; 1, 2, *n* – power cells of the 1, 2, ..., *n*-th level

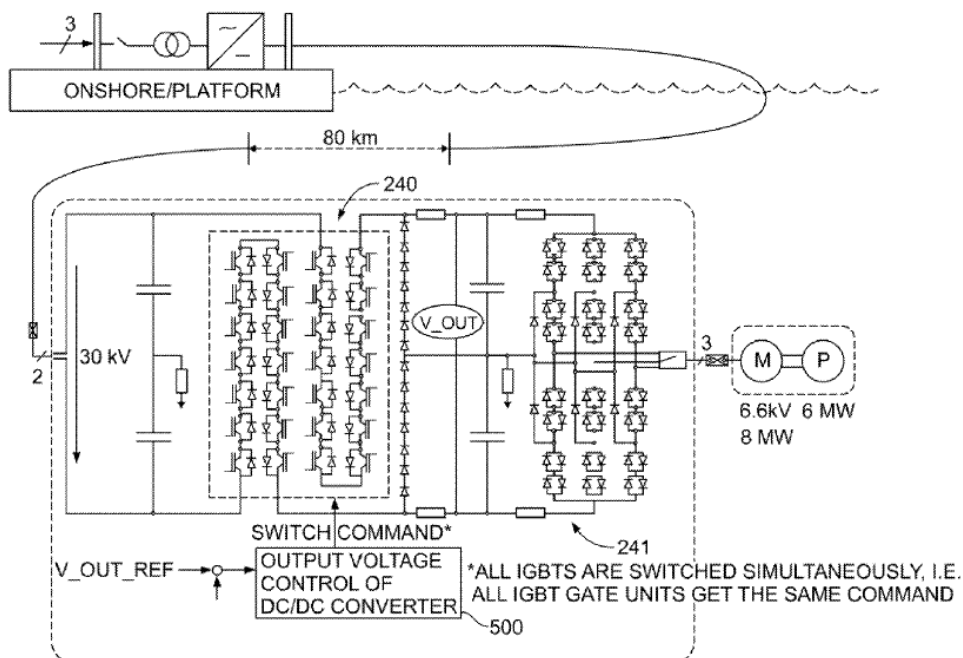


Рис. 4. Схема передачи электрической энергии переменного тока с промежуточным звеном постоянного тока для мощных высоковольтных электроприводов морских нефтедобывающих платформ [19]

Fig. 4. Scheme of transmission of AC electrical energy with an intermediate DC link for high-power high-voltage electric drives of offshore oil platforms according to [19]

Схема «AC line connector with intermediate DC link» [19] применяется для подачи электроэнергии на морские нефтегазовые подводные объекты либо от

внутренних энергетических подстанций, либо от морских ветряных электростанций. Может использоваться на морских плавучих платформах с глубоководной

системой распределения электроэнергии большой мощности (рис. 4) [19]. Использование передачи постоянного тока в приводах двигателей переменного тока на большие расстояния с целью экономии меди и снижения потерь мощности на горнодобывающих предприятиях рассмотрено в работе [20].

Схема передачи энергии по длинному кабелю постоянного тока к погружному силовому преобразователю повышенной частоты и ПЭД для механизированной скважинной добычи нефти на месторождениях Сибири, применительно к УЭЦН, в настоящее время не нашла промышленного применения, так как в России пока нет специально разработанных конструкций скважинных погружных двигателей и преобразователей необходимых габаритных размеров на повышенную частоту переменного тока.

В результате анализа вариантов построения силового канала электропривода установок электроцентробежных насосов можно сделать вывод о том, что для построения замкнутой системы электропривода УЭЦН предпочтительны следующие варианты построения силового канала:

- понижающий трансформатор 6/0,4 кВ – ПЧ–АД – повышающий трансформатор 0,4/1,5...3 кВ – длинный кабель – ПЭД;
- понижающий трансформатор 6/0,4 кВ – ТРН–АД – длинный кабель – ПЭД;
- однотрансформаторная схема – высоковольтный ПЧ с управлением АИН по алгоритму многосонной ШИМ-модуляции – длинный кабель – ПЭД.

Силовой канал электромеханической системы с частотно-регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния

Электромеханические системы, использующие косвенные методы измерения переменных состояния регулируемых асинхронных двигателей, в своем составе имеют три основных блока: силовой канал, внутренний интерфейс, микроконтроллерная система управления. Отличительная особенность данного варианта компоновки электромеханической системы – наличие блока оценивания переменных состояния АД, являющегося программно-реализуемым элементом микроконтроллерной системы управления. Как правило, в состав блока оценивания переменных состояния АД входят наблюдатели потокосцепления, угловой скорости ротора и момента на валу АД.

Силовой канал электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния (рис. 5.) включает в себя:

1. Коммутационные аппараты для подключения к питающей электрической сети.
2. Наземное оборудование УЭЦН, в состав которого входят элементы силового канала: станция управления, которая служит для пуска и регулирования производительности погружного ЭЦН путем плавного изменения частоты вращения сочлененного с ним ПЭД, обеспечивает необходимые защиты технологического оборудования и электро-

двигателя в аварийных режимах работы, отображает и передает текущую информацию о состоянии ЭЦН при помощи средств телеметрии и коммуникации, то есть осуществляет контроль и измерение параметров автоматизированной системы управления технологическим процессом; синус-фильтр, который обеспечивает максимальное приближение формы выходного напряжения ПЧ к синусоиде, тем самым минимизируя значение суммарного коэффициента гармонических составляющих междуфазного напряжения и аналогичного коэффициента для тока; повышающий трансформатор согласует параметры питающего напряжения и тока ПЧ и ПЭД.

3. Кабельная линия УЭЦН, предназначенная для снабжения электроэнергией электродвигателя погружного насосного агрегата.
4. Регулируемый ПЭД, представленный двумя подсистемами: электромагнитной, описываемой переменными состояния статора и ротора, как правило, проекциями вектора тока статора и проекциями вектора потокосцепления ротора; электро-механической, являющейся составной частью одномассовой или многомассовой механической подсистемы электропривода, при этом наблюдению подлежат, как правило, угловая частота вращения ротора и крутящий момент на валу двигателя.
5. Погружная часть скважинной насосной установки – ЭЦН, используется непосредственно для подъема нефтяного флюида на поверхность.

Внутренний интерфейс электромеханической системы (рис. 5.) представлен следующими блоками:

- Драйверы силовых ключей представляют собой специальные микросхемы, предназначенные для коммутации силовых электронных ключей, как правило, мощных тиристоров, IGBT или MOSFET транзисторов.
- Блок датчиков токов и напряжений интегрирован в корпус электромеханической системы и предназначен для измерения мгновенных значений статорных токов и напряжений.
- Блок оценивания переменных АД, в состав которого входят наблюдатели потокосцепления, угловой частоты вращения ротора и момента на валу АД.

Микроконтроллерная система управления (рис. 5) включает следующие основные блоки:

- Задатчик интенсивности предназначен для ограничения бросков тока и момента в переходных процессах электромеханической системы.
- Блок регуляторов обеспечивает показатели качества и устойчивость электромеханической системы.
- Блок согласования позволяет согласовывать выходные сигналы регулятора и входные сигналы драйверов силовых ключей, при этом, как правило, в случае полеориентированного управления применяется ШИМ-модуляция.
- Блок формирования обратных связей обрабатывает мгновенные значения сигналов, поступающих с

датчиков, и с учетом полученной информации формирует сигналы каналов обратных связей. Адекватная работа этого блока гарантируется подблоком оценивания параметров АД, который позволяет оценивать параметры Т-образной схемы замещения погружного регулируемого АД и па-

раметры механической системы электропривода в процессе работы [21].

- Блок априорной информации содержит дополнительные сведения об элементах электромеханической системы, например, каталожные данные асинхронного электродвигателя [21].



Рис. 5. Электромеханическая система с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния

Fig. 5. Electromechanical system with adjustable induction motor and indirect variable state measurement

Компоновка системы с полным набором датчиков обратных связей и системы с устройствами оценивания параметров, а также наблюдателями переменных состояния имеют свои преимущества и недостатки, которые зависят от типа систем с регулируемыми асинхронными двигателями.

Энергоэффективные УЭЦН

Многолетний опыт разработки и ввода в эксплуатацию месторождений нефти в России показал, что происходит рост капиталовложений и текущих затрат отрасли из-за постоянно увеличивающейся доли трудноизвлекаемых запасов и осложненных условий добычи. Особенно быстро растут текущие издержки. Задачу сокращения удельных затрат на добычу нефти можно решать с помощью разработки и применения энергоэффективных УЭЦН.

В [22, 23] рассмотрены научные подходы к повышению энергоэффективности электроприводов по-

гружных электроцентробежных насосов и вопросы теории и практики энергоэффективной эксплуатации оборудования для добычи нефти.

В работе [24] утверждается, что в зависимости от компоновки энергоэффективной УЭЦН «Новомет» и ОАО «ОКБ БН КОННАС» можно обеспечить снижение затрат электроэнергии на подъем скважинной жидкости от 7 до 25 %, а при благоприятных скважинных условиях эксплуатации оборудования эффект может превысить 50 %. Промышленные испытания энергоэффективных УЭЦН «Новомет» ЭЦН 5А-500-2000 с повышенным КПД 59 %, надежностью и снижением габаритной длины до 60 % показали, что в зависимости от условий на месторождениях снижение потребления электроэнергии составило от 11 до 41 % [25]. По информации главного конструктора «Новомет-Пермь» и начальника аналитического отдела ООО «Новомет Сервис» результаты опытно-промышленных испытаний шестисот энергоэффек-

тивных установок показали снижение удельного энергопотребления на 25...30 % и средняя наработка на отказ составила 602 ± 37 суток, что не уступает используемому серийному оборудованию [26, 27]. Кроме того, разработана линейка энергоэффективных УЭЦН 5-10Э и 5-20Э для малодебитных скважин, где основной эффект получился не на экономии электроэнергии, из-за незначительного ее потребления, а на повышении надежности до 30 %.

Новое энергоэффективное оборудование УЭЦН постепенно в плановом порядке должно заменить традиционное оборудование на нефтедобывающих предприятиях России с учетом опыта его применения на передовых предприятиях отрасли [28].

**Технико-экономическое сопоставление
и сравнительный анализ вариантов построения
каналов обратной связи по полному вектору
переменных состояния**

Рассмотрим вариант создания обратных связей по параметрам, измеряемым системами погружной телеметрии (отечественным и зарубежными), путем расширения компоновок и наполнения датчиками [29–32].

Для проверки технического состояния УЭЦН во время работы в промысловой скважине используются телеметрические системы (ТМС), состоящие из погружного блока и наземного блока для согласования телеметрических сигналов. Погружной блок телеметрии предназначен для измерения и передачи в блок согласования следующих основных параметров: давление на приеме погружной установки; температура статорной обмотки ПЭД; температура окружающей среды; уровень вибрации электромеханического оборудования; сопротивление изоляции погружного кабеля.

Информация из погружного блока в наземный поступает по линии связи «нулевой вывод обмотки высокого напряжения повышающего трансформатора перед устьем – погружной силовой кабель – общий вывод статорной обмотки ПЭД относительно заземляющей защитной оболочки силового кабеля». В наземной части системы происходит обработка полученных данных, а также представление их оператору АСУ ТП. По полученным данным можно судить о состоянии УЭЦН в реальном масштабе времени управлять режимами работы скважины и предотвратить отказы установки [33].

В России системы погружной телеметрии производятся такими компаниями, как: ЗАО «Новомет-Пермь» и ОАО «АЛНАС», ЗАО «Электрон», ООО «Борец», ОАО «Ижевский радиозавод» и др. До настоящего времени в России «... не было оперативной, надежной, дешевой универсальной цифровой технологии эффективного контроля эксплуатации и мониторинга добывающих нефтяных скважин, ... когда нефтяные компании перешли на ... разработку низкопроницаемых коллекторов с трудноизвлекаемыми запасами нефти, составляющих ... большую часть запасов углеводородного сырья» [34. С. 38].

Фактически «... не существует подобных универсальных технологий и за рубежом, так как стоимость разработанных там высокотехнологичных систем стационарного удаленного геомониторинга настолько высока, что они используются только в единичных скважинах на шельфовых месторождениях, разрабатываемых с морских платформ» [34. С. 39].

Одна из ведущих нефтедобывающих компаний России – «Газпром нефть» – для минимизации расходов на обустройство скважин глубинными стационарными информационно-измерительными системами разработала подходы к извлечению из цифровых данных дистанционного перманентного геомониторинга надежных количественных критериев оперативного управления работой скважин и пластов [34]. Основная задача – уменьшить потери добычи продукции из-за длительных простоев добывающих скважин при проведении в них стандартных комплексов промыслово-геофизических исследований, предусмотренных в РФ лицензионными соглашениями и федеральными регламентными документами, с целью обеспечения должного контроля разработки [34]. Для достижения требуемого уровня получение количественных оценок: текущей фазовой проницаемости, скин-фактора призабойной зоны пласта, уточнения геометрии залежи, и т. д., длительность вынужденной остановки добывающей скважины при проведении традиционного геомониторинга для пластов, соответствующих категории ТРИЗ, составит десятки суток [34].

Меры, принятые в компании «Газпром нефть» для перехода от датчиков-индикаторов на сертифицированные средства измерения давления и температуры, позволили обеспечить прямой способ дистанционной регистрации забойного давления и беспроводную передачу этих данных в обрабатывающие центры. В период с 2014 по 2018 гг. разработанные и внедренные точечные модули глубинного гидродинамико-геофизического мониторинга «...на объектах "Газпром нефти" дали значительный экономический эффект, выраженный в дополнительной добыче нефти... Опыт применения распределенной оптоволоконной термометрии при мониторинге эксплуатационных скважин в компании "Газпром нефть" обобщил коллектив специалистов Научно-Технического Центра "Газпром нефти"» [34. С. 35, 42]. В работе обоснованы основные технологические подходы и требования к обустройству добывающих скважин системами точечных и распределенных дистанционных стационарных информационно-измерительных систем (ИИС), а также предложены алгоритмы интерпретации и анализа данного типа цифровой информации.

На примере Южно-Приобского месторождения (годовая добыча в 2018 г. составила более 11409 тыс. т. нефти), где ежегодный эффект от внедрения точечных СИИС оценивается на уровне 880 тыс. т дополнительно добытой нефти, можно сделать вывод, что оптимизация добычи за счет уже внедренных средств стационарных ИИС дает совокупный эффект 7,7 % от уровня добычи месторождения [34].

Объем апробации распределенных мониторинговых систем на месторождениях «Газпром нефти» и совместных активах на конец 2018 г. составил: оптоволоконные термические системы DTS – 15 скважин; оптоволоконные акустические системы DAS – 3 скважины; оптоволоконные системы контроля забойного давления – 2 скважины; точно-распределенные индикаторные системы – 8 скважин [34].

Особенности информационных каналов обратной связи:

1. Каналы связи между погружной частью блока ТМС и наземным блоком ТМС, встроенным в станцию управления, узкополосные, что является вполне достаточным для инерционных переменных состояний (температура масла и жидкости в забое, давление в забое, уровень вибрации, динамический уровень жидкости). Для передачи информации неизмеряемых переменных состояния с целью управления производительностью УЭЦН в реальном времени использование таких каналов связи невозможно.
2. При попытке организации каналов обратной связи по переменным состояния от традиционных блоков ТМС к системе управления преобразователем, с точки зрения теории автоматического управления, образуются гибкие обратные связи. При этом образуются «паразитные» элементы (апериодические звенья 1-го и 2-го порядков, звенья чистого запаздывания), приводящие к тому, что достоверная информация по каналам обратной связи доводится до регулятора системы управления недопустимо долго. Стандартные блоки ТМС не подходят для управления ПЭД в замкнутых системах автоматического управления в реальном времени [30].

Разработка программно-алгоритмического блока восстановления неизмеряемых переменных состояния для замкнутой системы автоматического регулирования средствами наземных электрических измерений на входе нефтепогружного кабеля

Алгоритмы идентификации и организация эффективных адаптивных, робастных, синергетических, гибридных нечетких регуляторов в электроприводах УЭЦН рассмотрены в работах [9–13, 18, 21–23, 28, 33, 42]. Основные преимущества систем идентификации параметров схем замещения элементов электротехнического комплекса УЭЦН и наблюдателей полного вектора переменных состояния [36–40] проявляются при настройке замкнутых систем автоматического регулирования и управления электроприводов.

По мнению автора наиболее перспективной концепцией построения замкнутой САУ УЭЦН скважинной нефтедобычи в осложненных условиях эксплуатации является подход, заключающийся в применении наземных средств электрических измерений, сопряженных стандартным способом с интерфейсом наземной станции управления, которые передают достоверные сигналы переменных состояний в специально разработанный автором блок восстановления всех необходимых неизмеряемых переменных состо-

яния (угловая скорость, положение ротора, электромагнитный момент, момент сопротивления, потокосцепления ротора по осям α - β и т. д.) для реализации замкнутой САУ, обеспечивающей все необходимые показатели качества управления электроприводом УЭЦН.

Структура АСУ ТП скважинной нефтедобычи электроприводным способом

Концептуальные основы автоматизации управления УЭЦН нефтедобывающих скважин приведены в работе [41]. Решение задачи автоматизации управления УЭЦН нефтедобывающей скважины требует создания сложных многоуровневых систем принятия и реализации управленческих решений.

Планирующие решения на верхнем уровне управления «... требуют разработки систем поддержки принятия решений, выполняющих в реальном времени сбор и анализ больших объемов информации о различных аспектах процесса работы скважины с УЭЦН» [41 С. 108]:

- разработка моделей идентификации и прогнозирования процессов нефтедобычи;
- оптимизация технологических процессов с помощью алгоритмов поиска управленческих решений. Нижние (оперативные) уровни управления требуют:
- разработки систем аварийного и регулирующего управления, реализующих решения, принятые на верхних уровнях;
- разработки динамических моделей процессов работы УЭЦН, обеспечивающих синтез оптимальных алгоритмов реализации решений верхнего уровня управления, таких как стабилизация, ввод-вывод на режим, аварийное управление [41].

Обсуждение результатов

Отличительная особенность предлагаемого автором как наиболее рационального варианта компоновки электромеханической системы – наличие блока оценивания переменных состояния АД, являющегося программно-реализуемым элементом микроконтроллерной системы управления. Как правило, в состав блока оценивания переменных состояния АД входят наблюдатели потокосцепления, угловой скорости ротора и момента на валу АД.

Известно, что компоновка системы с полным набором датчиков обратных связей и компоновка системы с идентификаторами и наблюдателями имеют свои преимущества и недостатки [42]. Эти преимущества и недостатки зависят от типа систем с регулирующими асинхронными двигателями (таблица).

Компоновка системы с полным набором датчиков обратных связей и компоновка системы с идентификаторами и наблюдателями рассматриваемого типа электромеханической системы характеризуются общими замечаниями.

Представленные недостатки не являются существенными для автоматизации технологических процессов УЭЦН.

Таблица. Сравнение преимуществ и недостатков использования идентификаторов параметров схемы замещения и наблюдателей переменных состояния в основных структурах систем управления регулируемых асинхронных электроприводов УЭЦН

Table. Comparison of the advantages and disadvantages of using the identifiers of the substitution scheme and observers of the main structures of the controlled asynchronous electric drive control systems of the ESP

ПЧ–ПЭД со скалярным управлением и длинным нефтепогружным кабелем Frequency-scalar controlled submersible induction motor with long submersible cable				ПЧ–ПЭД с прямым управлением момента (ПУМ) и длинным нефтепогружным кабелем Frequency-controlled with direct torque control submersible induction motor and long submersible cable	
Компоновка системы с полным набором датчиков обратных связей (ДЮС) Full integration of feedback sensor control system		Достоинства Advantages	Недостатки Disadvantages	Компоновка системы с идентификаторами параметров и наблюдателями переменных состояния Sensorless control System	Недостатки Disadvantages
Расширение диапазона регулирования скорости и производительности погружных электроприводов и насоса, отсутствие затрат на установку и обслуживание датчиков угловой скорости Expansion of control range and performance of submersible motor and pump, no additional costs for installation and maintenance of angular speed sensors	Дополнительные затраты на покупку, установку и обслуживание датчиков ОС Additional costs for purchase, installation and maintenance of feedback sensors	Простота и удобство эксплуатации для автоматизации наиболее распространенных механизмов, отсутствие дополнительных затрат на установку и обслуживание датчиков угловой скорости Simple and easy to operate to automate the most common mechanisms, no additional costs for installation and maintenance of angular speed sensors	Снижение диапазона регулирования скорости и производительности ПЭД и ЭЦН, снижение быстродействия, необходимость оценивать вектор переменных состояний Reduction in speed and performance control of submersible motors and centrifugal pumps, speed reduction, it is necessary to evaluate the vector of state variables	Общие замечания для системы электропривода УЭЦН General remarks on the electric drive system of centrifugal pumps	Понижение быстродействия УЭЦН, пониженный КПД УЭЦН, подходит для регулирования промышленных механизмов с невысокими требованиями к электроприводу, например, для турбомеханизмов, учет влияния ПК на динамику системы Reduced speed of installation of electric centrifugal pumps, reduced efficiency of centrifugal pump units, suitable for the regulation of industrial machinery with low requirements for electric drive, for example, for turbocharging, taking into account the influence of submersible cable on system dynamics
По возможности управления приближается к системам с двигателями постоянного тока с независимым возбуждением: приемлемое быстродействие; отличный диапазон регулирования угловой скорости и производительности УЭЦН As far as control capabilities are concerned, it approximates to systems with independent excitation DC motors: acceptable performance; excellent speed and performance control range	Существенные трудности измерения потоковосцепления обмотки ротора, дополнительные затраты на установку и обслуживание датчиков ОС Significant difficulties in measuring rotor flux, additional costs for installation and maintenance of feedback sensors	Наилучшая из возможных компоновок системы, пригодность для автоматизации большого перечня общепромышленных механизмов Best possible system layout, suitability for automation of a large list of general industrial machinery	Снижение диапазона регулирования, быстродействия, необходимость оценивать вектор переменных состояний Reduction of control range, performance, vector of state variables must be evaluated	Самый распространенный тип систем ПЧ–АД, наилучшее соотношение «быстродействие–КПД», допускает повышенные энергозатраты за счет применения специальных алгоритмов управления, учет влияния ПК на динамику системы The most common type of system is frequency-controlled field-oriented submersible induction motor, best performing efficiency ratio, allows increasing energy efficiency by applying special control algorithms, taking into account the influence of submersible cable on system dynamics	
Наилучшее быстродействие, отлично подходит для автоматизации механизмов, где требуется система «источник момента–двигатель» Best performance, great for automation of mechanisms where a system of «torque–motor» is required	Существенные трудности измерения потоковосцепления обмотки статора, дополнительные затраты на установку и обслуживание датчиков статорного потока, дополнительные затраты на установку и обслуживание датчиков ОС Significant difficulties in measuring stator flux, additional costs for sensor installation and maintenance	ПЧ–ПЭД с прямым управлением момента (ПУМ) и длинным нефтепогружным кабелем Frequency-controlled with direct torque control submersible induction motor and long submersible cable		Общее повышение быстродействия ЭП, существенное снижение влияния ПК на динамику системы General increase in the performance of the electric drive, significantly reduced efficiency, making the system highly specialized, taking into account the influence of submersible cable on system dynamics	КПД, что делает систему узкоспециальной по назначению, учет влияния ПК на динамику системы
Возможность формировать динамические траектории с ограничением угловых ускорений и рывков Dynamic trajectories can be formed, but there are limitations on angular accelerations and jerks	Практически не используются, так как снижает конкурентное преимущество перед системами ПЧ–АД Hardly used as the competitive advantage over systems is reduced, low energy efficiency	ПЧ–ПЭД с обратной связью по скорости и длинным нефтепогружным кабелем AC voltage thyristor controller – submersible induction motor with speed feedback and long submersible cable		Импульсно-фазовый способ управления силовыми ключами создает дополнительные трудности по построению наблюдателя переменных состояний Pulse-phase method of power key control creates additional difficulties in constructing a state variable observer	Удельные затраты на автоматизацию примерно в два раза ниже, чем у системы ПЧ–АД, хорошо подходит для работы в повторно-кратковременном режиме, приемлемое ограничение механических перенапряжений, отличное ограничение токов в переходных режимах The unit cost of automation is about half that of a frequency converter system, it is well suited for reusable mode, acceptable limits for mechanical surges, excellent restriction of currents in transition modes

Основным недостатком компоновки системы «ТРН–АД с контуром обратной связи по скорости» с идентификаторами и наблюдателями следует считать импульсно-фазовый способ управления силовыми ключами, который создаёт дополнительные трудности по построению наблюдателя. Имеется возможность применения для этой схемы числоимпульсного способа управления.

Выводы

1. В работе поставлена научная проблема разработки, внедрения моделей и методов идентификации технологических процессов, комплексов и интегрированных систем управления добычи нефти электроприводным способом при малом и среднем дебите скважин и осложненных условиях эксплуатации.
2. Предложены научно обоснованные технические решения в виде моделей и методов идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления погружных асин-

хронных двигателей ЭП УЭЦН при изменениях нагрузки и характеристик измерительных каналов.

3. Внедрение предложенных научных основ, моделей и методов идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления в области оценки переменных состояния и параметров погружных асинхронных электродвигателей РЭП ЭЦН способствует повышению конкурентоспособности отечественной промышленности и продукции за счет дальнейшего развития автоматизации технологических процессов и промышленных установок.
4. С точки зрения энергетической безопасности страны актуален переход на контролируемую и управляемую добычу углеводородного сырья, гарантированно обеспечивающую проектные уровни добычи нефти, сокращение простоев оборудования, увеличение межремонтного периода, особенно в условиях разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кладиёв С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния, путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало- и среднедебитных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 220–231.
2. Ведерников В.А. Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок: дисс. ... д-ра техн. наук. – Тюмень, 2006. – 276 с.
3. Методика вывода скважины на режим с ЧПП частотным преобразователем. URL: <https://oil-ecn.ru/chastotnik.html> (дата обращения 18.07.2023).
4. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачёва, В.Г. Островский, Н.А. Лыкова, А.Н. Мусинский, П.А. Байдаров // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 54–58.
5. Лысова О.А., Фрайштетер В.П., Смирнов А.Ю. Анализ способов пуска установок центробежных электронасосов в осложненных условиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 4. – С. 87–96.
6. Лопатин Р.Р. Модели и алгоритмы частотно-регулируемого процесса расклинивания электроцентробежного насоса при добыче нефти в осложненных условиях: дисс. ... канд. техн. наук. – Томск, 2011. – 140 с.
7. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: Изд-во ООО «Недра Бизнесцентр», 2007. – 478 с.
8. Назарько М.Ю. Анализ способов регулирования частоты вращения установок электроцентробежных насосов // Академический журнал Западной Сибири. – 2016. – Т. 12. – № 2. – С. 20.
9. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиёв, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
10. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиёв, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 154–167.
11. Driving AC motors through a long cable: the inverter switching strategy / J.A. Pomilio, C.R. de Souza, L. Matias, P.L.D. Peres, I.S. Bonatti // IEEE Trans. Energy Convers. – 1999. – V. 14. – № 4. – P. 1441–1446. DOI: 10.1109/60.815087
12. High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives / A.F. Moreira, T.A. Lipo, G. Venkataramanan, S. Bernet // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2002. – V. 38. – № 5. – P. 1297–1306. DOI: 10.1109/TIA.2002.802920
13. Resonances and overvoltages in a medium-voltage fan motor drive with long cables in an underground mine / J. Rodriguez, J. Pontt, C. Silva, R. Musalem, P. Newman, R. Vargas, S. Fuentes // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2006. – V. 42. – № 3. – P. 856–863. DOI: 10.1109/TIA.2006.872936
14. Хакимьянов М.И. Повышение энергоэффективности и оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности: дисс. ... д-ра техн. наук. – Уфа, 2018. – 355 с.
15. Assessment of model predictive voltage control for autonomous four-leg inverter / R. Aboelsaud, R. Aboelsaud, A.S. Al-Sumaiti, A.G. Garganev, A.A.Z. Diab // IEEE Access. – 2020. – V. 8. – P. 101163–101180.
16. Improved dead-time elimination method for three-phase power inverters / R. Aboelsaud, A. Ibrahim, A.G. Garganev, I.V. Aleksandrov // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2020. – V. 11. – № 4. – P. 1759–1766.
17. Parida N., Das A. A modular multilevel converter with filter capacitor for long-cable-fed drive application // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2019. – V. 55. – № 6. – P. 7833–7842. DOI: 10.1109/TIA.2019.2931674
18. Overvoltage mitigation of medium voltage electric drives with long cables using multilevel-converters and passive filters / C. Larsson, A. Rydgard, G. Mademlis, Y. Liu, M. Fredriksson // 2019 21st Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2019 ECCE Eur. – Genova, Italy, 2019. – P. 1–10. DOI: 10.23919/EPE.2019.8915441
19. AC line connector with intermediate DC link: patent USA № 9685878 B2; filed. 02.12.2014; date of patent: 20.07.2017 – 18 p.
20. De Paula V.C., De Paula H. Employing DC transmission in long distance AC motor drives: analysis of the copper economy and power losses reduction in mining facilities // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2018. – V. 54. – № 1. – P. 841–847. DOI: 10.1109/TIA.2017.2740829
21. Аникин В.В. Методика и средства предварительной идентификации параметров модели послеремонтных регулируемых погружных асинхронных электродвигателей: дисс. ... канд. техн. наук. – Томск, 2020. – 182 с.
22. Теория и практика энергоэффективной эксплуатации установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти / С.А. Нонява, А.В. Куршев, А.А. Ишмурзин, В.У. Яма-

- лиев. – Уфа: государственное автономное учреждение науки Республики Башкортостан «Башкирская энциклопедия», 2020. – 288 с.
23. Шафиков И.Н. Повышение энергоэффективности электроприводов погружных электроцентробежных насосов: дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2020. – 155 с.
24. Юсупов М.Д., Долгих А.В., Ненашев А.И. Опыт внедрения энергоэффективных УЭЦН // Энергетическая стратегия. – 2012. – Т. 26. – № 8. – С. 102–104.
25. Федоров А.Е. Установки, экономящие энергию. Опыт внедрения // Инженерная практика. – 2012. – № 4. – С. 86–88.
26. Мартюшев Д.Н. Энергоэффективные УЭЦН: сокращение удельных затрат на добычу нефти // Инженерная практика. – 2014. – № 4. – С. 52–57.
27. Невоструев В.А. Опыт эксплуатации энергоэффективных УЭЦН «Новомет» // Инженерная практика. – 2017. – № 8. – С. 28–32.
28. Метод оптимального управления как способ повышения энергоэффективности электроприводного центробежного насоса / Д.Д. Вишняков, Е.М. Солодкий, А.Б. Петроченков, Р.Ю. Юдин, С.В. Сальников // Электротехника. – 2022. – № 11. – С. 48–52.
29. Downhole telemetry systems to monitor electric submersible pumps parameters in oil well / D.A. de Moura Fonsêca, A.O. Salazar, E.R.L. Villarreal, G.A. Echaiz Espinoza, A.C.Q.B. Leite // IEEE Access. – 2021. – V. 9. – P. 12824–12839.
30. Системы погружной телеметрии «Электрон-ТМС». URL: <https://www.petromarkt.ru/userfiles/files/TU-TMS-red-34.pdf> (дата обращения 07.07.2023).
31. Liang X., Ghoreishi O., Xu W. Downhole tool design for conditional monitoring of electrical submersible motors in oil field facilities // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2017. – V. 53. – P. 3164–3174.
32. Evolving technologies: electrical submersible pumps / C. Bremner, G. Harris, A. Kosmala, B. Nicholson, A. Ollre, M. Percy // Oilfield Rev. – 2006. – V. 18. – P. 30–43.
33. Раков И.В. Динамическая идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основе баланса мгновенной полной мощности в установившемся режиме // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – № 1. – Т. 19. – С. 24–48. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48> (дата обращения 07.07.2023).
34. Разработка и внедрение внутрискважинной системы интеллектуального испытания и дистанционного мониторинга ПГИ для добывающих нефтяных скважин / А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, А.А. Пустовских, И.С. Каешков, Д.Ю. Колупаев // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2019. – № 4. – С. 38–47.
35. Опыт применения распределенной оптоволоконной термометрии при мониторинге эксплуатации добывающих скважин в компании «Газпром нефть» / А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, И.С. Каешков, А.В. Буянов // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 55–64.
36. Bose B.K. Modern power electronics and AC drives. – New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
37. Liang X., He J., Du L. Electrical submersible pump system grounding: current practice and future trend // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – V. 5. – P. 5030–5037.
38. Szabat K., Tran-Van T., Kamiński M. A modified fuzzy Luenberger observer for a two-mass drive system // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2015. – V. 11. – P. 531–539.
39. Parameter identification for induction motor eliminating dead zone effect / Baiqiang Yu, Anwen Shen, Yu Kong, Shuo Yue // 2019 Chinese Automation Congress (CAC). – 2019. – V. 1. – P. 1669–1675.
40. Mohammed M.H. Optimization the dynamical parameters of three phase induction motor using genetic algorithm // Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. – 2012. – № 72. – С. 123–128.
41. Тагирова К.Ф., Нугаев И.Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21. – № 2. – С. 102–109. <https://doi.org/10.17587/mau.21.102-109>
42. Глазырин А.С. Способы и алгоритмы эффективной оценки переменных состояния и параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов: дисс. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2017. – 343 с.

Поступила 01.09.2023 г.

Прошла рецензирование: 14.09.2023 г.

Информация об авторах

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.276:622.276.53-886:62-527

REVIEW AND CRITICAL ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND WAYS TO IMPROVE REGULATED POWER SUPPLIES AND AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMPING UNITS IN INTERMITTENT OPERATION OF OIL WELLS

Sergey N. Kladiev,
kladiev@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. At present efforts are being made to convert low- and medium-flow oil wells to cyclical or short-term operation in order to reduce the excess pumping capacity that resulted from the reduction of well flow that is caused by reduced reservoir pressure during long-lasting exploitation of the deposit. The need for such a conversion requires justification for the use of more complex configurations of regulated power supply sources and automatic control systems of centrifugal pump units electric drives in automated process control systems. The local low-level automatic control systems for a mechanized electric drive method for lifting oil-containing liquid from the well to the surface, namely the installation of variable-speed AC electric drives consist of ground-based devices and special submersible equipment. The ground-based devices are control stations with AC voltage and frequency converters with built-in telemetry units, external sine filter, step-up transformer. The special submersible equipment includes asynchronous induction electric motor, power cable, submersible telemetry unit, process sensors, centrifugal pump. The power supply of such a unit is provided from the external electric three-phase network of 6 kV through a reducing transformer substation of 6/0,4 kV. In the continuous mode of operation of oil pumping plants the electric pumps and other equipment, operate in quasi-static modes. Unregulated electric drive, as well as the open-loop controlled electric drive does not allow for smooth acceleration to the nominal performance of pumping equipment for pumping oil out of well in difficult conditions and its smooth regulation when reducing the well flow because of reducing oil flow to the slaughter. Therefore, the main way of smoothly reducing the excess performance of the submersible centrifugal pump is the periodic activation mode, which includes pumping the oil mixture out of the well and stop – for its accumulation and recovery of formation pressure. The introduction of cyclical technology shows that it is impossible to use the open-loop system of regulated electric drive everywhere, where acceptable quality indicators of transition comparable with the quality of closed-loop control systems are objectively unattainable. Due to the fact that the amount of pressure at the well intake created by a centrifugal pump, necessary to lift the well fluid to the surface, depends on the square of the rotation speed of the pump working stages, the operating pump productivity range $Q_{min}...Q_{max}$ (m³/day) is obtained by varying the motor stator winding voltage (80...100) % from the nominal voltage value by using AC voltage controller with a phase control mode. If the stator voltage value is less than 80 % of U_{nom} then the well fluid is not lifted to the surface and does not flow out of wellhead equipment. Therefore, when a frequency converter with $U_n/f_{nom}=const$ is used, the supply voltage and frequency of the motor should be varied in the same range. The price for using cyclic operation is a decrease in the reliability of submersible pumps. It is necessary to use special designs of submersible electric motors, improve power supply systems and synthesize closed-loop control systems of automatic control of electric drive of submersible pump.

The purpose of the study is the review and critical analysis of the current state and ways to improve regulated power supplies and automatic control systems for electric centrifugal pumping units in intermittent operation of oil wells.

Object: systems of power supply and automatic control of centrifugal pump units in intermittent operation of oil well, telemetry systems, energy-efficient submersible motors and centrifugal pump designs.

Methods: methods of the theory of the automatic control system for developing the concept of operation of low flow of wells, analysis and synthesis of open and closed loop control systems of electric submersible centrifugal pumping units.

Results. The paper introduces the scientific problem of development, implementation, models and methods of identification of technological processes, complexes and integrated control systems of oil extraction by electric drive method, taking into account the influence of a long submerged cable, low flow of wells and difficult operating conditions. The author proposed scientifically based technical solutions in the form of a structure of a power channel of an electromechanical system with a frequency-regulated induction motor, long submersible cable and indirect method of measuring state variable from ground-based measurements at load changes and measurement channel characteristics.

Key words:

power channel of the submersible centrifugal pump electric drive, integrated control systems, variable-speed asynchronous induction electric motor, indirect methods of measurement of state variables, abnormal operating conditions, electric drive feedback channel alternatives, energy efficient centrifugal pump units.

REFERENCE

1. Kladiev S.N. Review and critical analysis of the current state and ways of developing the technological process of oil production by an electric drive in intermittent modes of operation of low- and medium-rate wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 8, pp. 220–231. In Rus.
2. Vedemikov V.A. *Modeli i metody upravleniya rezhimami raboty i elektropotrebleniem pogruznykh tsentrobezhnykh ustanovok* [Models and methods for controlling operating modes and power consumption of submersible centrifugal installations. Dr. Diss.]. Tyumen, 2006, 276 p.
3. *Metodika vyvoda skvazhiny na rezhim s CHRP chastotnym preobrazovatelem* [Putting the well into operation with a VFD frequency converter]. Available at: <https://oil-ecn.ru/chastotnik.html> (accessed 8 July 2023).
4. Likhacheva E.A., Ostrovsky V.G., Lykova N.A., Musinsky A.N., Baidarov P.A. Reliability of submersible oil pumps during periodic operation. *PRONEFT. Professionally about oil*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 54–58. In Rus.
5. Lysova O.A., Fraishteter V.P., Smimov A.Yu. Analysis of methods for starting centrifugal electric pump installations in difficult conditions. *News of higher educational institutions. Mining magazine*, 2018, no. 4, pp. 87–96. In Rus.
6. Lopatin R.R. *Modeli i algoritmy chastotno-reguliruemogo protsessa rasklinivaniya elektrotsentrobezhnogo nasosa pri dobyche nefi v oslozhnennykh usloviyakh*. Dis. Kand. nauk [Models and algorithms for the frequency-controlled wedging process of an electric centrifugal pump during oil production in difficult conditions. Cand. Diss.]. Tomsk, 2011. 140 p.

7. Belousenko I.V., Shvarts G.R., Velikiy S.N., Ershov M.S., Yarzov A.D. *Novye tekhnologii i sovremennoe oborudovanie v elektroenergetike neftegazovoy promyshlennosti* [New technologies and modern equipment in electrical power plant of oil and gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 2007. 478 p.
8. Nazarko M. Yu. Analysis of methods for regulating the rotation speed of electric centrifugal pump installations. *Academic Journal of Western Siberia*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 20–21. In Rus.
9. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Lavrinovich A.V. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
10. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Unloaded oil-submersible cable reduced dynamic model order optimization based on the frequency response approximation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. In Rus.
11. Pomilio J.A., De Souza C.R., Matias L., Peres P.L.D., Bonatti I.S. Driving AC motors through a long cable: the inverter switching strategy. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1441–1446. DOI: 10.1109/60.815087
12. Moreira A.F., Lipo T.A., Venkataramanan G., Bernet S. High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2002, vol. 38, no. 5, pp. 1297–1306. DOI: 10.1109/TIA.2002.802920
13. Rodriguez J., Pontt J., Silva C., Musalem R., Newman P., Vargas R., Fuentes S. Resonances and overvoltages in a medium-voltage fan motor drive with long cables in an underground mine. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 856–863. DOI: 10.1109/TIA.2006.872936
14. Khakimyanov M.I. *Povyshenie energoeffektivnosti i optimizatsiya rezhimov raboty elektropriwodov v nefteobrabatovayushchey promyshlennosti*. Diss. Dr. nauk [Increasing energy efficiency and optimizing operating modes of electric drives in the oil industry. Dr. Diss.]. Ufa, 2018. 355 p.
15. Aboelsaud R., Aboelsaud R., Al-Sumaiti A.S., Garganev A.G., Diab A.A.Z. Assessment of model predictive voltage control for autonomous four-leg inverter. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 101163–101180.
16. Aboelsaud R., Ibrahim A., Garganev A.G., Aleksandrov I.V. Improved dead-time elimination method for three-phase power inverters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 1759–1766.
17. Parida N., Das A. A modular multilevel converter with filter capacitor for long-cable-fed drive application. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 7833–7842. DOI: 10.1109/TIA.2019.2931674
18. Larsson C., Rydgard A., Mademlis G., Liu Y., Fredriksson M. Over-voltage mitigation of medium voltage electric drives with long cables using multilevel-converters and passive filters. *2019 21st Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2019 ECCE Eur.* Genova, Italy, 2019. pp. 1–10. DOI: 10.23919/EPE.2019.8915441
19. Balda J.C., Mejia A.E. *AC line connector with intermediate DC link*. Patent US, no. 9685878 B2, Jun. 20, 2017.
20. De Paula V.C., De Paula H. Employing DC transmission in long distance AC motor drives: analysis of the copper economy and power losses reduction in mining facilities. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 841–847. DOI: 10.1109/TIA.2017.2740829
21. Anikin V.V. *Metodika i sredstva predvaritel'noy identifikatsii parametrov modeli posleremontnykh reguliruemyykh pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelye*. Dis. Kand. nauk [Methods and means of preliminary identification of parameters of a model of after-repair adjustable submersible induction motors. Cand. Diss.]. Tomsk, 2020. 182 p.
22. Nonyava S.A., Kurshev A.V., Ishmurzin A.A., Yamaliev V.U. *Teoriya i praktika energoeffektivnoy ekspluatatsii ustanovok elektropriwodnykh tsentrobezhnykh nasosov dlya dobychi nefi* [Theory and practice of energy-efficient operation of electric centrifugal pump units for oil production. Ufa, Bashkir Encyclopedia Publ., 2020. 288 p.
23. Shafikov I.N. *Povyshenie energoeffektivnosti elektropriwodov pogruzhnykh elektrotsentrobezhnykh nasosov*. Dis. Kand. nauk [Increasing the energy efficiency of electric drives of submersible electric centrifugal pumps. Cand. Diss.]. Ufa, 2020. 155 p.
24. Yusupov M.D., Dolgikh A.V., Nenashev A.I. Experience in implementing energy-efficient ESPs. *Energy Strategy*, 2012, vol. 26, no. 8, pp. 102–104. In Rus.
25. Fedorov A.E. *Ustanovki, ekonomyashchie energiyu. Opyt vnedreniya* [Energy saving installations. Implementation experience]. *Engineering practice*, 2012, no. 4, pp. 86–88.
26. Martyshev D.N. *Ehnergoeffektivnye UETsN: sokrashchenie udelnykh zatrat na dobychu nefi* [Energy-efficient ESPs: reducing unit costs for oil production]. *Engineering practice*, 2014, no. 4, pp. 52–57.
27. Nevostuev V.A. *Opyt ekspluatatsii energoeffektivnykh UETsN «Novomet»* [Experience in operating energy-efficient ESP «Novomet»]. *Engineering practice*, 2017, no. 8, pp. 28–32.
28. Vishnyakov D.D., Solodky E.M., Petrochenkov A.B., Yudin R.Yu., Salnikov S.V. An optimum control method to improve the power efficiency of an electrically driven centrifugal pump. *Russian Electrical Engineering*, 2022, vol. 93, no. 11, pp. 728–731.
29. De Moura Fonsêca D.A., Salazar A.O., Villarreal E.R.L., Echaiz Espinoza G.A., Leite A.C.Q.B. Downhole telemetry systems to monitor electric submersible pumps parameters in oil well. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 12824–12839.
30. *Sistemy pogruzhnoy telemektrii «Ehlektron-TMS»* [Submersible telemetry systems «Electron-TMS»]. Available at: <https://www.petro-markt.ru/userfiles/files/TU-TMS-red-34.pdf> (accessed 7 July 2023).
31. Liang X., Ghoreishi O., Xu W. Downhole tool design for conditional monitoring of electrical submersible motors in oil field facilities. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2017, vol. 53, pp. 3164–3174.
32. Bremner C., Harris G., Kosmala A., Nicholson B., Ollre A., Percy M. Evolving Technologies: Electrical Submersible Pumps. *Oilfield Rev.*, 2006, vol. 18, pp. 30–43.
33. Rakov I.V. Dynamic estimation parameters of the elimination circuit of induction motor on the basis of instant full power balance in a steady-state mode. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, vol. 19, no. 1, pp. 24–48. In Rus. Available at: <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48> (accessed 7 July 2023).
34. Ipatov A.I., Kremetski M.I., Pustovskiy A.A., Kaeshkov I.S., Kolupaev D.U. Intellectual well-test and PLT remote monitoring downhole system development and implementation for producing oil wells. *PRONEFT Journal*, 2019, vol. 14, no. 4, pp. 38–47. In Rus.
35. Ipatov A.I., Kremetski M.I., Kaeshkov I.S., Bujanov A.V. Experience in the application of distributed fiber optic thermometry for monitoring wells in the company Gazprom Neft. *PRONEFT Journal*, 2017, vol. 5, no. 3, pp. 55–64. In Rus.
36. Bose B.K. *Modern power electronics and AC drives*. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
37. Liang X., He J., Du L. Electrical submersible pump system grounding: current practice and future trend. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, vol. 5, pp. 5030–5037.
38. Szabat K., Tran-Van T., Kamiński M. A modified fuzzy Luenberger observer for a two-mass drive system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, vol. 11, pp. 531–539.
39. Baiqiang Yu, Anwen Shen, Yu Kong, Shuo Yue. Parameter identification for induction motor eliminating dead zone effect. *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2019, vol. 1, pp. 1669–1675.
40. Mohammed M.H. Optimization the dynamical parameters of three-phase induction motor using genetic algorithm. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 2012, no. 72, pp. 123–128.
41. Tagirova K.F., Nugaev I.F. Actual tasks of oil-wells electric submersible pump control automation. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 102–109. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.21.102-109> (accessed 7 July 2023).
42. Glazyrin A.S. *Sposoby i algoritmy effektivnoy otsenki peremennykh sostoyaniya i parametrov asinkhronnykh dvigateley reguliruemyykh elektropriwodov*. Dis. Dokt. nauk [Methods and algorithms for effective assessment of state variables and parameters of asynchronous motors of adjustable electric drives. Dr. Diss.]. Tomsk, 2017. 343 p.

Received: 1 September 2023.

Reviewed: 14 September 2023.

Information about the authors

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.