
МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 535.34.083.2:538.56
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-425-434

ПРОТОЧНЫЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗАТОР ПРОТОННОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В СОСТАВЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Р. С. Кашаев*, Д. А. Нгуен, О. В. Козелков

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия,
* kashaev2007@yandex.ru*

Аннотация. Приведено описание усовершенствованной конструкции проточного анализатора протонного магнитного резонанса (ПМР) для экспресс-контроля характеристик скважинной жидкости и нефти, а также новой технологии его применения при добыче нефти погружными центробежными насосами в структуре промышленного интернета вещей с краевой компьютерной обработкой на интеллектуальном цифровом нефтегазовом месторождении. Представлены результаты модернизации ПМР-анализатора, предназначенного для оперативного всеобъемлющего мониторинга и управления на цифровом месторождении и экспресс-контроля максимального числа характеристик продукции скважин с представительным пробоотбором. Приведены результаты работы: новая система пробоотбора, повышающая представительность отбора, и алгоритм функционирования ПМР-анализатора в структуре промышленного интернета вещей с компьютерной обработкой, что позволяет преодолеть ограничения, снизить стоимость операций, повысить достоверность данных и надежность работы оборудования. Рассмотрены преимущества метода ПМР-релаксометрии и приборов на его базе для контроля свойств жидкости и управления установками добычи и подготовки нефти.

Ключевые слова: экспресс-контроль, проточный, протонный, магнитный резонанс, промышленный интернет вещей

Ссылка для цитирования: Кашаев Р. С., Нгуен Д. А., Козелков О. В. Проточный экспресс-анализатор протонного магнитного резонанса в составе промышленного интернета вещей // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 425–434. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-425-434.

FLOW-THROUGH EXPRESS ANALYZER OF PROTON MAGNETIC RESONANCE AS PART OF THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS

R. S. Kashaev*, D. A. Nguyen, O. V. Kozelkov

*Kazan State Energy University, Kazan, Russia
* kashaev2007@yandex.ru*

Abstract. A description is given of the improved design of a flow-through proton magnetic resonance (PMR) analyzer for express monitoring of well fluid and oil characteristics. A new technology for the analyzer application in oil production using submersible centrifugal pumps in the structure of the industrial Internet of things with edge computer processing in an intelligent digital oil and gas field is described. Presented results of the work include a new sampling system that increases the representativeness of the selection, and an algorithm for operation of PMR analyzer in the structure of the industrial Internet of things with computer processing, which allows to overcome limitations, reduce the cost of operations, increase the reliability of data and the reliability of equipment operation. The advantages of the PMR relaxometry method and devices based on it for monitoring the properties of liquids and controlling oil production and treatment plants are considered.

Keywords: express control, flow-through, proton, magnetic resonance, industrial Internet of things

For citation: Kashaev R. S., Nguyen D. A., Kozelkov O. V. Flow-through express analyzer of proton magnetic resonance as part of the industrial Internet of things. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 5. P. 425–434 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-425-434.

Введение. С переходом российской экономики на инновационный, цифровой путь развития на базе импортозамещающих отечественных разработок особую актуальность приобретает использование новых производственных технологий и новых роботизированных приборов и комплексов с улучшенными метрологическими характеристиками. Применение таких систем на интеллектуальных цифровых месторождениях (ЦМ — smart field) обеспечивает прирост добычи нефти на 10–25 %, снижение энергетических потерь до 8 % [1, 2], переход к новой стадии малодебитных скважин [3] и дает рост добычи тяжелой нефти с концентрацией воды более $W > 95$ %. Наряду с этим потенциалом нефтедобычи являются вязкие нефти, и Энергетической стратегией России на период до 2035 г. предусмотрено „создание инновационной системы энергетики с отечественными технологиями для энергетической безопасности страны, добычи тяжелой и высокообводненной нефти без иностранных технологий“.

Введение стандарта ПНСТ 360-2019* с требованием непрерывного контроля дебита, концентраций нефти, воды и газонасыщенности обусловило актуальность разработки инструментального оперативного средства и метода измерений.

Базовой основой структуры цифрового месторождения является сбор данных с их последующим анализом и управление процессами добычи, подготовки и транспортировки нефти, в том числе и через интернет вещей со всеобъемлющим контролем производственного оборудования и характеристик скважинной жидкости (СЖ). Однако проточный экспресс-контроль затруднен вследствие многообразия разнородных анализаторов и оборудования, часто рассеянных на обширных территориях и морских платформах, небезопасности функционирования зарубежного оборудования (были случаи отключения по сигналам со спутников), вариативности компонентов СЖ, агрессивности и взрывоопасности среды. Важно снизить погрешности используемых анализаторов, достигающие 15 % при измерениях и 30 % при пробоотборе [4], а также максимально расширить номенклатуру и диапазон измеряемых характеристик СЖ. Промышленный интернет вещей (ПИВ) позволяет преодолеть эти ограничения, связанные с организацией мониторинга и управления на адаптивной платформе технологического оборудования [5]. Опыт применения ПИВ с компьютерной краевой обработкой (КО) [6] показывает, что его использование обеспечивает снижение стоимости операций, децентрализацию, рост достоверности и надежности при автоматическом мониторинге и контроле.

Практически все технологии, в том числе добыча и подготовка нефти, изготовление и обработка химических и пищевых продуктов, включают в себя разнообразные формы многофазных потоков, которые могут быть расслоенными, волновыми, кольцевыми, пузырьковыми, эмульсионными. Это снижает достоверность измерений вследствие непредставительности пробоотбора, обусловленной формой потоков. Показатели работы скважин нестабильны [7] и могут резко (в течение нескольких часов) изменяться на 25–30 %. Поэтому необходим экспресс-контроль скважин по ПНСТ-360-2019.

На отечественных месторождениях вплоть до настоящего времени используются расходомеры и анализаторы, имеющие ряд недостатков: наличие движущихся деталей в турбинных и роторных расходомерах, влияние на точность и диапазон измерений инверсии фаз в водонефтяных эмульсиях во влагомерах на основе диэлектрической проницаемости, влияние пузырьков газа в ультразвуковых расходомерах, наличие радиоактивных гамма-источников (в зарубежных влагомерах и плотномерах). Подготовка нефти требует дорогостоящих и громоздких сепараторов нефти от газа, обслуживание которых требует, в свою очередь, высокого уровня подготовки

* Измерения количества добываемых из недр нефти и попутного нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. М., Стандартинформ, 2019.

персонала. Эти традиционные решения не подходят для непрерывного автоматизированного мониторинга характеристик скважинной жидкости и нефти на ЦМ. Ответом отрасли стали многофазные анализаторы и расходомеры (в настоящее время свыше 2700 применений), позволяющие снизить расходы на счетчики и повысить мобильность систем, кроме того, их можно использовать на морских платформах и удаленных скважинах. За рубежом даже разработан специальный стандарт ASTM D 3764, обеспечивающий решение задач оптимизации добычи СЖ и предотвращения аварий, представительного пробоотбора СЖ и нефти, верификации показаний анализаторов — калибровки, настройки, обеспечения безопасности обслуживания посредством сети Интернет.

Метод ядерного (протонного) магнитного резонанса. Практически единственным методом для решения поставленных задач в комплексе является неконтактный, неразрушающий метод протонной магнитной резонансной (ПМР) релаксометрии, позволяющий с помощью единого анализатора (ПМРА) осуществлять многопараметрический многофазный экспресс-контроль характеристик СЖ и нефти по целому ряду ПМР-параметров, коррелирующих с характеристиками нефти и ее компонентов. ПМР-анализатор может управлять практически всеми процессами на нефтепромысле, поскольку пробоподготовка отсутствует, методические ошибки минимизируются посредством многократных усреднений при градуировках по стандартным образцам ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и обработки данных с аппроксимацией кривых с высокими коэффициентами корреляций.

Технология ПМР-анализа позволяет по измерениям скоростей потоков фаз СЖ контролировать их дебит без остановок и нарушений производственных процессов, без износа движущихся деталей в агрессивной среде (с реагентами), как это осуществляется в стандартных расходомерах. Определение обводненности методом ПМР-релаксометрии уникально по диапазону 0–100 %, не используются датчики гамма-излучения, как в большинстве зарубежных анализаторов.

Возможности ПМР связаны с наличием магнитного момента μ у ядер водорода, присутствующих как в молекулах нефти, так и воды, при этом ПМР-параметры коррелируют с характеристиками нефти и ее компонентов. При помещении образца в постоянное магнитное поле B_0 и воздействии на магнитные моменты протонов переменным магнитным полем B_1 на частоте ν_0 (в герцах) или ω_0 (в радианах) магнитного резонанса (обычно в диапазоне $\nu_0 \sim 3 \dots 20$ МГц) поглощается электромагнитная энергия

$$\nu_0 = \gamma B_0 / 2\pi \quad \text{или} \quad \omega_0 = \gamma B_0, \quad (1)$$

где γ — гиромагнитное отношение ядра, в данном случае протона, которая регистрируется в катушке индуктивности датчика релаксометра ПМР. Это и есть явление ЯМР. Результаты измерений не зависят от состояния образца — расслоенного или однородного, непрозрачного или с механическими примесями и газом. Для метода ЯМР не требуются реактивы, объем образца обычно ≈ 15 –25 мл.

Однако отечественной промышленностью проточные, да и лабораторные ПМР-анализаторы не выпускаются. Зарубежная аппаратура ПМР имеет ограничения, связанные с недоступностью ее программного обеспечения для адаптации и модернизации, а также с дороговизной. Поэтому в нефтяной промышленности ПМР-анализаторы практически не применяются. Между тем метод ПМР-релаксометрия уже стал основой для таких официально утвержденных за рубежом методов, как измерение содержания водорода в топливах (ASTM D 1717), измерение содержания твердого жира SFC (ISO 8292), а также для отечественной методики определения масличности и влажности семян (ISO 10565) и вязкости тяжелой нефти в нефтяных ядрах (РД 153-39.0-959-16).

В настоящей статье отражены результаты модернизации ПМР-анализатора и усовершенствования технологии непрерывного получения информации о характеристиках СЖ для управления ее добычей с использованием промышленного интернета вещей, позволяющего повысить

оперативность измерений и точность результатов и снизить риски аварий. Достижению результатов способствовали:

— разработанный мехатронный протонный магнитный резонансный анализатор четвертого поколения (ПМРА-IV) с представительным пробоотбором по ГОСТ Р 8.866-2015 для автоматизации добычи, подготовки и транспортировки нефти;

— разработанная методика экспресс-контроля всей номенклатуры характеристик потоков СЖ: скоростей v_i потоков отдельных фаз в трубе любого сечения S (т. е. расхода фаз Q_i , поскольку $Q_i = v_i S$), концентрации воды W и газонасыщенности G по ПНСТ-360-2019, плотности ρ , вязкости η , дисперсного распределения капель (D_i) воды или нефти в водных эмульсиях нефти, молекулярной массы, температуры застывания нефти и нефтепродуктов, концентраций асфальтено-смола, серы и парафинов, фракционного состава в нефти и концентраций солей и нефти в сточной воде и воде, закачиваемой в пласт для поддержания давления;

— внедрение анализатора ПМРА-IV в структуру ПИВ для управления промышленными процессами: добычи нефти электроцентробежными насосами; повышения качества нефти путем снижения ее вязкости и удаления воды и асфальтено-смола; подготовки топливных водонефтяных эмульсий на основе нефть-содержащих сточных вод и разливов нефти как альтернативы тяжелым топливам; автоматизированного контроля загрязненности сточных и поверхностных вод нефтью, нефтепродуктами и солями.

Методика измерения ПМР-параметров. При измерениях ПМР-параметров методом ПМР-релаксометрии целесообразно применять методику Карра — Парселла — Мейбум — Гилла [8] из серии $\pi/2$ - и π -импульсов $[(\pi/2) - \tau_0 - (\pi - 2\tau_0)_N - T]_n$, поворачивающих намагниченность спинов на 90 и 180° , где τ_0 — интервал между импульсами, N — число π -импульсов, T — период запуска серии, n — число накоплений. Схема, отображающая последовательность $\pi/2$ - и π -импульсов, приведена на рис. 1 [8].

Между π -импульсами образуются сигналы спин-эхо (СЭ), и если спиновая система состоит из ядер с отличающимися временами спин-спиновой релаксации T_{2i} нескольких фаз, то огибающая СЭ будет суперпозицией i экспонент согласно уравнению

$$A_e = \sum A_{0i} \exp(-t/T_{2i}). \quad (2)$$

Из огибающей СЭ в полулогарифмическом масштабе выделяются ПМР-параметры — амплитуды A_{0i} сигналов СЭ и времена T_{2i} ; индекс „ i “ относится к разным фазам, имеющим свои A_{0i} и T_{2i} . Система характеризуется также временами спин-решеточной релаксации T_{1i} (продольной вдоль оси B_0). Но в данной работе авторами используется величина T_{2i} , так как время ее измерения ($\approx 1,5$ мин) в десятки раз меньше времени T_{1i} . Кроме того, величина T_{2i} более чувствительна к медленным молекулярным движениям в ассоциатах в диссипативной системе нефтяных дисперсных систем [9].

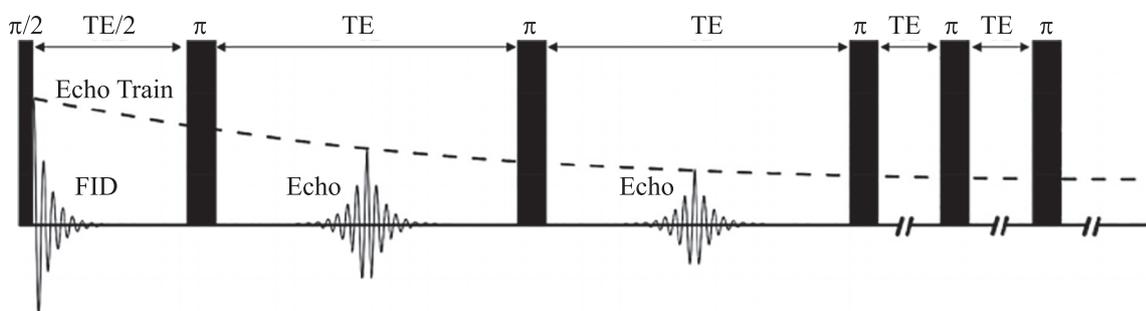


Рис. 1.

Усовершенствованный анализатор ПМРА-IV. За последние 30 лет авторами настоящей статьи были разработаны несколько вариантов (ПМРА-I-III) проточных ПМР-анализаторов [10,

11]. Последняя разработка — мехатронный экспресс-анализатор скважинной жидкости ПМРА-IV, структура, принцип работы и фотоизображения которого, а также таблица сравнения с аналогами приведены в [12]. Здесь опишем лишь усовершенствования системы представительного отбора пробы из емкости турбулентной гомогенизации СЖ.

Мехатронное устройство пробоотбора представляет собой комбинацию механических узлов, управляемых по сигналам микроконтроллера. Структурно-функциональная схема устройства представлена на рис. 2, где 1 — корпус патрубка, 2 — перемещающийся патрубок пробоотбора, 3 — электродвигатель СД-54, 4 — электронный блок управления, 5 — возбуждающий конденсатор, 6 — интегральная плата драйвера управления двигателем, 7 — шестерня, 8 — штифт, 9 — ходовой винт, 10 — энкодер, 11 — шатун.

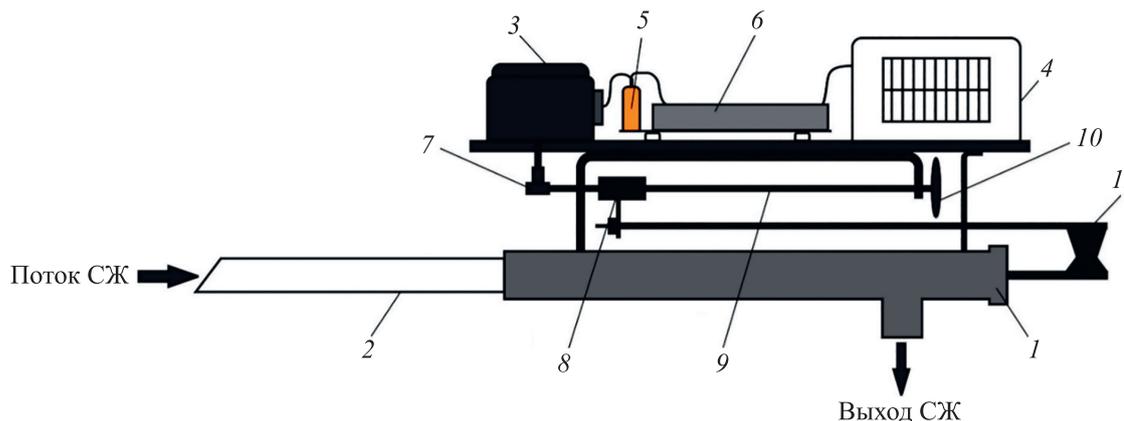


Рис. 2.

Мехатронная часть устройства установлена на алюминиевой опоре с монтажным кронштейном, на котором размещен электропривод с системой перемещения, позволяющей патрубку перемещаться в прямом и обратном направлениях. Тем самым создается перепад давлений жидкости между измерительной емкостью и входом патрубка, по которому проба поступает в катушку индуктивности датчика релаксометра ПМР. Запуск электропривода осуществляется однофазным синхронным электродвигателем СД-54 3 с редуктором. Дифференциальная шестерня 7 передает движение вала двигателя на приводной вал ходового винта 9 через штифт 8, установленный на приводном валу. Шестерня преобразует вращение ходового винта в возвратно-поступательное движение патрубка. На конце ходового винта закреплен медный диск с 25 прорезями и оптическим приемопередатчиком 10, образующий одноканальный энкодер, который предназначен для определения величины перемещения патрубка по числу оборотов диска. Основным компонентом блока управления 4 является микроконтроллер Atmel ATMEGA328, интегрированный в Arduino Nano. Пульт управления представляет собой клавиатуру с кнопками, подключенную к Arduino Nano для установки параметров и управления перемещением патрубка с помощью привода. Сигналы управления передаются на двигатель СД-54 через драйверы, состоящие из шести реле с двумя контактами. Реле изолированы от микроконтроллера с помощью оптоизоляции типа РС 817.

Рассмотренное мехатронное устройство реализует новую усовершенствованную систему пробоотбора, позволяющую повысить представительность отбора.

Следует отметить, что в последнее время появились публикации о разработках нескольких аналогичных усовершенствованному ПМРА-IV ПМР-анализаторов (см., например, [13–15]). Так, в [13] представлен многофазный поточный ЯМР-анализатор МРФМ фирмы „Krohne“ (Норвегия). В этом анализаторе применено предварительное намагничивание СЖ, и проанализировано его влияние на точность разделения ПМР-параметров фаз. В результате показано, что предварительное намагничивание существенно повышает намагниченности фаз нефти и воды, а также отношение сигнал/шум.

Структура промышленного интернета вещей с ПМР-анализатором. Интернет вещей (ИВ) объединяет цифровую среду данных с реальными объектами и позволяет создавать их цифровые двойники во многих сферах, в частности на интеллектуальных цифровых месторождениях для мониторинга давления и реле клапанов, уровня жидкости в танкерах, насосах, скважинах и др. [16]. Большинство реализаций интернета вещей централизованы, что является их слабым местом и может привести к потерям и авариям [17]. Поэтому желательна децентрализация системы для повышения достоверности и автономности мониторинга и управления, поскольку перерывы в операциях могут приводить к существенным потерям продукции и прибыли [18].

Промышленный интернет вещей, называемый также Индустрия 4.0, является расширением ИВ, оснащенным встроенными интеллектуальными датчиками, приводами и программным обеспечением для сбора, обработки и интерпретации информации в реальном времени без участия человека [19]. Физические компоненты с датчиками и приводами для краевой компьютерной обработки (КО) выбираются в зависимости от того, что надо контролировать — температуру, давление, влажность и др. ПИВ-КО определяет, как размещать и структурировать сетевые решения для любого промышленного применения.

С помощью баз данных ПИВ-КО можно точно описать, в частности, работу установки электроцентробежного насоса (УЭЦН), а именно данные по частоте вращения ротора, температуре погружного электродвигателя (ПЭД), входному и выходному давлению насоса и концентрации воды в СЖ. Насос должен работать в области между двумя граничными показателями расхода (дебита) — в рабочей зоне выше и ниже пределов напора. Основная проблема, определяемая операторами добычи нефти, — это экспресс-контроль параметров УЭЦН. Обычно при этом используются сети датчиков в системе SCADA, которая немасштабируема, закрыта и имеет высокую стоимость [6]. В SCADA-иситеме используются погружные датчики, что требует контроля их работоспособности и высоких затрат.

В этом плане перспективным является экспресс-контроль с помощью комплекса ПМРА-IV в структуре ПИВ-КО с использованием управляющих сигналов с данными о дебите, плотности и вязкости нефти. При этом нет необходимости размещения первичных датчиков в скважинах, что сопровождается сложностями по энергоснабжению и затратам, а также потерями напора.

Предложенная в [6] структура архитектуры ПИВ может быть разделена на три уровня: 1) устройства и установки, 2) ПИВ-КО, 3) мониторинг проекта в „облаке“.

— Уровень устройств и установок состоит из УЭЦН, датчиков температуры, давления, частоты и др., а также анализатора ПМРА-IV в устье скважины; этот уровень ответственен за сбор физической и цифровой информации, а также передачу данных на верхний уровень для выполнения его команд.

— Уровень ПИВ-КО состоит из регулируемого по скорости привода электродвигателя с компьютерной системой хранения данных, связанного с ПИВ-КО через протокол Modbus и подсистему, которая содержит плату Raspberry Pi, плату интерфейса Modbus, MiFi и блок бесперебойного питания. Плата Raspberry Pi — основной системный контроллер с возможностью накопления и хранения данных. Плата Raspberry Pi 4 Model B имеет 1.5 GHz 64-битовый четырехядерный ARM Cortex-A72 процессор с WiFi, Bluetooth 5, гигабитный Ethernet, два USB2.0 порта, два USB 3.0 порта, 2 GB-хRAM. Питание платы Pi 4 осуществляется через USB-C порт. Система работает как ворота, соединяющие данный уровень с вышестоящими. ПИВ-КО принимает сигналы в реальном времени, включая данные о ПМР-параметрах анализатора. Данные и результаты анализа используются для предварительных действий и автоматических предупреждений, минимизирующих потери продуктивности УЭЦН.

— Уровень „облачного“ мониторинга состоит из серверов и системы контроля предприятия; он ответственен за мониторинг и контроль УЭЦН удаленно через промышленные пульта управления, размещенные в „облаке“ как система программированного контроля и принятия решений. Подсистема ПИВ-КО работает как ворота в облачную конфигурацию, адаптированную к операциям со средой с большими информационными пространствами.

Для безопасного и быстрого доступа к „облаку“ используется краевой анализ и компьютерная обработка с неопределенными множествами данных. Цель КО — ускорение анализа данных большого объема непосредственно в области их поступления с обеспечением быстрых действий в реальном времени. При КО осуществляется взаимодействие с зависимыми от времени переменными, а „облако“ используется для остальной обработки. На удаленных нефтегазовых месторождениях, при слабой или отсутствующей связи с центральным сайтом, КО предпочтительна из-за возможности скрытия [20].

Методология [6] ПИВ-КО отображена в виде представленной на рис. 3 децентрализованной платформы, характеризующей последовательность сбора и обработки данных. Все датчики ПИВ-КО, УЭЦН расположены в скважине у насоса, там же выполняется шаг 11; все приводы с датчиками и вход в ПИВ-КО расположены в преобразователе частоты (ПЧ) электродвигателя, шаги 1–4, 8–10 выполняются здесь же; на 9-м шаге осуществляется изменение момента M_c сопротивления на валу через ПЧ, изменение мощности ПЭД и добавление команд по прогнозам; канал 12 предназначен для передачи данных от ПМРА-IV в устье скважины.

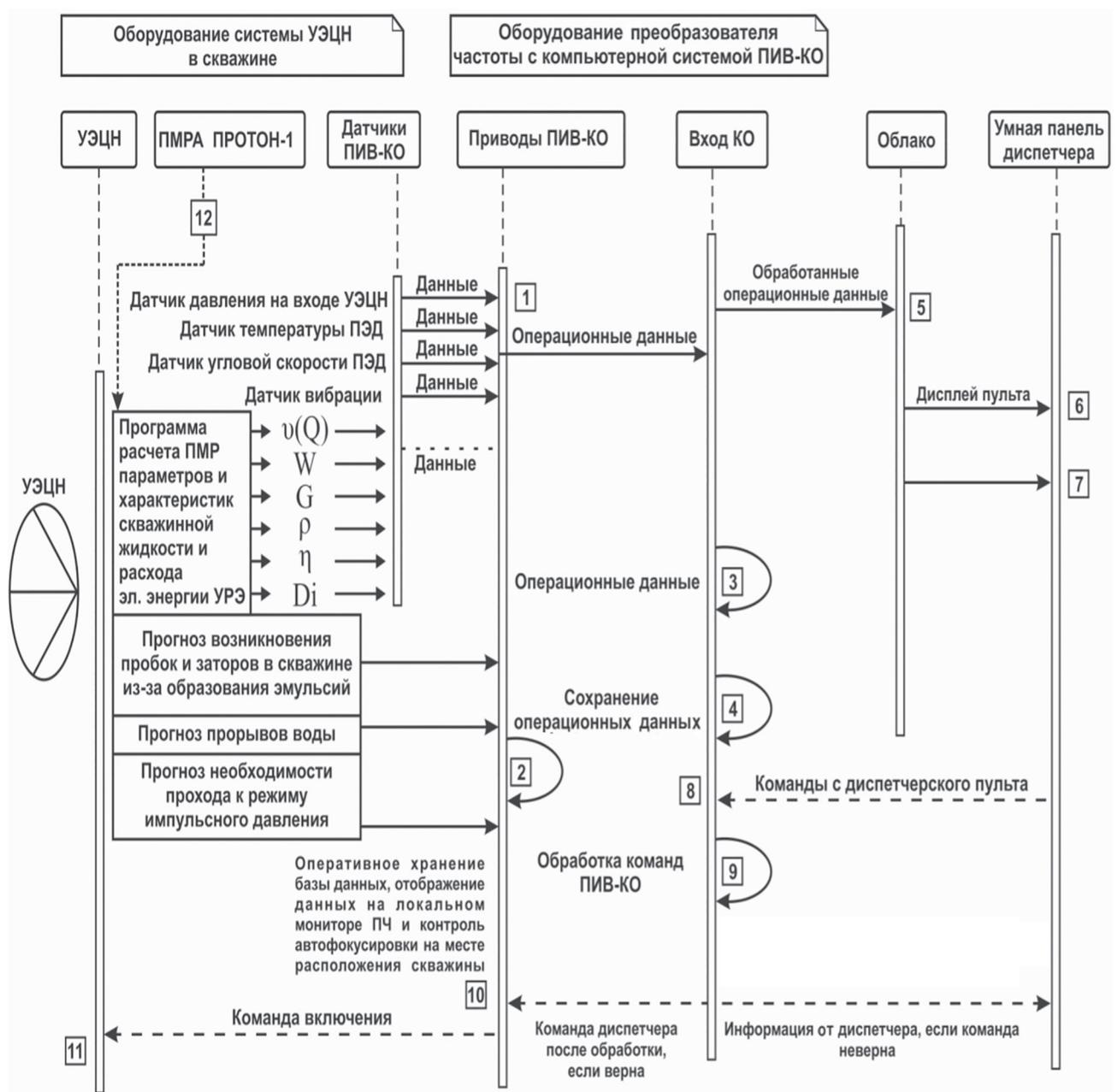


Рис. 3.

На дисплей выводится следующая информация:

- предварительные действия, которые требуют подтверждения пользователем;
- предварительные действия по поддержке состояния УЭЦН;
- действия по обратной связи с пользователем.

В таблице представлен сравнительный анализ систем мониторинга и контроля на нефтяном месторождении.

Характеристика	Система		
	SCADA	ИВ	ПИВ-КО
Децентрализация	Незначительная	Средняя	Высокая
Автоматический контроль и обработка данных в реальном времени	Низкая	Низкая	Высокая
Прозрачность и прослеживаемость данных и их передачи	Низкая	Средняя	Высокая
Стоимость операций	Высокая	Высокая	Низкая
Надежность платформы	Незначительная	Средняя	Высокая

Итак, ПИВ-КО в сочетании с ПМРА-IV — оптимальная система в ситуациях, когда надежность, всеобъемлющая наблюдаемость данных и безопасность превышают по значимости остальные параметры систем мониторинга.

Заключение. Низкая географическая плотность месторождений в России препятствует внедрению системы SCADA и ее масштабированию. Кроме того, она не поддерживает межоперационные связи оборудования и программ, трудна для изменений протоколов и их усовершенствования. Для многих применений был предложен ряд систем, основанных на ИВ, однако архитектура ПИВ с краевой компьютерной обработкой для ЦМ отсутствует несмотря на демонстрируемый ею значительный прогресс в технике связи между оборудованием и сетью данных.

В работе предложена структура ПИВ-КО в сочетании с проточным многопараметрическим экспресс-анализом с использованием ПМРА-IV для интеллектуального цифрового нефтяного месторождения. Представленная система позволяет обеспечить быстрый сбор данных по расширенному списку параметров УЭЦН и характеристик скважинной жидкости при удаленном мониторинге, оптимизирующем контрольные измерения. При автоматическом удаленном управлении операциями структура ПИВ-КО снижает потери времени при межаппаратном контакте. Данная система с краевой подсистемой, контактирующей с „облаком“, может быть применена на кустах скважин, где отсутствует Интернет. Таким образом, преодолеваются ограничения, связанные с рассеянием скважин на большом пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rosendahl T., Hepso V.* Integrated operations in the oil and gas industry: sustainability and capability development // Imprint of IGI Global. 2013.
2. *Тихомирнов Л. И.* Цифровизация: ключевые факторы успеха // Нефтегаз. 2019. В. 1–2. С. 142–143.
3. *Макеев А. А.* Оптимизация работы центробежных насосов в малодобитных скважинах доюрского комплекса // Нефтяное хозяйство. 2023. № 4. С. 98–100. DOI: 10/24887/0028-2448-2023-4-98-100.
4. Пат. 150614 РФ. Автоматический пробоотборник / *М. С. Немиров, С. И. Силантьев, Е. В. Савинов, Р. Р. Нурмухаметов.* Опубл. 27.07.2010. Бюл. № 21.
5. *Афанасьев М. Я., Грибовский А. А.* Концепция адаптивной платформы технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 268–272. DOI: 10.17686/0021-3454-2015-58-4-268-272.
6. *Ramzey H., Badawy M., Elhosseini M., Elbaset A.* I2OT-EC: A Framework for Smart Real-Time Monitoring and Controlling Crude Oil Production Exploiting IIOT and Edge Computing // *Energies*. 2023. N 16. DOI: 10.3390/en16042023.
7. *Муслимов Р. Х., Плотникова И. Н.* Альтернативные подходы — залог создания прорывных технологий в области поиска, разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений // Нефть. Газ. Новации. 2018. № 9. С. 24–32.

8. *Чижик В. И.* Квантовая радиофизика. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 689 с.
9. *Safieva R. Z., Mishin V. D.* Systems Analysis of the Evolution of Views on Oil Systems: From Petroleum Chemistry to Petroinformatics // *Pet. Chem.* 2021. Vol. 61. P. 539–554.
10. *Kashaev R. S., Temnikov A. N., Idiatullin Z. Sh., Charitonov M. V., Farachov T. I.* NMR-Analyser for Automatic Control of Physical-Chemical Parameters of Crude Oil and Bitumen // *Extended Abstracts of XXVIII Ampere Congress „Magnetic Resonance & Related Phenomena“*, Canterbury, UK. 1996. P. 295–296.
11. Пат. 2544360 РФ. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ЯМР / *Р. С. Кашаев, А. Н. Темников, З. Ш. Идиятуллин*. Опубл. 20.03.2015. Бюл. № 8.
12. *Kashaev R., Nguyen Duk Ahn, Kozelkova V., Kozelkov O., Dudkin V.* Online Multiphase Flow Measurement of Crude Oil Properties Using Nuclear (Proton) Magnetic Resonance Automated Measurement Complex for Energy Safety at Smart Oil Deposits // *Energies.* 2023. N 16 (3). P. 1080. <https://doi.org/10.3390/en16031080>.
13. *Hogendoorn J., Boer A., Appel M., de Jong H., de Leeuw R.* Magnetic Resonance Technology. A New Concept for Multiphase Flow Measurement // 31th Intern. North Sea Flow Measurement Workshop, Tonsberg, Norway, 22–25 Oct. 2013.
14. *Deng F., Xiao L., Wang M.* et al. Online NMR Flowing Fluid Measurement // *Appl. Magn. Resonance.* 2016. N 47. P. 1239. doi:10.1007/s00723-016-0832-2.
15. Автоматизированные системы определения количественных и качественных характеристик газа, воды, нефти и нефтепродуктов на потоке: Проспект ВИТ [Электронный ресурс]: npp-vit.ru/index.php?option=comcontent&task=view&id=15&Itemid=35.
16. *Wanasinghe T. R., Gosine R. G., James L. A., Mann G. K. I., de Silva O., Warran P. J.* The Internet of Things in the Oil and Gas Industry: A Systematic Review // *IEEE Internet Things J.* 2020. N 7. P. 8654–8673.
17. *Ray P. P., Dash D., Salah K., Kumar N.* Blockchain for IoT-based healthcare: Background, consensus, platforms, and use cases // *IEEE Syst. J.* 2020. N 15. P. 85–94.
18. *Zuo Y., Qi Z.* A Blockchain-based IoT Framework for Oil Field Remote Monitoring and Control // *IEEE Access.* 2021. N 10. P. 2497–2514.
19. IoT Agenda. What Is IIoT (Industrial Internet of Things)?—Definition from TechTarget.Com. [Электронный ресурс]: (<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Industrial-Internet-of-Things-IIoT>), 01.03.2022.
20. Simplilearn.com. Edge Computing Vs. Cloud Computing: Key Differences, 2022 [Электронный ресурс]: <https://www.simplilearn.com/edge-computing-vs-cloud-computing-article>.
21. *Козелков О. В., Кашаев Р. С., Михайлов А. Г., Козелкова В. О., Овсенко Г. А., TranVanTung, Nguyen Chi Kien.* Технологии экспресс-контроля и очистки нефти от примесей в мехатронной установке с управлением от комплекса на базе ПМР-релаксометрии // *Химическая технология.* 2022. № 3. С. 261–266.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Рустем Султанхамитович Кашаев**— д-р техн. наук, профессор; Казанский государственный энергетический университет, кафедра приборостроения и мехатроники; E-mail: Kashaev2007@yandex.ru
- Дык Ань Нгуен** — аспирант; Казанский государственный энергетический университет, кафедра приборостроения и мехатроники; E-mail: navupro1991@gmail.com
- Олег Владимирович Козелков** — д-р техн. наук, доцент; Казанский государственный энергетический университет, кафедра приборостроения и мехатроники, заведующий кафедрой; E-mail: Ok.1972@list.com

Поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 01.02.2024; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Rosendahl T., Hepso V. *Integrated Operations in the Oil and Gas Industry: Sustainability and Capability Development*, Imprint of IGI Global, 2013.
2. Tikhomirnov L. I. *Oil and Gas*, 2019, no. 1–2, pp. 142–143 (in Russ.).
3. Makeev A. A. *Oil-industry*, 2023, no. 4, pp. 98–100, DOI: 10/24887/0028-2448-2023-4-98-100 (in Russ.).
4. Pat. RU150614, *Avtomaticheskii probotoobornik (Automated Probe Sampling)*, M.S. Nemirov, S.I. Silantiev, E.V. Savinov, R.R. Nurmuchametov, Priority 27.07.2010, *Bulletin* 21 (in Russ.).
5. Afanasiev M. Y., Gribovsky A. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 4(58), pp. 268–272, DOI: 10.17686/0021-3454-2015-58-4-268-272. (in Russ.)
6. Ramzey H., Badawy M., Elhosseini M., Elbaset A. *Energies*, 2023, vol. 16, <https://doi.org/10.3390/en16042023>.

7. Muslomov R. Ch., Plotnikov I. N. *Oil. Gas. Novations*, 2018, no. 9, pp. 24–32 (in Russ.).
8. Chizhik V. I. *Kvantovaya radiofizika (Quantum Radiophysics)*, St. Petersburg, 2004, 689 p. (in Russ.).
9. Safieva R. Z., Mishin V. D. *Pet. Chem.*, 2021, vol. 61, pp. 539–554.
10. Kashaev R. S., Temnikov A. N., Idiatullin Z. Sh., Charitonov M. V., Farachov T. I. *Magnetic Resonance & Related Phenomena, XXVIII Ampere Congress, Canterbury, UK, 1996*, pp. 295–296.
11. Pat. RU2544360, *Ustroystvo dlya izmereniya sostava i raskhoda mnogokomponentnykh zhidkostey metodom YAMR (Device for Measurement of Composition and Yield PF Many Component Liquids by NMR Method)*, R.S. Kashaev, A.N. Temnikov, Z.Sh. Idiatullin, Priority 24.12.2014, Published 20.03.2015, Bulletin 8. (in Russ.)
12. Kashaev R., Nguyen Duk Ahn, Kozelkova V., Kozelkov O., Dudkin V. *Energies*, 2023, no. 3(16), pp. 1080, <https://doi.org/10.3390/en16031080>.
13. Hogendoorn J., Boer A., Appel M., de Jong H., de Leeuw R. *31th International North Sea Flow Measurement Workshop*, Tonsberg, Norway, October 22–25, 2013.
14. Deng F., Xiao L., Wang M. et al. *Appl. Magn. Resonance*, 2016, no. 47, pp. 1239, DOI:10.1007/s00723-016-0832-2.
15. npp-vit.ru/index.php?option=comcontent&task=view&id=15&Itemid=35. (in Russ.)
16. Wanasinghe T. R., Gosine R. G., James L. A., Mann G. K. I., de Silva O., Warrian P. J. *IEEE Internet Things J.*, 2020, vol. 7, pp. 8654–8673.
17. Ray P. P., Dash D., Salah K., Kumar N. *IEEE Syst. J.*, 2020, vol. 15, pp. 85–94.
18. Zuo Y., Qi Z. *IEEE Access*, 2021, vol. 10, pp. 2497–2514.
19. IoT Agenda. What Is IIoT (Industrial Internet of Things)? — Definition from TechTarget.Com, <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Industrial-Internet-of-Things-IIoT>.
20. Simplilearn.com. *EdgeComputingVs. Cloud Computing: Key Differences*, 2022, <https://www.simplilearn.com/edge-computing-vs-cloud-computing-article>.
21. Kozelkov O. V., Kashaev R. S., Michailov A. G., Kozelkova V. O., Ovseenko G. A., Tran Van Tung, Nguyen Chi Kien, *Chimicheskaya tehnologiya*, 2022, no. 3, pp. 261–266 (in Russ.).

DATA ON AUTHORS

- | | |
|--------------------------|--|
| Rustem S. Kashaev | — Dr. Sci., Professor; Kazan State Energy University, Department of Instrument Making and Mechatronics; E-mail: kashaev2007@yandex.ru |
| Duc Anh Nguyen | — Post-Graduate Student; Kazan State Energy University, Department of Instrument Making and Mechatronics; E-mail: navypro1991@gmail.com |
| Oleg V. Kozelkov | — Dr. Sci., Associate Professor; Kazan State Energy University, Department of Instrument Making and Mechatronics; Head of the Department; E-mail: Ok.1972@list.com |

Received 01.08.2023; approved after reviewing 01.02.2024; accepted for publication 22.03.2024.