



АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ СТАНКОВ-КАЧАЛОК НЕФТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПАТЕНТНОГО ПОИСКА

И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Р.Р. Гибадуллин, Т.И. Петров, А.Н. Цветков,
М.Ф. Низамиев, В.Ю. Корнилов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tobac15@mail.ru

Резюме: Повышение эффективности нефтедобычи является приоритетной задачей, и одним из вариантов является модернизация приводов станков-качалок нефти, за счет использования синхронных двигателей и адаптивных систем управления, которые применяются как электрооборудование для установок насосной добычи нефти.

Целью данной статьи является выявление изобретений в области электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти, для определения преимуществ и недостатков современных разработок в данной отрасли.

Проведенный анализ позволит выявить сильные стороны разрабатываемого электропривода и наиболее конкурентно их представить. Важным моментом является, и проверка возможности патентования в этой области, т.е. проверка на патентную чистоту.

В результате исследования были выявлены наиболее значимые изобретения (на основе патентного анализа РФ) в области станций управления штанговыми глубинными насосами, динамометрирования, ваттметрирования, которые и представлены в работе, по ним сделан краткий обзор, приведена основная информация и новизна.

И на основе этого исследования сделаны выводы, что имеющиеся изобретения позволяют эффективнее использовать станки-качалки нефти. Однако недостаточно изобретений в области частотного регулирования и «умных» станций управления, которые позволяют оптимизировать технологический процесс.

Таким образом, важным свойством для создания конкурентоспособного электропривода для станков-качалок нефти является применение «умных» систем управления, которые будут регулировать работу скважины за счет адаптивного (на основе автоматического анализа динамограмм и ваттметрограмм) частотного регулирования.

Ключевые слова: станция управления; электропривод; станок-качалка; адаптивные системы; динамометрирование; ваттметрирование.

Благодарности: Публикация статьи осуществлена в рамках проекта «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений», Соглашение №074-11-2018-020 с Минобрнауки РФ от 30 мая 2018 г.

Для цитирования: Ившин И.В., Сафин А.Р., Петров Т.И., Цветков А.Н., Низамиев М.Ф., Корнилов В.Ю. Анализ развития электроприводов для станков-качалок нефти по результатам патентного поиска // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №5. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-3-13.

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF ELECTRIC DRIVES FOR OIL ROCKING MACHINES BY THE RESULTS OF PATENT SEARCH

IV Ivshin, AR Safin, RR Gibadullin, TI Petrov, AN Tsvetkov,
MF Nizamiyev, VYu Kornilov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tobac15@mail.ru

Abstract: *Object.* The object of research is the modernization of the drives of oil pumping units through the use of synchronous motors and adaptive control systems. *Field of application:* electrical equipment for oil pumping units.

The purpose of the work is to identify inventions in the field of electric drives based on Russian highly efficient synchronous motors for oil pumping machines, to determine the advantages and disadvantages of modern developments in this field.

Methods. This analysis will reveal the strengths of the drive being developed and most competitively present them. An important point is, and checking the possibility of patenting in this area, i.e. check for patent purity.

Results. As a result of the study, the most significant inventions (based on the patent analysis of the Russian Federation) were identified in the field of sucker rod pump control stations, dynamometry, and wattmetry, which are presented in the work, they provide a brief overview, provide basic information and novelty.

Conclusion. A literature review showed that the issues of control stations for sucker rod pumps, dynamometry, wattmetry, and the development of synchronous electric motors are rather deeply covered, on the other hand, the literature does not sufficiently reflect the problems of frequency regulation of synchronous motors, as well as the capabilities of intelligent control stations that would allow increase the level of oil production, optimize the technological process, significantly reduce the influence of the "human" factor improve production safety

Thus, the need to create a competitive electric drive for oil pumping machines is the use of "smart" control systems that will regulate the operation of the well due to adaptive (based on automatic analysis of dynamograms and wattmetergrams) private regulation.

Keywords: control station; electric drive; rocking machine; adaptive systems; dynamometry; wattmetry.

Acknowledgments: The publication of the article was carried out within the framework of the project "Creation of a series of electric drives on the basis of Russian high-performance synchronous engines for oil pumping machines using wireless data transmission systems and an adaptive control system for smart deposits", Agreement No. 074-11-2018-020 with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of May 30, 2018.

For citation: Ivshin IV, Safin AR., Gibadullin RR, Petrov TI, Tsvetkov AN, Nizamiyev MF, Kornilov Vyu. Analysis of the development of electric drives for oil rocking machines by the results of patent search. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019;21(5):3-13. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-3-13.

Введение

Инновации в сфере топливно-энергетического комплекса являются базой для развития страны, и данная идея официально представлена в энергетической стратегии России до 2030 года.

Поэтому, согласно этой цели, необходимо решить такие задачи, как оптимизация нефтедобычи, повышение эффективности использования технологического энергетического оборудования, а также разработка мероприятий и технических средств повышения энергоэффективности использования горно-шахтного оборудования.

Одним из определяющих направлений развития нефтяной промышленности в последние годы является переход на «умные» станции управления электроприводом на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами для станков-качалок нефти. Такой переход позволит повысить уровень нефтедобычи, оптимизирует технологический процесс,

существенно снизит влияние «человеческого» фактора и обеспечит производственную безопасность [1–3].

Помимо этого, вся нефтяная промышленность стремится к снижению простоев скважин, сокращению эксплуатационных затрат и, самое главное, к эффективному использованию персонала. Чтобы решить вышеперечисленные задачи, крупные промышленные нефтяные производства обращаются к автоматизации процессов нефтедобычи и скважин в целом.

Существующие системы управления скважиной для контроля просты в использовании. Однако есть некоторые недостатки: необходимо проводить индивидуальные измерения и испытания, отсутствуют автоматизированные инструменты и сложность ввода в эксплуатацию. Стоит отметить, что специалисты обязаны присутствовать и руководить работами на строительной площадке. В зависимости от реальной ситуации на нефтяных месторождениях скважины чаще всего группируются. Используя централизованное управление, интеллектуальный контроль и раздельное управление, можно значительно упростить настройку и сократить объем обслуживания. Основной тенденцией развития в решении этой проблемы является создание цифровых интеллектуальных систем управления месторождениями. Сейчас большое внимание уделяется переходу к полностью автоматическому управлению электроприводами и дистанционному управлению параметрами на диспетчерском пункте. Применение интеллектуальных энергосберегающих станций управления станком – качалкой нефти на базе синхронных двигателей позволяет оптимизировать добычу нефти, за счет увеличения объема продукции и экономии энергоресурсов. Главным недостатком таких станций управления является высокая стоимость, что является сдерживающим фактором для широкого применения.

Целью данной работы является проведение патентного обзора по изобретениям в области станций управления штанговыми глубинными насосами, динамометрирования, ваттметрирования, электроприводов и синхронных электродвигателей [4,5].

Тип патентного поиска – это исследование технического уровня и тенденций развития, конкурентоспособности (эффективности предполагаемого использования) на базе патентной и иной информации.

Объектами исследования в данном случае будут служить [6,7]:

- станция управления штанговыми глубинными насосами;
- динамометрирование;
- ваттметрирование;
- синхронный электродвигатель.

Найденные патенты могут быть разделены, по ключевым словам, на следующие группы:

- изобретения в области управления штанговыми глубинными насосами;
- изобретения в области динамометрирования;
- изобретения в области ваттметрирования;
- изобретения в области синхронных вентильных двигателей.

Из каждой группы осуществлен отбор патентов, представляющих наибольший интерес в рамках данного патентного анализа.

Патентный обзор

Изобретения в области управления штанговыми глубинными насосами.

Патент РФ № 2407141, выданный ФГБОУ ВО «КГЭУ», описывает систему управления насосной системой. Станция управления системы состоит из блоков управления, преобразователя частоты и коммутационных устройств (один из автоматов подключена к трехфазной системе, другой к 220 В), магнитного пускателя, блока климат-контроля и датчика положения, установленные под балансировщиком насосной установки и подключенные к преобразователю частоты, в то время как блок климат-контроля подключен к однофазному автомату выключателю питания, а магнитный пускатель подключен к контроллеру.

В патенте РФ 2525094 представлена система диагностики насосов во время работы, как показано на рис. 1.

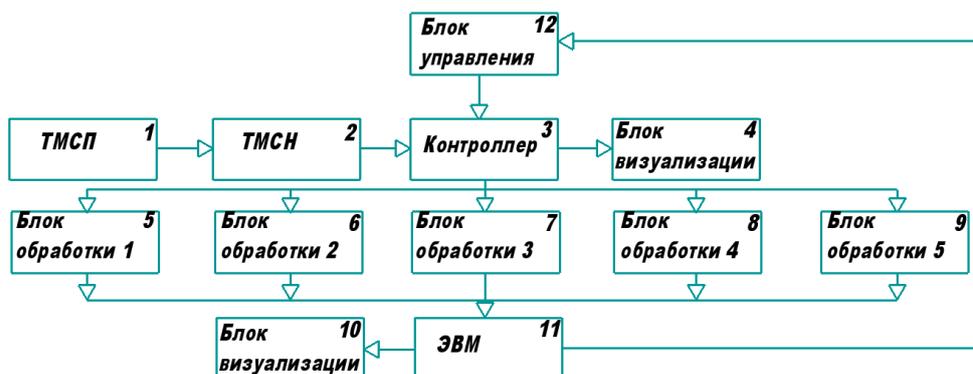


Рис. 1. Схема устройства диагностики для электронасосов

Технологическим итогом считается увеличение правильности установления технологического статуса насосного аппарата из-за применения системы классификаторов.

При работе с данной системой диагностики есть возможность увеличить достоверность оценки работы станка-качалки, дополнительно применяя системы классификации, которые одновременно отражают вероятность пяти классов технического состояния. Устройство включает в себя дисплей – блок визуализации, компьютерную систему – компьютер, устройство деградации машины, в том числе электрический погружной двигатель. Устройство также состоит из блоков погружной телеметрической системы, соединенных с погружным двигателем, выходы которых соединены с наземной телеметрической системой, последовательно соединенной с первым блоком формирования изображения и с первым, вторым, через контроллер, третий, четвертый и пятый блоки обработки и выходы блоков обработки через электронный компьютер, подключенный ко второму блоку визуализации.

ООО "Нефте-Гидроприводы Конькова" представила следующий патент РФ № 2646934. В данной разработке рассказывается про гидравлический привод станка-качалки нефти, Открытие принадлежит к сфере машиностроения, непосредственно к станциям управления гидроприводов нефтяных качалок. Технологическим итогом считается возможность контролирования деятельности абсолютно всех элементов привода в момент работы, высокая вероятность не допустить аварийные случаи, и работа в сложных погодных условиях.

В патенте РФ № 2097553, представлен прибор с целью контролирования технологической ситуации на станках-качалках нефти. Открытие специализировано для контролирования совокупности систем электропривода, но кроме того способен применяться с целью преобразования степени воды в скважинах способом звуковой локации.

Сотрудники компании в Ижевске разработали блок управления приводом электронасоса (Патент РФ № 153963). Блок управления для электродвигателя насосного агрегата (см. рис. 2) включает в себя станцию управления, к которой подключен вторичный источник питания для подачи стабильного питания на элементы, требующие питания, и который подключен к силовому кабелю станции, и исполнительный механизм подключен к силовым входам / выходам. Устройство дополнительно содержит волоконно-оптическое телеметрическое устройство, содержащее взаимосвязанные приемные и передающие устройства для генерации, сбора и передачи оптических сигналов от измерительного устройства и устройство управления и обработки для приема и обработки данных от контроллера приемопередатчика, в этом случае блок управления и обработки подключен к вторичному источнику питания. Прибор позволяет контролировать скважинные параметры и параметры оборудования при использовании электродвигателей любого типа. На рис. 2 блок 1 – устройство ввода-вывода, 2 – контроллер станции управления; 3 – источник вторичного электропитания; 4 – исполнительное устройство; 5 – устройство волоконно-оптической телеметрии; 6 – устройство управления и обработки; 7 – устройство приема-передачи.

качалки нефти (наибольшие и наименьшие мощностные показатели), которые считаются на основе поправочных коэффициентов, и зависимостей между ними.

И в зависимости от практических связей между поправочными коэффициентами происходит анализ и сравнение с теоретически обоснованными значениями, что является базой для формирования окончательного решения о дальнейшем функционировании станка-качалки нефти при соблюдении следующих условий.

Открытие, применяя сведение о равновесии конструкции, рассматривая разброс наибольших, а также наименьших параметров силы, и быстроты ее перемены, дает возможность увеличить подлинность диагностики и контроля работы станков-качалок согласно конкретному числу отсчетов в промежуток времени качания насосного агрегата. Вся система показана на рис. 4.

Изобретения в области синхронных вентильных двигателей

ОАО «РИТЭК» разработала станцию управления электроприводом погружного насоса (патент РФ № 85940). Электротехнический прибор специально разработан с целью функционирования с электроприводами погружных насосов на базе дроссельных электромоторов, дополнительно способен применяться в нефтегазовой индустрии с целью извлечения пластовых компонентов. Новейшим в конструкции является то, что станция в дополнение оборудована тормозным механизмом.

Сотрудники ООО «Концерн Созвездие» разработали вентильный электродвигатель (Патент РФ № 2365025). Изобретение относится к области электротехники, рассматривается разработка в области вентильных электродвигателей, и данная разработка может быть отнесена к сфере электроэнергетики и может быть использована для изготовления маленьких электроприводов непрерывного тока. Техническим итогом считается снижение размеров прибора, увеличение производительности, а также устойчивости и устранения неуправляемой перемены параметров станка-качалки нефти. В мотор клапана интегрированы два усилителя силы с фазовым сенсором, фильтром. Основной электрогенератор, вывод которого включен к другому входу фазового сенсора, два транзистора с различным видом проводимости, формирующие автоколебатель, резистор, бинарный расходомер, мультиплекс, начинает работу.

Патент РФ № 2354036 показывает возможный способ управления двигателем и систему слежения за эксплуатацией. Данный способ отличается тем, что в электроприводе за счет демодуляции сигнала, получаемого с датчиков вращающейся части электрической машины и датчиков, отвечающих за параметры трехфазного тока.

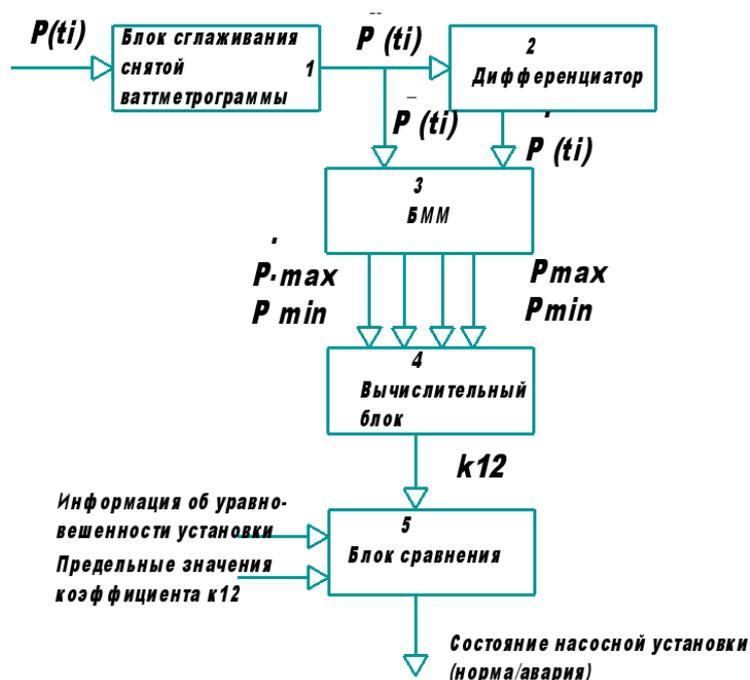


Рис. 4. Устройство диагностики посредством использования ваттметрограммы

Помимо этих двух систем датчиков в рассматриваемом способе управления присутствуют реле, датчики и логический операционный узел (все устройства также на три фазы). Этот операционный узел подключается аппарату, отвечающему за демодуляцию сигнала, и далее к датчику, отвечающему за определение местоположения в пространстве

вращающейся части электрической машины. Сама электрическая машина подключается к этой системе через частотный преобразователь. Связь операционного узла и частотного преобразователя осуществляется через дополнительно установленное реле.

В результате работы этой системы технически возможным становится вариант с обработкой и последующим визуализацией параметров работы электрической машины.

Литературный обзор посвящен анализу публикаций по вопросам:

– станций управления штанговыми глубинными насосами; динамометрирования; ваттметрирования; синхронных электродвигателей. Поиск и анализ проведен по материалам журналов и статей, монографий, учебных пособий.

В работе ученого Миловзорова Г.В. изобретена концепция с целью управления «умными» станками-качалками нефти, эксплуатируемых скважинным методом. Исследуются концепции управления станками-качалками нефти, структуры научно-технических измерителей, также многофункциональные способности автоматического анализа. Создателями предложена технология установления, оптимизации потребления электричества оборудованием скважинных насосных установок, базирующаяся на рассмотрении графиков, полученных посредством динамометрирования, ваттметрирования. Разбирается взаимосвязь расхода электроэнергии в повышение значения уровня воды и следующих характеристик деятельности насосной конструкции: протяженность перемещения штока, колебание качаний, кроме того, воздействие повторяющегося режима перегрузки, сбалансированности штока. Ученым вследствие проделанных исследований выявлено, то, что в наше время увеличивается значимость «умных» СУ станков-качалок насосных установок, за счет замера научно-технических характеристик улучшить процедуру работы комплекса, сократить перегрузки и аварийные ситуации на объекте, а так же в общем уменьшить расходы нефтяных компаний.

В статьях специалистов компании ЭСТ «Энергосервис» интересным результатом, который был получен вследствие проведения большого числа экспериментов, стал доказанным тот факт, что условия окружающей среды в зоне размещения станка-качалки играют важную роль, и это надо учитывать уже на этапе производства.

Интерес представляет и использование новых технологии в области машинного обучения, например нейронные сети, они могут быть использованы для более качественного анализа динамограмм и ваттметрограмм. В результате использования данной технологии определение статуса станка – качалки достоверно на уровне 90%.

Все аспекты построения станций управления штанговыми глубинными насосами, динамометрирования, ваттметрирования, экспериментальных стендов для испытаний электроприводов, разработки синхронных электродвигателей довольно широко изложены в литературе. С другой стороны, в публикациях в недостаточной степени отражены возможности нагружения шкафа электропривода заданным током, возможности проверки защит электропривода, обеспечивать имитацию сигналов датчиков станка-качалки (датчик давления, концевые датчики и проч.).

Проведенный литературный обзор показал преимущества синхронных приводов по сравнению с асинхронными, что проявляется в повышенном КПД (91% вместо 84,5%) и меньших энергозатратах. В дополнение к высокой энергоэффективности современные синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) имеют чрезвычайно компактную конструкцию для экономии места.

Основными достоинствами использования в электроприводе станков-качалок синхронных двигателей с регулированием возбуждения можно считать:

- оптимизация режима работы за счет влияния на реактивную составляющую;
- СДПМ обладают большим коэффициентом мощности, если сравнивать с АД, используемыми в этой отрасли;
- СДПМ также обладает возможностью работать в более сложных условиях перегрузки, по сравнению с аналогичными АД;
- стабильность работы СДПМ (если параметры находятся в пределах перегрузки);
- оптимизация потребления электроэнергии (большая эффективность в коммутационных режимах), вследствие малых значение реактивной составляющей токов.
- синхронный двигатель может выполнять роль стабилизатора напряжения.

Большинство нефтедобывающих предприятий отказываются от модернизации имеющегося оборудования, они во многом пересматривают концепции исследований в области работы и разработок станков-качалок нефти.

Система интеллектуальных нефтяных полей – это концепция автоматизированного контроля над эксплуатационными характеристиками станка-качалка нефти, включающая в себя постоянную модернизацию в отношении нефтедобычи.

Автоматизация скважин, эксплуатируемых УШСН заключается, в первую очередь в целом, в управлении следующих технических характеристик:

– динамограмма; вариативный уровень воды; ваттметрограмма; используемое значение тока; колебание качаний; воздействие газа; эффективность нефтедобычи.

Функции управления обязаны гарантировать коммутацию электропривода на расстоянии, остановка станка-качалки вследствие технологических нарушений, дискретный порядок эксплуатации, «мягкий» запуск и «мягкое» урегулирование быстроты вращения синхронной машины (за счет использования ЧРП).

Концепция «умного» управления штанговых скважинных насосных установок подразумевает наличие в конструкции станка-качалки следующего оборудования в любой скважине одного шкафа управления с целью хранения характеристик, построения эксплуатационных диаграмм, элементов для возможности коммутации на расстоянии.

Уже после соединенного управления сервером, общекомандный знак посредством беспроводного посредника переходит в любой беспроводный узел станка-качалки. Беспроводный узел выполняет определение адреса, также знака, затрагивающего состояния этой скважины, переход в источник дистанционного управления станком-качалкой, а источник дистанционного управления распоряжается частотно-стабилизирующим механизмом привода, тут частотно-стабилизирующий прибор привода соединяется с концепцией управления скважиной. Частотно-стабилизирующий прибор привода приводит в оборот электромотор. В окончательном результате работа перемещающихся элементов закрепляется датчиками. Подобным способом, создается единственный замкнутый контур управления, фокусирующийся на контроле, интеллектуализацию, рабочую роль в отсутствии физического лица. Нарощенное введение концепции управления с целью «умных» месторождений повернет к увеличению автоматизации штанговых скважинных насосных установок, а также к внушительному повышению рабочей производительности.

Определяющим направлением развития нефтяной и газовой промышленности (НГП) в последние годы является переход к плавному (оптимальному) регулированию технологических режимов на основе внедрения энергосберегающих технологий. Одним из важнейших факторов, определяющим переход к оптимальному управлению технологическими режимами, является активное внедрение регулируемого электропривода.

На данный момент с целью эффективного внедрения продукта на предприятиях соответствующей отрасли недостаточно производить высококачественную продукцию в собственных фирмах. Для того, чтобы продукт существовал на конкурентоспособном уровне, следует обладать, как возможно наиболее абсолютными сведениями о компаниях-производителях аналогичного продукта, о их академической, а также практических составляющих, о пребывании в данных компаниях патентно-лицензионной работы, об имеющейся в фирмах учено-промышленной деятельности.

Понимание в целом диапазона элементов не только лишь производственной, однако также академической работы компаний-соперников даст возможность вовремя отвечать на вызовы времени, направленностей формирования инновационного продукта, в регулярно изменяющихся потребностях потребителей продукта и т.д. С целью установления обстоятельной конкурентной борьбы следует установить ключевых изготовителей продукта, установить динамику патентования в этой сфере в промежутке от 1990х годов до 2019 года.

Как уже отмечалось, основными исследователями в области разработки станций управления глубинными штанговыми насосами, динамометрирования, ваттметрирования, разработки экспериментальных стендов для испытаний электроприводов, синхронных электродвигателей являются такие зарубежные фирмы как *Siemens* (Германия) *BOSCH GMBH ROBERT* (Германия), *Schneider Electric* (Франция), *Mitsubishi Electric* (Япония) и т.д., а также российские предприятия ООО "НПП "ГРАНТ", ОАО "Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения", Томское научно-производственное внедренческое общество "СИАМ", ОАО "Ижевский завод нефтяного машиностроения" (ОАО "Ижнефтемаш") и другие.

Результаты

Патентный анализ выявил большое число изобретений, касающихся станций управления штанговыми глубинными насосами, динамометрирования, ваттметрирования. Однако к настоящему времени рынок в области систем управления станков-качалок нефти уже довольно "насытился", поэтому наблюдается некоторое снижение темпов патентования.

На основании проведенного обзора можно выделить наиболее эффективные изобретения в области станций управления штанговыми глубинными насосами,

динамометрирования, ваттметрирования, синхронных электродвигателей (патенты № 2407141, 2525094, 153963, 2221227, 2190126, 2365025).

Выводы

1. Проведенный обзор не выявил изобретений в области цифровых адаптивных интеллектуальных («умных») систем управления нефтяными полями, следовательно, предложенные в этой области решения будут обладать патентной чистотой. Также было выявлено, что число изобретений в области частотного регулирования СД недостаточно [8]. Отсутствуют патенты в области законов регулирования частоты, напряжения и тока возбуждения СД, при частотном регулировании СД большой мощности. Поэтому разработанные законы регулирования и управления возбуждением СД также будут обладать патентной чистотой [9].

2. Современное оборудование для станков-качалок нефти (электропривод, станция управления и т.д.) не только повышает эффективность (как техническую, так и экономическую) нефтедобычи, но и позволяет повышать энергоэффективность [10,11].

3. Патентный анализ выявил большое число изобретений, касающихся станций управления штанговыми глубинными насосами, динамометрирования, ваттметрирования, синхронных электродвигателей. В патенте РФ №122713, полученным ФГБОУ ВО «УГНТУ», описывается интеллектуальная станция управления скважиной с частотно-регулируемым электроприводом.

Отдельную группу патентов составляют изобретения в области ваттметрирования. Довольно большое число патентов составляют изобретения в области синхронных вентильных двигателей.

4. Проведенный литературный обзор показал, что достаточно глубоко освещены вопросы станций управления штанговыми глубинными насосами, динамометрирования, ваттметрирования, разработки синхронных электродвигателей [12,13].

С другой стороны, в литературе отражены в недостаточной степени проблемы частотного регулирования СД, а также возможности интеллектуальных станций управления, которые позволили бы повысить уровень нефтедобычи, оптимизировать технологический процесс, существенно снизить влияние «человеческого» фактора и повысить производственную безопасность [14,15].

Литература

1. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F. Control of sucker rod pumps energy consumption. IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk, 2015. pp. 1-4.
2. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В., и др. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2018. №7-8. С.107-116.
3. Lee K.-W., Ha J.-I. Evaluation of Back-EMF Estimators for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors. Journal of Power Electronics. 2012. V. 12. N. 4. pp. 604-614.
4. Raute R., Caruana C., Cilia J., et.al. A Zero Speed Operation Sensorless PMSM Drive Without Additional Test Signal Injection. European Conference on Power Electronics and Applications. 2012. pp 1-10.
5. Семькина И.Ю., Тарнецкая А.В. Современные бездатчиковые методы оценивания положения неподвижного ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами // Вестник КузГТУ. 2017. №2 (120).С.126-132.
6. Ortega R., Praly L., Astolfi A., et al. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2010. N 99. pp. 1-13.
7. Pacas .M. Sensorless drives in industrial applications. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2011. V. 5. N 2. pp. 16-23
8. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., et.al. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017. V. 62. N 7. pp. 3546-3550.
9. Бобров М. А., Юшков И.С., Тутаев Г.М., и др. Разработка бездатчиковой цифровой системы управления электроприводом на базе асинхронизированного вентильного двигателя // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. №3.
10. Morimoto S., Kawamoto K., Sanada M., et.al. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame. Proc. 2001 IEEE IAS Annual Meeting. 2011. V. 4. pp. 2637-2644.

11. Burkov P.V., Burkova S.P., Timofeev V.Y. Justifying a method of balancing crank-and-rod mechanism of mining roadheader. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 682. pp.270-275.
12. Lindh T., Montonen J.-H., Grachev M. Generating surface dynamometer cards for a sucker-rod pump by using frequency converter estimates and a process identification run. *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. Riga, 2015. pp. 416-420.
13. Gabor T. *Sucker-Rod Pumping Handbook*. 1 st Edition. Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping. Gulf Professional Publishing, 2015. 598 p.
14. Dong L., Han X., Hua L. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015. V. 29. N.4.
15. Saihi L., Boutera A. Robust Sensorless Sliding Mode Control of PMSM with MRAS and Luenberger Extended Observer. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC 2016). 2016. pp. 48-57.

Авторы публикации

Ившин Игорь Владимирович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ)..

Сафин Альфред Робертович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Гибадуллин Рамил Рифатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Петров Тимур Игоревич – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ). Email: tobac15@mail.ru

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Корнилов Владимир Юрьевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Khakimyanov MI, Shafikov IN, Khusainov FF. *Control of sucker rod pumps energy consumption. IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Omsk, 2015. pp. 1-4.
2. Petrov TI, Safin AR, Ivshin IV, et.al. Model of a pumping unit control system based on synchronous motors with a sensorless method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 7-8:107-116.
3. Lee K.-W, Ha J.-I. Evaluation of Back-EMF Estimators for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors. *Journal of Power Electronics*. 2012;12(4):604-614.
4. Raute R, Caruana C, Cilia J, et.al. *A Zero Speed Operation Sensorless PMSM Drive Without Additional Test Signal Injection. European Conference on Power Electronics and Applications*. 2012. pp 1-10.
5. Semykina IYu, Tarnetskaya AV. Modern sensorless methods for assessing the position of the stationary rotor of a synchronous motor with permanent magnets. *Bulletin of KuzSTU*. 2017;2(120):126-132.
6. Ortega R, Praly L, Astolfi A, et al. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2010; 99:1-13.
7. Pacas M. Sensorless drives in industrial applications. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2011; 5(2):16-23.

© И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Р.Р. Гибадуллин, Т.И. Петров, А.Н. Цветков, М.Ф. Низамиев,
В.Ю. Корнилов

8. Aranovskiy S, Bobtsov A, Ortega R, et.al. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017;62(7):3546-3550.

9. Bobrov MA, Yushkov IS, Tutaev GM, et.al. Development of a sensorless digital control system for an electric drive based on an asynchronous valve motor. *Bulletin of SUSU. Series: Energy*. 2017. N3.

10. Morimoto S, Kawamoto K, Sanada M, et.al. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame. Proc. 2001. *IEEE IAS Annual Meeting*. 2011; 4:2637-2644.

11. Burkov PV, Burkova SP, Timofeev VY. Justifying a method of balancing crank-and-rod mechanism of mining roadheader. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;682:270-275.

12. Lindh T, Montonen J-H, Grachev M. Generating surface dynamometer cards for a sucker-rod pump by using frequency converter estimates and a process identification run. *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. Riga, 2015. pp. 416-420.

13. Gabor T. Sucker-Rod Pumping Handbook. 1 st Edition. *Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping*. Gulf Professional Publishing, 2015. 598 p.

14. Dong L, Han X, Hua L. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29(4).

15. Saihi L, Boutera A. Robust Sensorless Sliding Mode Control of PMSM with MRAS and Luenberger Extended Observer. 2016. *8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC 2016)*. 2016. pp. 48-57.

Authors of the publication

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alfred R. Safin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ramil R. Gibadullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Timur I. Petrov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: tobac15@mail.ru.

Alexey N. Tsvetkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Marat F. Nizamiyev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vladimir Yu. Kornilov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

08 октября 2019 г.