

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»**

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04  
по диссертации Солодкого Евгения Михайловича  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Диссертация «Управление штанговой скважинной насосной установкой для добычи нефти с наблюдателями переменных состояния технологического процесса» по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности) принята к защите «27» декабря 2019 г. (протокол заседания №7) диссертационным советом Д ПНИПУ.05.04, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от 01 октября 2019 г. № 68-0 в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым-четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре «Микропроцессорные средства автоматизации» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**Научный руководитель** – доктор технических наук, доцент Казанцев Владимир Петрович, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Официальные оппоненты:**

1. Храмшин Вадим Рифхатович, доктор технических наук (05.09.03), профессор, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»;

2. Хакимьянов Марат Ильгизович, доктор технических наук (05.09.03), доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

дали положительные отзывы о диссертации.

### **Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Санкт-Петербург дала положительный отзыв (отзыв ведущей организации утвержден директором департамента науки, доктором технических наук, доцентом Тарасовым Сергеем Анатольевичем, заслушан на заседании кафедры робототехники и автоматизации производственных систем и подписан Михаилом Петровичем Беловым, доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой робототехники и автоматизации производственных систем и Королёвым Виталием Вячеславовичем, кандидатом технических наук, доцентом, ученым секретарем кафедры).

По теме диссертации соискателем опубликованы 15 научных трудов, в том числе 11 работ – в ведущих научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени и приравняваемых к ним, из них 6 работ – в изданиях, индексируемых в Scopus, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Солодкий Е.М. Разработка и моделирование полеориентированной системы векторного управления асинхронным двигателем / Е.М. Солодкий, Д.А. Даденков, А.М. Шачков, К.В. Павловская // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2016. – Т. 14. – № 9. – С. 26-32.

2. Solodkiy E.M. Practice of using MexBIOS Development Studio technologies in educational process / E.M. Solodkiy, D.A. Dadenkov, A.A. Terehin, I.R. Yusupov // IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS 2016): Conference Proceedings, 03-07 October 2016, Perm, Russian Federation. – 2016. – Art. № 7756688. – pp. 1-5. – DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756688 (Scopus).

3. Solodkiy E.M. Induction motor sensorless vector control with an adaptive speed observer and direct electrical angle correction in coordinate transformations / E.M. Solodkiy, P.V. Varzanosov, A.A. Belonogov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Conference Proceedings, 16-19 May 2017, St. Petersburg, Russia – 2017. – Art. № 17285286. – pp. 1-4. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076315 (Scopus).

4. Solodkiy E. M. Parametric Identification of an Induction Motor Based on a Phase-Locked-Loop Frequency Control Algorithm / E. M. Solodkiy, D. A. Dadenkov, A. M. Kostygov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – vol. 89. – no. 11. – pp. 670-674 (Scopus).

5. Solodkiy E.M. Sensorless energy-efficient sucker-rod pump control system / E.M. Solodkiy, D.A. Dadenkov, V.P. Kazantsev // 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS): Conference

Proceedings, 03-06 October 2018, Novocherkassk, Russia. – 2018. – Art. № 18345814. – pp. 1-5. – DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571795 (Scopus).

6. Солодкий Е.М. Энергоэффективная система управления добычи нефти штанговой насосной установки / Е.М. Солодкий, В.П. Казанцев, Д.А. Даденков, С.В. Сальников // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. – № 12. – С. 292-295.

7. Solodkiy E.M. Improving the energy efficiency of the sucker-rod pump via its optimal counterbalancing / E.M. Solodkiy, V.P. Kazantsev, D.A. Dadenkov // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon): Conference Proceedings, 8-14 Sept. 2019, Sochi, Russia. – 2019. – Art. № 19047998. – pp. 1-5. – DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867737 (Scopus).

8. Солодкий Е.М. Повышение энергоэффективности работы штанговой скважинной насосной установки за счет оптимального уравнивания / Е.М. Солодкий, В.П. Казанцев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019. – Т. 17. – № 4. С. 38-45.

9. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. № 2019618285 «Управляющая программа контроллера энергоэффективной системы управления штанговыми скважинными насосными установками («Управляющая программа ЕЕ-SRP»)» // Солодкий Е.М., Казанцев В.П.; дата приоритета 17 июня 2019 г.; заявка № 2019616951; опубл. 27 июня 2017 г. в реестре программ, РОСПАТЕНТ.

*В данных работах соискатель привёл основные результаты своих научных исследований: описал методы построения и варианты цифровой реализации системы векторного управления асинхронным электроприводом с использованием наблюдателей угла потокосцепления ротора, электромагнитного момента и механической скорости ротора, предложил структуру лабораторного стенда для исследования системы автоматического управления штанговой скважинной насосной установкой (САУ ШСНУ) в среде визуального программирования Mexbios Development Studio, дал обоснование применения алгоритма фазовой автоподстройки частоты в задаче идентификации параметров асинхронного двигателя, привёл структуру и принципы построения САУ ШСНУ с применением наблюдателей переменных состояния асинхронного двигателя и переменных состояния технологического процесса добычи нефти, предложил метод оценивания динамического уровня жидкости в скважине по динамограмме работы ШСНУ, разработал комплексную модель ШСНУ с учетом влияния степени уравниваемости балансирующего станка-качалки и упругих свойств колонны штанг плунжерного насоса установки на потребление электрической энергии, привёл обоснование использования наблюдателей переменных состояния технологического процесса для оценки уравниваемости балансирующего станка-качалки (СК), разработал алгоритмы и методы энергоэффективного управления скоростью приводного электродвигателя для стабилизации требуемого динамического уровня жидкости в скважине.*

На автореферат диссертации поступило 7 отзывов, все отзывы положительные: канд. техн. наук Садов В.Б., доцент кафедры «Системы автоматического управления» Южно-Уральского государственного университета (НИУ); д-р техн. наук, профессор Тютиков, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов Ивановского энергетического университета им. В.И. Ленина; канд. техн. наук, доцент Серебряков А.В., и д-р техн. наук Титов В.Г., профессор кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; канд. техн. наук Гусев Н.В., директор Томского ООО «НПФ Мехатроника-Про»; д-р техн. наук, ст. науч. сотр. Карякин А.Л., зав. кафедрой электрификации горных предприятий Уральского государственного горного университета; канд. техн. наук, зам. директора Научно-технического центра АО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ПНППК); д-р. техн. наук, доцент Анисимов А.А. и д-р техн. наук Тарарыкин С.В., профессор, зав. кафедрой «Электроника и микропроцессорные системы» Ивановского энергетического университета им. В.И. Ленина.

В отзывах отмечено, что тема исследования является актуальной и несёт в себе научно-практическую ценность, которая заключается в разработке систем энергоэффективного управления штанговыми скважинными насосными установками для добычи нефти, позволяющими повысить рентабельность и продлить тем самым жизненный цикл малодебитных и среднедебитных скважин.

**Диссертационный совет отмечает,** что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработана** концептуальная структура САУ ШСНУ на основе бездатчиковых методов контроля ее состояния для поддержания требуемого динамического уровня жидкости в скважине, создающая необходимые структурные условия для повышения энергоэффективности добычи нефти;  
**предложен** оригинальный подход к управлению ШСНУ с наблюдателями переменных состояния технологического процесса, отличающийся тем, что применен адаптивный к изменению параметров технологического процесса регулятор динамического уровня нефтяной жидкости, обеспечивающий повышенные показатели энергоэффективности процесса добычи нефти;  
**доказана** перспективность использования в практике нефтедобычи разработанного метода и алгоритмов двухзонного управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом ШСНУ, обеспечивающим существенное снижение энергопотребления установки, что подтверждено актом внедрения.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что: применительно к проблематике диссертации эффективно **использован** комплекс существующих методов современной теории управления и теории автоматизированного электропривода для получения комплексной модели

ШСНУ с наблюдателями переменных состояния и синтеза бездатчиковой системы управления частотно-регулируемым электроприводом установки; **изложены** результаты синтеза энергоэффективных законов движения точки подвеса колонны штанг, методы и алгоритмы синтеза адаптивного регулятора динамического уровня, результаты аналитического и имитационного моделирования САУ ШСНУ, свидетельствующие о снижении энергопотребления установки; **изучены** причинно-следственные связи между технологическими переменными ШСНУ, кинематическими параметрами СК и угловой скоростью электропривода в цикле качания, позволяющие оценить показатели удельного энергопотребления ШСНУ (объемного и массового); **произведена модернизация** известного метода оценки дополнительного усилия в точки подвеса колонны штанг вследствие распространения упругой волны, существующего алгоритма наблюдателя механической скорости ротора путем исключения из вектора координаты потока ротора, существующего алгоритма наблюдателя потокосцепления ротора путем использования фазовой автоподстройки частоты.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**разработаны и внедрены** алгоритмы управления ШСНУ в виде управляющих программ контроллера с открытой программной платформой для процессора цифровой обработки сигналов, обеспечивающие снижение энергопотребления ШСНУ порядка 10 %, что подтверждается актом внедрения (группа компаний «СПУТНИК», г. Пермь);

**определены** перспективы разработанных алгоритмов управления ШСНУ на основе применения наблюдателей переменных состояния технологического процесса добычи нефти для поддержания динамического уровня жидкости в скважине.

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила:

**для экспериментальных работ** показано, что результаты исследований различных режимов работы ШСНУ на лабораторной физической установке и результаты промышленных испытаний не противоречат результатам имитационного моделирования;

**теория** управления ШСНУ базируется на известных принципах построения многоконтурных систем подчиненного регулирования переменных состояния технологических процессов и хорошо согласуется с известными положениями теории автоматизированного электропривода;

**идея базируется** на обобщении передового промышленного опыта применения наблюдателей переменных состояния технологических процессов и установок;

**установлено** качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках информации;

**использованы** современные статистические методы обработки информации с получением численных показателей качества регулирования электропривода ШСНУ и показателей энергопотребления установки.

**Личный вклад соискателя** состоит в участии на всех этапах процесса диссертационного исследования, а именно: им разработаны модели технологического объекта, методы и алгоритмы управления ШСНУ с наблюдателями переменных состояния технологического процесса, обеспечивающие оптимальное по дебиту значение динамического уровня жидкости в скважине при снижении потребляемой электроэнергии установки, проведены исследования комплексной имитационной модели технологического процесса добычи нефти с использованием предложенных методов управления ШСНУ, поставлена серия экспериментов на лабораторном испытательном стенде и промышленной установке, подготовлены основные публикации по теме исследований.

**Диссертационный совет пришел к выводу** о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 09 января 2018 г. № 1-0: в ней изложены и научно обоснованы новые методы реализации системы автоматического управления штанговой скважинной насосной установкой с наблюдателями переменных состояния технологического процесса, позволяющие повысить показатели удельного энергопотребления.

На заседании «20» марта 2020 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.05.04 принял решение присудить Солодкому Евгению Михайловичу ученую степень кандидата технических наук (протокол заседания № 1).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 15, против присуждения ученой степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04,  
д-р техн. наук, проф. / Южаков Александр Анатольевич /

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04,  
д-р техн. наук, доцент / Фрейман Владимир Исаакович /

«20» марта 20