На правах рукописи

Солодкий Евгений Михайлович

УПРАВЛЕНИЕ ШТАНГОВОЙ СКВАЖИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ С НАБЛЮДАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Пермь, 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель:	 Казанцев Владимир Петрович доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследователь- ский политехнический университет» Храмшин Вадим Рифхатович доктор технических наук, профессор, профессор ка- федры «Электротехника и электротехнические си- стемы» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государствен- ный технический университет им. Г.И. Носова» 				
Официальные оппоненты:					
	Хакимьянов Марат Ильгизович доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприя- тий» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтя- ной технический университет»				
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образова- тельное учреждение высшего образования «Санкт- Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»				

Защита состоится «20» марта 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.04 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (http://pstu.ru/).

Автореферат разослан «14» января 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04, доктор технических наук, доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Почти половина фонда действующих нефтедобывающих скважин РФ и стран СНГ эксплуатируется штанговыми скважинными насосными установками (ШСНУ) на основе балансирных станков-качалок (СК). Широкое применение таких СК связано не только с высокой надежностью, простотой обслуживания и ремонта в промысловых условиях, но и позволяет при средних и малых дебитах нефти существенно снизить относительную долю стоимости потребленной энергии в себестоимости нефти, причем при высокой обводненности продукции вопрос потребления электроэнергии является ключевым, поскольку определяет рентабельность нефтедобычи.

Для максимальной нефтеотдачи пласта требуется стабилизация заданного технологами динамического уровня нефтяной жидкости (ДУНЖ) в скважине, что достигается применением регулируемых электроприводов. Для привода подавляющего большинства СК применяют асинхронные электродвигатели (АД) с короткозамкнутым ротором, регулирование скорости которых для поддержания ДУНЖ осуществляют либо на основе периодического включения ШСНУ в работу, либо по схеме «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный электродвигатель», либо по схеме «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель» (ПЧ-АД). Как показывают многочисленные исследования, применение последнего варианта имеет существенно больший функционал и возможности повышения энергоэффективности эксплуатации ШСНУ. Однако для реализации этих возможностей требуется установка как минимум трех датчиков: датчика динамического уровня или датчика усилия для косвенной оценки уровня жидкости в скважине, датчика угла наклона балансира СК и датчика скорости на валу АД. Серийно выпускаемые СК не оснащаются такими датчиками, но и их установка в реальных условиях эксплуатации не только увеличивает эксплуатационные расходы, но и снижает вероятность безотказной работы. Следует отметить также, что в передаче движения от вала АД к плунжерному насосу присутствует кривошипно-шатунный механизм, вызывающий значительные по величине циклические знакопеременные нагрузки на валу трансмиссионного механизма, а возвратно-поступательное движение колонны штанг имеет волновой характер, что усугубляет проблему энергоэффективного управления ШСНУ.

Следовательно, для реализации возможностей повышения энергоэффективности ШСНУ, предоставляемых регулируемыми приводами, необходима разработка методов косвенной оценки переменных состояния технологического процесса, причем, вопросы повышения энергоэффективности добычи нефти должны решаться в комплексе с задачей оценки и снижения влияния динамических нагрузок в механических элементах СК на энергетику электропривода.

Степень разработанности темы. Вопросам разработки энергоэффективных электромеханических приводов как сложных нестационарных нелинейных динамических объектов посвящены труды таких ученых, как Браславский И.Я., Виноградов А.Б., Калачев Ю.Н., Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т., Fang-Zheng Peng., Т. Fukao, Sandeep Kumar, Wu Chen, Marco Tursini, Alessia Scafati и многих др. Исследованием и проектированием частотно-регулируемых приводов с наблюдателями состояния занимаются отечественные и зарубежные вузы и производители преобразовательной техники: МЭИ, ИГЭУ, УрФУ, НІП ВНИИЭМ, «Инвертор», «Веспер», АВВ, Danfoss, Delta, Schneider Electric, Siemens и другие. В частности, известны бездатчиковые полеориентированные системы векторного управления АД, где в качестве вектора входных параметров для наблюдателя скорости используются проекции векторов тока и напряжения на стационарные оси α, β неподвижной системы координат. Наблюдатель механической скорости в модели АД участвует в оценке угла потокосцепления ротора, а значит, дает оценку активной моментообразующей составляющей тока статора, позволяющей оптимизировать процесс энергопотребления за счет реализации соответствующих алгоритмов управления скоростью и электромагнитным моментом двигателя. Однако вопросам бездатчикового управления ШСНУ по схеме ПЧ-АД на основе оценки усилия в точке подвеса колонны штанг (ТПКШ) и ДУНЖ в скважине, а также оптимизации энергопотребления в цикле качания уделяется крайне малое внимание.

Вопросам оптимизации режимов отбора продукции скважин и повышения срока службы оборудования СК за счет снижения динамических нагрузок в элементах ШСНУ посвящены труды таких ученых, как Валовский К.В., Вирновский А.С., Ершов М.С., Зюзев А.М., Кулибанов В.Н., Кулизаде К.Н., Плющ Б.М., Чаронов В.Я., Шаньгин Е.С. и др. К настоящему времени разработаны многочисленные модели гидродинамических, механических и физических процессов наземной части ШСНУ и модели притока жидкости к забою. Вместе с тем, вопросам разработки комплексных моделей ШСНУ с наблюдателями переменных состояния технологического процесса и вопросам учета влияния динамических нагрузок в элементах СК на энергетику электропривода, обусловленного, в частности, волновым характером изменения нагрузок на полированном штоке, уделяется далеко не достаточное внимание, что сдерживает создание САУ ШСНУ с повышенными энергетическими показателями.

Таким образом, вопросы разработки энергоэффективного управления ШСНУ с наблюдателями переменных состояния технологического процесса с учетом динамических нагрузок в механических элементах СК являются весьма актуальными.

Объект исследования – технологический процесс добычи нефти с использованием ШСНУ, основанный на регулировании скорости электропривода для поддержания заданного ДУНЖ.

Предмет исследования – модели, методы и алгоритмы управления ШСНУ с контролем ДУНЖ в скважине.

Цель диссертационной работы заключается в решении важной научной задачи повышения энергетической эффективности добычи нефти с учетом специфики нагружения элементов СК.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. На основе анализа методов управления ШСНУ с поддержанием требуемого ДУНЖ в скважине предложить концептуальную структуру системы бездатчикового управления ШСНУ, позволяющую реализовать возможности повышения энергоэффективности добычи нефти.

2. Разработать комплексную модель ШСНУ как технологического объекта управления с наблюдателями переменных состояния, учитывающую специфику нагружения элементов СК.

3. Разработать методы и алгоритмы управления ШСНУ, обеспечивающие повышенные показатели энергоэффективности добычи нефти.

4. Провести комплекс экспериментальных исследований САУ ШСНУ с наблюдателями переменных состояния технологического процесса на лабораторной физической установке и осуществить внедрение результатов исследований в промышленности.

Методология и методы исследований основаны на использовании положений современной теории управления, теории автоматизированного электропривода, теории оптимизации, а также методов имитационного моделирования и объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:

– предложена концептуальная структура САУ ШСНУ с поддержанием требуемого ДУНЖ в скважине, отличающаяся применением наблюдателей переменных состояния технологического процесса и создающая необходимые структурные условия для повышения энергоэффективности добычи нефти;

– разработаны оригинальные аналитические и имитационные модели, а также комплексная модель ШСНУ с наблюдателями переменных состояния, отличающиеся формированием оценок динамических нагрузок в элементах СК и позволяющие определить и минимизировать интегральное усилие на полированном штоке вследствие распространения упругой волны в колонне штанг;

– разработаны методы управления ШСНУ с наблюдателями переменных состояния технологического процесса, отличающиеся применением адаптивных алгоритмов, обеспечивающих снижение потребляемой электроэнергии в цикле качания.

Достоверность научных результатов и выводов обусловлена корректным применением апробированных математических методов, полученные результаты не противоречат известным решениям других исследователей и подтверждаются удовлетворительным совпадением результатов имитационного моделирования с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

– разработанное программное обеспечение для процессора цифровой обработки сигналов имеет прикладной характер, т.к. позволяет производить оценки необходимых технологических переменных процесса добычи нефти без использования встраиваемой в АСУТП измерительной техники; получено свидетельство об официальной регистрации программы контроллера энергоэффективной системы управления ШСНУ;

– разработанные методы и алгоритмы оптимального по критериям энергоэффективности управления ШСНУ имеют прикладной характер и могут быть использованы в нефтедобывающей промышленности, научно-исследовательской работе и образовательном процессе вуза.

Полученные научные и практические результаты работы нашли применение в модернизации АСУТП нефтедобычи скважины № 250 ЦДНГ «Ильинский» Пермского края и в учебном процессе кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета в рам-ках лабораторных и исследовательских работ по дисциплинам «Автоматизация технологических процессов и производств», «Моделирование систем и процессов», «Системы управления исполнительными механизмами».

На защиту выносятся:

– концептуальная структура САУ ШСНУ на основе применения наблюдателей переменных состояния технологического процесса, включая наблюдатель ДУНЖ в скважине (п. 3, 13 паспорта специальности);

– аналитические, имитационные и комплексная модели технологического процесса управления ДУНЖ в скважине (п. 3, 13 паспорта специальности);

– методы и алгоритмы адаптивного к изменению параметров технологического процесса управления ШСНУ (п. 3, 10, 13 паспорта специальности);

– результаты экспериментальных исследований САУ ШСНУ с наблюдателями переменных состояния технологического процесса, пакетов управляющих программ, разработанных в интегрированных программных средах MatLab/Simulink и MexBIOS Development Studio, а также результаты внедрения исследований в виде контроллера энергоэффективного управления ШНСУ, подтвержденные актом внедрения (п. 10, 13 паспорта специальности).

Связь с государственными научными программами. Результаты работы использовались при выполнении гранта РФФИ <u>18-29-18081</u> (2018-2019 г.г.).

Апробация результатов диссертации.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: IX Международной (XX Всероссийской) конференции «Автоматизированный электропривод» – АЭП-2016 (г. Пермь, 2016), XVII Международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» – ЭПП-2018 (г. Екатеринбург, 2018), VII Международной интернет-конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (г. Пермь, 2016), V Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» (г. Томск, 2016), Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (г. Санкт-Петербург, 2017), VIII Международной интернет-конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (г. Пермь, 2017), X Международной конференции «Автоматизированный электропривод» – АЭП-2018 (г. Новочеркасск, 2018), XXVI Международном научно-техническом семинаре «Повышение эффективности электроприводов» (г. Москва, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 11 в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ для публикации результатов кандидатских диссертаций, из них 6 статей в изданиях, индексируемых в SCOPUS, получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 172 страницы машинописного текста, из которых основной текст составляет 154 страниц, 83 рисунка, 18 таблиц, список литературы из 120 наименований, приложения (3 страницы).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, раскрываются цель и задачи исследования, приводится научная новизна и практическая значимость результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор автоматизированных систем управления технологическим процессом добычи нефти и выполнено теоретическое обоснование критериев энергоэффективности управления ШСНУ. Отмечено, что в качестве основного показателя энергоэффективности ШСНУ может рассматриваться удельное потребление активной электроэнергии на единицу объема нефтяной жидкости или массы добытой нефти. Показано, что для повышения энергоэффективности необходимо иметь информацию о координатах движения отдельных узлов ШСНУ, однако установка таких датчиков снижает готовность к эксплуатации и надежность системы в целом. В связи с этим обосновывается применение бездатчиковых методов управления ШСНУ на основе наблюдателей переменных состояния технологического процесса, в частности динамического усилия на штоке, с использованием которого осуществляется оценка ДУНЖ в скважине. Для иллюстрации концепции построения САУ ШСНУ с наблюдателями переменных состояния ШСНУ была предложена структура системы управления на основе электромеханической системы ПЧ-АД (рисунок 1). Обозначения: СК – станок–качалка; АД – асинхронный двигатель; АИН – автономный инвертор напряжения; ВСУ – векторная система управления; НСПЭП – наблюдатель переменных состояния электропривода; НПШСНУ – наблю-



датель переменных ШСНУ; ТВ – трехфазный выпрямитель; АРДУ – адаптивный регулятор ДУНЖ в скважине; $L^*_{AY}(t)$, $\hat{L}_{AY}(t)$ – заданный динамический уровень и его оценка; T_0 – время от начала движения ТПКШ до начала движения плунжера; $\hat{V} = \{\hat{V}_r(t), \hat{X}_r(t)\}$ – вектор наблюдаемых переменных движения (линейная скорость и координата) ТПКШ; $\omega_R^*(t), \omega_R(t), \hat{\omega}_R(t)$ – заданное, фактическое и оценочное значение скорости АД; $M_c(t)$ – момент на валу кривошипа СК; $M_e(t)$ – электромагнитный момент АД; T_a, T_b, T_c – длительности включения верхних ключей стойки АИН; U_a, U_b, U_c – фазовые напряжения обмоток статора АД; I_a, I_b – статорные токи в обмотках фаз A и B.

В результате сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе приведены аналитические и имитационные модели подсистем ШСНУ с учетом специфики бездатчикового метода управления, а также рассмотрены вопросы построения комплексной модели ШНСУ как технологического объекта управления (ТОУ). Для решения поставленных в работе задач предложено осуществить декомпозицию модели ТОУ на отдельные функционально и структурно самодостаточные части, в частности, модель бездатчиковой системы управления АД и модель динамической нагрузки на полированный шток.

Модель бездатчиковой системы управления АД составлена по уравнениям равновесия ЭДС для Г-образной схемы замещения в векторной форме:

$$L_{\sigma} \frac{di_s}{dt} = \vec{u}_s - (R_s + R_R + j\omega_1 L_{\sigma})\vec{i}_s - (j\omega_r - \frac{R_R}{L_M})\vec{\psi}_R.$$
(1)

Это же уравнение, записанное в осях d-q, имеет вид:

$$\begin{cases} L_{\sigma} \frac{dI_{sd}}{dt} = U_{sd} - (R_s + R_R) \cdot I_{sd} - \omega_1 \cdot L_{\sigma} \cdot I_{sq} + \frac{R_R}{L_M} \cdot \psi_r; \\ L_{\sigma} \frac{dI_{sq}}{dt} = U_{sq} - (R_s + R_R) \cdot I_{sq} + \omega_1 \cdot L_{\sigma} \cdot I_{sd} + \omega_r \cdot \psi_r, \end{cases}$$
(2)

где U_{Sd} – напряжение статора по оси d, U_{Sa} – напряжение статора по оси q, L_{σ} – приведенная индуктивность, L_M – приведенная индуктивность намагничивания, I_{sa} – ток статора по оси q, I_{sd} – ток статора по оси d, R_s – сопротивление статора, R_R – приведенное сопротивление ротора, ω_1 – скорость вращения поля ротора, ψ_r – модуль вектора потокосцепления ротора, $\omega_r = \omega_R \cdot p$, где ω_R – механическая скорость вращения ротора, p – число пар полюсов. Регулятор тока кроме ПИ-регулирования реализует линеаризацию, активное демпфирование и ограничение длины вектора напряжения (рисунок 2). Регулятор скорости – с ПИ- структурой, обеспечивает настройку контура на апериодический оптимум.



Рисунок 2 – Структура регулятора тока в векторной (комплексной) форме

В качестве входной переменной модели векторной бездатчиковой системы управления АД, поступающей от модели динамических нагрузок на элементах СК, выступает момент на валу. Для бездатчикового контроля механической скорости АД был предложен наблюдатель на основе фильтра Калмана, так как в алгоритме этого наблюдателя заложена возможность нивелирования случайных воздействий и шумов измерений. При реализации наблюдателя механической скорости модель электромагнитных процессов АД была редуцирована за счет исключения из вектора состояния системы потока ротора, что значительно снизило ресурсоемкость операций алгоритма наблюдателя, позволило распределить сервисные процессы управляющего микроконтроллера и повысить скорость их выполнения.

Модель АД описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{r}; \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{p}. \end{cases}$$
(3)

Здесь: х –вектор состояния объекта:

 $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} I_{s\alpha} & I_{s\beta} & \omega_r \end{pmatrix}^{\mathrm{T}};$ (4)

и – вектор входа модели:

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} U_{s\alpha} & U_{s\beta} \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}; \tag{5}$$

у – измеряемый выходной вектор:

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} I_{s\alpha} & I_{s\beta} \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}; \tag{6}$$

A, **B**, **C** – матрицы состояния, управления и измерения системы; **r** – вектор случайных воздействий на объект; **ρ** – вектор шума измерений.

Матрицы **A**, **B** и **C** определены из редуцированной модели электромагнитных процессов АД с использованием Г-образной схемы замещения:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{R_{s} + R_{R}}{L_{\sigma}} & 0 & 0\\ 0 & -\frac{R_{s} + R_{R}}{L_{\sigma}} & 0\\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$
(7)
$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_{\sigma}} & 0 & 0\\ -\frac{1}{L_{\sigma}} & 0 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}},$$
(8)
$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$
(9)

Наблюдатель состояния объекта характеризуется системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}; \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}}, \end{cases}$$
(10)

где $\hat{\mathbf{x}}$ – оценка неизвестного вектора состояния объекта; $\hat{\mathbf{y}}$ – оценка вектора измерений.

Для цифровой реализации НСПЭП была использована система разностных уравнений вида:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{k} = (T \cdot \mathbf{A} + \mathbf{I}) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + T \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_{k-1} = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}); \\ \hat{\mathbf{y}}_{k-1} = \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}), \end{cases},$$
(11)

где *T* – период дискретизации, **F** - матрица вида:

$$\mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{pmatrix} \left(1 - T \cdot \frac{R_s + R_R}{L_\sigma}\right) \hat{I}_{sa} + T \cdot \frac{R_R}{L_M \cdot L_\sigma} \cdot \hat{\psi}_{ra} - T \cdot \frac{\hat{\omega}_r}{L_\sigma} \cdot \hat{\psi}_{r\beta} - T \cdot \frac{U_{sa}}{L_\sigma} \\ \left(1 - T \cdot \frac{R_s + R_R}{L_\sigma}\right) \hat{I}_{s\beta} + T \cdot \frac{\hat{\omega}_r}{L_\sigma} \cdot \hat{\psi}_{ra} + T \cdot \frac{R_R}{L_M \cdot L_\sigma} \cdot \hat{\psi}_{r\beta} + T \cdot \frac{U_{s\beta}}{L_\sigma} \\ \hat{\omega}_r \end{pmatrix},$$
(12)

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{pmatrix} \hat{I}_{s\alpha} & \hat{I}_{s\beta} \end{pmatrix}^{\mathrm{T}},\tag{13}$$

 $\hat{\mathbf{X}}_{k}$ – вектор оценок переменных состояния (наблюдателя), который используется в *k*-м программном цикле наблюдения, $\hat{\Psi}_{r\alpha}$ и $\hat{\Psi}_{r\beta}$ – оценка проекций потокосцепления ротора на стационарные оси.

Для оценки потокосцепления ротора АД, необходимого для вычисления электромагнитного момента и механической скорости, использовался алгоритм фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Алгоритм наблюдателя потокосцепления базируется на вычислении производных проекций вектора потокосцепления с последующей фильтрацией высокочастотного релейного сигнала, причем с постоянной времени на порядок меньшей, чем в известных решениях. Данный подход обеспечил большее быстродействие наблюдателя, что позволило повысить качество оценивания не только потокосцепления ротора АД, но и его электромагнитного момента и механической скорости (на рисунке 1 внутренние оцениваемые переменные АД не показаны).

Модель нагрузки на полированный шток построена по параметрам скважины, добываемой жидкости, параметрам насоса и колонны штанг. При этом координаты движения полированного штока получены по оценкам наблюдателя скорости с использованием кинематических параметров станка качалки. В частности, нагрузка на полированный шток при движении плунжера вверх найдена из уравнения:

$$P_{\lambda} = \frac{1}{4}\pi (D_{f}^{2} - D_{r}^{2})\rho_{f}l + \frac{1}{4}\pi D_{r}^{2}\rho_{r}l - \frac{1}{4}\pi D_{f}^{2}\rho_{f}(l - H_{dyn}) + j\frac{\pi D_{r}^{2}\rho_{r}l}{8g} + \frac{f\sigma_{i}}{g}, \qquad (14)$$

где D_f – диаметр плунжера, D_r – диаметр штанги, ρ_f – плотность жидкости в скважине, ρ_r – плотность материала штанги, H_{dyn} – динамический уровень жидкости в скважине, l – глубина спуска, j – ускорение точки подвеса штанг, f – площадь поперечного сечения штанг, σ_i – дополнительное напряжение, возникающее при свободных колебаниях колонны штанг, g – ускорение свободного падения.

Величина дополнительного напряжения в ТПКШ по окончании периода начальной деформации штанг потребовала решения волнового уравнения:

$$a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},\tag{15}$$

где *и* – величина деформации, м; коэффициент *а* определяется выражением:

$$a = \sqrt{\frac{Eg}{\rho_r}},\tag{16}$$

где Е – модуль Юнга, Па.

Поскольку аналитическое решение (15) громоздко на интересуемом временном интервале, а численные конечно-разностные методы неприменимы в режиме реального времени, был предложен итерационный алгоритм расчета, реализованный в среде имитационного моделирования Matlab/Simulink (рисунок 3).

Граничные и начальные условия были определены следующим образом. Начало координат положено в точке подвеса штанг, ось *x* направлена вдоль колонны вниз. В начальный момент времени, пренебрегая влиянием начальной деформации, имеем: *u*=0,

 $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial u}{\partial x_{t=0}} = 0$ $\forall x \in [0; l)$. Для концевого сечения (*x*=*l*) начальное условие будет сле-

дующим: $\frac{\partial u}{\partial t} = v$, где v – скорость плунжера относительно ТПКШ.



Рисунок 3 – Модель реализации алгоритма нахождения напряжения в ТПКШ

Граничное условие для нижнего конца колонны удовлетворяет соотношению: $a^2 \frac{\partial u}{\partial x} = -ml \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$, где $m = \frac{(D_f^2 - D_r^2)^2 \rho_f}{(D_t^2 D_r^2 - D_r^4) \rho_r}$, где D_t – диаметр насосно-компрессорных труб.

Решение волнового уравнения (15) по модели продольного удара Сен-Венана может быть представлено в виде:

$$u = f(at - x) - f(at + x), \qquad (17)$$

где f - функция, определяемая далее по уравнениям (18 – 20).

С учетом замены z=at и граничного условия было получено уравнение для итеративного решения волнового уравнения во время движения плунжера:

$$f''(z) + \frac{1}{ml}f'(z) = f''(z-2l) + \frac{1}{ml}f'(z-2l).$$
(18)

При $z \in [0; 2l)$ правая часть уравнения будет оставаться равной нулю. С учетом начальных условий было получено выражение для f'(z):

$$f'(z) = \frac{v}{a} e^{-\frac{z}{ml}}.$$
 (19)

В интервале $z \in [2l; 4l)$ с учетом (18, 19) получено соотношение, в дальнейшем используемое для определения выражения (17):

$$f'(z) = \frac{v}{a}e^{-\frac{z}{ml}} + \frac{v}{a}\left[1 - \frac{2}{ml}(z - 2l)\right]e^{-\frac{(z - 2l)}{ml}}.$$
(20)

Сопоставление результатов моделирования с аналитическим решением на интервале $z \in [0; 4l)$, полученным профессором Вирновским А.С. при нахождении максимального усилия в точке подвеса штанг, показало адекватность предложенного алгоритма вычисления дополнительного усилия на полированном штоке.

Разработанные модели ШСНУ позволили составить комплексную модель ШСНУ как ТОУ и предоставить возможность детального изучения влияния алгоритмов управления ШСНУ на энергоэффективность добычи нефти.

В третьей главе проведен синтез САУ ШСНУ, обеспечивающей существенное снижение потребления электроэнергии в цикле качания. Закон движения точки подвеса, снижающий максимальное усилие в колонне штанг, получен из ряда условий: снижение в момент начала движения плунжера (время T_0 от начала цикла) скорости точки подвеса V_r , симметричное задание скорости V_r на половине цикла качания, снижение макси-

мального ускорения ТПКШ. Для выполнения этих условий был предложен метод двухзонного управления скоростью ТПКШ на каждой половине цикла качания. Первая зона формирует задание координаты перемещения ТПКШ по гармоническому закону с угловой скоростью $\omega_r^* = (1 - \lambda)\omega_{cp}$, где λ – коэффициент снижения угловой скорости,

 $\omega_{cp} = \frac{2\pi N}{60}$ – угловая скорость гармонической функции координаты перемещения

ТПКШ, определяющаяся количеством качаний *N* в минуту. Вторая зона формирует ступенчатое изменение углового ускорения из условия симметричности скорости на половине цикла качания. Амплитуда углового ускорения определяется из условий симметрии ее изменения в цикле качания. При этом заданная угловая скорость внутри цикла качания изменяется по двухзонному закону на каждой половине цикла качания. Далее значение угловой скорости ω_r^* с использованием вектора наблюдаемых переменных движения ТПКШ { $\hat{V}_r(t), \hat{X}_r(t)$ } (см. рисунок 1) преобразуется в адаптивном регуляторе ДУНЖ (АРДУ) в задание скорости АД $\omega_R^*(t)$. Эталонная настраиваемая модель движения ТПКШ в полном цикле качания принята в виде:

$$\omega_{r}^{*}(N,T_{0},t) = \begin{cases} (1-\lambda)\frac{2\pi N}{60}, npu \quad t \in [0,T_{0}];\\ (1-\lambda)\frac{2\pi N}{60} + k \cdot (t-T_{0}), npu \quad t \in [T_{0},T_{C}/2];\\ (1-\lambda)\frac{2\pi N}{60} + k \cdot (T_{C}-T_{0}) - k \cdot t, npu \quad t \in [T_{C}/2,T_{C}-T_{0}];\\ (1-\lambda)\frac{2\pi N}{60}, npu \quad t \in [T_{C}-T_{0},T_{C}], \end{cases}$$
(21)

где $k = \frac{4T_C \cdot \lambda \cdot \omega_{\rm cp}}{(T_C - 2 \cdot T_0)^2}$.

Для анализа влияния коэффициента λ на снижение усилий в ТПКШ в качестве функции сравнения была выбрана гармоническая функция положения при ходе штока, равном H:

$$\begin{cases} s_{zap} = \frac{1}{2}H - \frac{1}{2}H \cdot \cos(\omega \cdot t); \\ v_{zap} = \frac{1}{2}H \cdot \omega\sin(\omega \cdot t); \\ a_{zap} = \frac{1}{2}H \cdot \omega^{2}\cos(\omega \cdot t). \end{cases}$$
(22)

Относительное увеличение максимального ускорения при движении плунжера вверх $\chi_a = \frac{a'_{\text{max}} - a_{\text{гар}}}{a_{\text{гар}}}$ и относительное снижение скорости ТПКШ в момент окончания

периода начальной деформации $\chi_{\nu} = \frac{\nu_{rap}(T_0) - \nu'(T_0)}{\nu_{rap}(T_0)}$ определяют соответственно уси-

лия от сил инерции и дополнительные усилия от распространения упругой волны в колонне штанг. Величина χ_a показывает увеличение силы инерции поступательного движения колонны штанг при двухзонном управлении, а величина χ_v в свою очередь, показывает снижение дополнительных усилий на полированном штоке, вызванных действием упругих колебаний.



а) скорости; б) ускорения

Для анализа эффективности двухзонного метода управления ШСНУ были построены зависимости χ_a и χ_v от времени начала движения плунжера T_0 и коэффициента λ при заданной скорости качаний балансира, которые приведены на рисунке 4.

Анализируя полученные поверхности, можно сделать вывод, что при определенном коэффициенте λ максимальное ускорение ТПКШ при движении плунжера по гармоническому и двухзонному закону изменения координат будут одинаковыми. При этом анализ поверхности (χ_v , T_0 , λ) показывает, что скорость ТПКШ в момент начала движения плунжера T_0 снижается при двухзонном управлении, а величина снижения зависит от T_0 . Таким образом, максимальное усилие при движении плунжера, вызванное действием сил инерции поступательного движения колонны штанг, не изменится, а усилие от распространения упругой волны снизится.

Для произвольного числа качаний была получена поверхность $\lambda = f(T_0, N)$, по которой для любого режима работы установки можно получить закон управления, обеспечивающий снижение усилий в ТПКШ (рисунок 5). В алгоритме адаптивного управления параметр алгоритмической самонастройки λ аппроксимирован полиномом 2-го порядка методом минимальных квадратических отклонений (наименьших квадратов).



Рисунок 5 – Зависимость $\lambda = f(T_0, N)$, обеспечивающая снижение усилия в ТПКШ

Для анализа энергоэффективности предложенного метода двухзонного управления был произведен числовой эксперимент по полученным моделям ШСНУ. В качестве входных параметров при моделировании были взяты кинематические параметры СК 8-3,5-4000 ШСНУ. На модели ШСНУ согласно выбранным режиму и параметрам установки была исследована нагрузка в ТПКШ и на выходном валу редуктора.

В результате при двухзонном управлении в сравнении с поддержанием постоянства средней скорости качания было отмечено снижение максимальной нагрузки на полированный шток на 3,1 % (160 кг). Далее было исследовано потребление электрической энергии из сети. Для сопоставления с другими методами управление были выбраны два наиболее часто встречающиеся: скалярное разомкнутое управление АД с заданием частоты питающего напряжения, векторное замкнутое по скорости управление с постоянным заданием. При этом частота напряжения от АИН при скалярном управлении выбиралась из условия заданного времени цикла качания. В частности, для режима управления ШСНУ при среднем дебете нефти при 8-ми полных качаниях в минуту снижение энергопотребления по сравнению с векторной замкнутой системой управления за цикл качания составило 7,8 %, по сравнению со скалярным управлением – 12.3 % (рисунок 6). При уменьшении числа качаний в минуту до 6-ти экономия электроэнергии за цикл качания составила соответственно 4,2 и 8,1 %.



Рисунок 6 – График потребляемой электрической энергии при 8-ми полных качаниях балансира в минуту

В четвертой главе представлена программно-техническая реализация и приведены результаты экспериментальных исследований САУ ШСНУ на экспериментальной установке и в промышленных условиях. Первоначально апробация алгоритмов осуществлялась на установке, включающей электромашинный агрегат в виде двух двигателей (асинхронный и постоянного тока) на одном валу с управлением от преобразователей частоты с открытой программной платформой. Система управления частотно-регулируемого привода реализована при помощи платформы для создания программного обеспечения микроконтроллеров MexBIOS. Преобразователь частоты с открытой программной платформой выполнен на базе процессора цифровой обработки сигналов TMS320F2812 и силового интеллектуального модуля. Преобразователь имеет широкий набор периферии, позволяющий выполнять высокоскоростной захват сигналов с датчиков при помощи встроенных АЦП и ΣΔ-модуляторов.

Для имитации нагрузки на валу АД была спроектирована и реализована система задания момента на его валу. Она базируется на регулировании тока якорной цепи нагрузочной машины на основе двигателя постоянного тока (ДПТ) согласно уравнениям нагрузки в ТПКШ, пересчитанного на величину момента на входном валу редуктора АД. Были получены составляющие момента нагрузки АД, приведенные с учетом коэффициента масштабирования. Таким образом, нагрузка на валу АД:

$$M_C^* = \frac{\left(M_\lambda + M_{\rm np} + M_{J\Sigma}\right)}{i \cdot k_M},\tag{23}$$

где M_{λ} – момент, обусловленный усилием F_{λ} , возникающим в точке подвеса колонны штанг; $M_{\rm пp}$ – момент, обусловленный действием силы тяжести противовеса, $M_{\rm пp} = M_{\rm yp}R\sin(\theta)$, $M_{\rm yp}$ – максимальный момент от противовеса, θ – угол поворота кривошипа, R – радиус кривошипа; $M_{J\Sigma}$ – суммарный момент, обусловленный инерцией масс, движущихся возвратно-поступательно (балансир с головкой, шатун, детали СК), а также обусловленный инерцией вращающихся масс; *i* – отношение угловой скорости вала двигателя к угловой скорости вала кривошипа (передаточное число); k_M – коэффициент масштабирования.

В системе управления моментом на валу ДПТ был использован датчик крутящего момента TRB-2K (Dacell Co. LTD, Южная Корея) тензометрического типа, а также цифровой индикатор DN-10W с 16 битным высокоскоростным АЦП, детектирующий выходной сигнал датчика при частоте 100 раз в секунду. Далее захваченный сигнал с датчика обрабатывается фильтром нижних частот и подается на ЦАП. Частота среза фильтра нижних частот – 1 кГц. Кроме этого, вследствие ограничения мощности тормозных резисторов, установленных в звене постоянного тока АД, а также глубокой зоны отрицательного нагрузочного момента коэффициент масштабирования k_M был выбран равным 32,67. В результате дано сопоставление кривых задающего момента M^*_C и момента на валу ДПТ M_L , измеренного датчиком момента (рисунок 7).



Рисунок 7 – Сопоставление кривых изменения задающего момента M_{C}^{*} и момента M_{L} на валу ДПТ, измеренного датчиком момента

САУ АД (см. рисунок 1) реализует бездатчиковое векторное управление с наблюдателем скорости, основанном на применении фильтра Калмана. Система управления снабжена адаптивным наблюдателем момента, с помощью которого определяется усилие в ТПКШ установки.

Для апробации алгоритмов определения ДУНЖ на имитатор нагрузки подавалась расчетная динамограмма, которая затем сравнивалась с динамограммой, полученной в САУ АД. Анализ данных, полученных на экспериментальной установке, показал, что при определении ДУНЖ среднеквадратическое отклонение (СКО) от заданного значения составило 49,5 м (менее 5 % от математического ожидания).

На экспериментальной установке проводился анализ переходных процессов по скорости АД при задании закона движения ТПКШ. В САУ АД использовалось бездатчиковое векторное управление с наблюдателем скорости. Фактическая скорость на валу АД была пересчитана в угол поворота кривошипа, который использовался для вычисления координат ТПКШ исследуемого СК. Относительное отклонение скорости АД от задания имеет максимальную величину 4,9% (рисунок 8). При 40 выборках объемом 10 000 значение статистического критерия Кохрена составило G=0,023 (при критическом значении критерия для доверительной вероятности 0,95% $G_{0,95} = 0,025$), что свидетельствует об однородности дисперсий. Обобщенное СКО составило 2,05 с⁻¹.

Метод адаптации САУ к вариациям параметров СК базируется на принципах параметрической и алгоритмической адаптации. На рисунке 9 приведен один из разработанных алгоритмов, обеспечивающий расчет оптимальной по заданным условиям угловой скорости кривошипа СК с применением разработанного наблюдателя. Переходный процесс по ДУНЖ в скважине имеет апериодический характер и отвечает желаемой передаточной функции, на которую настроен замкнутый контур регулирования динамического уровня.



Рисунок 8 – Переходные процессы при заданном законе движения ТПКШ: сопоставление заданной ω_R^* и фактической ω_R скорости АД; отклонение δ (%) фактической скорости АД от задания

На основе анализа потребления активной мощности при работе ШСНУ с предложенной системой управления были получены количественные оценки энергоэффективности, достигаемой использованием предложенных алгоритмов управления. Снижение энергопотребления за цикл качания в соответствии с предложенным принципом двухзонного управления составило в среднем 6,9 и 5,8 % при частотах качания СК соответственно 8 и 6 мин⁻¹. При этом САУ АД обеспечивает непрерывную работу ШСНУ за счет стабилизации ДУНЖ, снижается максимальное усилие в ТПКШ, уменьшается зона отрицательного момента на пальце кривошипа. Результаты, полученные на экспериментальной установке, подтверждают результаты имитационного моделирования. Методы и алгоритмы управления ШСНУ получили промышленное внедрение в виде разработки «Контроллер энергоэффективной системы управления штанговыми скважинными насосными установками», нашедшей применение при выполнении проекта модернизации АСУТП добычи нефти, что подтверждается актом внедрения. Опытно-промысловые исследования производились на скважине № 250 ЦДНГ «Ильинский» Пермского края. Средний дебит по жидкости составлял 2,8 м³/сутки, по нефти 1,21 тонн/сутки со средним показателем обводненности, равным 0,49.



Рисунок 9 – Алгоритм расчета угловой скорости кривошипа

траты электрической энергии за период наблюдения составили 4290 кВт·час, что соответствует 25,11 кВт·час/м³ добытой жидкости и 58,12 кВт·час на тонну нефти. ДУНЖ изменялся в пределах от 1350 м до 1160 м. После проведения модернизации АСУТП добычи нефти с использованием разработанного контроллера ШСНУ (рисунок 10), реализующего предложенные в работе методы и алгоритмы управления, удельные затраты энергии на объем добытой жидкости сократились на 9,3 %, на массу добытой нефти на 10,3 %. Для анализа влияния исключительно двухзонного управления на энергоэффективность



Рисунок 10 – Структура взаимодействия подсистем САУ ШСНУ

работы установки были проведены экспериментальные исследования. Сравнивалось энергопотребление установки при замкнутом по скорости векторном и предложенном двухзонном управлении в режиме установившегося значения ДУНЖ в скважине (таблица 1).

Динамиче- ский уровень (м)	Энергопот	ребление су-		
	точное, п (кВ	риведенное т.час)	Снижение энерго-	
	Векторное	Двухзонное		
1350	75,7	72,7	3,96	
1298	72,72	69,85	2,98	
1248	69,26	66,47	4,03	
1200	66,6	63,94	4,55	
1153	63,7	61,15	4,24	
	3,95			

Таблица 1	– Рез	ультаты	замеров	энерго	опотр	оебления	ШСНУ
-----------	-------	---------	---------	--------	-------	----------	------

Таким образом, полевые испытания САУ ШСНУ подтвердили ранее полученные результаты имитационного моделирования и исследований, проведенных на экспериментальной установке, показав энергоэффективность предложенных методов и алгоритмов управления.

В заключении обобщены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа состояния проблемы предложена концептуальная структура САУ ШСНУ с наблюдателями переменных состояния технологического процесса, обеспечивающая структурные условия повышения энергетических показателей добычи нефти.

2. Разработаны аналитические, имитационные модели подсистем ШСНУ и на их основе комплексная модель технологического объекта управления ДУНЖ в скважине с учетом волнового характера изменения напряжения на полированном штоке вследствие распространения упругой волны.

3. Разработаны методы управления ДУНЖ в скважине, обеспечивающие снижение потребляемой электроэнергии ШСНУ за счет применения адаптивных к изменению технологических параметров алгоритмов управления в цикле качания.

4. Предложенные в работе модели технологического объекта, методы и алгоритмы управления реализованы на экспериментальной установке в виде управляющих программ для преобразователя частоты с открытой программной платформой на базе микроконтроллера TMS320F28335, а также при модернизации АСУ ТП добычи нефти скважины № 250 ЦДНГ «Ильинский» Пермского края, что позволило снизить затраты энергии в среднем на 9,3 % на объем добытой жидкости и на 10,3 % на массу добытой нефти.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, включая SCOPUS:

1. Солодкий, Е.М. Моделирование режимов работы автономного инвертора напряжения на базе IGBT транзисторов с использованием техники векторной широтно-импульсной модуляции / Е.М. Солодкий, Д.А. Даденков // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – Т. 12. – № 9. – С. 45-51.

2. Kostygov, A.M. The state of and prospects for using hardware-software simulators of electrotechnical complexes / A.M. Kostygov, **E.M. Solodkii**, A.V. Kukharchuk, A.M. Zyuzev, M.V. Mudrov, K.E. Nesterov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – no. 6. – pp. 309-313 (Scopus).

3. Костыгов, А.М. Бездатчиковое векторное управление вентильным двигателем с коррекцией ошибки вычисления электрического угла / А.М. Костыгов, Д.А. Даденков, **Е.М. Солодкий**, А.М. Шачков // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2015. – Т. 13. – № 9. – С. 27-33.

4. 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.

5. 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).

6. 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/ICI-EAM.2017.8076315 (Scopus).

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

8. 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, Novocher-kassk, Russia. – 2018. – Art. № 18345814. – pp. 1-5. – DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571795 (Scopus).

9. 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.

10. 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).

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

Свидетельство о регистрации программы ЭВМ:

12. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ. № 2019618285 «Управляющая программа контроллера энергоэффективной системы управления штанговыми скважинными насосными установками («Управляющая программа EE-SRP»)» // Солодкий E.M., Казанцев В.П.; дата приоритета 17 июня 2019 г.; заявка № 2019616951; опубл. 27 июня 2017 г. в реестре программ, РОСПАТЕНТ.

Публикации в других изданиях:

13. Солодкий, Е.М. Разработка системы векторного управления в среде Mexbios Development Studio / Е.М. Солодкий, А.А. Терехин, И.Р. Юсупов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-3. – С. 599-603.

14. Костыгов, А.М. Синтез регуляторов тока и скорости в системе векторного управления вентильным электроприводом / А.М. Костыгов, **Е.М. Солодкий**, Д.А. Даденков // Фундаментальные исследования. 2014. – № 11-7. – С. 1490-1495.

15. Даденков, Д.А. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink / Д.А. Даденков, **Е.М. Солодкий**, А.М. Шачков // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 11. – С. 117-128.

16. Варзаносов, П.В. Реализация системы векторного управления асинхронным двигателем / П.В. Варзаносов, А.В. Белоногов, **Е.М. Солодкий** // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2016. – Т. 1. – С. 150-156.