

На правах рукописи

Валишин Денис Евгеньевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЛИНЕЙНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА СКВАЖИННОГО ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА
ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет».

Научный руководитель **Аипов Рустам Сагитович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Сапсалева Анатолий Васильевич,**
доктор технических наук, профессор, профес-
сор кафедры «Электроника и электротехника»
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

Некрасов Антон Алексеевич,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник отдела электрификации и энерго-
обеспечения АПК ФГБНУ «Федеральный
научный агроинженерный центр ВИМ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Южно-Уральский
государственный аграрный университет»
г. Троицк

Защита диссертации состоится « 15 » марта 2019 г. в 12⁰⁰ часов на засе-
дании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу:
410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратов-
ский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» и на сайте
www.sgau.ru.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Теат-
ральная пл. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 220.061.03.
e-mail: chekmarev.v@yandex.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Старцев Сергей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вода имеет важное значение для любого животноводческого и птицеводческого предприятия. Обеспечение животных и птицы питьевой водой – одно из основных условий их успешного развития. Животноводческие и птицеводческие комплексы располагаются на значительном удалении от городов. Для их водоснабжения используются поверхностные источники, колодцы, артезианские скважины.

На сегодняшний день в Российской Федерации водоснабжение из подземных источников составляет более 80 %. Наибольшее распространение для водоснабжения получили скважинные центробежные насосы, но центробежные насосы имеют низкий КПД (20...25%) при малой производительности (до 2 м³/ч), сложно решаются вопросы пуска и часто наблюдаются срывы работы при изменении высоты подъема.

Отмеченные недостатки отсутствуют в плунжерных насосах. Применение для водоснабжения в сельском хозяйстве скважинных плунжерных насосов (СПН) усложняется наличием преобразователя вида движения между плунжером и электродвигателем вращения. Это уменьшает КПД, увеличивает металлоёмкость и стоимость установки, ограничиваются возможности для регулирования производительности.

Повысить КПД, снизить металлоёмкость и стоимость можно за счет применения в электроприводе СПН цилиндрического линейного асинхронного двигателя (ЦЛАД). ЦЛАД позволяет получить непосредственно поступательное движение плунжера. Кроме того, ЦЛАД характеризуется простотой конструкции, технологичностью изготовления, дешевизной. Для дополнительного повышения энергетических характеристик электропривода, уменьшения пусковых токов ЦЛАД, предлагается применить в концевых звеньях упругие накопители механической энергии с периодическим переключением ЦЛАД с трехфазного питания на двухфазное. Разработка безредукторного электропривода для СПН на базе ЦЛАД с накопителями механической энергии с периодическим переключением двигателя с трехфазного питания на двухфазное является актуальной нерешенной задачей. Тематика работы соответствует подпрограмме "Техническая и технологическая модернизация, инновационное развитие" государственной программы Российской Федерации "Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной

продукции, сырья и продовольствия на 2013 - 2020 годы" (постановление Правительства РФ от 14 июля 2012 года N 717).

Степень разработанности темы исследования. Применением в электроприводах технологических машинах различного назначения линейных асинхронных двигателей занимались и занимаются известные ученые: Болдеа И., Веселовский О.Н., Винокурова А.И., Вольдек А.И., Гурницкий В.Н., Епифанов А.П., Коняев А.Ю., Локшин Л.И., Мамедов Ф.А., Насар С.А., Петленко Б.И., Сапсалева А.В., Сарапулов Ф.Н., Свечарник Д.В., Скобелев В.Е., Соколов М.М., Ямамура С. и др. Несмотря на большое количество научных исследований, посвященных обоснованию внедрения линейных двигателей в различные технологические процессы, задача создания энергоэффективного безредукторного электропривода для СПН требует дальнейшего решения.

Цель работы – снижение энергетических затрат скважинного плунжерного насоса применением электропривода на базе цилиндрического линейного асинхронного двигателя с упругими накопителями механической энергии с периодическим переключением с трехфазного питания на двухфазное.

Задачи исследования:

1. Провести анализ и выявить приоритетные конструктивные исполнения безредукторного электропривода СПН. Разработать электропривод на базе ЦЛАД для СПН с улучшенными энергетическими и пусковыми характеристиками.

2. Разработать математическую модель электропривода СПН на базе ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии с периодической коммутацией фазы двигателя при трехфазном питании.

3. Исследовать энергетические характеристики электропривода СПН на базе ЦЛАД при периодической работе в трехфазном и двухфазном режимах.

4. Для проверки адекватности полученных результатов при математическом моделировании провести экспериментальные исследования электропривода.

5. Рассчитать экономическую эффективность внедрения линейного асинхронного электропривода СПН.

Объект исследования – линейный асинхронный электропривод скважинного плунжерного насоса на базе ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии с периодическим переключением с трехфазного питания на

двухфазное.

Предмет исследования – закономерности влияния режимных и конструктивных факторов линейного асинхронного электропривода на энергетические характеристики СПН.

Научная новизна:

- предложена новая конструкция электропривода СПН, отличающаяся высокими технико-экономическими показателями в результате использования ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии с периодической коммутации фазы двигателя при трехфазном питании (патент РФ № 2578746);

- разработана математическая модель электропривода СПН на базе ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии, позволяющая исследовать его работу при периодической коммутации фазы при трехфазном питании;

- получены результаты исследования закономерности влияния СПН на энергетические показатели линейного асинхронного электропривода.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработана математическая модель электропривода на базе ЦЛАД для СПН, позволяющая исследовать режим его работы с периодической коммутацией трехфазного режима в двухфазный, при котором будут достигаться рациональные энергетические показатели его работы;

- разработана конструкция электропривода на базе ЦЛАД для СПН с системой управления, обеспечивающей периодическую коммутацию фазы двигателя при трехфазном питании, позволяющая уменьшить пусковые токи и улучшить энергетические характеристики привода;

- разработана и создана экспериментальная установка для физического исследования процессов, происходящих в электроприводе на базе ЦЛАД для СПН;

- результаты исследования приняты к внедрению в агрофирме ООО «Укорно», в ООО «ИспЭК» и соответствуют направлению научно-исследовательской работы ФГБОУ ВО «Башкирский ГАУ» с малым инновационным предприятием ООО «ЭШАР» по теме: «Повышение эффективности работы СПН применением линейного асинхронного привода», заключенной по договору № 143 от 12 декабря 2013 года, гос. регистрация №01201176549, используется в учебном процессе ФГБОУ ВО «Башкирский ГАУ».

Методология и методы исследований. В теоретических и эксперимен-

тальных исследованиях использовались основные методологические принципы: объективность, всесторонность и конкретность рассмотрения исследуемых процессов. Применены методы статического анализа, методы сравнения. Для анализа нелинейных уравнений использовался программный пакет Matlab.

Положения, выносимые на защиту:

- конструкция электропривода СПН на базе ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии с периодической коммутацией фазы двигателя при трехфазном питании, позволяющая уменьшить пусковые токи;

- математическая модель электропривода СПН на базе ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии с реализацией периодического отключения фазы при трехфазном питании двигателя;

- результаты теоретических исследований, отражающие процесс работы электропривода СПН на базе ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии при периодической коммутации фазы двигателя при трехфазном питании, позволившие выявить основные характеристики привода и наметить пути повышения эффективности его работы;

- результаты экспериментальных исследований работы электропривода СПН на базе ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии при периодической коммутации фазы двигателя при трехфазном питании.

Степень достоверности и апробация результатов полученных автором научных положений обеспечивается применением в исследованиях современного и сертифицированного оборудования, статистической обработкой полученных данных с использованием лицензионного программного обеспечения, удовлетворительном совпадении теоретических и экспериментальных данных.

Результаты исследований, выводы и практические рекомендации были доложены и одобрены на научно-практических конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция «Научное обеспечение развития АПК в современных условиях» (г. Ижевск, 2011 г.); Международная научно-практическая конференция «Энергетика предприятий АПК и сельских территорий: состояние, проблемы и пути решения» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); XV Российский энергетический форум «Энергетика БРИКС и ШОС» (г. Уфа, 2014); Международная специализированная выставка «АгроКомплекс» (г. Уфа, 2015-2018 гг.); Российский промышленный форум (г. Уфа, 2016 г.); XVII специализированная выставка «Отопление. Водоснабжение. Кондиционирование. Всё

для строительства и ремонта. Чистая вода» (г. Уфа, 2016 г.); Международная научно-практическая конференция «Достижения науки – агропромышленному комплексу» (г. Челябинск, 2017-2018 гг.).

Привод СПН на базе ЦЛАД был отмечен следующими наградами: золотая медаль выставки «Золотая осень» (Москва, 2014); диплом II-й степени на Российском энергетическом форуме в конкурсе «На лучшую технологию, оборудование, продукцию и научные разработки» (Уфа, 2015); диплом II-й степени на XXVII Международной специализированной выставке «АгроКомплекс-2017» в конкурсе «За разработку и освоение производства оборудования для электро-, газо- и теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей» (Уфа, 2017).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 15 печатных работ, в том числе 2 в рецензируемых научных изданиях, получен один патент РФ на изобретение. Общий объем публикаций 4,1 п.л., из которых 2,0 п.л. принадлежит лично соискателю.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, списка использованной литературы, и приложений. Работа изложена на 124 страницах текста, содержит 50 рисунков, 10 таблиц, 7 приложений. Список использованной литературы включает в себя 107 наименований, в том числе 7 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, определена цель, поставлены задачи, кратко изложены основные положения, выносимые на защиту, представлена общая характеристика работы.

В первой главе «Современное состояние проблемы и способы повышения эффективности работы привода скважинных насосов» произведен анализ существующих системы водоснабжения в РФ, который показал, что свыше 50% всех скважин не имеют зон санитарной охраны, это приводит к интенсивному загрязнению подземных источников, и определяет необходимость постоянного перехода на более глубокие водоносные горизонты при водоснабжении.

Произведенный обзор существующих систем подъема воды из скважины, показал, что слабые стороны центробежных насосов (низкий КПД, потребность заливки перекачиваемой жидкостью перед пуском, частые срывы работы, ограниченная высота подъема воды) можно устранить применением плунжерных насосов. Но применение их в сельском хозяйстве невозможно из-за ряда суще-

ственных недостатков привода: большая металлоемкость и дороговизна из-за потребности в преобразователе вида энергии между плунжером и электродвигателем вращения. Перечисленные недостатки можно устранить применением линейного асинхронного электропривода на базе ЦЛАД и поместить его непосредственно в скважину. ЦЛАД позволяет получить непосредственно поступательное движение, исключив промежуточный преобразовательный механизм между насосом и двигателем. Кроме того, ЦЛАД обладает конструктивной простотой, технологичностью изготовления, дешевизной. Для дополнительного повышения эффективности работы электропривода колебательного движения предлагается применить в концевых звеньях упругие накопители механической энергии для останова и последующего разгона плунжера СПС с периодической коммутацией фазы двигателя при трехфазном питании (патент РФ № 2578746).

На рисунке 1 приведена кинематическая схема линейного асинхронного электропривода СПН на базе ЦЛАД. Электропривод работает следующим образом. При подаче трёхфазного питания на индуктор 1 ЦЛАД, возникает электромагнитная сила, приложенная к вторичному элементу ЦЛАД, одновременно являющемуся плунжером насоса 2. Под действием этой силы плунжер начинает движение вниз, клапан 3 закрывается, происходит увеличение давления в камере 5, и как следствие открывается клапан 4, вытесненная вода из камеры 5 через патрубок 10 поступает в трубопровод. По мере перемещения плунжера упругий элемент 8 сжимается, что приводит к увеличению его силы сопротивления. В определенный момент электромагнитная сила ЦЛАД полностью

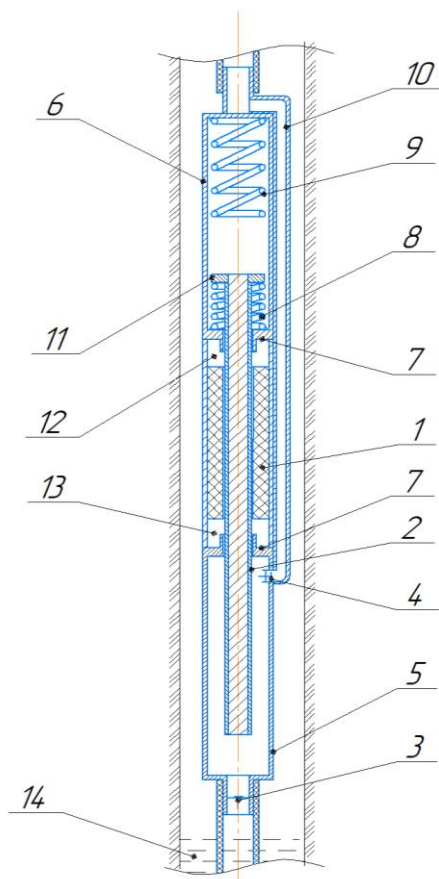


Рисунок 1 – Кинематическая схема линейного асинхронного электропривода СПН на базе ЦЛАД: 1 – индуктор ЦЛАД; 2 – плунжер; 3, 4 – клапаны; 5, 6 – рабочие камеры; 7 – крышки; 8, 9 - упругие элементы; 10 – патрубок; 11 – фланцы; 12, 13 – полости между индуктором ЦЛАД и рабочей камерой; 14 – вода

уравновешивается силой сопротивления упругого элемента 8, плунжер остановится. В этот момент система управления (на рисунке не показана) по сигналу датчика положения обесточивает одну из фаз индуктора ЦЛАД (питание ЦЛАД осуществляется по схеме «звезда с нулевым проводом»). Под действием силы упругости предварительно сжатого упругого элемента 8 плунжер начинает движение вверх с возрастающей скоростью. Этому движению будет способствовать и электромагнитная сила ЦЛАД при двухфазном его питании. При движении плунжера вверх клапан 4 закроется, а клапан 3 – из-за появления разрежения в камере 5 откроется, в камеру 5 начнет поступать вода из скважины. Под действием инерции движущихся масс и электромагнитной силы ЦЛАД в какой-то момент начнет сжиматься упругий элемент 9, возрастающая сила упругости будет препятствовать движению плунжера. Когда плунжер 2 остановится, система управления включит обесточенную фазу, индуктор переходит на трехфазное питание, появится электромагнитная сила, направленная вниз. Под действием силы сжатого упругого элемента 9 и электромагнитной силы ЦЛАД начнется движение плунжера вниз, далее процесс повторяется. Свободный ход плунжера между упругими элементами 8 и 9 определяет частоту коммутации фазы ЦЛАД: чем больше свободный ход, тем меньше частота коммутации и наоборот. Условиями выполнения предложений является: изменение направления движения плунжера; перемещение плунжера после изменения направления движения на половину полюсного деления ЦЛАД; энергия, запасенная упругими накопителями, должна быть больше для преодоления сил, препятствующих обратному движению плунжера.

Во второй главе «Математическая модель линейного асинхронного электропривода СПН» разработана математическая модель электропривода СПН на базе ЦЛАД.

Расчетная схема электропривода с указанием сил, действующих на плунжер, приведена на рисунке 2. Для математического описания работы СПН составлены дифференциальные уравнения механического движения. Определяющей величиной является механическая характеристика двигателя. Начало координат для каждого этапа движения плунжера отсчитывается от крайних положений вторичного элемента ЦЛАД. Начало отсчета времени выбирается индивидуально для движения плунжера вниз и вверх.

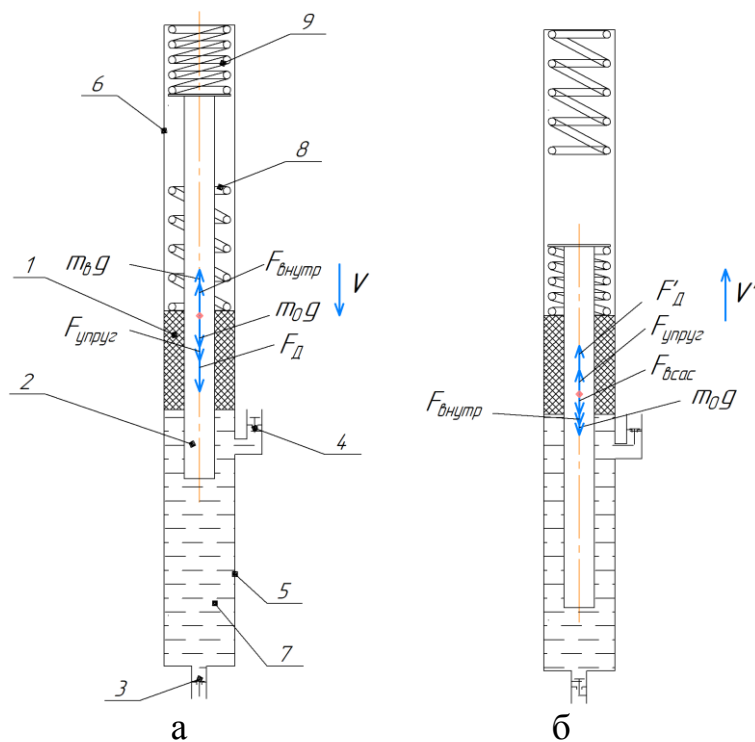


Рисунок 2 – Расчетная схема линейного асинхронного электропривода СПН:
 а - силы, действующие при движении плунжера в камеру; б - силы, действующие при движении плунжера из камеры; 1- индуктор ЦЛАД; 2 - плунжер; 3, 4 - клапаны; 5, 6 – рабочие камеры насоса; 7 – вода; 8, 9 - упругие накопители механической энергии

На основе расчетной схемы составлена система дифференциальных уравнений, описывающая движение плунжера:

$$\begin{cases} F_D(v) - m_в g - F_{внутр}(v) + m_0 \cdot g + F_{упруг} = (m_0 + m_в) \cdot \frac{dv}{dt}; \\ F'_D(v') - F_{внутр}(v') - F_{всас}(v) - m_0 \cdot g + F_{упруг} = m_0 \cdot \frac{dv'}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где $F_D(v)$ - силы ЦЛАД при трехфазном режиме питания, Н; $F'_D(v')$ - сила ЦЛАД в двухфазном режиме питания, Н; $F_{всас}(v)$ – сила сопротивления при всасывании воды в камеру насоса, Н; $F_{внутр}(v)$ – сила внутреннего сопротивления ЦЛАД и насоса, Н; $F_{упруг}$ - сила упругости накопителя механической энергии, Н; v – скорость движения плунжера при трехфазном режиме питания, м/с; v' – скорость движения плунжера при двухфазном режиме питания, м/с; m_0 - масса подвижных частей без массы вытесняемой воды, кг; $m_в$ – масса нагнетаемой воды в нагнетательном трубопроводе, кг; g - ускорение свободного падения, м/с².

Математическое моделирование электромагнитных процессов с учетом общепринятых допущений при многополюсном исполнении (число пар полюсов $p > 4$) ЦЛАД предлагается проводить по схемам замещения на базе уравнений Парка-Горева. ЦЛАД работает в трехфазном и двухфазном режимах питания, при моделировании таких режимов работы ЦЛАД удобна ортогональная система координат $\alpha, \beta, 0$ неподвижная относительно индуктора. Ось α при этом совмещается с осью индуктора, а ось β опережает ее на угол $\pi/2$. Система уравнений Парка-Горева для двухфазного режима питания индуктора ЦЛАД

(отключена фаза «А»), имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\psi_{\alpha 1}}{dt} &= U_{\alpha 1} - \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \psi_{\alpha 1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_r \psi_{\alpha 2}; \\
 \frac{d\psi_{\beta 1}}{dt} &= U_{\beta 1} - \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \psi_{\beta 1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_r \psi_{\beta 2}; \\
 \frac{d\psi_{\alpha 1}}{dt} &= -\frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r \psi_{\alpha 2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s K_s \psi_{\alpha 1} - \frac{\pi}{\tau} v \psi_{\beta 2}; \\
 \frac{d\psi_{\beta 1}}{dt} &= -\frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r \psi_{\beta 2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s K_s \psi_{\beta 1} + \frac{\pi}{\tau} v \psi_{\alpha 2}; \\
 U_{\alpha 1} &= -\frac{1}{3}(Ub + Uc); \quad U_{\beta 1} = \frac{1}{3}(Ub - Uc); \\
 F_{\text{Д}} &= \frac{3}{2} \frac{\pi^2 v_0 k_r}{\tau^2 \sigma \alpha'_s} (\psi_{\alpha 2} \psi_{\beta 1} - \psi_{\alpha 1} \psi_{\beta 2}).
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\psi_{\alpha 1}, \psi_{\beta 1}, \psi_{\alpha 2}, \psi_{\beta 2}$ – потокосцепления по осям α и β соответственно индуктора и вторичного элемента, Вб; Ub, Uc – напряжения фаз «В», «С», В; v_0 – синхронная скорость электромагнитного поля ЦЛАД, м/с; τ – полюсное деление обмотки ЦЛАД, м; $\alpha'_s, \alpha'_r, K_s, K_r$ – коэффициенты входящие в уравнение системы определяются параметрами схемы замещения ЦЛАД; $\alpha'_s = \frac{R_1 X_r}{X_s X_r - X_m^2}$; $\alpha'_r =$

$\frac{R'_2 X_s}{X_s X_r - X_m^2}$, $K_s = \frac{X_m}{X_s}$; $K_r = \frac{X_m}{X_r}$; σ – коэффициент рассеяния магнитного потока; $X_s = X_1 + X_m$, $X_r = X'_2 + X_m$ – значения сопротивлений вводимые в модель, Ом; R_1, X_1, R'_2, X'_2 – соответственно активное и реактивное сопротивления индуктора и вторичного элемента, приведенные к обмотке индуктора, Ом; X_m – сопротивление взаимной индукции между индуктором и вторичным элементом, Ом.

Сила внутреннего сопротивления вторичного элемента (плунжера) ЦЛАД определяется двумя сопротивлениями уплотнения штока:

$$F_{\text{внутр}}(v) = 2 \cdot F_{\text{тр.шт.}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{тр.шт.}}$ - сила трения, зависит от вида уплотнения, Н:

$$F_{\text{тр.шт.}} = \mu \cdot \pi \cdot D_p \cdot b, \quad (4)$$

где $\mu = 0,10 \dots 0,13$ – коэффициент трения уплотнений о рабочую поверхность плунжера, Н/м²; D_p - диаметр плунжера, м; b – ширина уплотнения, м.

В качестве упругих элементов используются цилиндрические винтовые пружины. В математической модели сила упругих накопителей описывается линейным законом Гука:

$$F_{упруг} = -k \cdot X, \quad (5)$$

где $F_{упруг}$ - сила упругости, Н; k , X - соответственно жесткость Н/м и деформация упругого элемента, м.

Наличие многократного интегрирования в уравнениях (1)...(5) обуславливает значительную нелинейность рассматриваемой задачи. Дополнительную сложность вносит различная форма аналитической записи этих уравнений на этапах трехфазного питания ЦЛАД и двухфазного питания. Для решения нелинейной сложной динамической системы уравнений предлагается воспользоваться пакетом объектно-визуального моделирования MATLAB (Simulink). Реализация математической модели электропривода на базе ЦЛАД СПН в приложении Simulink представлено на рисунке 3.

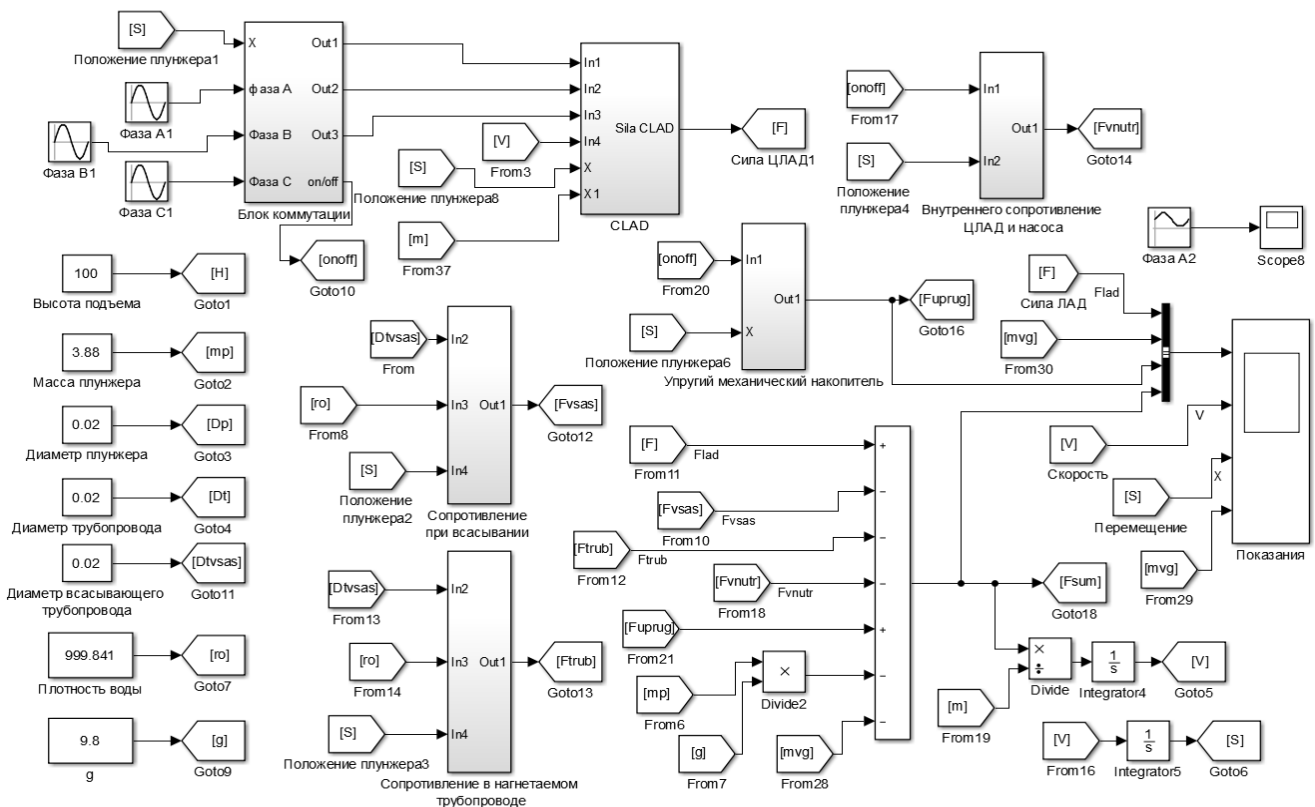


Рисунок 3 – Математическая модель электропривода на базе ЦЛАД СПН в среде Simulink

Постоянными в течение времени моделирования параметрами являются следующие величины: высота скважины – H , м; масса плунжера - m_p , кг; диаметр плунжера – D_p , мм; диаметр трубопровода – D_t , мм; диаметр всасывающего трубопровода – $D_{твсас}$, мм; плотность воды – ρ_0 , кг/м³, которые определяют силы сопротивления движению плунжера СПН вошедшие в систему уравнений.

В третьей главе «Теоретическое исследование математической модели линейного асинхронного электропривода СПН» определены коммутационные

токи, КПД, мощность, рабочие характеристики.

Исследования математической модели проводились со следующими параметрами схемы замещения ЦЛАД (по техническим паспортным данным завода-изготовителя – ООО "Свердловский Машиностроительный Завод", г. Екатеринбург): $R_l=0,5$ Ом, $X_l=1$ Ом, $X'_2=0,1$ Ом, $X_m=5$ Ом, $R'_2=1$ Ом, $V_0=3,6$ м/с, $\tau=0,036$ м, число пар полюсов индуктора $p=6$.

Полученные при математическом моделировании временные зависимости токов, потребляемых индуктором ЦЛАД (рисунок 4), показывают снижение пусковых токов по амплитуде до 19 %, по продолжительности до 17 % при коммутации одной фазы по сравнению с коммутацией всех трех фаз.

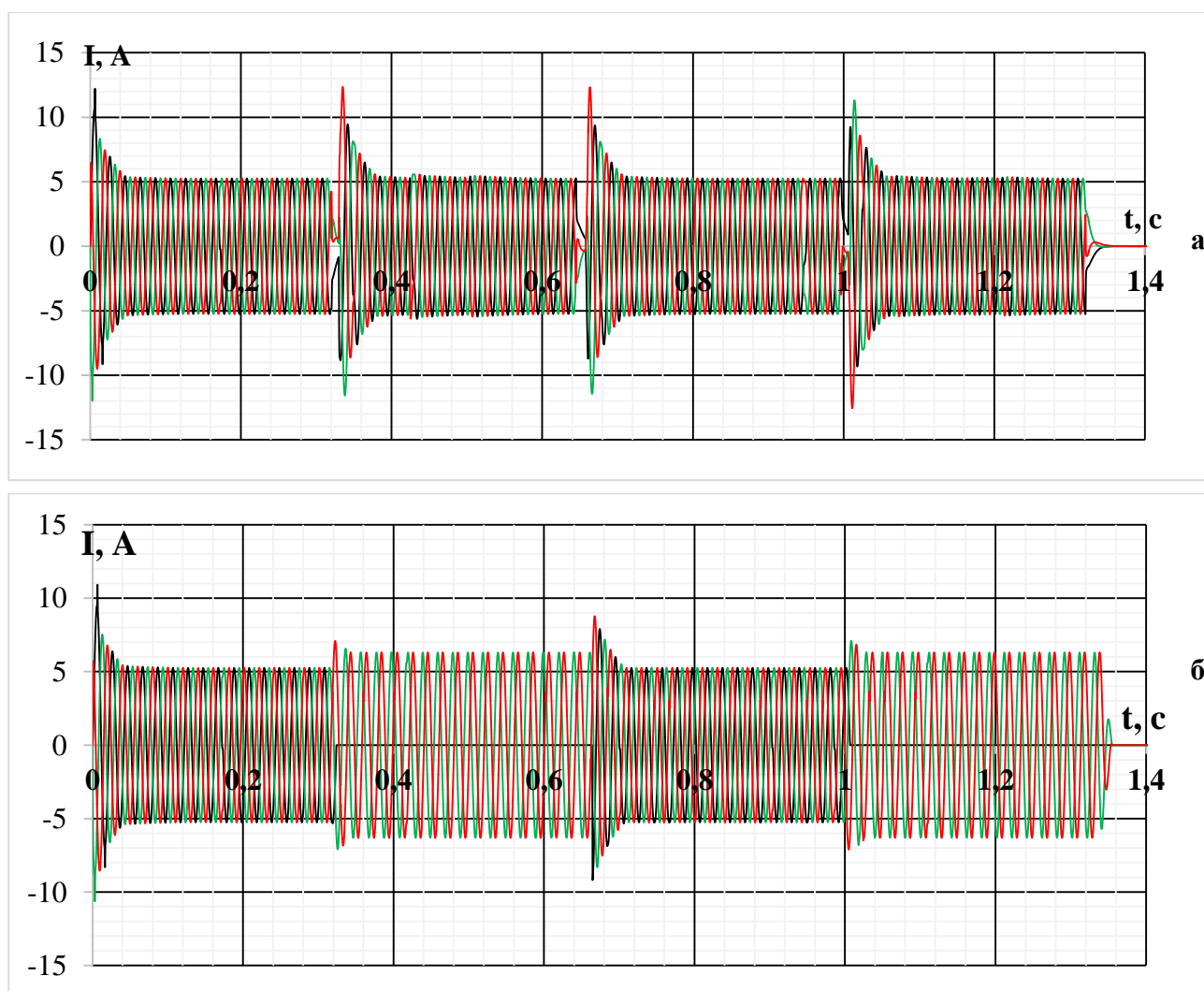


Рисунок 4 – Ток при коммутации всех трех фаз (а) и при коммутации только одной фазы А (б)

Для анализа работы линейного асинхронного электропривода СПН, с различными нагрузками (разные диаметры плунжера) приведены рабочие характеристики (рисунок 5). Из приведенных зависимостей следует, чем меньше диаметр плунжера, тем больше высота подъема воды.

Для сравнения на этом же рисунке приведены рабочие характеристики наиболее распространённых для водоснабжения насосов: центробежных скважинных серии ЭЦВ (ЭЦВ 4-1,5-50, ЭЦВ 4-2,5-80 и ЭЦВ 4-2,5-120) с развиваемым напором 50...120 м и диапазоном производительности 0,5...4 м³/ч; вихревого насоса 2В-1,6; вибрационного насоса «Малыш». Анализ рабочих характеристик показывает, что при необходимой для обеспечения водой, например, фермы КРС на 500 голов с производительностью насоса 1 м³/ч предлагаемый СПН на базе ЦЛАД может обеспечить напор 170 м, ближайший центробежный скважинный насос при соизмеримой мощности обеспечивает напор не более 100 м.

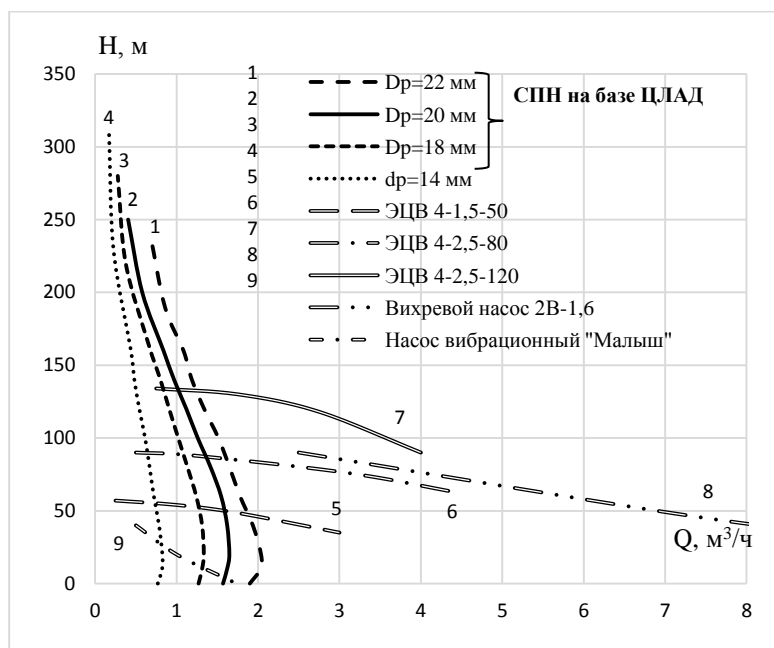


Рисунок 5 – Рабочие характеристики исследуемого насоса и насосов других типов:

H – напор, Q – производительность

Н – напор, Q – производительность

В сельскохозяйственном производстве из-за низкой надежности систем электроснабжения возможно снижение напряжения трехфазного источника питания. Исследования показали, что при снижении питающего напряжения на 5 % напор и производительность СПН с линейным асинхронным электроприводом уменьшается на 7 %, а при снижении напряжения на 10 % - на 14,6 %, что не критично для надежного водоснабжения из-за имеющегося возможности создания большего запаса по напору.

В соответствии с ГОСТ 31532-2012 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения» в качестве показателя экономичности энергопотребления для насосов выбран КПД (отношение мощности насоса к потребляемой мощности электроприводом). Установлено, что максимальный КПД СПН с разработанным электроприводом составляет 0,45, при $D_p=22$ мм (рисунок 6). При производительности от 0,8 до 1,7 м³/ч, КПД в данном диапазоне составляет не менее 0,4. Данные, полученные экспериментальным путем (точки на рисунке 6), отличаются от результатов математиче-

ского моделирования не более, чем на 9,6 %. Мощность линейного асинхронного электропривода СПН при разных нагрузках представлена на рисунке 7.

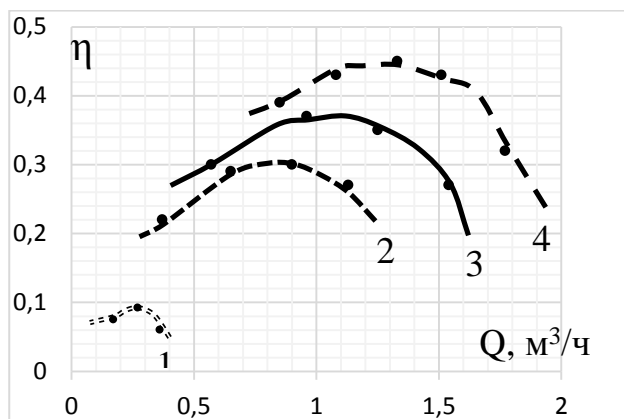


Рисунок 6 – Зависимость КПД СПН от производительности: 1 - $D_p=14$ мм; 2 - $D_p=18$ мм; 3 - $D_p=20$ мм; 4 - $D_p=22$ мм

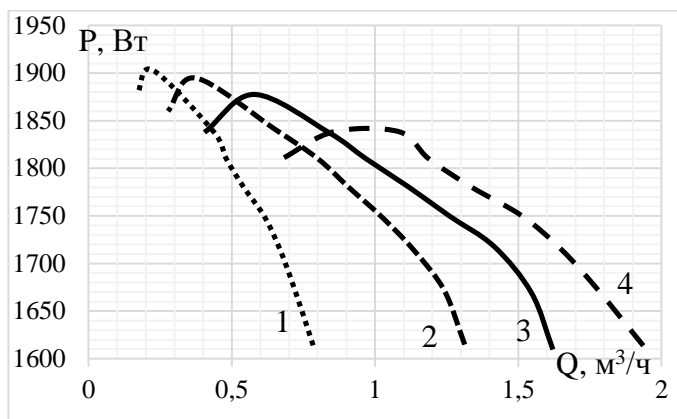


Рисунок 7 – Зависимость мощности СПН от производительности: 1 - $D_p=14$ мм; 2 - $D_p=18$ мм; 3 - $D_p=20$ мм; 4 - $D_p=22$ мм

На рисунке 8 представлены для сравнения графики зависимости КПД от напора для различных насосов. КПД СПН с линейным электроприводом имеет в диапазоне напоров от 80 м до 200 м КПД более 0,30. Ближайший центробежный насос имеет КПД 0,20 в диапазоне напоров от 80 м до 90 м. Установлено, что для обеспечения максимальной производительности при конкретной нагрузке (определен диаметром плунжера) имеет место значение, при котором обеспечивается максимальная производительность. Например, на рисунке 9 приведена зависимость производительности от жёсткости нижнего накопителя механической энергии.

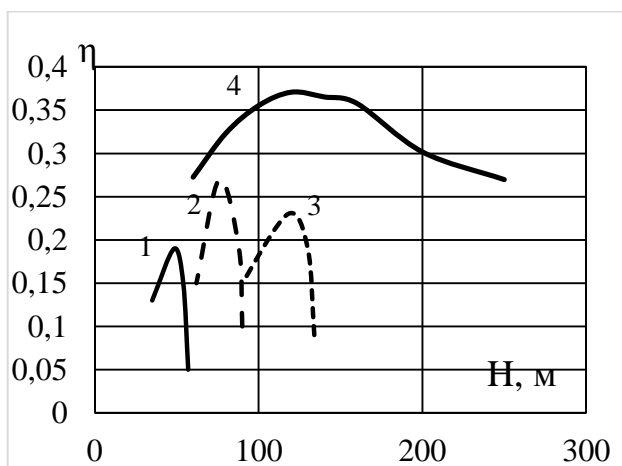


Рисунок 8 – Зависимость КПД от напора: 1 - ЭЦВ 4-1,5-50; 2 - ЭЦВ 4-2,5-80; 3 - ЭЦВ 4-2,5-120; 4 СПН на базе ЦЛАД $D_p=20$ мм

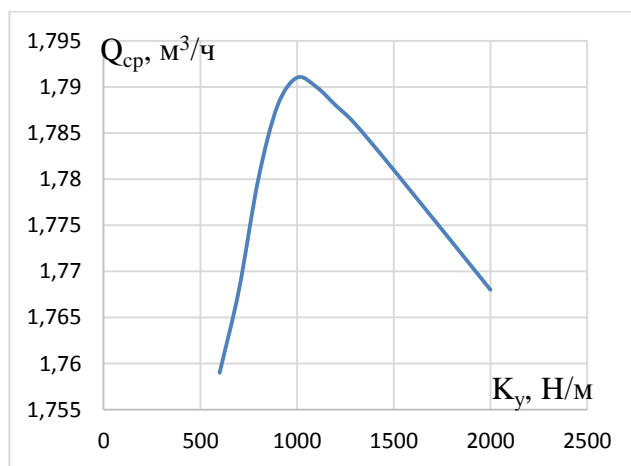


Рисунок 9 – Зависимость производительности от жесткости нижнего накопителя механической энергии ($D_p=20$ мм)

В соответствии с ГОСТ 31532-2012 в качестве показателя экономичности энергопотребления для различных насосов рассчитано количество электроэнергии, затрачиваемое на 1 м^3 выкачиваемой жидкости ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$) (рисунок 10).

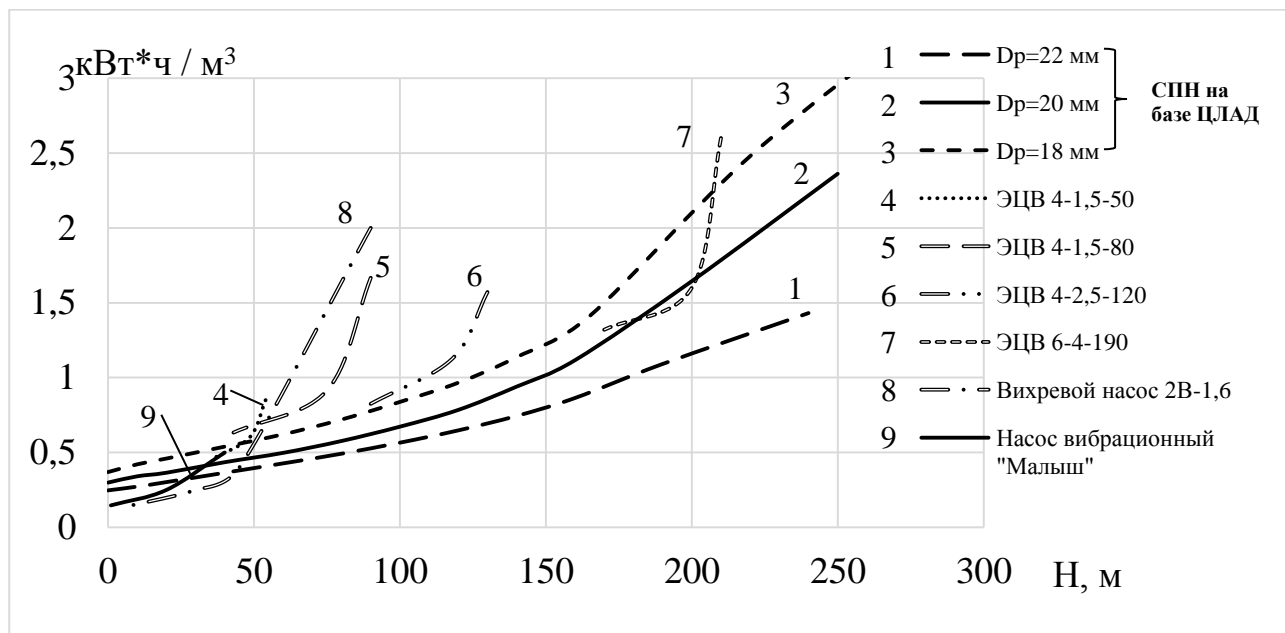


Рисунок 10 – Зависимость затрат электроэнергии на подъем 1 м^3 воды в зависимости от напора различными насосами

Анализ полученных результатов показывает, что в широком диапазоне изменения напора наименьшие затраты электроэнергии на подъем 1 м^3 воды имеет СПН с линейным асинхронным электроприводом.

В четвертой главе «Экспериментальное исследование электропривода на базе ЦЛАД СПН» разработаны программа и методика экспериментальных исследований, на основе которых создана экспериментальная установка.

Программа экспериментальных исследований включает проверку адекватности: теоретических и экспериментальных значений тока ЦЛАД в приводе СПН; определения КПД насосной установки; механических параметров.

Экспериментальная установка для многостороннего исследования имеет модульное построение: позволяет менять ЦЛАД; использовать в СПН плунже-ры различных диаметров; устанавливать упругие элементы с разной жёсткостью; имеется возможность изменения места установки упругих элементов по высоте. На рисунке 11а показан общий вид экспериментальной установки, на рисунке 11б – структурная схема системы управления.

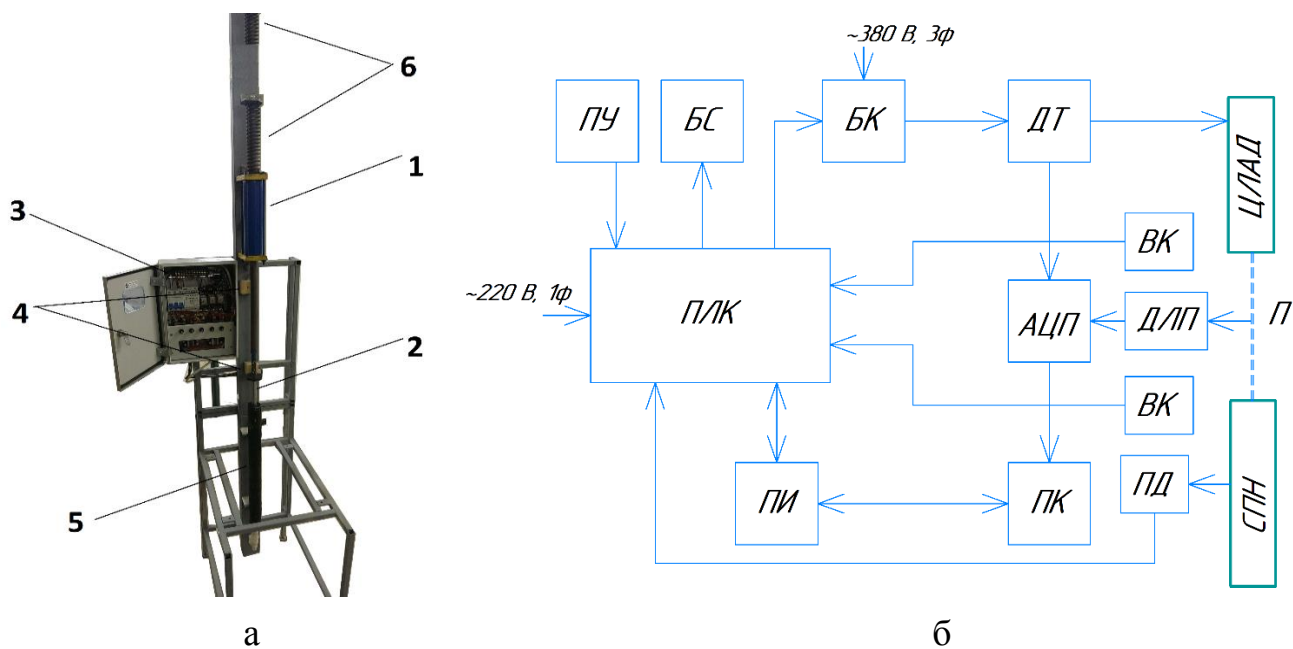


Рисунок 11 – Экспериментальная установка: а – общий вид; б – структурная схема системы управления; 1 – индуктор ЦЛАД; 2 – вторичный элемент ЦЛАД (плунжер); 3 – система управления; 4 – выключатель концевой; 5 – рабочая камера СПН; 6 – упругие накопители механической энергии

Структурная схема системы управления включает в себя: ЦЛАД, вторичный элемент которого жестко связан с плунжером (П), скважинный плунжерный насос (СПН), блок коммутации (БК), программируемый логический контроллер (ПЛК), пульт управления (ПУ), блок сигнализации (БС), датчик линейного положения (ДЛП), выключатель концевой (ВК), датчик тока (ДТ), преобразователь давления (ПД), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), преобразователь интерфейсов RS-485/USB (ПИ) и персональный компьютер (ПК).

Система управления позволяет реализовать необходимые режимы работы ЦЛАД. Есть возможность осуществления различных вариантов вынужденных и автоколебаний с управлением работой ЦЛАД по времени и частоте включений, скорости и положению плунжера.

Экспериментальная установка оснащена современной контрольно-измерительной и аттестованной аппаратурой с многоканальной регистрацией результатов измерений и их математической обработкой на ЭВМ. Для контроля величины тока использовались датчики тока Honeywell CSLA1CF (погрешность менее $\pm 1,5\%$), для определения положения плунжера – датчик линейного положения «Gefran» LT-M-0500-s (погрешность менее $\pm 0,05\%$). Для определения давления датчики серии ОВЕН ПД100-ДИ (основная погрешность $\pm 0,5\%$).

Сигналы с датчиков регистрировались многоканальным осциллографом (аналогово-цифровым преобразователем) ACUTE серии DS-1000. Далее сигнал обрабатывался в программе Microsoft Excel и Statistica, в результате чего определялись действительные значения тока, потребляемого индуктором ЦЛАД, перемещения, давления, производительности и КПД.

Для практического применения необходимо обеспечить все виды защит: от короткого замыкания, перегрузки, токов утечки и обрыва фаз. При этом необходимо учитывать режим работы (перевод из трехфазного режима на двухфазный). Защита от короткого замыкания, перегрузки, токов утечки предлагается осуществить автоматическими выключателями дифференциального тока. Защиту от обрыва фаз необходимо реализовать через систему управления на основе ПЛК с использованием датчиков тока по фазам и с контролем продолжительности отключения фазы.

Для определения вероятностной погрешности физических измерений, произведена их математическая обработка по ГОСТ Р 8.736-2011 и МИ 1317-04 (по методике прямых многократных измерений, количество измерений в каждой точке - 12).

На рисунках 12, 13 приведены сравнительные характеристики экспериментов и результатов математического моделирования. Показателями для оценки адекватности разработанной математической модели выбраны ток I_b индуктора ЦЛАД (рисунок 12) и координаты положения плунжера X (рисунок 13).

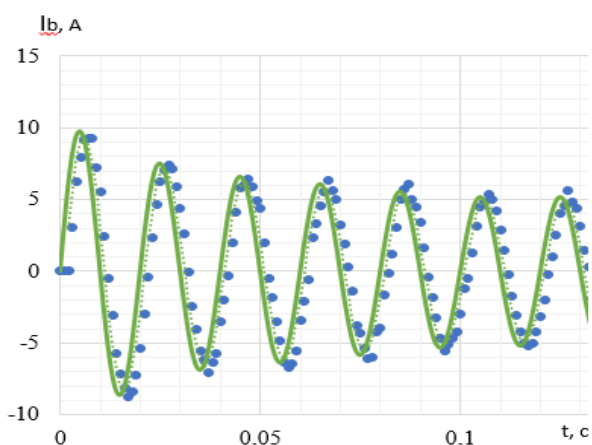


Рисунок 12 – Временная зависимость тока I_b индуктора ЦЛАД

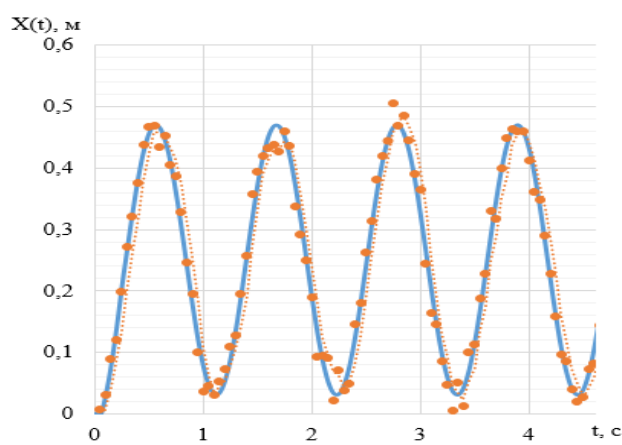


Рисунок 13 – Временная зависимость координаты положения плунжера X

Исследование расчетной и экспериментальной зависимостей тока индук-

тора ЦЛАД свидетельствует о том, что отличие амплитуд пускового тока не превышает 0,91 А, что составляет 12,5 % (в интервале от 0 до 100 мс), а тока в установившемся режиме – 0,38 А, т.е. 7,6 % (в интервале от 100 до 300 мс). Это позволяет использовать разработанную математическую модель СПН с приводом на базе ЦЛАД в практических расчетах и считать ее адекватно отражающей физические процессы.

В пятой главе «Технико-экономическая оценка эффективности внедрения СПН с линейным асинхронным электроприводом» определены годовые эксплуатационные затраты в размере 54395,43 рублей при годовой потребности воды 8212,50 м³ на животноводческом комплексе КРС на 500 голов. Оценка эффективности работы предлагаемого электропривода на базе ЦЛАД проводилась по ГОСТ Р 52777-2007 и ГОСТ Р 53056-2008 для сельскохозяйственной техники. Оценка экономической эффективности внедрения привода СПН на базе ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии с реализацией периодического отключения одной фазы при трехфазном питании двигателя показала, что по сравнению с центробежным насосом предлагаемый привод позволяет снизить потребление электрической энергии на 23 %. Срок окупаемости капиталовложений составляет 4,1 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ возможных конструктивных исполнений приводов СПН на базе ЦЛАД, выявлены их достоинства и недостатки. Сделан вывод о целесообразности применения ЦЛАД с упругими накопителями механической энергии при периодической коммутации фазы двигателя при трехфазном питании. Разработана конструкция линейного асинхронного электропривода на базе ЦЛАД для СПН позволяющая увеличить КПД, уменьшить пусковые токи.

2. Разработана математическая модель СПН на базе ЦЛАД в приводе с упругими накопителями механической энергии и реализацией периодического отключения одной фазы при трехфазном питании двигателя, позволяющая выбрать параметры, при которых будут достигаться рациональные энергетические и технические показатели.

3. Исследования показали, что работа линейного асинхронного электропривода на базе ЦЛАД СПН, позволяет уменьшить пусковые токи до 19 % по амплитуде и до 17 % по продолжительности. Установлено, что максимальный КПД СПН с электроприводом на базе ЦЛАД составляет 0,45 при диаметре

плунжера 22 мм. При производительности от 0,8 до 1,7 м³/ч, КПД составит не менее 0,4.

4. Разработана экспериментальная установка СПН с электроприводом на базе ЦЛАД с коммутацией одной фазы двигателя при трехфазном питании. Проведены экспериментальные исследования, в результате которых получены временные зависимости фазного тока индуктора ЦЛАД и положения плунжера. Математическая обработка результатов экспериментов показала, что расхождение расчетных и экспериментальных данных по положению плунжера не превышает 7,7 %, тока – 12,5 %, производительности – 6,8 %, а КПД – 9,6 %, что позволяет считать снятые экспериментальные зависимости с достаточной точностью соответствующими данным теоретических исследований, а разработанную математическую модель адекватно отражающей физические процессы и использовать ее в практических расчетах.

5. Годовой экономический эффект от внедрения предлагаемого СПН с приводом на базе ЦЛАД в животноводческом комплексе КРС на 500 голов с годовым потреблением воды 8212,5 м³ с глубины 100 м позволило уменьшить потребление электрической энергии на 23 %. Расчетный срок окупаемости капиталовложений составляет 4,1 года.

Рекомендации производству

Проведенные исследования позволяют дать рекомендации по проектированию и применению разработанного линейного асинхронного электропривода с упругими накопителями механической энергии при периодической коммутации фазы двигателя при трехфазном питании для различного технологического оборудования с колебательным движением рабочего органа.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования по совершенствованию линейного асинхронного электропривода СПН могут вестись в направлении углубления теоретических исследований способов управления с целью поддержания максимального КПД, напора или производительности при изменении внешних факторов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Валишин, Д.Е.** Математическая модель плунжерного насоса с цилиндрическим линейным асинхронным двигателем в приводе / Р.С. Аипов, Д.Е. Валишин, Д.С. Леонтьев // Политематический сетевой электронный науч-

ный журнал КубГАУ (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №02(096). – IDA [article ID]: 0961401040. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/02/pdf/40.pdf>, 0,688 у.п.л.

2. **Валишин, Д.Е.** Математическая модель линейного асинхронного привода плунжерного насоса с периодической коммутацией фазы источника трёхфазного напряжения / Р.С. Аипов, Д.Е. Валишин // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2016. - Т.12. - №4. -С.13-20.

Патенты

3. **Патент №2578746, Российская Федерация, МПК F04B 47/06, F04B 17/04/** Насосная установка [Текст] / Р.С. Аипов, Д.Е. Валишин, Д.С. Леонтьев (RU). – №2015106455/06,; заявл. 25.02.2015; опубл. 27.03.2016. - Бюл. № 9.

Публикации в других изданиях

4. **Валишин, Д.Е.** Исследование привода скважинного плунжерного насоса на базе ЦЛАД с неполнофазным режимом работы / Р.С. Аипов, Д.Е. Валишин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета, 2017. - №3. -С. 43-49.

5. **Валишин, Д.Е.** Повышение эффективности насосной установки применением линейного асинхронного привода / Д.Е. Валишин // Научное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы Всероссийской научно-практической конференции в рамках XX юбилейной специализированной выставки "АгроКомплекс-2010". - Уфа: Башкирский ГАУ, 2010. -С. 158-160.

6. **Валишин, Д.Е.** Применение линейного асинхронного двигателя для привода насосной установки / Д.Е. Валишин // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: материалы Всероссийской научно-практической конференции. - Ижевск: Ижевская ГСА, 2011. -С. 56-60.

7. **Валишин, Д.Е.** Математическая модель линейного асинхронного двигателя насосной установки / Д.Е. Валишин // Особенности развития агропромышленного комплекса: материалы Всероссийской научно-практической конференции в рамках XXI Международной специализированной выставки "АгроКомплекс-2011". - Уфа: Башкирский ГАУ, 2011. -С. 122-125.

8. **Валишин, Д.Е.** Математическое моделирование неполнофазных режимов работы линейных асинхронных двигателей для насосных установок / Д.Е. Валишин // Энергообеспечение и энергосбережение на предприятиях АПК: межвузовский научный сборник. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2011. С. 33-35.

9. **Валишин, Д.Е.** Неполнофазный режим работы линейного асинхронного электропривода в технологическом оборудовании АПК / Р.С. Аипов, Д.Е. Валишин // Перспективы инновационного развития АПК: материалы Международной конференции в рамках XXIV Международной специализированной выставки "Агрокомплекс–2014". - Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. -С. 183-187.

10. **Валишин, Д.Е.** Несимметричные режимы работы цилиндрического линейного асинхронного двигателя в приводе плунжерного насоса / Д.Е. Валишин//Аграрная наука в инновационном развитии АПК: материалы международной научно-практической конференции в рамках XXV Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2015». - Часть III. -Уфа: Башкирский ГАУ., 2015. -С. 195-202.

11. **Валишин, Д.Е.** Плунжерный насос повышенной эффективности с линейным электродвигателем / Валишин Д.Е. // Отопление. Водоснабжение. Кондиционирование: материалы III Международной конференции в рамках XIX специализированной выставки. - Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. -С. 36-39.

12. **Валишин, Д.Е.** Пути и способы повышения эффективности работы плунжерного насоса / Валишин Д.Е. // Актуальные проблемы энергообеспечения предприятий: материалы Всероссийской научно-практической конференции в рамках XV Российского энергетического форума. - Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. -С. 28-32.

13. **Валишин, Д.Е.** Погружной плунжерный насос с двумя рабочими камерами с линейным асинхронным приводом / Д.Е. Валишин, Д.С. Леонтьев // Наука молодых – инновационному развитию АПК: материалы Международной молодежной конференции. - Уфа: Башкирский ГАУ, 2016. -С. 92-96.

14. **Валишин, Д.Е.** Совершенствование скважинного плунжерного насоса для предприятий АПК применением цилиндрического линейного асинхронного двигателя / Д.Е. Валишин // Энергетика - агропромышленному комплексу России: материалы международной научно-практической конференции. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет. 2017. -С. 41-46.

15. **Валишин, Д.Е.** Повышение энергоэффективности работы скважинного плунжерного насоса / Валишин Д.Е., Урманов В.Г. // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VIII международной научно-практической конференции. - Уфа: Башкирский ГАУ, 2017. -С. 30-33.