

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт металлургии, машиностроения и транспорта**

На правах рукописи

Кочанжи Фёдор Иванович

**Тема научно-квалификационной работы (диссертации)
«Повышение эффективности нефтедобычи штанговыми глубинными
насосами за счёт использования накопленной энергии рекуперации в
суперконденсаторах»**

Направление подготовки
15.06.01 «Машиностроение»

Направленность
15.06.01_03 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Аспирант: Кочанжи Фёдор Иванович
Научный руководитель:
Волков Андрей Николаевич, д.т.н,
доцент, зав.кафедрой «Автоматы»

Санкт Петербург – 2019

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ/на кафедре «Автоматы» Института металлургии, машиностроения и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: – *Волков А.Н., д.т.н., доц.*

Научный руководитель: – *Волков А.Н., д.т.н., доц.*

Рецензент: – *Смирнов К. А., к.т.н., ведущий инженер – разработчик ООО «Компания Комплит»*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Применение штанговых скважинных насосов (ШГН) на сегодняшний день является одним из основных и наиболее распространённых способов добычи нефти. В настоящее время одним из методов решения поставленной задачи является применение линейных реечных приводов ШГН на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Экономия ресурсов, в том числе и энергий в нефтяной промышленности является актуальной задачей. Тема диссертации посвящена вопросам исследования энергопотребления приводов штанговых скважинных насосов путем выбора рациональных режимов работы привода, разработки мехатронного рекуперативного привода с учетом специфической нагрузки представляется весьма актуальной.

Цель и задачи исследования

Повысить энергоэффективность линейного привода ШГН на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором за счет использования энергии рекуперации в момент движения штока насоса вниз без полезной нагрузки. Разработать схему и алгоритм работы мехатронного рекуперативного привода, учитывающего специфическую циклическую нагрузку привода ШГН. Исследовать возможные варианты подключения конденсаторов большой емкости (суперконденсаторов) к приводу насоса. Выбрать оптимальный режим работы привода. Разработать мехатронный модуль для оптимального контроля системы заряда и разряда суперконденсатора, подключенного в звено постоянного тока преобразователя частоты насоса.

Научная новизна

1. Предложена принципиальная структурная схема работы мехатронного рекуперативного привода.

2. Разработана математическая модель мехатронного рекуперативного привода ШГН, учитывающего несимметричную циклическую нагрузку для различного времени цикла.
3. Предложен способ повышения эффективности рекуперации за счет установки преобразователя постоянного тока применительно для циклового привода
4. На основе анализа математической модели выбран оптимальный режим работы привода, выявлены граничные значения напряжения рекуперативного привода, выявлено существенная понижение потребляемой мощности привода из сети за счет использования суперконденсаторов и его системы управления.
5. Результаты исследования математической модели и полученные результаты могут быть положены в основу методов проектирования рекуперативного привода для штанговых скважинных насосов.

Теоретическая и практическая значимость

Предложена схема и алгоритм работы, математическая модель, которая может быть использована для исследования мехатронных систем привода разнообразного технологического оборудования для грузоподъемных машин. Практическая значимость заключается в создании теоретических основ для разработки методики проектирования рекуперативных приводов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ. ИММиТ» -2016 и на всероссийском форуме «Наука и инновации в технических университетах» - 2017.

Публикации

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в двух статьях, изданных в журналах из списка, рекомендованного ВАК.

Представление научного доклада: основные положения

Разработана схема и алгоритм работы мехатронного рекуперативного привода, учитывающего специфическую циклическую нагрузку привода. Разработан метод оптимального использования всей мощности конденсатора большой емкости. Выбран оптимальный режим работы привода с модулем рекуперации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении на основании краткого анализа состояния научных исследований в выбранном направлении обоснована актуальность темы представленной диссертации. Сформулированные основные цели и научные задачи исследования, представлены новые научные положения, выносимые на защиту. Кратко описано содержание диссертации.

В главе 1 произведен аналитический обзор области применения предмета диссертационного исследования, представлены основные области применения суперконденсаторов на сегодняшний день.

Суперконденсаторы используются для питания трамвайной линии Paris T3 на участках без воздушных проводов и для восстановления энергии во время торможения.

В 2009 году Alstom и RATP оснастили трамвай Citadis экспериментальной системой восстановления энергии под названием «STEEM». Система оснащена 48 установленными на крыше суперконденсаторами для накопления энергии торможения, что обеспечивает трамваям высокий уровень энергетической автономии, позволяя им работать без воздушных линий электропередачи на

некоторых участках своего маршрута, заряжаясь во время движения на остановочных станциях с питанием. Во время испытаний, которые проходили между остановками Porte d'Italie и Porte de Choisy на линии T3 сети трамвайных путей в Париже, трамвай использовал в среднем приблизительно на 16% меньше энергии.

В августе 2012 года китайская корпорация CSR Zhuzhou Electric Locomotive представила прототип двухвагонного легкого метро, оборудованного крышным суперконденсатором. Поезд смог проехать 2 км без проводов, перезаряжаясь за 30 секунд на станциях через наземный пикап. Поставщик утверждал, что поезда могут быть использованы в 100 малых и средних китайских городах. Семь трамваев (уличных вагонов) на суперконденсаторах ввели в эксплуатацию в 2014 году в Гуанчжоу, Китай. Суперконденсаторы заряжаются за 30 секунд с помощью устройства, расположенного между рельсами. Это обеспечивает трамвай до 4 километров. Начиная с 2017 года, суперконденсаторные автомобили Чжучжоу также используются в новой системе трамвая Нанкин и проходят испытания в Ухане.

Первый гибридный автобус с суперконденсаторами в Европе появился в 2001 году в Нюрнберге, Германия. Это был так называемый «Ultrasapbus» от MAN, который был испытан в реальной работе в 2002 году. Испытательный автомобиль был оснащен дизель-электрическим приводом в сочетании с суперконденсаторами. Система была снабжена 8 модулями «Ultrasap» напряжением 80 В, каждый из которых содержал 36 компонентов. Система работала с напряжением 640 В и могла заряжаться, разряжаться при 400 А. Электрическая мощность составляло 0,4 кВт · ч при весе 400 кг.

Суперконденсаторы использовали энергию торможения при старте. Расход топлива был снижен на 10-15% по сравнению с обычными дизельными автомобилями. Другие преимущества включают снижение CO₂ выброса, тихий и безотходный запуск двигателя, снижение вибрации и снижение затрат на техническое обслуживание.

В начале 2005 года Шанхай испытал новую форму электрического автобуса, названного «сарabus», который работает без линий электропередачи (работа без контактной сети) с использованием больших бортовых суперконденсаторов, которые частично перезаряжаются всякий раз, когда автобус останавливается (под так называемыми электрическими зонтами), и полностью заряжаются на конечной остановке. В 2006 году два коммерческих автобусных маршрута начали использовать «сарabus». Один из них - маршрут 11 в Шанхае. Было подсчитано, что шина суперконденсатора была дешевле, чем шина литий-ионного аккумулятора, и один из ее автобусов имел одну десятую стоимости энергии дизельного автобуса с экономией топлива в течение всего срока службы.

В главе 2 описывается разработка модели штанговой колонны глубинного насоса. Известны математические модели, описывающие процессы в колонне штанг на основе решения дифференциальных уравнений в частных производных итерационным способом. Достоинством этих моделей является то, что они позволяют оценивать работу насоса как при нормальной работе, так и при наличии дефектов оборудования. Недостатком модели является сложность реализации, выражающейся в необходимости организации итерационного процесса, невозможность расчета напряжений в элементах колонны по ее длине, трудности в использовании ее в системах имитационного моделирования из-за необходимости составления уравнений связи для решения задачи расчета процессов при совместной работе с системой электропривода.

Попытка решения задачи адаптации модели штанговой колонны с целью использования ее в системе имитационного моделирования Matlab-Simulink была предпринята в работе [2]. Здесь использован метод электрической аналогии и штанговая колонна рассмотрена как цепь с распределенными параметрами. Эквивалентами механических величин, таких как сила, скорость, перемещение, масса, коэффициент трения пропорциональный скорости, вес элемента и величина, обратная произведению модуля Юнга на площадь поперечного сечения были взяты соответственно электрические величины: напряжение, сила тока, заряд,

индуктивность, активнее сопротивление, электродвижущая сила и погонная ёмкость. Для наглядности эквивалентные друг другу величины представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Таблица эквивалентности величин

Механические величины	Электрические величины
Сила	Напряжение
Скорость	Ток
Перемещение	Заряд
Масса	Индуктивность
Коэффициент трения пропорционален скорости	Активное сопротивление
Вес элемента	ЭДС
Величина, обратная произведению модуля Юнга на площадь поперечного сечения	Погонная ёмкость

Недостатком модели является то, что в ней недостаточно полно учтены потери от сил вязкого трения по длине колонны, а влияние веса штанг учтено с помощью сосредоточенного источника ЭДС, что не позволяет имитировать процессы, возникающие в аварийных режимах, например, при обрыве штанг.

Таким образом, задача построения математической модели колонны штанг и ШГН, позволяющей исследовать нормальные и аварийные режимы работы насоса и их влияние на электрическую часть привода, а также ее реализации в системе имитационного моделирования является актуальной. Построим математическую модель колонны с использованием метода электрической аналогии.

Как известно [1-4], колонну штанг можно рассматривать как упругий колеблющийся стержень. А в электротехнике длинную линию можно представить в виде эквивалентного активного четырехполюсника в том случае, если задачей расчета являются напряжения в начале и конце линии или ее участка. Применительно к рассматриваемой задаче колонну целесообразно разбить на

участки, длина которых равна либо длине ступени при многоступенчатой конструкции, либо длине штанги, если одной из задач расчета является получение значений усилий в узлах их соединения. В любом случае структурная схема расчетного участка длиной dx будет иметь вид, представленный на рисунке 1.

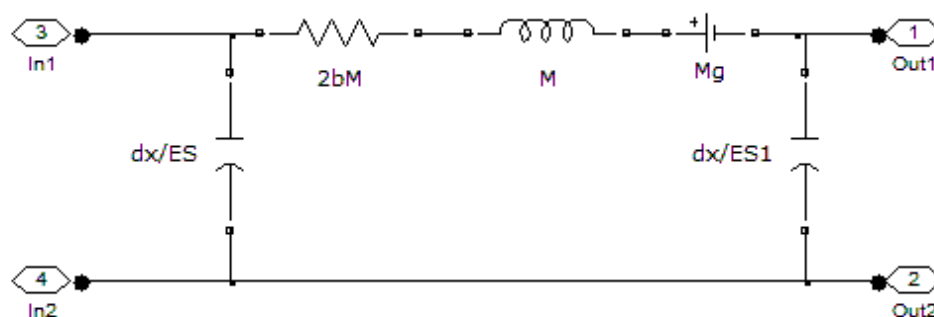


Рисунок 1 – Расчетная схема участка колонны

Модель колонны и ШГН реализована в системе имитационного моделирования Matlab-Simulink Power System Blockset. Скорость колонны задана с помощью управляемого источника тока по закону:

$$V_n(t) = \frac{\pi N_n L_n}{60} \sin\left(\frac{2\pi N_n t}{60}\right), \quad (1)$$

где N_n – число двойных ходов в минуту, L_n – длина хода полированного штока.

Ввиду того, что величина нагрузки на плунжер зависит от направления и не зависит от скорости, нагрузку удобно имитировать с помощью источника ЭДС, а учет направления движения штока осуществлять с помощью диода. Аналогичным образом симитированы нагрузки в клапанах, а также нагрузки, обусловленные действием сил, величина которых не зависит от скорости, например, силы сухого трения. На приведенной на рисунке 6 модели ШГН, таким образом симитирована повышенная нагрузка в нагнетательном клапане. Ввиду того, что указанная нагрузка действует только при движении вверх, ее имитация выполняется с помощью источника ЭДС и двух диодов, один из которых включен последовательно с источником, как показано на рисунке 2, а второй - шунтирует

эти элементы, имитируя тем самым отсутствие нагрузки при движении штока вниз. Для анализа же режима обрыва штанг достаточно выполнить замыкание точки обрыва на корпус с помощью управляемого ключа, что эквивалентно нулевому значению усилия в точке обрыва. Данные виды нагрузок и аварийные режимы в настоящей работе модели не рассматриваются, а элементы не приводятся, чтобы не загромождать схему.

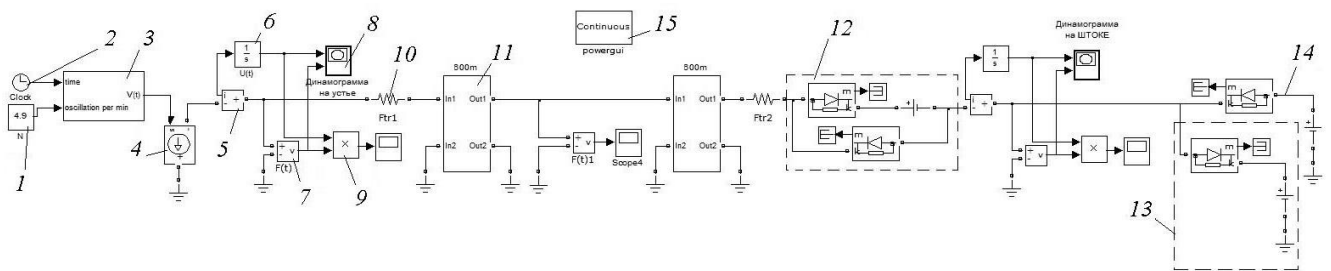
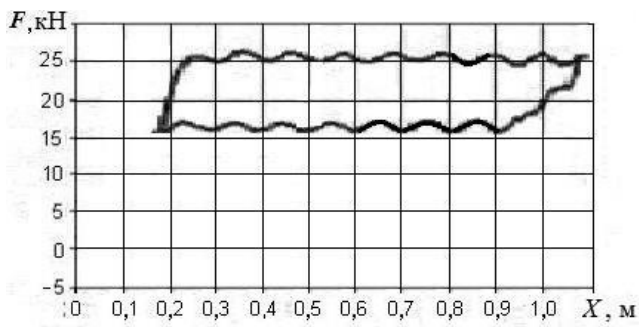


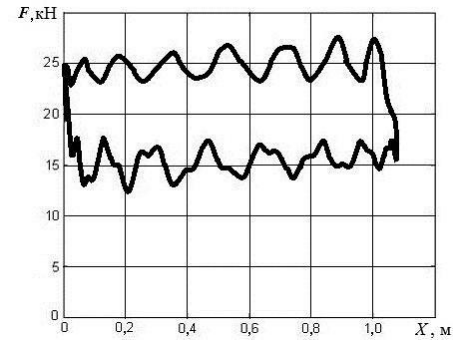
Рисунок 2 – Имитационная модель колонны штанг и ШГН, реализованная в системе имитационного моделирования Matlab-Simulink

1 – блок задания числа двойных ходов; 2 – блок расчета времени моделирования; 3 – блок задания сигнала скорости; 4 – блок задания скорости; 5 – блок измерения скорости; 6 – блок расчета перемещения; 7 – блок измерения усилия; 8 – блок, используемый для построения динамограммы; 9 – блок расчета мощности; 10 – блок имитации трения на устье; 11 – модель участка штанговой колонны; 12 – блок имитации трения в нагнетательном клапане; 13, 14 – блоки задания нагрузки на плунжер при движении штока вниз и вверх соответственно.

В качестве тестовой задачи было выполнено имитационное моделирование работы ШГН от линейного реечного привода компании Текстоун. Глубина подвеса насоса составила 1200 м, диаметр плунжера – 50.8 мм, нагрузка на плунжер при подъеме нефти составила 600 кг, вес штанг – 1500 кг, усилие от трения в нагнетательном клапане – 300 кг. Ход штока составил 1,08 м, число двойных ходов в минуту – 4,9. Экспериментальная и расчетная динамограммы представлены на рисунках 4а и 4б.



а



б

Рисунок 3 – Экспериментальная и расчетная штоковые динамограммы

Как видно из рисунка 3 результаты моделирования с достаточной для практики точностью совпадают с экспериментальными. Расхождение может быть объяснено несколько иным значением модуля упругости материала штанг, действием сил трения, возникающих при искривлении ствола скважины. Зеркальность динамограммы связана с особенностями работы блока интегрирования при расчете перемещения штока. Таким образом, разработанная математическая модель является адекватной и может быть использована для анализа работы электрической части привода ШГН в различных режимах.

Далее происходит оценка энергоэффективности использования суперконденсаторов для накопления кинетической энергии штока ШГН.

Как известно, одним из способов повышения энергоэффективности добычи нефти является использование энергии при движении штока, ведь на сегодняшний день эта энергия гасится на тормозном резисторе преобразователя частоты привода насоса [5]. Если рассматривать систему из нескольких насосов, преобразователи частоты которых объединены по звену постоянного тока, то каждый привод в разный момент времени будет либо потреблять энергию, либо генерировать ее обратно в звено постоянного тока, которую предлагается запасать в суперконденсаторе. В этом случае все равно необходимо подключение всей системы в трехфазную сеть. Схема предложенной системы представлена на рисунке 4.

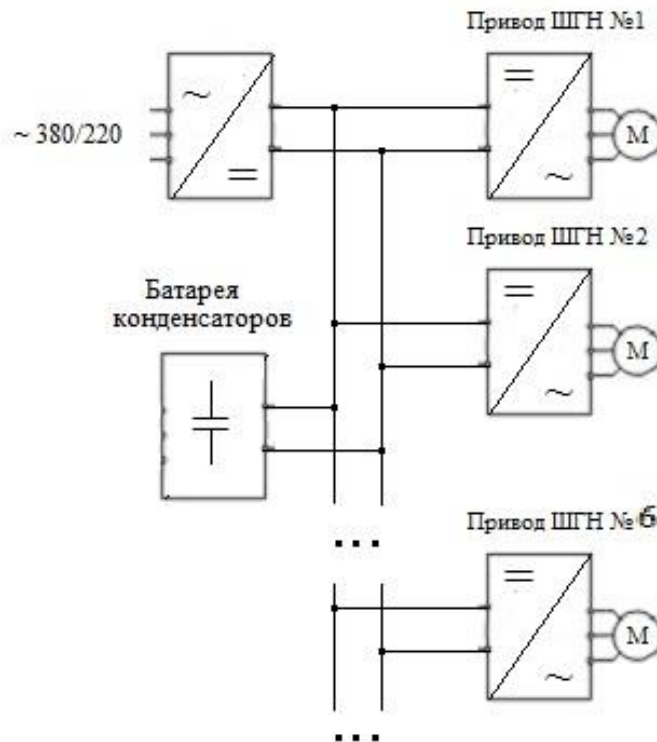


Рисунок 4 – Схема подключения n количества насосов ШГН в единое звено постоянного тока

При математическом моделировании системы приняты следующие допущения и упрощения: потери в клапанном аппарате ШГН, от сил вязкого трения, сил трения штанг о колонну насосно-компрессорных труб, динамических сил и вибраций пренебрежимо малы.

Входной преобразователь и привод ШГН рассматриваются как управляемые идеальные источники тока.

Зависимость потребляемой СШНУ с номером n активной мощности изменяется по закону:

$$P_n(t) = P_{mn} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T_n} + \varphi_{n0}\right) + P_{0n} \quad (2)$$

где P_{mn} – амплитуда переменной составляющей мощности, P_{0n} – постоянная составляющая мощности, T_n – период откачки, φ_n – начальная фаза.

Подключение СШНУ осуществляется после полного заряда батареи до напряжения 550 В (напряжение на выходе выпрямителя, подключенного к трехфазной сети 380/220 В).

Результатом расчета является нахождение значения потребляемой активной мощности сети, при котором напряжение на конденсаторе колеблется в допустимых пределах работы преобразователя частоты. В тормозном режиме, генерируемая мощность вызывает повышение напряжения и расходуется на заряд конденсатора, а в двигательном режиме, при движении штока вверх с нефтью, привод потребляет энергии сначала из конденсатора, пока напряжение не опустится до минимальной критической отметки в 510 В, нижняя граница напряжения работы преобразователя.

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение напряжения на конденсаторе при подключении N качалок имеет вид:

$$C \frac{dU_C(t)}{dt} = \frac{P_{cemu}}{U_C(t)} - \sum_{n=1}^N \frac{P_n(t)}{U_C(t)} = \frac{P_{cemu}}{U_C(t)} - \sum_{n=1}^N \frac{P_{0n}}{U_C(t)} - \sum_{n=1}^N \frac{P_m \sin(2\pi \frac{t}{T_n} + \varphi_{on})}{U_C(t)} \quad (3)$$

Решение дифференциального уравнения (2) после преобразований имеет вид:

$$U_C(t) = \sqrt{U_{K0}^2 + \frac{2 \left(P_{cemu} - \sum_{n=1}^N P_{0n} \right)}{C} t - \sum_{n=1}^N \frac{2T_n \cdot P_{mn}}{\pi C} \sin\left(\frac{\pi t}{T_n} + \varphi_n\right) \sin\left(\frac{\pi t}{T_n}\right)} \quad (4)$$

Из (3) следует, что для того, чтобы среднее значение напряжения было постоянным необходимо, чтобы выполнялось равенство:

$$P_{cemu} = \sum_{n=1}^N P_{0n} . \quad (5)$$

В качестве примера на рисунке 5 приведены зависимости потребляемой мощности от времени при наличии и отсутствии рекуперации, полученные при длине хода штока 1,12 м и 10 двойных ходов в минуту.

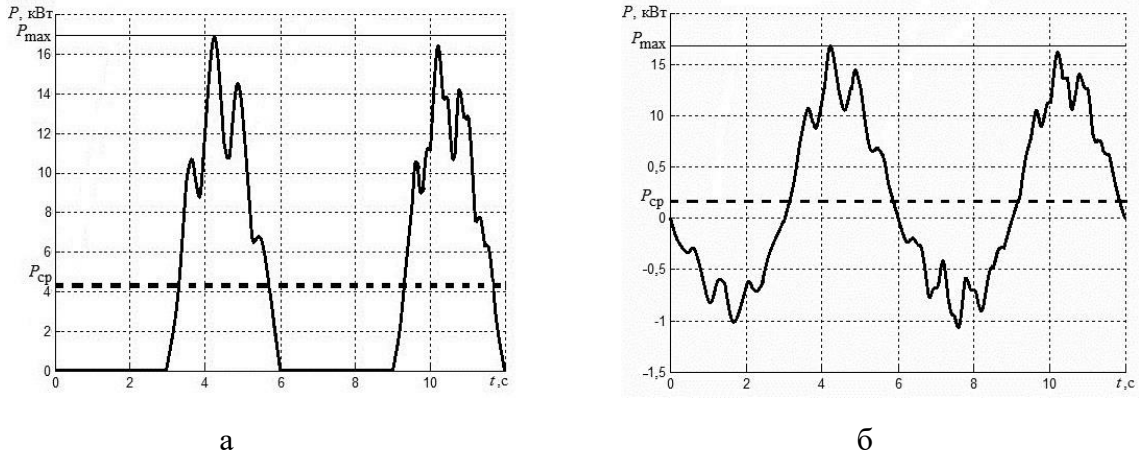


Рисунок 5 – Графики потребляемой мощности: а – при отсутствии рекуперации; б – при наличии рекуперации. 1 – зависимость от времени; 2 – среднее значение; 3 – пиковое значение

Полученная математическая модель была использована для исследования энергетических показателей и удельных затрат мощности при подъеме нефти. Варьировали длину хода штока L_{dx} и число двойных ходов N_{dx} . Принято, что трение в нагнетательном и всасывающем клапане равно 100 кг. Глубина подвеса насоса, диаметр плунжера сохранялись неизменными и равными 1200 м и 25 мм соответственно. В результате расчета получены усредненные значения потребляемой мощности на полированном штоке и плунжере при наличии и отсутствии системы рекуперации энергии при движении штока вниз, максимальное усилие на штоке, а также пиковая мощность, потребляемая механической частью привода.

В главе 3 описано управление суперконденсатором при помощи DC-DC преобразователя. Как было решено в предыдущих главах рациональное подключение суперконденсаторов является подключение непосредственно в звено постоянного тока преобразователя частоты, у которого предусмотрены выводы на клеммы положительной и отрицательной полярности.

При прямом подключении без применения преобразователя приводит к тому, что не все емкость будет использована в рабочем режиме, в силу того, что напряжение в звене постоянного тока не снижается до нуля. Рабочие напряжения

звена: минимальное – 510 В, максимальное – 800 В. При превышении напряжения происходит шунтирование на тормозной резистор, при минимальном – система управления преобразователем прекращает работу устройства. Из-за ограничений порогов напряжений, полезная емкость конденсатора рассчитывается по выражению:

$$W_э = C * \frac{U_{max}^2 - U_{min}^2}{2}, \quad (6)$$

Для наглядности приводится расчет для суперконденсатора ИКЭ-160/800 со следующими номинальными характеристиками: $C_n=0,5$ Ф, $U_{max}=800$ В. При принятом $U_{min}=510$ В, энергия, которая остается неиспользованной, составит около 65 кДж, при номинальном 160кДж, это примерно 40% от полной энергии. В силу того, что стоимость суперконденсатора является высокой, разумным представляется применение преобразователей напряжения, так называемые DC-DC конвертеры, которые позволяют поддерживать постоянное напряжение на входе, то есть со стороны звена постоянного тока, а со стороны суперконденсатора, напряжение изменяется в более широких пределах, обеспечивая таким образом более глубокий разряд конденсатора. На рисунке 6 изображена принципиальная схема предложенного варианта подключения системы электропривода.

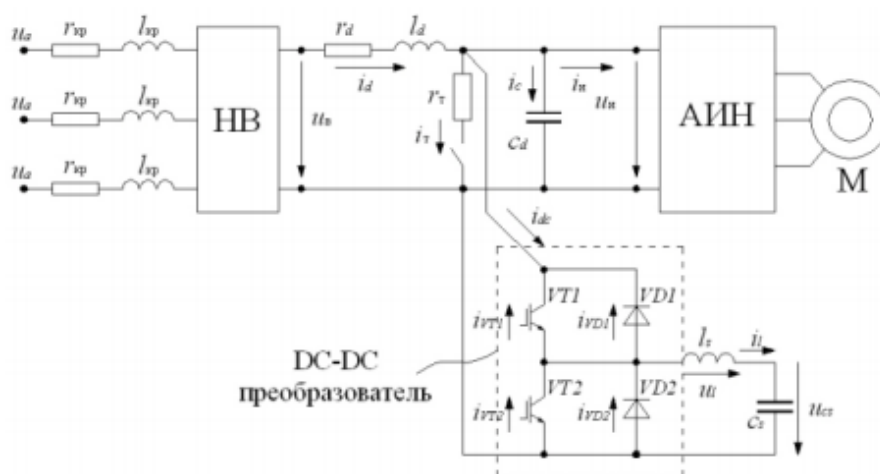


Рисунок 6 – Принципиальная электрическая схема электропривода с преобразователем частоты и устройством DC-DC управления конденсатором

Далее описаны режимы работы DC-DC преобразователя. Существует два характерных режима работы преобразователя постоянного тока: понижающий и повышающий. В первом случае, преобразователь работает на понижение напряжения в звене постоянного тока в генераторном режиме, во втором – направлен на повышение напряжения в двигательном режиме. Энергия рекуперации, в нашем случае, при движении штока насоса вниз, через инвертор поступает в звено постоянного тока, что приводит к повышению напряжения. За счет необходимости стабилизации напряжения происходит заряд суперконденсатора на выходе преобразователя. Схема работы преобразователя в этом режиме представлена на рисунке 7. В этом режиме преобразователь является потребителем энергии, за счет которой происходит заряд суперконденсатора и, как следствие, происходит увеличение напряжения на нем.

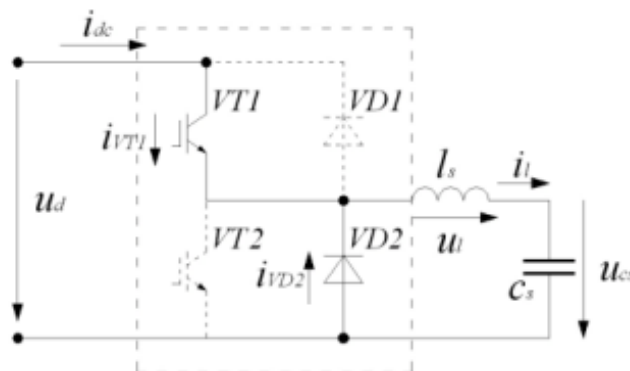


Рисунок 7 – Схема силовых цепей DC-DC преобразователя в понижающем режиме

В повышающем режиме работы происходит обратный процесс. Когда электропривод работает в двигательном режиме, запасенная на суперконденсаторе энергия расходуется на совершение полезной работы. Схема силовых цепей преобразователя постоянного тока при работе в этом режиме представлена на рисунке 8.

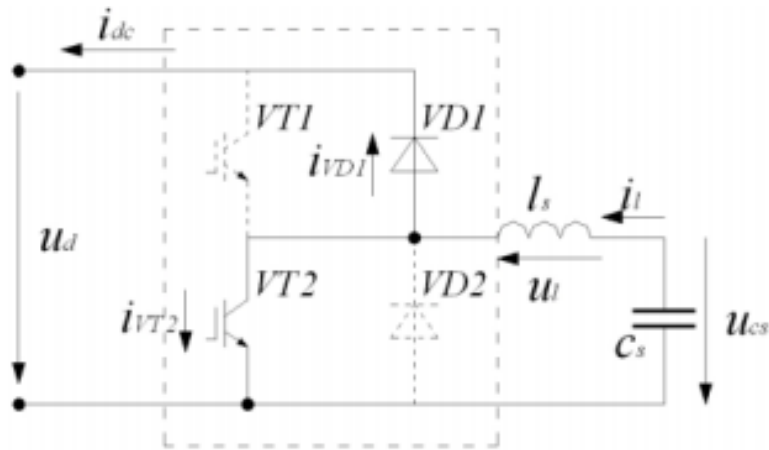


Рисунок 8 – Схема силовых цепей DC-DC преобразователя в повышающем режиме

На рисунке 9 приведены результаты моделирования для двух вариантов подключения суперконденсаторов к звену постоянного тока преобразователя частоты.

Для моделирования использовался асинхронный двигатель DRS180L4 фирмы Sew Eurodrive мощностью 22 кВт, такого же типа и мощности устанавливается на линейном приводе штангового глубинного насоса, и суперконденсатор емкостью 0,5Ф.

Управление приводам вышло скалярным, так как на сегодняшний день привода линейного привода на действующих месторождениях настроены именно на этот режим. Сымитирована циклическая работа привода с участками разгона, торможения, генераторного режима. На диаграмме рисунка 9а, конденсатор подключен напрямую к преобразователю частоты, в следствие чего, наблюдается колебания напряжения в звене постоянного тока.

На диаграмме рисунка 9б изображена работа системы при подключении конденсатора через DC-DC преобразователь. В результате, наблюдается стабилизация напряжения в звене постоянного тока, а на стороне конденсатора происходит увеличение напряжения за счет увеличения тока.

Таким образом можно максимально использовать емкость конденсатора, но существует минимальный предел по напряжению. Чем выше диапазон регулирования напряжения, тем больше значения токов на стороне заряда. Если

принят диапазон регулирования 5:1, то есть минимальное значение напряжения на выходе выпрямителя составит $510/5 = 102$ В, а значение тока - при номинальном токе двигателя в $45\text{А} - 45 \times 5 = 225\text{А}$. Это приведет к удорожанию устройства, так как возрастает цена на комплектующие на это номинал токов.

Графики на рисунке 9 для наглядности представлены в относительных единицах.

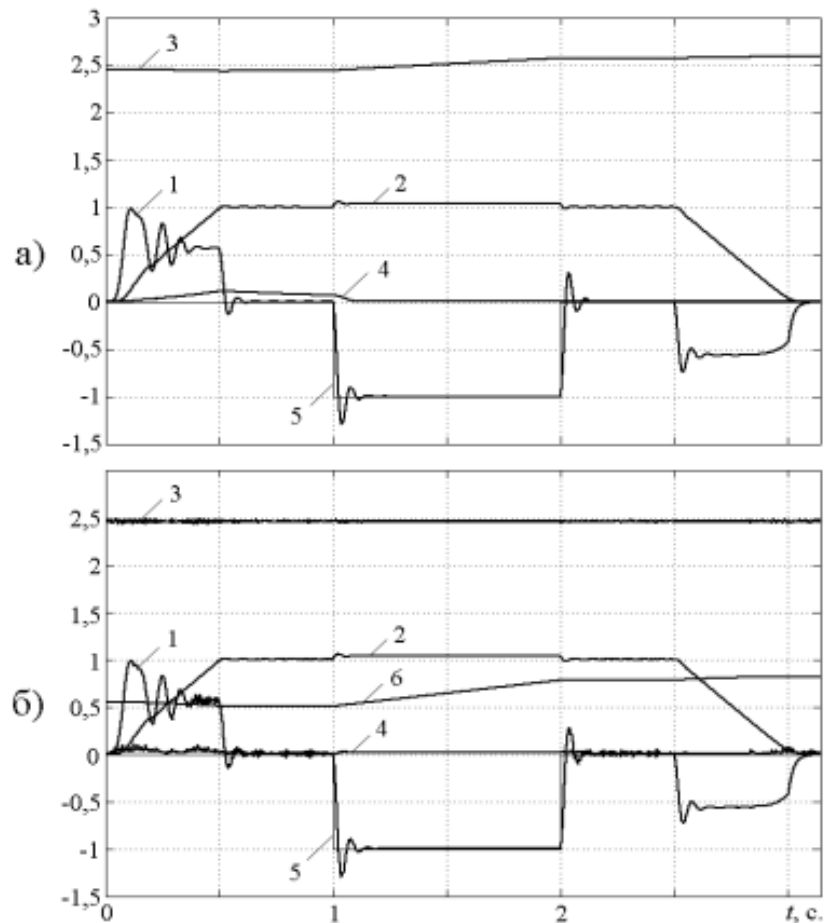


Рисунок 9 – Результаты моделирования частотно-регулируемого электропривода (а – непосредственное включение СК в звено постоянного тока, б – подключение СК через DC-DC преобразователь) 1 – электромагнитный момент двигателя m , 2 – угловая скорость двигателя ω , 3 – напряжение в звене постоянного тока u_d , 4 – ток на выходе неуправляемого выпрямителя i_d , 5 – момент статической нагрузки m_s , 6 – напряжение на блоке суперконденсаторов, который подключен через DC-DC преобразователь u_{sc} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ применения энергоёмких конденсаторов в промышленности и транспорте. Показано, что применение системы, запасующей кинетическую энергию движущегося вниз штока позволяет существенно повысить энергоэффективность процесса нефтедобычи за счет значительного снижения бросков тока, потребляемого из сети, а также уменьшения пиковой активной мощности, и ликвидации ее колебаний во времени.

Предложена принципиальная схема подключения приводов ШГН, построена математическая модель системы, позволяющей использовать и запасать кинетическую энергию штока при движении вниз, получены критерии снижения потребляемой мощности и тока при использовании разработанной системы. Выполнено моделирование работы одной ШГН при наличии системы, запасующей и использующей кинетическую энергию движущегося вниз штока.

Разработана и реализована в системе имитационного моделирования Matlab-Simulink математическая модель штанговой колонны методом электрической аналогии. Штанговая колонна здесь рассматривается как набор активных четырехполюсников, что позволяет использовать модель для исследования аварийных режимов работы, в том числе при обрыве штанг, а также определять напряжения в местах соединения ступеней штанговых колонн или штанг без выполнения дополнительных вычислений.

Решена задача эффективного подключения суперконденсатора в звено постоянного тока стандартного преобразователя частоты при помощи специального преобразователя, позволяющего максимально использовать всю емкость конденсатора. Произведен анализ различных подключений суперконденсатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касьянов В.М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов. / В.М. Касьянов.– М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1973. – 95с.
2. Сакаев А.Ф. Системы и алгоритмы энергосберегающего управления частотно-регулируемыми электроприводами штанговых скважинных насосных установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 28.09.09 / А.Ф. Сакаев.– СПб: Изд-во СпбГИ(ТУ) им. Плеханова.– 2009.–20с.
3. Ганеев А.Р. Модельно-ориентированное проектирование при создании станции управления процессом добычи нефти скважинными штанговыми насосами / А.Р. Ганеев // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2012. № 4. – с.48 – 51.
4. Фридман В. М. Теория упругих колебаний: уравнения и методы / В. М. Фридман ; Рос. акад. наук, Ин-т проблем машиноведения. - С-Пб.: Наука, 2014. - 253 с.
5. Ивановский В.Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления / В.Н.Ивановский // Инженерная практика. 2011. №6, с. 18-26.