

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*На правах рукописи*

*Подпись аспиранта*

Ларин Михаил Юрьевич

*ФИО аспиранта*

ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕХАТРОННЫМИ ПРИВОДАМИ  
ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ

*наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)*

15.06.01 Машиностроение

*отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)*

15.06.01 03 Роботы, мехатроника и робототехнические системы

*наименование направленности (шифр и наименование направления)*

Академическая степень **Исследователь, Преподаватель-исследователь**

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Научный руководитель: д.т.н., профессор, профессор, Волков Андрей  
Николаевич

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Санкт-Петербург, 2022

Научный доклад выполнен в Высшей школе автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: д.т.н., профессор, профессор ВШАиР, ФГАОУ  
ВО СПбПУ, Волков Андрей Николаевич  

---

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Рецензент: д.т.н., профессор, профессор ВШАиР, ФГАОУ  
ВО СПбПУ, Дьяченко Владимир Алексеевич  

---

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

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**

На сегодняшний день состояние нефтяной отрасли в России характеризуется увеличением количества неработающих скважин. По состоянию на 2018 год, в России насчитывается 175 тысяч работающих скважин, что составляет на 1% больше, чем в 2017. В то же время, количество неработающих скважин достигло 24 тысяч, что на 14% больше, чем в предыдущем году.

Основная причина перевода скважин в категорию бездействующих и последующей консервации – низкий дебит нефти. Таким образом, задача разработки низко- и среднедебитных месторождений является особенно актуальной. Для разработки подобных месторождений наиболее часто применяются установки штанговых глубинных насосов (УШГН), которые являются одним из самых популярных способов искусственного подъема нефти по всему миру (примерно в 66% добывающих скважин используется данный тип установок), что объясняется их простотой, эффективностью и надежностью.

ШГН разделяют на два класса: ШГН с балансирным типом привода и ШГН с безбалансирным типом привода. Последние отличаются такими преимуществами, как меньший вес и размеры по сравнению с балансирными, и, как следствие большей простотой монтажа на скважинах и в обслуживании. Из недостатков – повышенное энергопотребление из-за отсутствия балансира.

Для разработки низко- и среднедебитных скважин наиболее часто применяются установки штанговые глубинные насосные (УШГН). Как правило, именно ШГН с безбалансирным типом привода, используются для разработки низко- и среднедебитных месторождений, ввиду малого веса и

габаритов, а также относительно малых временных и экономических затратах при доставке и монтаже по сравнению с балансирным типом ШГН.

Ввиду отсутствия балансира, такой тип ШГН имеет высокие пиковые значения потребляемой мощности. Работу каждой из установок ШГН можно рассматривать, как работу циклового мехатронного привода с повторяющимися нагрузками. При нескоординированной работе группы ШГН пиковые значения потребляемой мощности ШГН могут накладываться друг на друга, что приводит к высоким требованиям к системе питания по номинальной мощности. При этом, обеспечение группы технологического оборудования энергией в условиях удаленности от населенных пунктов и энергомагистралей – сложный ресурсоемкий вопрос.

Вышеперечисленные факты делают проблему понижения максимальной потребляемой мощности группы ШГН актуальной, и одним из вариантов решения данной проблемы является оптимизация алгоритма управления группой ШГН по критерию пиковой потребляемой мощности при сохранении приемлемого уровня производительности группы в целом.

### **Цель и задачи исследования**

Цель данной работы – разработка, исследование и оптимизация стратегий управления группы ШГН с мехатронным приводом для повышения энергоэффективности группы ШГН в целом.

Основные задачи диссертации:

1. Аналитический обзор известных решений в области повышения энергоэффективности добычи нефти группой штанговых насосов.
2. Разработка математической модели группы ШГН с мехатронным приводом, отражающей наиболее значимые характеристики и взаимосвязи объектов с точки зрения управления группой при оптимизации энергоэффективности.

3. Разработка программной имитационной модели группы ШГН с мехатронным приводом с произвольной формой рабочего цикла, учетом рекуперации и других параметров, одним из элементов которой является система управления, вырабатывающая сигналы управления в соответствии с заданной стратегией управления.
4. Разработка различных стратегий и алгоритмов управления группой ШГН в соответствии с определенными критериями, отражающими энергоэффективность и производительность группы ШГН.
5. Исследование разработанных стратегий управления на имитационной модели при различных заданных параметрах ШГН и внешних условиях.
6. Анализ результатов.

### **Научная новизна**

Научная новизна исследований, проведенных в научно-квалификационной работе:

1. Синтезирована программная имитационная модель группы ШГН, учитывающая множество параметров и способная работать с рабочими циклами приводов ШГН, имеющими произвольную форму.
2. Разработаны новые стратегии и алгоритмы управления группой ШГН с мехатронным приводом, ориентированные на энергоэффективность при сохранении приемлемого уровня производительности группы ШГН в целом.
3. Получены и проанализированы результаты исследований стратегий управления группой ШГН с мехатронным приводом на имитационной модели при различных заданных внешних и внутренних по отношению к группе ШГН параметрах.

## **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные результаты создают основу для проектирования и использования систем управления группами ШГН с мехатронным приводом, которые позволяют снизить потребляемую пиковую мощность всей группы и могут использоваться совместно с другими способами повышения энергоэффективности. Также, полученные модели позволяют оценить зависимость между энергопотреблением группы ШГН и производительностью данной группы при различных условиях, что позволяет выработать практические рекомендации для исследователей и инженеров, занимающихся проектированием систем с группой ШГН с неодинаковыми циклами с мехатронным приводом. Также, имитационная модель может быть легко адаптирована к другим задачам, где используются группы приводов, работающих с неодинаковыми циклами при заданных ограничениях по какому-либо ресурсу.

## **Апробация работы**

В процессе подготовки работы с целью апробации результатов произведены доклады и выступления на следующих конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021», Санкт-Петербург, Россия;
- Неделя науки СПбПУ, конференция с международным участием, 2019, Санкт-Петербург, Россия;
- Неделя науки СПбПУ, конференция с международным участием, 2017, Санкт-Петербург, Россия;
- Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения, научно-техническая конференция, 2017, Севастополь, Россия;
- Неделя науки СПбПУ, конференция с международным участием, 2016, Санкт-Петербург, Россия.

## **Публикации**

На основе результатов исследования работы опубликовано 9 работ. Из них 3 статьи РИНЦ, 3 тезиса РИНЦ, 1 статья опубликована в журнале, индексируемом в базе ВАК, 2 статьи опубликованы в журналах, индексируемых в базе Scopus.

## **Представление научного доклада: основные положения**

- Математическая модель системы с группой ШГН с мехатронным приводом с неодинаковыми циклами. Пример применения математической модели для получения физической модели системы с группой ШГН при использовании конкретного варианта конструкции ШГН.
- Применение математической модели для синтеза имитационной модели системы. Разработка основных положений для стратегий управления группой ШГН с целью повышения энергоэффективности.
- Стратегии управления для повышения энергоэффективности группы ШГН и результаты оценки их применения, полученные с помощью имитационной модели.
- Метод применения и обучения двухслойной нейронной сети прямого распространения сигнала в системе управления группой приводов с целью синтеза наиболее обобщенного и адаптивного способа управления группой ШГН для максимизации производительности группы ШГН при ограничениях по пиковой потребляемой мощности.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** продемонстрирована актуальность темы работы, ее научная новизна, установлена цель исследования, показана как теоретическая,

так и практическая значимость. Кроме того, в данном разделе изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** научно-квалификационной работы, которая называется «Анализ способов повышения эффективности нефтедобычи» представлен обзор существующих способов повышения эффективности нефтедобычи и проведен анализ их применимости в системах с несколькими ШГН. Выделены основные категории проектных решений для повышения эффективности нефтедобычи (рисунок 1). Проведен сравнительный анализ и возможность совместного применения данных способов (таблица 1).



Рисунок 1. Основные способы повышения эффективности нефтедобычи

Таблица 1. Сравнительная таблица различных способов повышения эффективности нефтедобычи

Способ		Вывод	Учёт в модели
Стратегии ввода и эксплуатации скважин		Не относится к предмету исследований	–
Конструктивные изменения	Конструкция насоса	Позволяет улучшить отдельные параметры работы и энергоэффективность ШГН путём повышения КПД до 90-92 %, $\cos \varphi$ до 1. Влияет на вид нагрузочной диаграммы и диаграммы потребления.	Возможность варьировать параметры каждого привода и в группе и задания различных параметров каждому ШГН, в том числе возможность работы с различными диаграммами потребления
	Тип привода		
	Звено рекуперации	Значительное снижение пиковой потребляемой мощности в 3-4 раза и устранение колебаний потребляемой мощности и тока. Значительное повышение производительности при средних величинах доли доступной мощности	Возможность учёта рекуперации и запасания энергии с различными коэффициентами рекуперации
Система управления		В зависимости от выбора параметров ШГН и системы управления возможно:  - снижение пикового потребления энергии при сохранении производительности;  - повышение производительности как на отдельных интервалах доли доступной мощности, так и при любых её значениях	Необходимо рассмотреть различные варианты системы управления на различных вариантах группы ШГН, провести синтез систем управления и поиск наилучшей

Во второй главе под названием «Математическое представление группы ШГН как группы цикловых приводов» сформулированы основные положения и зависимости, характерные для систем с группой цикловых электроприводов с неодинаковыми циклами, применяемых в производстве. Также, получена математическая модель группы ШГН с неодинаковыми

циклами, с учетом возможности совместного применения способов повышения эффективности нефтедобычи из таблицы 1.

Основные положения и понятия математической модели группы ШГН:

- 1) В системе присутствует  $n$  ШГН;
- 2) Все ШГН подключены к одной энергосистеме с максимальной доступной мощностью  $N_{fact} = const$ ;
- 3) В энергосистеме может присутствовать звено постоянного тока для рекуперации электроэнергии, максимальное запасаемое количество энергии которого:  $E_{max}$ ;
- 4) Каждый ШГН имеет закон энергопотребления  $N_i(t, \alpha_i)$  за рабочий цикл, где  $i = 1, \dots, n$  – индекс ШГН,  $\alpha_i$  – вектор параметров рабочего цикла ШГН  $i$ , задаваемый внешними условиями,  $T_i$  – время цикла ШГН  $i$ ;
- 5) Вектор параметров рабочего цикла привода  $i$  постоянен во время работы группы  $\alpha_i = const$ ;
- 6) Все ШГН имеет возможность рекуперации электроэнергии в звено постоянного тока общей энергосистемы с одинаковым коэффициентом рекуперации  $k$ ;
- 7) Каждый ШГН может быть запущен в момент времени  $t_i^*$  и остановлен после завершения цикла в момент времени  $t_i^* + T_i$ ;
- 8) Все ШГН подключены к одной системе управления верхнего уровня, выдающей для ШГН  $i$  в качестве управляющих воздействий  $u_i$  сигналы запуска привода в моменты  $t_i^*$ , сигналы управления для всех ШГН тогда 
$$\mathbf{u}(t) = (u_1(t), \dots, u_n(t))^T$$
;
- 9) ШГН за цикл выкачивает объем нефти  $v_i$ ;

- 10) Общий выкачанный объем нефти для всей группы ШГН за время  $t$   $V(t) = \sum_{i=1}^n (m_i(t) \cdot v_i)$ , где  $m_i(t)$  – количество завершенных циклов ШГН за время  $t$ , при этом  $m_i(t) = f(u_i(t))$ , а значит и  $V(t) = V(\mathbf{u}(t))$ ;
- 11) Решением задачи оптимизации для данной системы является максимизация выкачиваемого объема всей группы  $V(\mathbf{u}(t))$  при заданной доступной мощности  $N_{fact}$ ;
- 12) Мощность, необходимая для нескоординированной параллельной работы всех ШГН  $N_{max} = \sum_{i=1}^n \max_t N_i(t, \alpha_i)$ .

Взаимосвязи между этими величинами записаны в виде системой уравнений и неравенств. Особое внимание в данной системе следует обратить на следующие неравенства:

- $t_{i,j+1}^* \geq t_{i,j}^* + T_i$  – привод  $i$  может быть запущен в новый цикл  $j + 1$  только после завершения текущего цикла  $j$ ;
- $E_{rec}(t, \mathbf{u}(t)) \geq 0$  – это критичное условие исправной работы группы приводов, так как при его нарушении происходит перегрузка энергосистемы;
- $E_{rec} \leq E_{max}$  – условие ограничения запасенной энергии емкостью звена постоянного тока. При отсутствии звена постоянного тока  $E_{max} = E_{rec} = 0$ , что приводит к следующему преобразованию в системе:

$$N_{fact} - \sum_{i=0}^n N_i^*(u_i(t)) \geq 0$$

Итоговая математическая модель рассматриваемой системы:

$$\left\{ \begin{array}{l}
E_{rec}(t, \mathbf{u}(t)) = \int_0^t \left( N_{fact} - \sum_{i=0}^n N_i^*(u_i(t)) \right) dt \\
N_i^*(u_i(t)) = \left( k + (1 - k) \cdot h(N_i(u_i(t))) \right) \cdot N_i(u_i(t)) \\
N_i(u_i(t)) = N_i(t - u_i(t), \alpha_i) \cdot s_i(t, u_i(t)) \\
s_i(t, u_i(t)) = h(t - u_i(t)) - h(t - T_i - u_i(t)) \\
\mathbf{s}(t, \mathbf{u}(t)) = \left( s_1(t, u_1(t)), \dots, s_n(t, u_n(t)) \right)^T \\
h(x) \in \{0,1\} - \text{функция Хевисайда} \\
V(\mathbf{u}(t)) = \sum_{i=1}^n (m_i(\mathbf{u}(t)) \cdot v_i) \\
t_{i,j+1}^* \geq t_{i,j}^* + T_i \\
E_{rec}(t, \mathbf{u}(t)) \geq 0 \\
E_{rec} \leq E_{max} \\
\mathbf{u}(t) = \operatorname{argmax}_{\mathbf{u}(t)} \sum_{i=1}^n (V(\mathbf{u}(t)))
\end{array} \right.$$

Во второй части данной главы представлена физическая модель группы ШГН для одной из существующих конструкций отдельного ШГН на основе математической модели, полученной ранее. На рисунке 2 представлены графики законов потребления ШГН в группе из 7 ШГН, использованных в физической модели.

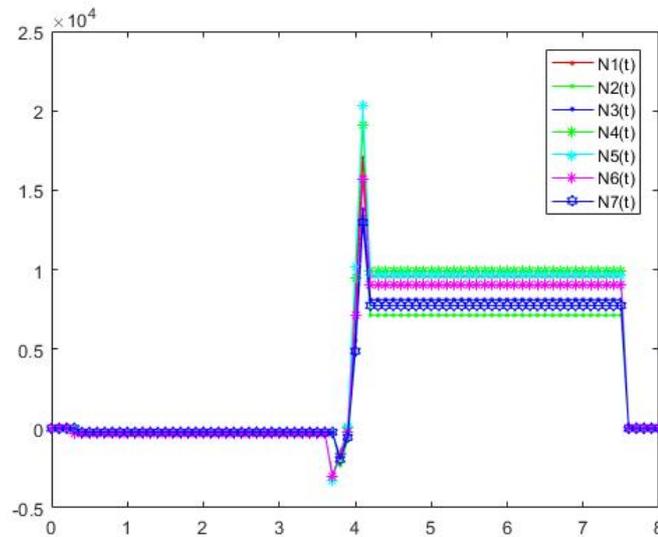


Рисунок 2. Графики законов потребления ШГН в группе

В третьей главе под названием «Разработка стратегий системы с группой ШГН с неодинаковыми циклами и их исследование с помощью программной имитационной модели» дано обоснование необходимости разработки имитационной модели и сформулированы основные положения имитационной модели группы ШГН, необходимой для исследования различных способов управления группой ШГН с целью повышения энергоэффективности всей группы. Имитационная модель группы ШГН выполнена в программном пакете Matlab на скриптовом языке М в объектно-ориентированном стиле. Используются методы информатики, теории дифференциальных уравнений, имитационного моделирования.

Во второй части данной главы сформулированы несколько стратегий управления, примененных в имитационной модели. Результаты имитационного моделирования проанализированы.

Общие положения всех рассмотренных стратегий управления:

- В условиях ограниченной доступной мощности  $N_{fact}$  необходимо запускать приводы в определенной последовательности, чтобы соблюдалось критичное условие существования системы:

$$\begin{cases} E_{rec}(t, \mathbf{u}(t)) = \int_0^t \left( N_{fact} - \sum_{i=0}^n N_i^*(u_i(t)) \right) dt \\ E_{rec} \leq E_{max} \\ E_{rec}(t, \mathbf{u}(t)) \geq 0 \end{cases}$$

- Так как приводы имеют различные рабочие циклы энергопотребления  $N_i(t, \alpha_i)$  и различные результаты цикла  $v_i$ , то для максимизации результата работы всей системы  $V(\mathbf{u}(t))$  некоторые из приводов запускать выгоднее, чем другие. А значит, такие приводы имеют более высокий приоритет  $p_i \in [1, n]$ . Приоритеты расставляются перед запуском системы на основе показателя приоритетности  $Q_i$ , а также могут быть при необходимости

пересчитаны во время работы. В процессе работы запускается привод наиболее приоритетный из приводов, доступных для запуска.

Рассмотренные стратегии управления можно разделить на две основные категории:

1) Алгоритм управления, основанный на приоритетах без прогнозирования: решение о запуске привода  $k$  принимается в текущий момент времени без прогнозирования возможности того, что запуск привода  $k$  в данный момент времени может помешать запуску более приоритетного привода  $l$ , который через некоторое время закончит движение.

2) Алгоритм управления, основанный на приоритетах с прогнозированием:

- Показатель приоритетности ШГН  $i$ , находящегося в работе, в момент времени  $t$  рассчитывается по формуле:

$$Q_{pi}(t) = Q_i * f_p(t, T),$$

где  $Q_{pi}(t)$  – показатель приоритетности работающего ШГН;  $Q_i$  – показатель приоритетности свободного ШГН;  $f_p(t, T) \in [0; 1]$  – функция прогнозирования;

- Для работающих ШГН с высоким показателем приоритетности будет запланирован последующий запуск сразу после завершения их текущего цикла;
- При расчете запуска свободных ШГН учитываются не только текущие циклы работающих ШГН, но и последующие запланированные запуски.

Рассмотрены варианты определения показателя приоритетности  $Q_i$ , на основе которого устанавливается приоритет  $p_i$  каждого из ШГН, для каждой категории стратегий управления:

1) Выравнивание износа:  $Q_i = \frac{1}{m_{i+1}}$  с принудительным ожиданием;

2) Выравнивание износа:  $Q_i = \frac{1}{m_{i+1}}$  без ожидания;

3) Производительность привода:  $Q_i = v_i$ ;

4) Относительная производительность привода по времени:  $Q_i = \frac{v_i}{T_i}$ ;

5) Относительная производительность привода по максимальной мощности потребления за цикл:  $Q_i = \frac{v_i}{N_{i\max}}$ ;

6) Относительная производительность привода по средней мощности потребления за цикл:  $Q_i = \frac{v_i}{N_{i\text{avg}}}$ .

Показано, что существует зависимость между объемом  $V(\mathbf{u}(t))$ , производимым группой ШГН за время  $T$  и долей доступной мощности от максимальной возможной пиковой мощности потребления для всей системы  $N_r = \frac{N_{fact}}{N_{max}}$ . Также показано (рисунок 3), что эта зависимость различна для разных стратегий управления. В таблице 2 приведены варианты систем управления, по которым были получены данные для графиков на рисунке 3.

Таблица 2. Рассматриваемые варианты системы управления

Номер варианта	Описание
1	Система управления без прогнозирования на основе выравнивания износа без ожидания
2	Система управления без прогнозирования на основе выравнивания износа с ожиданием
3	Система управления без прогнозирования на основе приоритета $Q_i = v_i$
4	Система управления без прогнозирования на основе приоритета $Q_i = \frac{v_i}{N_{i\max}}$
5	Система управления без прогнозирования на основе приоритета $Q_i = \frac{v_i}{N_{i\text{avg}}}$
6	Система управления без прогнозирования на основе приоритета $Q_i = \frac{v_i}{T_i}$

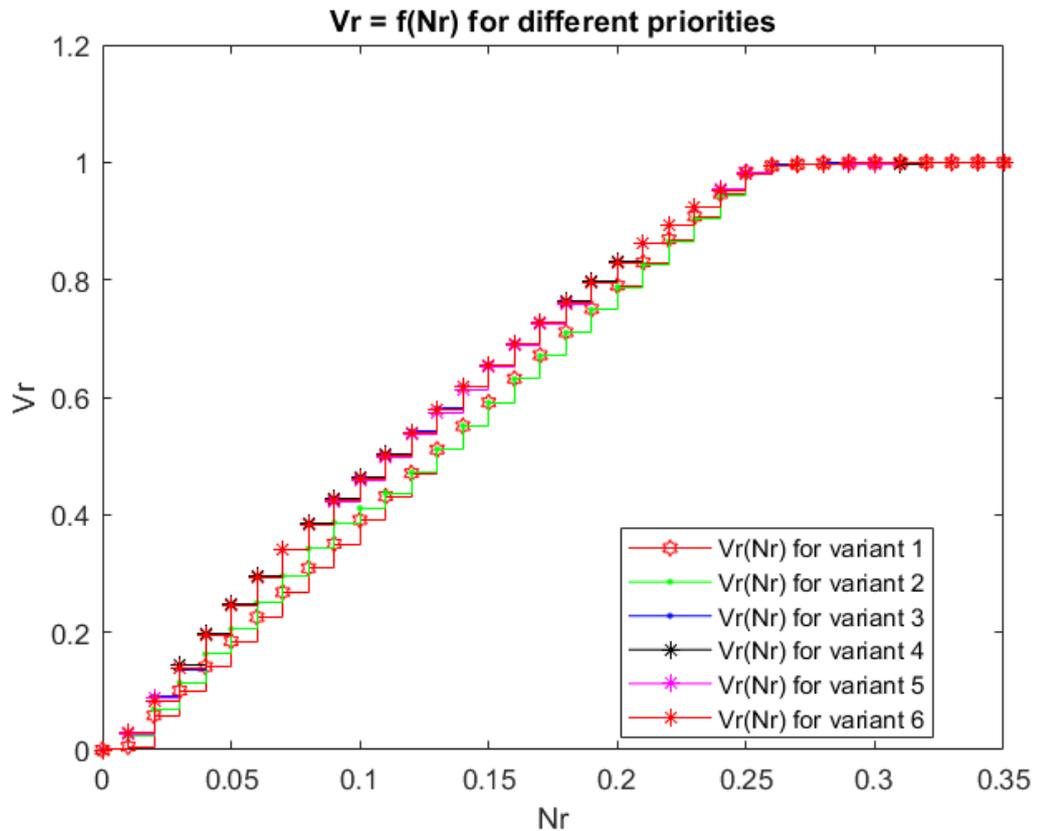


Рисунок 3. Зависимость относительной производительности от доли доступной мощности для различных вариантов системы управления для группы 100 ШГН без рекуперации на промежутке [0; 0.35]

Видно, что при всех способах управления система достигает производительности, близкой к максимальной при доле мощности 0.25 от максимальной суммарной пиковой мощности. Это объясняется тем максимальная расчетная мощность складывается из пиковой мощности каждого привода, а потребление приводов имеет узкие пики, которые во время работы редко накладываются друг на друга.

Опорной зависимостью выбрана зависимость, полученная для алгоритма, основанном на выравнивании износа без ожидания – вариант 1 по таблице 2, что соответствует запуску случайного привода, но без принудительных простоев. Данный метод управления по производительности уступает алгоритмам, основанным на приоритетах – варианты управления 3-6

по таблице 2, максимально – на 8% от полной производительности при доступной мощности 12% от максимальной необходимой.

Варианты управления 3-6 дают очень близкие результаты – ввиду того, что параметры ШГН, на основе которых выставляются приоритеты, имеют малые разбросы. Однако их результаты различны, что говорит о том, что для определенного набора параметров группы ШГН существует наиболее оптимальная стратегия, но найти ее – отдельная задача.

В заключительной части данной главы рассмотрены стратегии управления, основанные на приоритетах с прогнозированием – с различными вариантами функции прогнозирования. Рассмотренные варианты функций прогнозирования:

- 1)  $f_1(t, T) = \frac{t}{T}$  – линейная функция;
- 2)  $f_2(t, T) = \left(\frac{t}{T}\right)^2$  – положительная парабола;
- 3)  $f_3(t, T) = 1 - \left(\frac{t}{T} - 1\right)^2$  – отрицательная парабола;
- 4)  $f_4(t, T) = 0.5 + 0.5 * \frac{\tanh\left(\frac{t-T}{2}\right)}{\tanh\left(\frac{T}{2}\right)}$  – логистическая кривая.

Рассмотренные функции прогнозирования представлены на рисунке 4.

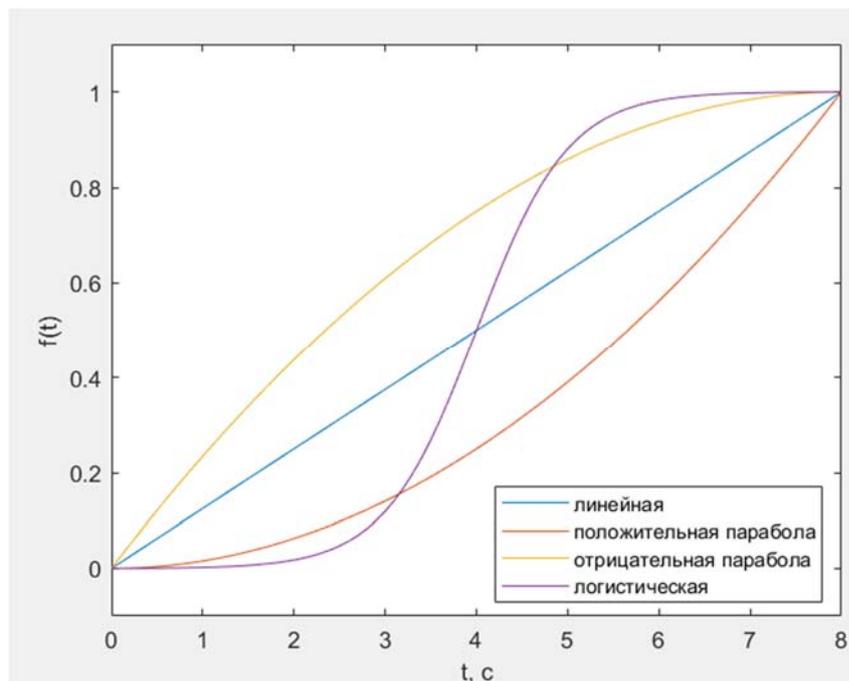


Рисунок 4. Рассмотренные функции прогнозирования

Отношение средней производительности системы из 100 ШГН без рекуперации без звена постоянного тока при управлении с прогнозированием к средней производительности при управлении без прогнозирования с таким же способом определения приоритета в процентах представлено в таблице 3. Аналогичные результаты для системы из 7 ШГН с рекуперацией со звеном постоянного тока представлены в таблице 4.

Таблица 3. Таблица средних значений производительности для системы 100 ШГН без рекуперации

Функция прогнозирования	Средняя производительность относительно случая без прогнозирования, %			
	Sort1	Sort2	Sort3	Sort4
Линейная	91.35	88.64	88.74	91.21
Положительная парабола	95.09	91.85	91.23	95.19
Отрицательная парабола	89.29	88.26	88.18	89.97
Логистическая кривая	89.54	88.01	88.52	89.78

Таблица 4. Таблица средних значений производительности для системы 7 ШГН с рекуперацией

Функция прогнозирования	Средняя производительность относительно случая без прогнозирования, %			
	Sort1	Sort2	Sort3	Sort4
Линейная	101,45	101,72	96,70	101,76
Положительная парабола	101,40	100,75	96,70	101,37
Отрицательная парабола	102,24	101,42	96,70	102,23
Логистическая кривая	102,19	100,77	96,70	102,16

При использовании стратегий управления с прогнозированием на системах без рекуперации и без звена постоянного тока добиться повышения производительности не удалось. При использовании стратегий управления с прогнозированием на системах с рекуперацией и звеном постоянного тока удалось добиться повышения производительности до 4% при тех же ограничениях по пиковой мощности.

В четвертой главе, которая называется «Синтез адаптивной стратегии управления группой ШГН» разработан адаптивный метод управления группой ШГН. Это стратегия управления без прогнозирования, основанные на приоритетах, в которых показатели приоритетности определяются с помощью двухслойной нейронной сети:

$$Q_i = f(\eta_i, W) = \left(1, \frac{1}{1 + e^{-(1, \eta_i) \cdot W_1^T}}\right) \cdot W_2^T$$

Определены параметры отдельного ШГН  $\eta_i = (T_i, N_{i \max}, N_{i \text{ avg}}, S_{i N}, E_{i \text{ rec}}, E_{i \text{ work}}, v_i)$ , которые учитываются нейронной сетью:

- 1)  $T_i$  – время цикла привода  $i$ ;
- 2)  $N_{i \max}$  – пиковая максимальная потребляемая мощность в цикле;
- 3)  $N_{i \text{ avg}}$  – средняя потребляемая мощность в цикле;
- 4)  $s^2_{i N} = \frac{\sum_{j=0}^{\text{ceil}(\frac{T_i}{\Delta t})} (N_i(\Delta t \cdot j) - N_{i \text{ avg}})^2}{\text{ceil}(\frac{T_i}{\Delta t}) - 1}$  – дисперсия потребляемой мощности;
- 5)  $E_{i \text{ rec}} = \int_0^{T_i} -N_i(t) \cdot h(-N_i(t)) dt$  – энергия, рекуперированная во время цикла;
- 6)  $E_{i \text{ work}} = \int_0^{T_i} N_i(t) \cdot h(N_i(t)) dt$  – энергия, затрачиваемая на работу во время цикла;
- 7)  $v_i$  – производимый продукт для каждого привода, имеет очевидное влияние на итоговую производительность системы.

Архитектура нейронной сети представлена на рисунке 5.

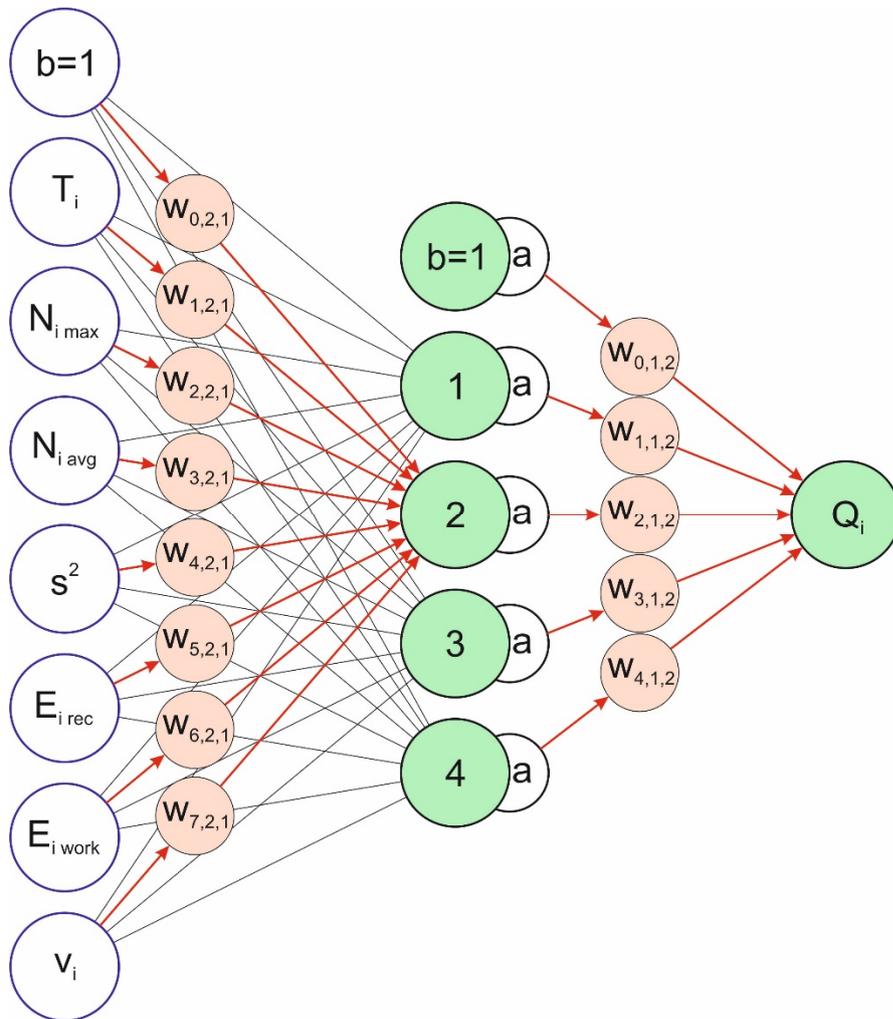


Рисунок 5. Схема применяемой НС. Синаптические веса первого слоя показаны только для нейрона 2

Удалось добиться незначительного повышения производительности до 1% при тех же ограничениях по пиковой мощности для исследованных групп ШГН. Однако преимущество адаптивных методов в их универсальности по отношению к набору параметров группы ШГН и величинам этих параметров. Это значит, что данная стратегия управления может показывать наилучшие результаты по сравнению с другими стратегиями управления независимо от значений параметров ШГН в группе. Однако, ввиду сложной формы функции стоимости, имеющей несколько локальных минимумов – нет гарантии сходимости процесса обучения к наиболее оптимальному результату. Необходимо проводить несколько полных циклов обучения нейронной сети.

## **Объекты, (предмет) и методы исследования**

Объектом исследования в научно-квалификационной работе является группа ШГН с мехатронным приводом с неодинаковыми циклами. В частности, исследования проводились для двух вариантов групп:

- 1) группа из 7 ШГН – это разумное количество ШГН в группе для практического применения;
- 2) группа из 100 ШГН – для оценки влияния стратегии управления в общем случае, независимым от конкретного количества ШГН в группе.

Использованы методы информатики, теории дифференциальных уравнений, имитационного моделирования. Расчет влияния того или иного алгоритма управления на группу ШГН произведен при помощи математического и имитационного моделирования с использованием программного пакета Matlab.

## **Результаты и их обсуждение**

Основные результаты, полученные в работе, можно формулировать следующим образом:

1. Получена математическая модель системы с группой ШГН с мехатронным приводом с неодинаковыми циклами с возможностью учета рекуперации энергии, звена постоянного тока и произвольной формы цикла потребления отдельных ШГН. С помощью математической модели выведены условия корректной работы системы и показано существование зависимости между сигналами управления группой ШГН и эффективностью работы группы при ограничении пикового потребления;
2. Разработана программная имитационная модель на основе математической модели, учитывающая множество параметров;

3. Разработаны основные принципы и положения для управления группой ШГН для повышения энергоэффективности группы путем уменьшения пикового энергопотребления. Этими принципами являются:

- 1) выполнение условия существования системы на протяжении всей работы группы ШГН;
- 2) ШГН для следующего запуска выбирается на основе приоритета, назначенному этому ШГН.

На основе этих принципов и положений разработано несколько стратегий управления. Основными различиями в стратегиях управления является способ определения приоритета каждого ШГН в группе;

4. Разработанные методы управления исследованы с помощью программной имитационной модели, результаты исследований проанализированы;

5. При всех способах управления система достигает производительности, близкой к максимальной производительности - при доле мощности от 0.25 до 0.5. Конкретное значение доли мощности зависит от значения и ширины пиков в законах потребления ШГН. Чем меньше ширина пиков – тем меньше доля мощности за счет уменьшения абсолютной величины потребляемой мощности. Чем выше пики – тем ниже доля мощности за счет увеличения максимальной пиковой потребляемой;

6. Опорной зависимостью выбрана зависимость, полученная для алгоритма без прогнозирования, основанном на выравнивании износа без ожидания – вариант 1 по таблице 2. Варианты управления 3-6 по таблице 2 показывают результаты, близкие к друг к другу, но лучшие, чем опорный – максимально, на величину 8% производительности при доле доступной мощности  $N_r = 0.12$ ;

7. При использовании стратегий управления с прогнозированием на системах без рекуперации и без звена постоянного тока добиться повышения производительности не удалось;
8. При использовании стратегий управления с прогнозированием на системах с рекуперацией и звеном постоянного тока удалось добиться повышения производительности до 4% при тех же ограничениях по пиковой мощности;
9. Синтезирована и исследована адаптивная стратегия управления с настраиваемыми параметрами: с показателем приоритетности, определяемом нейронной сетью на основе всех параметров ШГН. Удалось добиться незначительного повышения производительности до 1% при тех же ограничениях по пиковой мощности. Однако преимущество данной стратегии в универсальности по отношению к набору параметров группы ШГН и величинам этих параметров. Недостаток – в том, что наилучшее решение может быть получено не с первого раза ввиду сложной формы оптимизируемой функции.

### **Заключение**

Можно подвести итоги исследований, проведенных в рамках научно-квалификационной работы:

1. Разработана математическая модель группы ШГН с мехатронным приводом, отражающая наиболее значимые характеристики и взаимосвязи объектов с точки зрения управления группой при оптимизации энергоэффективности;
2. Разработана программная имитационная модель группы ШГН с мехатронным приводом с произвольной формой рабочего цикла, учетом рекуперации и других параметров, одним из элементов которой является система управления, вырабатывающая сигналы управления в соответствии с заданной стратегией управления;

3. Разработаны основные принципы и положения для управления группой ШГН для повышения энергоэффективности группы путем уменьшения пикового энергопотребления. На основе этих принципов и положений разработано несколько стратегий управления;
4. Разработанные стратегии управления исследованы на имитационной модели при различных заданных параметрах ШГН и внешних условиях;
5. Проведен анализ результатов, показано, что с помощью определенных стратегий управления группой – в том числе, даже без применения других способов повышения энергоэффективности – действительно возможно добиться повышения производительности всей группы ШГН в целом при заданных ограничениях по максимальной потребляемой мощности. Следовательно, возможно добиться повышения энергоэффективности группы ШГН с мехатронным приводом с неодинаковыми циклами с помощью выбора оптимальной стратегии управления группой ШГН за счет снижения максимальной потребляемой мощности при сохранении того же уровня производительности.

Как видно, все поставленные задачи выполнены, а установленные цели достигнуты.

## **Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)**

### **Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК**

Брунман В.Е., Ватаев А.С., Волков А.Н., Ларин М.Ю., Мацко О.Н., Петкова А.П., Плотников Д.Г. Разработка алгоритмов управления штанговыми насосами, направленных на повышение энергоэффективности // Вестник машиностроения. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. - №4. – с.24-25

### **Публикации в изданиях, индексируемых в базе Scopus**

V. E. Brunman\*, A. S. Vataev, A. N. Volkov, M. Yu. Larin, O. N. Matsko, A. P. Petkova, D. G. Plotnikov Improving the energy efficiency of borehole pumps // Russian Engineering Research, Volume 37, Issue 7, 1 July 2017, Pages 579-580

Volkov A. N., Larin M. Yu. Reducing the maximum power consumption of a group of sucker-rod pumps with the mechatronic drive by optimizing the control algorithm // E3S Web Conf., 326 (2021) 00037

### **Публикации в изданиях, индексируемых в базе РИНЦ**

Ларин М.Ю., Мацко О.Н., Полищук М.Н., Анисимова М.В., Моисеев Д.В. Исследование зависимости эффективности работы системы штанговых насосов с шестеренно-реечным приводом от установленной мощности и алгоритма управления // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: материалы междунар. науч. - техн. конф. Севастополь, 5-9 сентября 2016 г. - Севастополь: СевГУ, 2016. – С.45-46

Ларин М. Ю., Мацко О. Н., Емельянов А. И. Способы повышения эффективности при добыче нефти штанговыми насосами // Неделя науки СПбПУ: м-лы научн. конференции с междунар. участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч.2. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 17-19

Волков Н.А., Ларин М.Ю., Мацко О.Н. Вопросы ресурсосбережения при добыче нефти штанговыми глубинными насосами // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: мат-лы междунар. науч. - техн. конф. Севастополь, 11-15 сент. 2017 г. - Севастополь: СевГУ, 2017. – С.45-46

М. Ю. Ларин, Т. В. Андреева, С. О. Пожидаев. Способы повышения энергоэффективности при добыче нефти штанговыми насосами // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 60-62

Н. А. Волков, А. А. Корнилова, О. Н. Мацко, М. Ю. Ларин. Исследование цикловых приводов роботов и технологического оборудования как мехатронных систем // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 18-21.

Волков А.Н., Ларин М.Ю. Понижение максимальной потребляемой мощности группы глубинных штанговых насосов с мехатронным приводом путем оптимизации алгоритма управления // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021 : Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 41-44.

**Аспирант:**

\_\_\_\_\_

*(подпись)*

**Ларин М.Ю.**