

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**  
Институт «Политехнический», факультет «Энергетический»  
Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Ведущий инженер  
ООО НТЦ «Приводная техника», к.т.н.

\_\_\_\_\_ /А.М. Журавлев/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2017 г.

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ /А.Н. Шишков/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2017 г.

Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения  
для объектов нефтегазового комплекса.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА  
(ДИССЕРТАЦИЯ)**

**ЮУрГУ-13.04.02.2017.050. ВКР**

*Руководитель проекта:*

Профессор

\_\_\_\_\_ /М.А. Григорьев /

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2017 г.

*Автор проекта*

*студент группы* \_\_\_\_\_ П-286 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ /А.А. Иманова /

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2017 г.

*Нормоконтролер:*

Доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_ /Т.А. Функ/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2017 г.

Челябинск 2017 г.

## АННОТАЦИЯ

Иманова А.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для объектов нефтегазового комплекса. - Челябинск: ЮУрГУ, П-286; 2017, с., рисунков, табл. Библиография литературы – наименований

В данной работе на основании заданных технологических требований был создан проект повышения энергетических и тепло-экономических показателей электропривода бурового насоса для буровой установки БУ4500.

Был произведен анализ требований технологического процесса к электроприводу бурового насоса.

Проведен анализ и сравнение системы электропривода. В качестве электропривода бурового насоса был предложен электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения СРДНВ.

Рассмотрено математическое описание и системы управления электроприводом с СРДНВ.

Проведено экспериментальное исследование на объекте и рассмотрены полученные характеристики.

					<b>13.04.02.2017.050. ПЗ</b>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дат</i>				
Разраб.		Иманова А.А.			<b>Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для нефтегазового комплекса</b>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
Провер.		Григорьев М.А.					4	
Реценз						<b>ЮУрГУ</b>		
Н. Контр.		Функ Т.А.				<b>Кафедра «АЭП»</b>		
Утверд.		Шишков А.Н.						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА .....	8
1.1. Основные технические требования к ЭП бурового насоса установки БУ4500 .....	8
1.2. Приводы бурового насоса .....	10
1.3. Описание режима работ бурового насоса .....	16
2. ВЫБОР СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	27
2.1 Выбор типа электропривода .....	27
2.2 Электропривод постоянного тока .....	29
2.3 Синхронный электропривод .....	29
2.4 Привод переменного тока .....	30
2.5 Синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения .....	32
3. СИЛОВАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	35
3.1 Расчет ЭП по мощности .....	35
3.2 Электромагнитный расчет СРМНВ .....	40
4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭП с СРМНВ .....	45
4.1 Структурная модель СРМНВ .....	45
4.2 Оптимизация силовой части электропривода .....	46
5. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭП С СРМНВ .....	54
5.1 Функциональные схемы управления СРМНВ .....	54
5.2 Динамические характеристики СРМНВ .....	57
6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОБЪЕКТЕ .....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	66
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	71

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время нефтегазовая промышленность, а особенно электробурение, являются весьма энергоемкими отраслями, причем основной объем электроэнергии потребляют основные привода установки. Значительный рост стоимости электроэнергии, получаемой от источников централизованного электроснабжения, и стоимости линий электропередачи, а также наметившиеся тенденции перехода к автономному энергоснабжению с источниками ограниченной установленной мощности выводят на первый план задачи энергосбережения.

При бурении в нефтяной и газовой промышленности эти задачи успешно решаются применением регулируемого электропривода.

Основные механизмы буровой установки должны быть оснащено частотно-регулируемыми приводами и современными системами автоматического регулирования (САР), которые вместе с системой автоматического управления (АСУ) позволяют установке наиболее полно соответствовать современным требованиям технологии бурения.

Благодаря достижениям в области информационной и силовой электроники в настоящее время наблюдается бурное развитие регулируемого электропривода переменного тока как на базе традиционных электрических машин, так и на основе новых решений. Одно из направлений прогресса связано с упрощением конструкции электрической машины и усложнением управления благодаря “интеллектуальным” силовым модулям, микроконтроллерам. Примером такого подхода может служить электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ).

Идея работы СРДНВ заключается в том, что часть обмоток выполняет функцию возбуждения, а другая создаёт поле реакции якоря, причём регулирование этих полей независимое, а, следовательно, появляется способ управления возбуждением машины. Возможность реализации больших перегрузочных моментов и эффективное использование активных материалов при простой системе управления делает электропривод с СРДНВ серьезным

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

конкурентом лучшим традиционным регулируемым электроприводам переменного тока.

В связи с этим в данной работе рассматривается возможность использования ЭП с СРДНВ для буровых насосов,

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

# 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

## 1.1 Основные технические требования к ЭП бурового насоса установки БУ 4500

Установка буровая БУ 4500/270 ЭК-БМ с электрическим приводом, эшелонным расположением блоков в блочно-модульном исполнении предназначена для кустового (наклонно-направленного) бурения нефтяных и газовых скважин с условной глубиной залегания продуктивных пластов 4500 м в макроклиматических районах с умеренным климатом – У, категории 1 по ГОСТ 15150-69 (от -45 до +40 °С) на месторождениях с содержанием сероводорода менее 6% [1].

Таблица 1.1 – Технические данные буровой установки БУ 4500/270 ЭК-БМ

Наименование параметра	Величина
Допускаемая нагрузка на крюке, кН (тс)	2700 (270)
Наибольшая нагрузка от массы колонны буровых труб, кН (тс)	1620 (162)
Условная глубина бурения, м	4500
Скорость подъема крюка при расхаживании колонны (при ликвидации аварии), м/с	0,18
Скорость подъема крюка, м/с	0.3 – 1,6
Ротор:	
Диаметр отверстия в столе ротора, мм	700
Передаточное число	3,61
Частота вращения стола ротора, обеспечиваемая приводом, об/мин.	0 – 200
Тормоз дополнительный бесступенчатый	ШПМ-500
Буровые насосы:	

Продолжение таблицы 1.1

Наименование параметра	Величина
Тип насоса	УНБТ-1180
Число буровых насосов, шт.	2
Максимальное давление, развиваемое насосом, Мпа	35,7
Максимальная подача насоса, л/с	51,4
Буровая лебедка:	
Тип	ЛБУ 900 ЭТ-3
Диаметр талевого каната, мм	32
Тип трансмиссии	зубчатая двухскоростная коробка передач
Тормозная система	Торможение при спуске от двигателя лебедки. Аварийный и стояночный тормоз - дисковый.
Число основных электродвигателей, шт.	1
Привод регулятора подачи долота	Электродвигатель переменного тока мощностью 90 кВт
Буровая вышка:	
Полезная высота, м	45
Грузоподъемность на крюке, т	270
Подъем вышки	Регулятором подачи долота через УПВ талевой системой
Номинальная длина свечи, м	25

На рисунке 1.1 представлен внешний вид комплекса буровой установки БУ 4500/270 ЭК-БМ.



Рисунок 1.1 – Внешний вид комплекса буровой установки

Рассмотрим более подробно один из главных механизмов буровой установки: буровой насос.

### 1.2 Приводы буровых насосов.

Буровой насос создает циркуляцию бурового раствора, очищающего забой и при турбинном способе бурения передающего энергию турбине.

В бурении в основном применяются поршневые насосы, имеющие сменные цилиндрические втулки, позволяющие в определенных пределах изменять производительность насоса при постоянном числе ходов поршней в минуту [2].



Таблица 1.2 – Технические данные бурового насоса УНБТ-1180

Наименования параметра	Значение
1. Гидравлическая мощность (идеальная), кВт	1062
2. Приводная мощность на входном валу (расчетная), кВт	1180
3. Номинальная частота ходов поршня в минуту	125
4. Номинальная частота входного вала, об/мин	556
5. Передаточное число шестеренчатой передачи насоса	4,45
6. Диаметр шкива клиноременной передачи, мм	1000
7. Диаметр шкива клиноременной передачи привода, мм	560

Электроприводы буровых насосов требовали замены на регулируемые, что в свою очередь обеспечивает:

- уменьшении сроков простоя буровой установки при замене цилиндрических втулок;
- возможность регулирования подачи бурового раствора путем регулирования скорости вращения буровых насосов, за счет чего увеличивается скорость проходки;
- сокращение потребления электроэнергии;
- снижение затрат на техническое обслуживание электродвигателей;
- необходимые технологические и электрические защиты и блокировки.

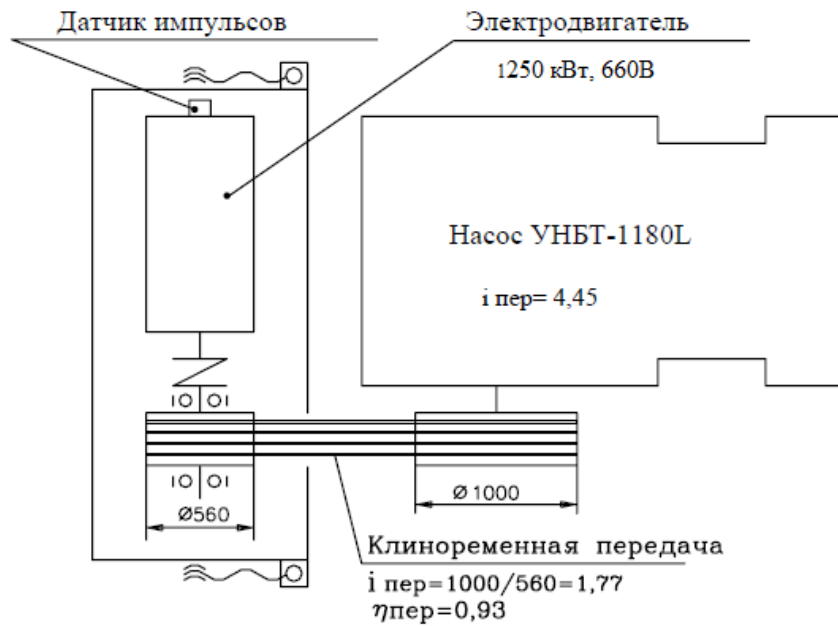


Рисунок 1.2 – Кинематическая схема бурового насоса

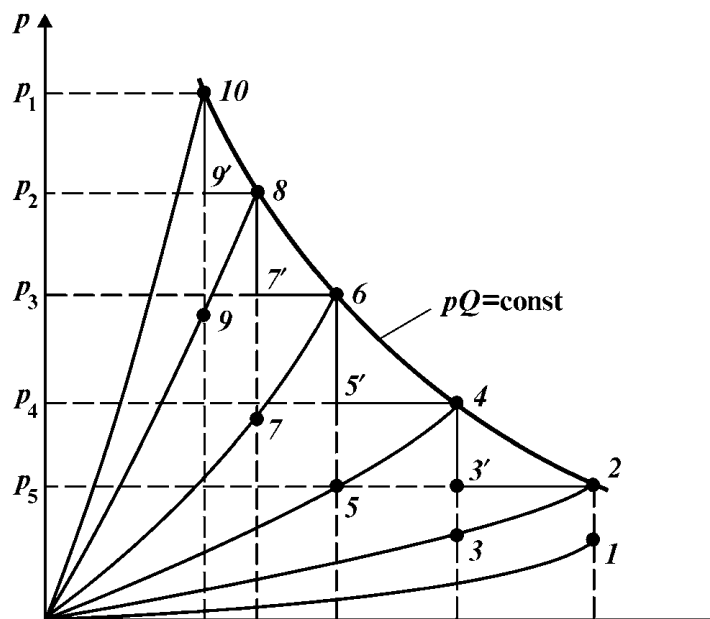


Рисунок 1.3 – График режимов работы бурового насоса при различных видах электропривода: 1–2, 3–4, 5–6, 7–8, 9–10 – для нерегулируемого электропривода; 1–2–3'–4–5'–6–7–8–9''–10 – для регулируемого электропривода при постоянном моменте; 2–4–6–8–10 – для регулируемого электропривода при постоянной мощности

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

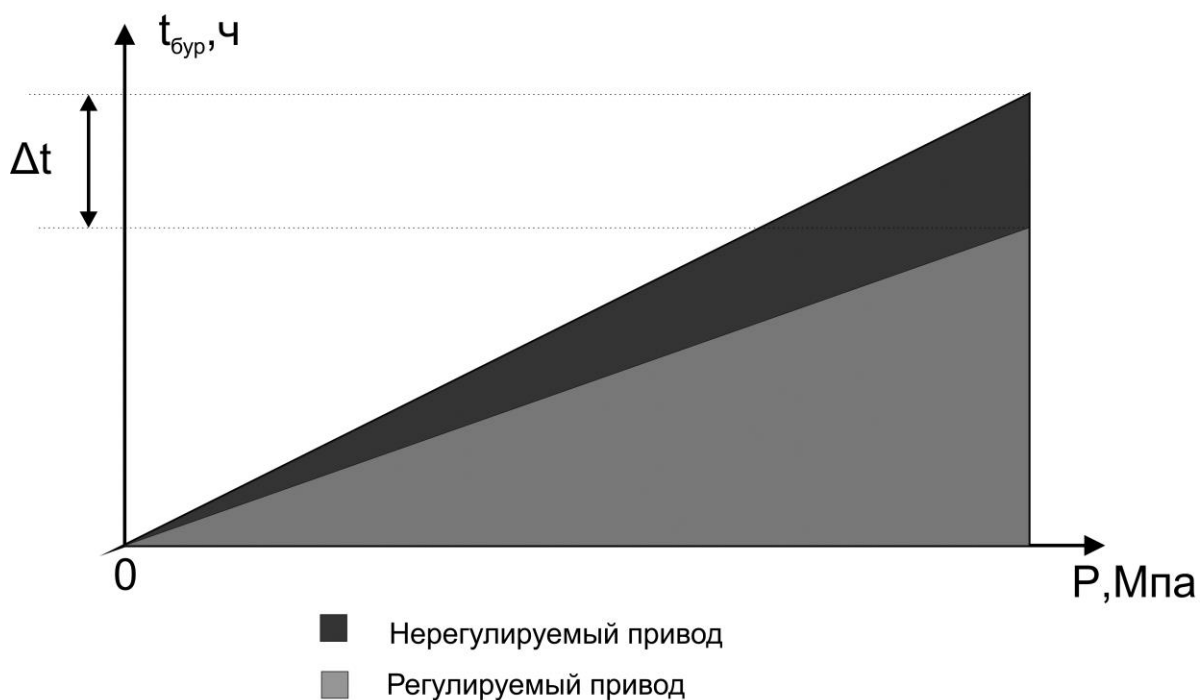


Рисунок 1.4 – График увеличения времени  $\Delta t$  при использовании нерегулируемого ЭП с заменой втулок

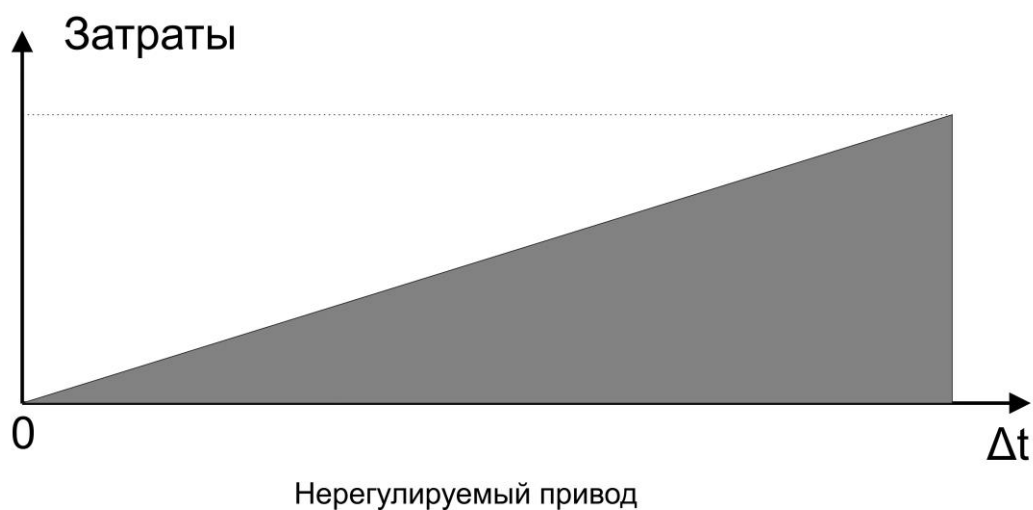


Рисунок 1.5 – График увеличения затрат с ростом времени  $\Delta t$  на замену втулок

Исходя из назначения и условий эксплуатации, к буровым насосам предъявляются следующие основные требования [3]:

- а) подача бурового промывочного раствора должна быть регулируемой в пределах, обеспечивающих эффективную промывку скважины;
- б) мощность насоса должна быть достаточной для промывки скважины и привода забойных гидравлических двигателей;

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

в) скорость промывочной жидкости на выходе из насоса должна быть равномерной для устранения инерционных нагрузок и пульсаций давления, вызывающих осложнения в бурении, дополнительные энергетические затраты и усталостные разрушения;

г) насосы должны быть приспособлены для работы с абразиво- и масло-содержащими коррозионно-активными промывочными растворами различной плотности;

д) узлы и детали, контактирующие с промывочным раствором, должны обладать достаточной долговечностью и быть приспособленными к удобной и быстрой замене при выходе из строя;

е) крупногабаритные узлы и детали должны быть снабжены устройствами для надежного захвата и перемещения при ремонте и техническом обслуживании;

ж) узлы и детали приводной части должны быть защищены от промывочного раствора и доступны для осмотра и технического обслуживания;

з) насосы должны быть приспособлены к транспортировке в собранном виде на далекие и близкие расстояния и к перемещению волоком в пределах буровой;

и) конструкция насосов должна допускать правое и левое расположение двигателей насосного агрегата;

к) надежность и долговечность насосов должны сочетаться с их экономичностью и безопасностью эксплуатации.

Технические условия на изготовление буровых насосов регламентируются ГОСТом.

С ростом глубины бурения значительно увеличиваются и мощности буровых насосов. Освоены и намечаются к производству новые модели буровых насосов, отвечающие возросшим требованиям бурения. Буровые насосы непрерывно совершенствуются: повышаются надежность и долговечность, снижается масса и сокращаются материальные и трудовые затраты на их изготовление, эксплуатацию и ремонт. Это обусловило широкую номенклатуру моделей и модификаций буровых насосов, используемых в отечественной и зарубежной практике бурения эксплуатационных и разведочных скважин [4].

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Рабочие органы буровых насосов преимущественно выполняются в виде поршней. Наиболее распространены двухпоршневые насосы двустороннего действия, на смену которым в последние годы приходят трехпоршневые насосы одностороннего действия. В насосах двустороннего действия жидкость перемещается в поршневой и штоковой полостях и за один двойной ход поршня совершаются два цикла всасывания и нагнетания. При одностороннем действии жидкость перемещается в поршневой полости рабочей камеры и за один двойной ход совершается один цикл всасывания и нагнетания.

Основными параметрами, определяющими режим работы буровых насосов, являются давление на его выходе и подача – количество жидкости, подаваемое в единицу времени. Давление на выходе буровых насосов при работе на некоторую гидравлическую систему определяется по формуле

$$p = k \cdot Q^2, \quad (1)$$

где  $Q$  – подача (производительность, расход),  $k$  – коэффициент, характеризующий общее сопротивление гидравлической системы.

Подача раствора  $Q$  выбирается технологическими службами с учетом конкретных условий. Для нормальной очистки забоя и подъема частиц разбуренной породы на поверхность величина подачи должна быть тем большей, чем больше площадь забоя [5].

Гидравлическую  $P_z$  и приведенную  $P_n$  мощность бурового насоса определяют по формулам:

$$\begin{aligned} P_z &= p \cdot Q, \\ P_n &= p \cdot Q \div n \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n = 0,9+0,92$  – КПД, учитывающий гидравлические и механические потери в буровых насосах.

Сопоставив выражения (1) и (2) нетрудно убедиться, что при постоянных параметрах гидравлической системы и переменной подаче жидкости, гидравлическая мощность пропорциональна подаче в третьей степени, т.е. возрастает весьма интенсивно.

Требуемая мощность бурового насоса при различных условиях в скважине и

						<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			15

методах бурения различна. Поскольку каждая установка должна обеспечивать бурение как роторным, так и турбинным способом, мощность бурового насоса выбирается из условий турбинного бурения, где требуется наибольшая мощность. На серийных буровых установках различных классов номинальная приводная мощность одного бурового насоса составляет от 300 до 950 кВт, а на уникальных установках до 1180 кВт и более. Номинальная частота вращения привода выбирается в пределах от 500 до 1 000 об/мин. На серийных установках устанавливается как правило два, а на уникальных и морских установках – три насоса.

Стандартизованные данные мощности буровых насосов по ГОСТ 1 6293–89 установлены по классам таким образом, что мощности насосов будут достаточны для бурения скважин с глубиной, соответствующей классу установки, причем с некоторым запасом.

Буровые насосы, представляющие собой насосы поршневого типа, оснащаются сменными поршнями и втулками ряда диаметров. Сменные поршни нужны в связи с тем, что требуемое давление по мере углубления скважины изменяется.

Со сменой поршней связаны следующие закономерности: по условиям прочности механизмов насоса (штоки, подшипники, передаточный механизм) усилия в них должны быть равными при разных диаметрах поршней; следовательно, при меньшем диаметре поршня допускается более высокое давление на выходе бурового насоса (обратно пропорционально площади поршня); при уменьшении диаметра поршня и постоянной скорости его движения подача бурового насоса изменяется прямо пропорционально площади поршня (снижается); при смене диаметра поршня должен сохраняться режим постоянной мощности привода бурового насоса [6].

### 1.3 Описание режима работ бурового насоса

В реальных условиях существуют два режима работы бурового насоса: с регулируемым и нерегулируемым приводом. Оптимальный режим бурового насоса характеризуется постоянством развиваемой мощности, равной номинальной:  $p \cdot Q = const$ . Приближение к этому режиму при нерегулируемом

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
						16
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

приводе достигается применением цилиндрических втулок разного диаметра. Режим работы бурового насоса рассмотрим по графику, характеризующему зависимость подачи  $Q$  от давления  $p$  на выходе и диаметра втулки  $D$  (рис. 1.6). Если принять, что в комплект бурового насоса входят 5 типоразмеров сменных поршней, то основные расчетные точки 2, 4, 6, 8, 10, соответствующие различным диаметрам поршней, будут располагаться на расчетной кривой постоянной мощности [7].

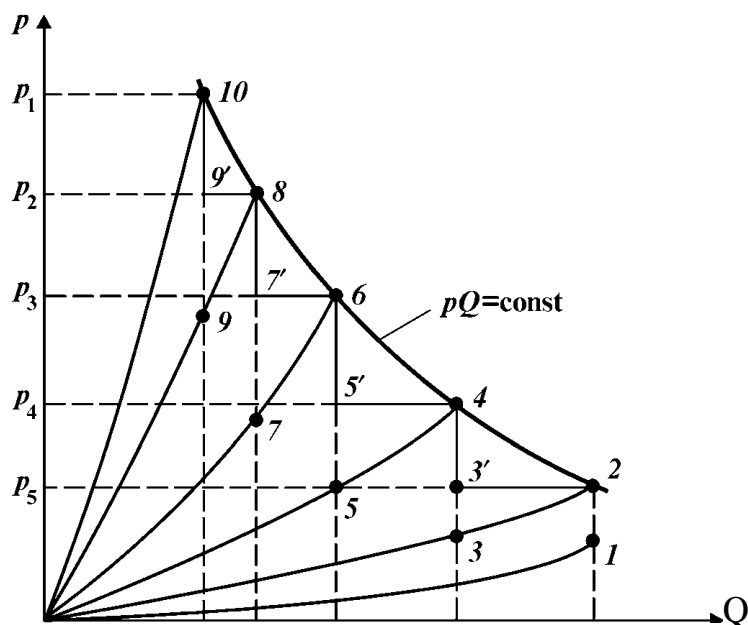


Рисунок 1.6 – График режимов работы бурового насоса при различных видах электропривода: 1–2, 3–4, 5–6, 7–8, 9–10 – для нерегулируемого электропривода; 1–2–3'–4–5'–6–7–8–9'–10 – для регулируемого электропривода при постоянном моменте; 2–4–6–8–10 – для регулируемого электропривода при постоянной мощности

При этом точка 2 соответствует максимальному, а точка 10 – минимальному диаметру поршня. Заметим, что при неизменном диаметре поршня подача бурового насоса пропорциональна скорости привода, а момент на валу двигателя пропорционален давлению.

В соответствии с формулой давление на выходе бурового насоса  $p$  пропорционально квадрату подачи жидкости  $Q$ , график зависимости  $p = k \cdot Q^2$  для конкретного значения коэффициента гидравлического сопротивления  $k$  называют «кривой нагрузки». Значение коэффициента  $k$  увеличивается с ростом глубины скважины. Кривые нагрузки, проходящие через

указанные расчетные точки, показаны на рис. 1.6 тонкими линиями. Предположим, что при малой глубине бурения установлены поршни максимального диаметра  $D5$  и БН работает в точке 1.

С увеличением глубины скважины подача бурового насоса  $Q5$  остается постоянной, а давление возрастает. Продолжать работу с поршнем диаметра  $D5$  выше точки 2 недопустимо, так как мощность привода превысит допустимое значение. Поэтому в точке 2 необходимо заменить поршень диаметра  $D5$  на поршень с диаметром  $D4$ . Поскольку при той же скорости привода вследствие уменьшения диаметра поршня подача уменьшится, а кривая нагрузки останется неизменной, режим работы бурового насоса будет определяться точкой 3. По мере углубления скважины произойдет переход в точку 4 и т.д. Следовательно, в случае нерегулируемого электропривода бурового насоса и периодической замены поршней процесс протекает по отрезкам вертикальных прямых 1–2, 3–4, 5–6, 7–8, 9–10. Из графика видно, что в точках 1, 3, 5, 7, 9 фактически развиваемая мощность значительно меньше номинальной. Вынужденное недоиспользование мощности по сравнению с идеальной кривой  $pQ = const$  можно оценить суммарной площадью треугольников 2–3–4, 4–5–6, 6–7–8, 8–9–10.

Рассмотрим теперь для тех же условий режимы работы бурового насоса, оснащенного регулируемым электроприводом [8].

Благодаря возможности регулирования скорости вниз от номинальной, график работы насоса (см. рис. 1.6) представляет собой ступенчатую кривую 1–2–3' – 4–5' – 6–7 – 8–9'–10.

Анализ графиков показывает, что в данном случае недоиспользование мощности значительно меньше, чем при нерегулируемом приводе. Применение регулируемого электропривода обеспечивает уменьшение числа замен поршней при бурении скважины.

Более полное использование мощности бурового насоса при регулируемом электроприводе практически выражается в том, что при том же значении допустимого давления в нагнетательной системе подача бурового насоса будет

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18



больше, чем при нерегулируемом электроприводе. Благодаря этому при всех видах бурения улучшается очистка забоя, что приводит к увеличению механической скорости бурения, а также обеспечивается возможность повышения скорости бурения вследствие использования более высокой нагрузки на долото. Одновременно возрастает проходка на долото, так как уменьшается степень повторного разрушения породы. В результате увеличения проходки на долото сокращается суммарное время спускоподъемных и ряда вспомогательных операций. При турбинном бурении, кроме того возрастает механическая скорость бурения вследствие увеличения частоты вращения долота и подводимой к нему средней мощности.

Регулирование подачи бурового насоса необходимо также в осложненных условиях бурения. Ответственной операцией, особенно при бурении глубоких скважин, является восстановление циркуляции бурового раствора в гидравлической системе. В начале этой операции вязкость раствора и гидравлическое сопротивление в системе значительно выше, чем при рабочих режимах. Восстановление циркуляции значительно облегчается при возможности работы бурового насоса с пониженной подачей.

Минимальная относительная подача при восстановлении циркуляции может составлять 0,1 от подачи в режиме бурения.

Таким образом, буровой насос целесообразно оснащать регулируемым электроприводом, причем регулирование следует осуществлять в режиме постоянного момента, определяемого допустимым давлением в гидравлической системе буровой установки.

На основании изложенного электропривод бурового насоса должен отвечать следующим требованиям:

- а) возможность плавного, затянутого во времени пуска (до 60 с);
- б) пусковой момент не должен превышать номинальный более чем на 10%;
- в) возможность регулирования скорости привода в режиме бурения до 50 %, а в режимах восстановления циркуляции до 80 % и более вниз от номинального значения [9];

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

г) при регулировании скорости вниз от номинальной привод должен обеспечивать постоянство давления бурового насоса, что соответствует постоянству момента на его валу;

д) привод должен иметь жесткую механическую характеристику с относительным падением скорости от холостого хода до номинальной нагрузки порядка 5 %;

е) привод нереверсивный, режим работы – продолжительный с относительно спокойной нагрузкой.

Регулируемый электропривод бурового насоса по системе тиристорный преобразователь – двигатель (ТП – Д) в настоящее время широко используется на отечественных буровых установках, оснащенных индивидуальными электроприводами основных механизмов. Данный тип привода в настоящее время применяется на всех буровых установках для бурения на глубинах 2500 м и более, а также на некоторой части буровых установок для бурения на глубину 1600 м.

Система управления электроприводом бурового насоса (рис. 2.2, а) построена по принципу подчиненного управления и включает в себя контур регулирования ЭДС электродвигателя и подчиненный ему контур регулирования тока. Регулятор ЭДС – пропорциональный (П-регулятор), регулятор тока – пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор). Блок регуляторов БР включает в себя гальваническую развязку РГ, фазочувствительный выпрямитель ФВ, задатчик интенсивности ЗИ, регулятор ЭДС РЭ с узлом ограничения УО и регулятор тока РТ. Блок датчиков содержит датчик тока ДТ и датчик напряжения ДН. На рис. 2.2, а датчики тока и напряжения вместе с устройствами гальванического разделения первичной цепи измерения и вторичного сигнала, подаваемого в систему управления, изображены прямоугольником с двумя диагоналями [10].

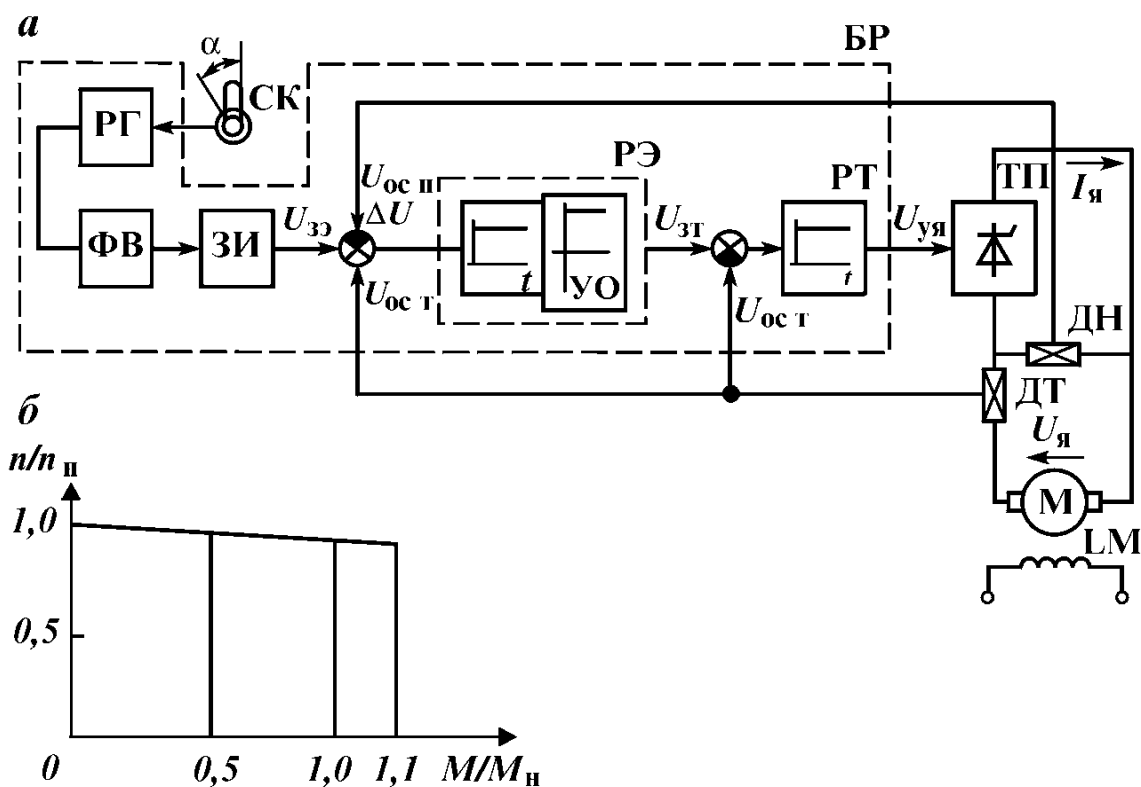


Рисунок 1.7 – Функциональная схема (а) и механическая характеристика (б) электропривода бурового насоса, управляемого по системе подчиненного управления:  $U_{зз}$ ,  $U_{зГ}$  – сигналы задания соответственно ЭДС и тока якоря двигателя;  $U_{ост}$ ,  $U_{oc н}$  – сигналы обратных связей соответственно по току и напряжению якоря двигателя;  $U_{уя}$  – выходной сигнал регулятора тока;  $U_{я}$ ,  $I_{я}$  – соответственно напряжение и ток якоря двигателя

На рисунке 1.7, используется также способ изображения регуляторов, при котором внутри прямоугольника указывается его переходная характеристика (реакция на ступенчатое воздействие).

Сигнал, пропорциональный ЭДС двигателя (в установившемся режиме пропорциональной скорости двигателя), определяется по формуле

$$E = c \cdot \omega = U - IR,$$

где  $c$  – конструктивная постоянная;  $\omega$  – угловая скорость вала;  $U$  – напряжение на якоре;  $I$  – ток якорной цепи;  $R$  – суммарное сопротивление якорной цепи двигателя.

Сигнал, пропорциональный первому слагаемому формулы, получают от датчика напряжения, а второму слагаемому – от датчика тока. Суммирование сигналов датчиков осуществляется на входе регулятора ЭДС РЭ. Поскольку сопротивление якорной цепи мало, первый сигнал является доминирующим.

Применение данной схемы обеспечивает возможность устранения из системы управления тахогенератора.

Управление электроприводом осуществляется с пульта управления насосом сельсинным командоаппаратом СК. Воздействуя на систему управления тиристорным преобразователем ТП, плавно регулируют скорость двигателя М. В некоторых электроприводах буровых насосов регулирование скорости осуществляется ослаблением магнитного потока двигателя. В этом случае в цепь обмотки возбуждения двигателя *LM* включается устройство регулирования тока возбуждения. Механическая характеристика электропривода буровых насосов по системе ТП – Д, соответствующая максимальной частоте вращения двигателя, приведена на рис. 2.2, б. Регулирование предельного момента осуществляется изменением уставки узла ограничения УО регулятора ЭДС РЭ [11].

Указанная система электропривода обеспечивает требуемый диапазон регулирования скорости, в случае необходимости этот диапазон может быть расширен за счет ослабления магнитного потока двигателя. Однако при этом допустимый момент нагрузки электродвигателя уменьшается.

С конструктивной точки зрения основное преимущество системы ТП – Д состоит в отсутствии генератора постоянного тока, имеющего коллекторный узел и щеточный аппарат. Тиристорный преобразователь ТП является устройством статического типа, не содержит вращающихся частей и не требует мощных фундаментов.

Тиристорные преобразователи выполняются в виде унифицированных блочных конструкций с высокой степенью надежности, долговечности и ремонтпригодности. Благодаря малой мощности управления можно получить хорошие статические и динамические характеристики привода, а также обеспечить высокий уровень автоматизации.

Для тиристорных преобразователей характерны и некоторые недостатки, например, некоторое искажение формы напряжения в питающей сети, снижение коэффициента мощности при регулировании скорости вниз от номинального

					ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

значения и др. Эти недостатки не всегда существенны и при необходимости могут быть скомпенсированы применением фильтрокомпенсирующих устройств.

В настоящее время отмечается тенденция оснащения буровых установок электрооборудованием, рассчитанным на напряжение питания 690 В переменного тока, и двигателями постоянного тока на напряжение 800 В, что обеспечивает следующие преимущества[12]:

а) снижение массы электрооборудования на 30% по сравнению с использованием напряжения 400 В;

б) уменьшение площади, занимаемой оборудованием, экономия в массе и стоимости конструктивных блоков и модулей буровых установок;

в) уменьшение числа кабелей и монтажных соединений, в связи с чем повышается монтажно-транспортные показатели оборудования, что особенно важно для буровых установок повышенной транспортабельности.

Направления развития электропривода основных механизмов буровых установок в основном совпадают с общей тенденцией развития электропривода на современном этапе – это постоянно расширяющаяся область применения регулируемого электропривода и компьютерных средств автоматизации при создании нового и модернизации действующего оборудования.

В настоящее время все ведущие электротехнические фирмы выпускают регулируемые электроприводы комплектно с компьютерными средствами автоматизации в виде гибко программируемых систем, адаптируемых к широкой области их применения.

Область применения различных типов регулируемых электроприводов в значительной степени определяется применяемой элементной базой силовых полупроводниковых преобразователей энергии. В связи с освоением промышленностью полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов в модульном исполнении: мощных полевых транзисторов (*MOSFET*), биполярных транзисторов с изолированным затвором (*IGBT*) запираемых тиристоров с интегрированным управлением (*IGCT*) и запираемых тиристоров (*GTO*) разработаны полупроводниковые преобразователи, обеспечивающие

					ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

плавное и экономичное регулирование скорости электродвигателей в широком диапазоне. На базе выпускаемых силовых полупроводниковых модулей создаются регулируемые электроприводы по системе преобразователь частоты – асинхронный короткозамкнутый двигатель (ПЧ – АД) [13].

При мощности электропривода до 1 МВт для создания ПЧ в настоящее время используются модули *IGBT*, более 1 МВт – модули *GTO* или *IGCT*.

Создание надежных статических преобразователей частоты для управления асинхронными электродвигателями с использованием средств микропроцессорной техники привело к массовому применению электроприводов по системе ПЧ – АД в различных отраслях промышленности.

Разработки в области частотно-регулируемых электроприводов нашли применение в электроприводах исполнительных механизмов ряда зарубежных буровых установок наземного и морского бурения.

С середины 90-х годов компанией *ABB* начата комплектная поставка электрооборудования для буровых установок с частотно-регулируемыми электроприводами. В комплект входят электроприводы буровой лебедки, буровых насосов, верхнего привода (или ротора), а на морских буровых установках также якорных лебедок и гребных винтов. В качестве приводных двигателей применены асинхронные короткозамкнутые электродвигатели типа *AFD*, разработанные специально для использования в частотно-регулируемых электроприводах и приспособленные к условиям бурения. Электродвигатели – малошумные, с низким уровнем вибрации, с принудительной вентиляцией мощностью до 1400 кВт, не требующие водяного охлаждения [14].

Каждый привод имеет индивидуальный инвертор, работа которого основана на принципе широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Инверторы построены по мостовой трехфазной схеме, состоящей из шести полупроводниковых ключей.

Преимущества при применении частотно-регулируемого электропривода переменного тока:

а) Наилучшее использование установленной мощности и работа в оптимальных режимах для каждого интервала бурения

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ	Лист 24

б) Увеличение частоты вращения долота, средней мощности, подводимой к долоту

в) Возможность пуска насоса под нагрузкой

г) Облегчение восстановления циркуляции, сокращение затрат времени на промывку скважины

д) Уменьшение числа рейсов в связи с увеличением средней проходки на долото

Каждый инвертор имеет свою собственную микропроцессорную систему управления. Для управления системой имеется контроллер прикладного программного обеспечения, позволяющий одновременно управлять несколькими инверторами. Статическая точность регулирования частоты вращения с обратной связью от импульсного датчика – 0,01 %; без обратной связи от 0,5 до 3 %. Указанные типы частотно-регулируемого электропривода нашли широкое применение на буровых установках месторождений Северного моря.

По сравнению с электроприводом по системе ТП – Д, частотно-регулируемый электропривод обладает следующими преимуществами:

а) сокращение массы и габаритов электрооборудования;

б) проще решается проблема обеспечения взрывозащиты электродвигателя;

в) более высокая точность регулирования скорости;

г) за счет прямого управления моментом достигаются требуемые показатели качества функционирования электропривода в динамических режимах;

д) уменьшение динамических нагрузок в передаточном механизме, поскольку момент инерции ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя значительно меньше момента инерции ротора двигателя постоянного тока;

е) более простыми средствами обеспечиваются сопряжение локальных систем автоматики с системой управления верхнего уровня [15];

ж) повышается надежность и долговечность электропривода, работающего в тяжелых условиях эксплуатации;

з) благодаря встроенной системе диагностики сокращаются затраты на техническое обслуживание и простои технологического оборудования;

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

и) более высокое значение КПД за счет применения в преобразователях полупроводниковых приборов нового поколения с малыми внутренними потерями энергии и др.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26



## 2 ВЫБОР СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1 Выбор типа электропривода

Современные буровые установки оснащаются регулируемыми электроприводами главных технологических механизмов. Регулируемые приводы способствуют повышению надежности главных технологических механизмов за счет упрощения кинематических систем передач, обеспечения плавности пуска и ограничения моментов нагрузки механизмов; позволяют резко повысить производительность буровой установки, что имеет большое экономическое значение. Высокий технико-экономический эффект достигается также за счет увеличения КПД, облегчения монтажа и транспортировки, улучшения условий труда буровиков [16].

Наиболее полно технологическим требованиям отвечает глубоко регулируемый электропривод. Поэтому электроприводы главных механизмов серийных буровых установок выполнены по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока. Глубокое регулирование скорости приводов обеспечивается изменением напряжения, приложенного к якорю двигателя, и изменением тока в обмотке возбуждения двигателя [17].

Однако использование в качестве электроприводов главных механизмов буровой установки двигателей постоянного тока влечёт за собой массу трудностей, связанных с эксплуатацией данных двигателей. Эти трудности связаны с наличием у двигателей постоянного тока коллекторного блока, который нуждается в частом обслуживании. Кроме того, наличие коллектора делает привод постоянного тока менее надёжным и безопасным, что в условиях добычи нефти весьма важно.

Описанных недостатков лишён привод переменного тока с управлением от ПЧ. Поэтому, учитывая современные достижения в изготовлении преобразователей частоты (современные преобразователи частоты выпускаются на большие мощности, являются доступными и зачастую не превосходят по цене тиристорные преобразователи постоянного тока). В последнее время

					ИОУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

осуществляются попытки заменить на главных приводах буровых установок системы тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока на более совершенные системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

По сравнению с электроприводами постоянного тока электропривод переменного тока имеет следующие преимущества:

а) надежность, простота, относительная дешевизна двигателя, не требующего постоянного обслуживания (нет коллекторного узла), что позволяет значительное снижение эксплуатационных затрат по двигателям;

б) большая, чем у приводов постоянного тока, глубина регулирования скорости 1:1000 вместо 1:100;

в) высокий коэффициент мощности, близкий к 1. Нет необходимости применения ФКУ (фильтрокомпенсационной установки);

г) меньшая, чем в тиристорных преобразователях, относительная величина генерируемых в сеть гармоник;

д) высокая электрическая надежность;

е) не критичны к качеству питающей сети даже в режимах рекуперации энергии, соответственно более стабильная работа и меньшая аварийность;

ж) допускают большие просадки напряжения питания без отключения привода;

з) цена комплекта преобразователь частоты – асинхронный двигатель сопоставима со стоимостью тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока.

Как и у преобразователей постоянного тока, блочные конструкции преобразователей частоты характеризуют высокий уровень эргономики и ремонтпригодности, а также малое время восстановительных работ (ремонт производится в основном путем замены блоков), что является весьма существенным в связи с эксплуатацией буровых установок вдали от ремонтных баз. Важным достоинством является также унификация схем электроприводов,

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

конструкции элементов, функциональных узлов и блоков регулирования преобразователями.

## 2.2 Электропривод постоянного тока.

Основным преимуществом данных двигателей, которое определяло повсеместное их использование на этапе развития электрических приводов, является легкость плавного регулирования скорости в широких пределах. Поэтому с развитием полупроводниковой промышленности и появлением относительно недорогих преобразователей частоты процент их использования постоянно уменьшается [18].

В промышленности, там где используются буровые лебедки по возможности двигатели постоянного тока заменяются приводами на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Основные недостатки двигателя постоянного тока (невысокая надежность, сложность обслуживания и эксплуатации) обусловлены наличием коллекторного узла. Кроме того, для питания двигателя необходим источник постоянного тока или тиристорный преобразователь переменного напряжения в постоянное. При всех своих недостатках двигатели постоянного тока обладают высоким пусковым моментом и большой перегрузочной способностью.

## 2.3 Синхронный привод.

Основным преимуществом данных двигателей является то, что они могут работать с коэффициентом мощности  $\cos\varphi = 1$ , а в режиме перевозбуждения даже отдавать реактивную мощность в сеть, что благоприятно сказывается на характеристиках сети буровой лебедки: увеличивается ее коэффициент мощности, уменьшаются потери и падение напряжения [19]. Кроме того, синхронные двигатели устойчивы к колебаниям сети. Максимальный момент синхронного двигателя пропорционален напряжению, при этом момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения. Следовательно, при снижении напряжения синхронный двигатель сохраняет большую перегрузочную

					ИОУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

способность, а возможность форсировки возбуждения увеличивает надежность их работы лебедки при аварийных понижениях напряжения. Большой воздушный зазор по сравнению с асинхронным двигателем и применение постоянных магнитов делает КПД синхронных двигателей выше. Их особенностью также является постоянство скорости вращения при изменении момента нагрузки на валу.

При всех достоинствах синхронного двигателя основными недостатками, ограничивающими их применение являются сложность конструкции, наличие возбуждителя, высокая цена, сложность пуска.

Поэтому синхронные двигатели преимущественно используются при мощностях свыше 100 кВт.

#### 2.4 Привод переменного тока.

По конструктивному принципу асинхронные двигатели подразделяются на двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором. При этом большинство используемых электродвигателей являются асинхронными с короткозамкнутым ротором. Столь широкое применение обусловлено простотой их конструкции, обслуживания и эксплуатации, высокой надежностью, относительно низкой стоимостью. Недостатками таких двигателей являются большой пусковой ток, относительно малый пусковой момент, чувствительность к изменениям параметров сети, а для плавного регулирования скорости необходим преобразователь частоты. Кроме того, асинхронные двигатели потребляют реактивную мощность из сети. Предел применения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором определяется мощностью системы электроснабжения конкретного предприятия, так как большие пусковые токи при малой мощности системы создают большие понижения напряжения [21].

Использование асинхронных двигателей с фазным ротором помогает снизить пусковой ток и существенно увеличить пусковой момент, благодаря введению в цепь ротора пусковых реостатов. Однако, ввиду усложнения их конструкции, и как следствие, увеличения стоимости их применение ограничено. Основное

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

применение – приводы механизмов с особо тяжелыми условиями пуска. Для уменьшения пусковых токов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может быть использовано устройство плавного пуска или преобразователь частоты.

В настоящее время все большее распространение приобретает использование частотно-регулируемого привода, выполненного на основе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

При использовании частотно-регулируемого привода достигается:

- а) экономия электроэнергии;
- б) плавность пуска и снижение пусковых токов;
- в) увеличение срока службы двигателя.

По сравнению с электроприводами постоянного тока электропривод переменного тока имеет следующие преимущества:

а) надежность, простота, относительная дешевизна двигателя, не требующего постоянного обслуживания (нет коллекторного узла), что позволяет значительное снижение эксплуатационных затрат по двигателям;

б) большая, чем у приводов постоянного тока, глубина регулирования скорости 1:1000 вместо 1:100;

в) высокий коэффициент мощности, близкий к 1. Нет необходимости применения ФКУ (фильтрокомпенсационной установки);

г) меньшая, чем в тиристорных преобразователях, относительная величина генерируемых в сеть гармоник;

д) высокая электрическая надежность;

е) не критичны к качеству питающей сети даже в режимах рекуперации энергии, соответственно более стабильная работа и меньшая аварийность;

ж) допускают большие просадки напряжения питания без отключения привода;

з) цена комплекта преобразователь частоты – асинхронный двигатель сопоставима со стоимостью тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

Как и у преобразователей постоянного тока, блочные конструкции преобразователей частоты характеризуют высокий уровень эргономики и ремонтпригодности, а также малое время восстановительных работ (ремонт производится в основном путем замены блоков), что является весьма существенным в связи с эксплуатацией буровых установок вдали от ремонтных баз. Важным достоинством является также унификация схем электроприводов, конструкции элементов, функциональных узлов и блоков регулирования преобразователями.

## 2.5. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения

В настоящее время во многих отраслях тяжелой и легкой промышленности, а также в энергетике и нефтегазовом комплексе наиболее остро стоит вопрос надежности систем, обеспечивающих бесперебойный технологический процесс.

При поиске новых эффективных решений в классе машин с пассивным ротором и “гладким” статором, привлёк внимание многофазный синхронный двигатель, предложенный Weh-ом [22]. Высокие показатели в такой машине достигаются выбором конфигурации схем обмотки на статоре, оптимизацией геометрии ротора и применением специальных законов управления токами статора, отличных от синусоидальных.

Электропривод на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения (СРМНВ) [23], отличающейся простотой конструкции статора и «холодным» ротором, в наибольшей степени отвечает требованиям надежности современных систем [24]. Уже имеющаяся схема силовых цепей системы электропривода выполняется многофазной с индивидуальными источниками питания.

В этой бесконтактной машине роль обмотки возбуждения может выполнять и обмотка, размещенная на статоре, если, во-первых, ее витки располагаются в межполюсном промежутке и, во-вторых, эта обмотка имеет полный шаг. Такой двигатель работает как обращенная машина постоянного тока, ее фазные

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

обмотки статора могут питаться как от независимых индивидуальных источников, так и от традиционных многофазных управляемых преобразователей, выполненных, например, по мостовой схеме. Так как ротор может выполняться массивным, то достигается высокая механическая жесткость вала. Двигатель может быть выполнен в том же корпусе и с тем же пакетом железа статора, что и у асинхронных двигателей, а при той же токовой линейной нагрузке статора развивает момент на 20...35% больше. Благодаря умышленному смещению физической нейтрали на край полюса двигатель может развивать большие (до 4...10 крат) перегрузочные моменты.

В [25] развивается идея предложенного двигателя. Изучаемая машина имеет следующие конструктивные особенности: на статоре размещается  $m$ -фазная (в нашем случае – шести) сосредоточенная обмотка, имеющая полный шаг. Явнополюсность ротора достигается в [25] за счёт его продольной шихтовки. В работах [26] даётся математическое описание машины, определяется влияние насыщения на характеристики машины, высказываются некоторые соображения по выбору числа фаз, полюсов, полюсной дуги. Авторы приходят к выводу, что при тех же массах меди, электрических потерях и максимальной индукции в зазоре двигатель имеет на 68 % большее усилие, чем асинхронная машина. L. Law и др. предлагают название машины, наиболее близко отражающее принцип её работы – Field Regulated Reluctance Machine (синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения – СРДНВ).

Между тем очевидные конструктивные преимущества машины:

- бесконтактность;
- простая и технологичная конструкция массивного ротора;
- высокая механическая жёсткость ротора;
- “холодный” ротор;
- простая обмотка на статоре, –

позволяют утверждать, что такой тип привода вполне конкурентоспособен на рынке. Он вполне удовлетворяет тем требованиям, которые встают перед современным электроприводом (это требования расширенного диапазона

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

регулирования скорости, простоты конструкции электрической машины). А если учесть те заманчивые обещания (высокие удельные усилия до 40 кН / м<sup>2</sup>, отсутствие видимого насыщения момента в функции тока), которые предлагаются в [25], то в определённых классах механизмов он не будет иметь себе конкурентов.

Представленные обстоятельства делают актуальной идею исследования электропривода с СРДНВ.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34



### 3. СИЛОВАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

#### 3.1 Расчет мощности привода насоса

Подачу, напор и полезную мощность буровых насосов выбирают на основе требований, предъявляемых технологией промывки скважин. Исходной является объемная подача, от которой зависят эффективность роторного бурения и нормальная работа забойных двигателей. [27]

В соответствии с гидравлической программой бурения объемный расход  $Q$  бурового раствора назначается исходя из трех условий:

- а) необходимой скорости восходящего потока в кольцевом пространстве скважины  $v_{кп}$ ;
- б) требований эффективности очистки забоя скважины от шлама ( $Q_{заб}$ );
- в) характеристик гидравлического забойного двигателя в зависимости от условий бурения скважины ( $Q_{зд}$ ).

Установлено, что для эффективной очистки забоя и выноса шлама, а также нормальной работы забойных двигателей скорость восходящего потока бурового раствора в кольцевом пространстве должно быть строго регламентированным.

Дальнейшее увеличение скорости восходящего потока сопровождается неоправданным ростом давления насосов и возможным снижением механической скорости бурения. При опасности образования сальников и осыпания горных пород скорость восходящего потока в осложненных зонах ствола скважины повышается.

При гидравлических расчетах наклонно направленных и горизонтальных скважин необходимая скорость восходящего потока определяется по более сложным методикам в зависимости от профиля скважины, свойств горных пород, бурового раствора и других факторов.

Например при бурении горизонтального участка скважины критическая скорость восходящего потока, обеспечивающая нормальный режим течения:

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

$$v_{\text{КП}} = 25 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (3.1)$$

где  $\rho, \tau_0$  – соответственно плотность ( $\text{кг/м}^3$ ) и динамическое напряжение сдвига (Па) бурового раствора.

При бурении наклонно направленных скважин рекомендованная формула для расчета имеет вид: 
$$v_{\text{КП}} = \frac{5000}{\rho(300\eta + \tau_0)(2 - \sin \varphi)} \left( \frac{600\eta + \tau_0}{300\eta + \tau_0} \right)^{2,52}, \quad (3.2)$$

где  $\varphi, \eta$  – зенитный угол и пластическая вязкость (Па·с).

Необходимый расход бурового раствора:

$$Q_{\text{КП}} = v_{\text{КП}} \cdot F_{\text{КП}}, \quad (3.3)$$

где  $F_{\text{КП}}$  – площадь проходного сечения кольцевого пространства между стенками скважины ( $D_{\text{д}}$ ) и бурильными трубами ( $D$ ):

$$F_{\text{КП}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{д}}^2 - D^2). \quad (3.4)$$

Расход жидкости, необходимый для очистки забоя, зависит от диаметра скважины и определяется по формуле:

$$Q_{\text{ЗАБ}} = \alpha \frac{\pi}{4} D_{\text{д}}^2, \quad (3.5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, имеющий размерность скорости и принимаемый для бурения гидравлическими забойными двигателями равными 0,7 м/с.

Расход жидкости необходимый для эффективной работы забойных двигателей, выбирается в диапазон, рекомендуемом его паспортными характеристиками в соответствии с диаметральной габаритом и заданным крутящим моментом гидродвигателя.

В конечном результате в качестве требуемого расхода жидкости  $Q$  выбирается максимальное в заданных условиях бурения значение из вышеуказанного ряда:  $Q_{\text{КП}}, Q_{\text{ЗД}}, Q_{\text{ЗАБ}}$ .

					ИОУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

Давление нагнетания (на выходе из насоса) зависит от потерь давления на преодоление гидравлических сопротивлений в манифольде, бурильной колонне и затрубном кольцевом пространстве с учетом изменения плотности бурового раствора в связи с насыщением раствора выбуренной породой. Гидравлические сопротивления подразделяют на линейные, обусловленные силами трения движущихся частиц жидкости, и местные, обусловленные изменениями величины и направлениями скорости потока. Гидравлические сопротивления в колонне труб и кольцевом затрубном пространстве относят к линейным. К местным гидравлическим сопротивлениям относят: потери давления в замковых соединениях бурильных труб, промывочных отверстиях долота, проточных каналах забойных двигателей. Полная потеря давления определяется арифметической суммой линейных и местных потерь давления в системе циркуляции промывочной жидкости:

$$P_H = p_m + p_{\text{от}} + p_{\text{убот}} + p_z + p_d + p_{\text{зот}} + p_{\text{кп}}, \quad (3.6)$$

где  $P_H$  – давление нагнетания промывочной жидкости на выходе из насоса;  $p_m, p_{\text{от}}, p_{\text{убот}}, p_z, p_d, p_{\text{зот}}, p_{\text{кп}}$  – потери давления соответственно в манифольде, бурильных трубах, замковых соединениях, долоте, забойном двигателе и кольцевом пространстве.

Потери давления на гидравлические сопротивления в трубах принято определять по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$p = \lambda \rho \frac{l \cdot v^2}{2d}, \quad (3.7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho$  – плотность жидкости ( $\text{кг/м}^3$ );  $l$  – длина труб, м;  $d$  – внутренний диаметр труб, м;  $v$  – средняя скорость течения жидкости, м/с.

Гидравлические сопротивления пропорциональны квадрату средней скорости течения жидкости. Поэтому закон сопротивления устанавливаемый формулой Дарси-Вейсбаха, принято называть законом квадратичного сопротивления.

										Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>					37

Средняя скорость жидкости в трубах:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi d^2}. \quad (3.8)$$

Подставляя значение скорости в формулу 2.7, получаем:

$$p = \lambda \rho \frac{8l \cdot Q^2}{\pi^2 d^5} = 0.81 \lambda \rho \frac{l \cdot Q^2}{d^5}. \quad (3.9)$$

Если принять  $\alpha = \frac{0.81 \lambda}{d^5}$ , то формулу 2.9 можно записать в следующем виде:

$$p = \alpha \rho l Q^2, \quad (3.10)$$

где  $\alpha$  — коэффициент потерь давления в трубах и кольцевом пространстве.

Аналогично формулу можно получить для расчета потерь давления на местных сопротивлениях:

$$p = \alpha_M \rho Q^2, \quad (3.11)$$

где  $\alpha_M$  — коэффициент потерь давления местного сопротивления.

Значения коэффициентов потерь давления для различных элементов системы циркуляции промывочного раствора приводятся в технической литературе по технологии бурения и промывки скважин.

Давление насоса  $P$ , определяется по формуле:

$$P = p_n - p_{вс}, \quad (3.12)$$

где  $p_{вс}$  — давление всасывания (давление на входе в насос), зависящее от типа применяемой циркуляционной системы.

Полезная мощность насоса  $N_{П}$ :

$$N_{П} = QP, \quad (3.13)$$

где  $Q$  — подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  $P$  — давление насоса, Па.

Мощность, потребляемая насосом, суммируется из полезной мощности и мощности, затрачиваемой на гидравлические, объемные и механические потери в самом насосе:

$$N_H \geq \frac{N_{II}}{\eta_H}, \quad (3.14)$$

где  $\eta_H$  – КПД насоса.

Для практических расчетов КПД насоса можно представить в следующем виде:

$$\eta_H = \eta_{ИН} \eta_M = 0.8, \quad (3.15)$$

где  $\eta_M = 0.85$  – механический КПД насоса;

$\eta_{ИН} = 0.94$  – индикаторный КПД насоса.

При выборе мощности привода бурового насоса, следует исходить из условия обеспечения запаса по давлению на выходе насоса, для предупреждения срабатывания предохранительного клапана при непредвиденных случаях роста сопротивления в скважине. Наиболее полно этому условию соответствует регулируемый привод, обеспечивающий режим регулирования в зависимости от сопротивления в скважине:

$$N_{II} = \frac{N_H}{\eta_{TP}} \left( \frac{d_i}{d_{i+1}} \right)^3, \quad (3.16)$$

где  $N_H$  – мощность насоса, Вт;  $N_{II}$  – мощность привода бурового насоса, Вт;

$\eta_{TP}$  – КПД трансмиссии привода бурового насоса;  $d_i$  – смежные диаметры втулок.

Для выбора мощности привода можно использовать следующее приближенное соотношение:

$$N_{II} = 0.85 - 0.9 N_H. \quad (3.17)$$

### 3.2 Электромагнитный расчет СРДНВ

Задача проектирования СРДНВ, как и любой электрической машины, не является однозначной и требует последовательных расчётов с учётом назначенных критериев качества, технических требований и ограничений, связанных как с материалами и условиями эксплуатации, так и с многообразием схем и разными возможностями их реализации с помощью современной электроники. Принимая математическую модель СРДНВ соответствующей обращённой машине постоянного тока, укажем основные этапы проектирования СРДНВ.

В качестве исходных величин можно принять ограниченное количество технических данных, которые принимаются за номинальные [28]:

- мощность  $P_n$ , кВт;
- напряжение питания инвертора  $U_n$ , В;
- номинальная и максимальная частоты вращения;
- КПД  $\eta_n$ .

Задачей электромагнитного расчёта машины является выбор её параметров:

- главных размеров статора (диаметров  $D$ ,  $l_\delta$ );
- электромагнитных и тепловых нагрузок;
- числа фаз, полюсов;
- воздушного зазора  $\delta$ ;
- обмоточных данных фазных катушек.

В качестве расчётной принята электромагнитная мощность, однако истинное значение этой мощности можно определить только после полного расчёта электрической машины. Поэтому на начальном этапе электромагнитную мощность определяют по номинальной мощности и предварительно принятому КПД.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

Электромагнитный момент определяется по заданным номинальным данным

$$M_{эм} = \frac{P_H}{\eta_H \cdot \omega_H}.$$

На начальном этапе проектирования предварительное значение КПД можно выбирать по той же методике, что и для машины для машин постоянного тока [29].

Предварительный выбор электромагнитных нагрузок: индукции в зазоре и линейной нагрузки выполняются также согласно рекомендациям [30].

Главные размеры СРДНВ, как и для обычных электрических машин, рассчитываются по выражению “машиной постоянной”. Удовлетворительный результат можно получить при использовании постоянной Арнольда  $C$  для машин постоянного тока [31]

$$C = \frac{D^2 \cdot l_\delta}{M_{эм}} = \frac{2}{\pi \cdot \alpha_\delta \cdot A \cdot B_\delta},$$

где  $D$  – диаметр ротора;  $l_\delta$  – расчётная длина ротора;  $\alpha_\delta$  – полюсная дуга.

Однако в СРДНВ одна и та же обмотка выступает то в роли возбуждения то якоря, поэтому более удобным может оказаться выражение машинной постоянной, полученной из (3.28)

$$C_A = \frac{D^3 \cdot l_\delta}{P'} = \frac{8 \cdot p \cdot \delta'}{\mu_0 \cdot A^2 \cdot \alpha_\delta \cdot (1 - \alpha_\delta) \cdot K_B \cdot \pi^2 \cdot k_{ср} \cdot \omega_{мех}}, \quad (3.18)$$

где  $P'$  – расчётная электромагнитная мощность двигателя;  $A$  – линейная нагрузка;  $K_B$  – отношение тока возбуждения к току якоря;  $k_{ср}$  – коэффициент учитывающий пульсации электромагнитного момента.

По “машиной постоянной”, устанавливающей связь между размерами машины и электромагнитными нагрузкам, определяют произведение  $D^3 \cdot l_\delta$ . На основании значения  $\lambda = l_\delta / \tau$  находят величину  $l_\delta$ . Значение  $\lambda$  характеризует основные размерные соотношения в машине. Большие  $\lambda$  имеют машины относительно малого диаметра и большой длины, и, наоборот, малые значения  $\lambda$  – короткие машины с большим диаметром. В первом случае машины имеют малую

массу и меньшую высоту оси вращения. В них лучше используется медь обмотки, так как длина лобовых частей катушек по сравнению с длиной их пазовых частей становится меньше [32]. Меньше и момент инерции машин при больших  $\lambda$ , что особенно важно при проектировании электроприводов, к которым предъявляются высокие требования по динамическим показателям. Задача выбора оптимальной величины диаметра ротора рассматривалась в отношении синхронных машин [33]. Здесь в качестве критерия оптимизации принималось требование минимума потерь в машине. Однако задача выбора оптимальной величины  $\lambda$  является более сложной и многокритериальной, которую необходимо рассматривать в комплексе с конкретными технологическими требованиями. Так, в машинах постоянного тока [34] выбор диаметра якоря привязан к высоте оси вращения  $h$ , которая принимает стандартный ряд значений. Внешний диаметр в этом случае будет выбираться из условия  $D_{\text{вн}} \leq 2 \cdot h - (8 \div 10) \cdot 10^{-3}$ . Между тем, учитывая чрезвычайно высокую механическую жёсткость ротора, можно рекомендовать СРДНВ для электроприводов в таких специальных случаях, как погружные насосы, где  $\lambda$  может достигать нескольких десятков.

Расчётный коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha_\delta$ , как следует из (3.28), оказывает влияние на степень использования машины: с увеличением  $\alpha_\delta$  растёт зона, приходящаяся на якорную зону, но при этом уменьшается зона возбуждения. Поэтому на задаче выбора оптимальной величины полюсной дуги следует остановиться отдельно (см. п. 3.3.3).

Влияние числа фаз на характеристики электропривода с СРДНВ рассматривалось в п.

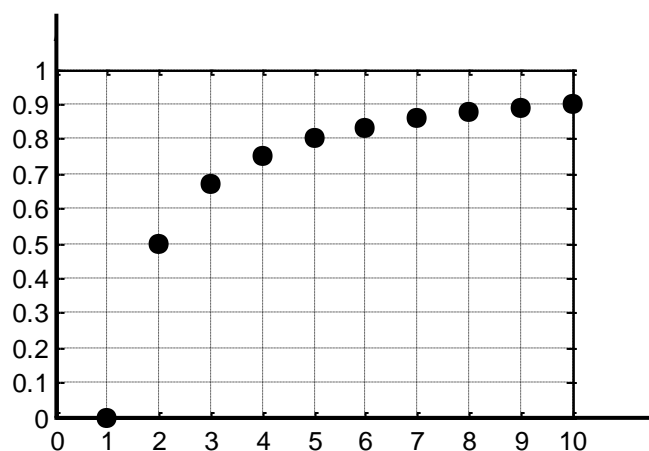


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента пульсаций от числа фаз СРДНВ

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



3.1.2. На рис. 3.1 представлена зависимость величины пульсаций электромагнитного момента от числа фаз. Увеличение  $m$  до 5–6 существенно снижает пульсации мгновенного значения момента. Дальнейшее увеличение числа фаз приводит к значительному увеличению числа ключей: так при индивидуальных источниках питания на фазу это число равно  $4 \cdot m$ ; при питании же машины от стандартных мостовых инверторов –  $2 \cdot m$ . В нашем случае мы остановились на варианте машины с числом фаз равным шести.

Правильный выбор воздушного зазора во многом определяет удельные показатели привода. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответствующему увеличению индукции в зазоре. Но чрезмерное уменьшение  $\delta$  приводит к возрастанию амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. В СРДНВ средней мощности зазор целесообразно выбирать, как и в асинхронном двигателе аналогичного исполнения (0,3 – 0,5 мм). Однако, исходя из возможностей большой перегрузочной способности СРДНВ, его лучше ориентировать на механизмы с тяжёлыми условиями нагрузки и выбирать  $\delta$ , как для двигателей краново-металлургической серии.

Обмоточные данные фазной катушки рассчитываются по линейной нагрузке и величине расчётной мощности.

Число витков обмотки статора

$$w_{\phi} = \frac{A \cdot \pi \cdot D}{2 \cdot m \cdot I_{\text{ср.кв.}}}$$

ЭДС вращения двигателя рассчитывается по (3.8), (3.27), при этом значение тока возбуждения может быть получено из соотношения  $I_{\text{в}} = K_{\text{в}} \cdot I_{\text{а}}$ , а выражение для тока якоря – по (3.4). Тогда действующее значение напряжения при номинальной нагрузке и номинальной скорости приближённо оценивается выражением

					ИОУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

$$U = \sqrt{(I_{\text{в}} r)^2 \cdot \frac{1}{3} + E^2 \cdot \frac{2}{3}}. \quad (3.19)$$

Здесь для упрощения выкладок не учитывается падение напряжения на индуктивном сопротивлении.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

## 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СРДНВ

### 4.1 Структурная модель СРДНВ

Исходным математическим описанием любой системы либо объекта регулирования являются совокупность дифференциальных и алгебраических уравнений. Для решения задач электромагнитного расчёта СРДНВ и оптимизации силовой части электропривода сначала удобно получить модель только двигателя.

Уравнения легко могут быть изображены графически в виде структурной схемы, которая будет состоять из простейших элементарных безынерционных звеньев. Такие структурные схемы – отдельных звеньев и всего объекта регулирования в целом – получили название детализированных [35].

На рис. 4.1 приведена детализированная структурная схема СРДНВ. Здесь приняты следующие обозначения:

– для звеньев электропривода и их параметров: **М** – вращающиеся массы двигателя с коэффициентом  $k_{\infty} = \infty$ , который учитывает равенство электромагнитного момента моменту статической нагрузки в установившемся режиме; **ЯЦ** – якорная цепь электродвигателя с активным сопротивлением  $r$ ; коэффициентами пропорциональности между величиной электромагнитного момента и током якоря  $C_M$  и между ЭДС вращения электродвигателя и его угловой скоростью  $C_E$ ;

– для регулируемых координат:  $n$  – скорость вращения вала двигателя;  $M_{эм}$ ,  $M_c$  – электромагнитный момент двигателя и момент статической нагрузки;  $E_{тп}$ ,  $E_d$  – ЭДС регулируемого источника питания и ЭДС вращения электрической машины.

Коэффициент пропорциональности  $C_M$  можно определить, воспользовавшись

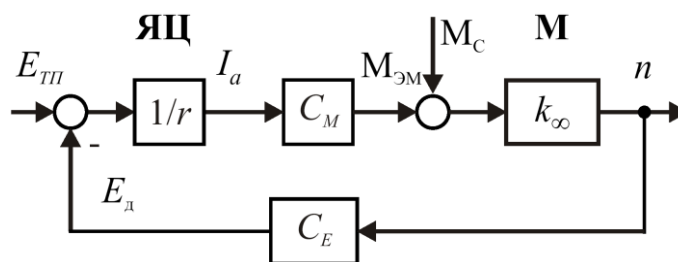


Рис. 4.1. Структурно-топологическая модель СРДНВ

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

выражениями (3.24) и (3.25)

$$C_M = B_\delta \cdot N_a \cdot \frac{D}{2} \cdot l_\delta \cdot k_{cp}, \quad (4.1)$$

где  $N_a$  – число проводников приходящихся на якорную обмотку;  $D$  – диаметр статора;  $l_\delta$  – длина ротора;  $k_{cp}$  – коэффициент, учитывающий пульсации электромагнитного момента;  $B_\delta$  – оценивается приближённо по (3.27).

Коэффициент  $C_E$ , определим из (3.8)

$$C_E = B_\delta \cdot l_\delta \cdot w_\phi \cdot D, \quad (4.2)$$

где  $w_\phi$  – число витков, приходящихся на фазу.

Коэффициенты (3.37) и (3.38) отличаются в  $m_q k_{cp}$ , где  $m_q$  – число фаз, приходящихся на якорь. Заметим, что в двигателях постоянного тока можно полагать  $C_M = C_E$ .

Полученная модель СРДНВ позволяет выполнить электромагнитный расчёт машины. Однако для описания статических и динамических режимов работы требуется учёт совместной работы преобразователя и двигателя, поэтому расчётная модель требует уточнения.

#### 4.2 Оптимизация силовой части электропривода

Попытки решить задачу оптимизации формы линейной плотности поверхностного тока аналитически в общем случае оказываются малоэффективными, а вариации уравнений связи при учёте особенностей питания обмоток статора от вентильных преобразователей с разными схемами силовых цепей исключает получение результата в общем виде.

Традиционные методики расчёта системы электропривода в части постановки и применения оптимизационных процедур слабо используют возможности современной вычислительной техники. Между тем уже сегодня можно назвать ряд удачных применений оптимизационных методов при решении некоторых

задач электромеханики, в частности, в области проектирования электрических машин [4, 68].

При анализе математических моделей было показано, что при решении задач численной оптимизации наиболее удобной оказывается модель, использующая понятие обмоточной функции.

В этом случае обеспечение наилучших массогабаритных показателей с учётом (3.36), (3.42) электропривода может быть учтено введением критерия оптимизации

$$q = \frac{\sum_{j=m}^k I_j \cdot \left( \sum_{i=1}^j I_i + C \right)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2}, \quad (4.3)$$

где  $n$  – число пазов на статоре;  $C$  – постоянная интегрирования.

Критерий (3.66) следует рассматривать при ограничениях:

$$-\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \leq I_{\text{доп}}^2;$$

$$-F \leq F_{\text{нас.}}$$

Функциональные связи между переменными в системе учитывались системой уравнений:

$$-\sum_{i=1}^n I_i = 0;$$

$$-F(x) = \sum_{i=1}^j I_i + C;$$

$$-f_{\tau}(j) = I_j \cdot \left( \sum_{i=1}^j I_i + C \right);$$

$$-F_{\tau} = \sum_{j=m}^k I_j \cdot \left( \sum_{i=1}^j I_i + C \right);$$

$$\begin{aligned}
 f_1(i_1, i_2, \dots, i_n) &= 0 \\
 f_2(i_1, i_2, \dots, i_n) &= 0 \\
 &\dots\dots\dots \\
 f_n(i_1, i_2, \dots, i_n) &= 0.
 \end{aligned}$$

Последние  $n$  уравнений учитывают связи, которые накладывает на форму линейной плотности поверхностного тока силовые цепи электрического преобразователя.

Нами предложена следующая схема алгоритма решения задачи оптимизации (рис. 3.8), которая включает следующие этапы:

- ввод исходной формы кривой линейной плотности поверхностного тока (блок 1);
- вычисление компонент функционала. Здесь вычисляется квадрат

действующего значения тока, согласно выражению  $\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2$  (рис. 3.8, блок 2), где

$n = 6$  выбрали равным числу фаз статора. МДС ( $F_i$ ) вычисляют путём алгебраического сложения фазных токов и последующего приведения результата к нулевому среднему значению так, чтобы абсолютные значения её максимума и минимума были равны. В линейной системе величина индукции в зазоре  $B_{\delta i}$  пропорциональна соответствующему значению МДС, а значит, – величине обмоточной функции (рис. 3.8 блок 3). Текущее значение удельного касательного усилия вычислялось по выражению  $f_{\tau} = I_i \cdot F_i$ . После того как вычисляются площади  $S_1$  и  $S_2$ , ограничивающие соответственно положительные и отрицательные участки кривой  $f_{\tau}$ , вводится поправка на положение кривой обмоточной функции относительно горизонтальной оси (рис. блок 7), и расчёт повторяется, начиная с блока 3, до тех пор, пока не будет выполнено условие (блок 7); в результате получаем значение критерия оптимизации  $q$  и оптимальную величину полюсной дуги  $b$  при данной форме линейной нагрузки;

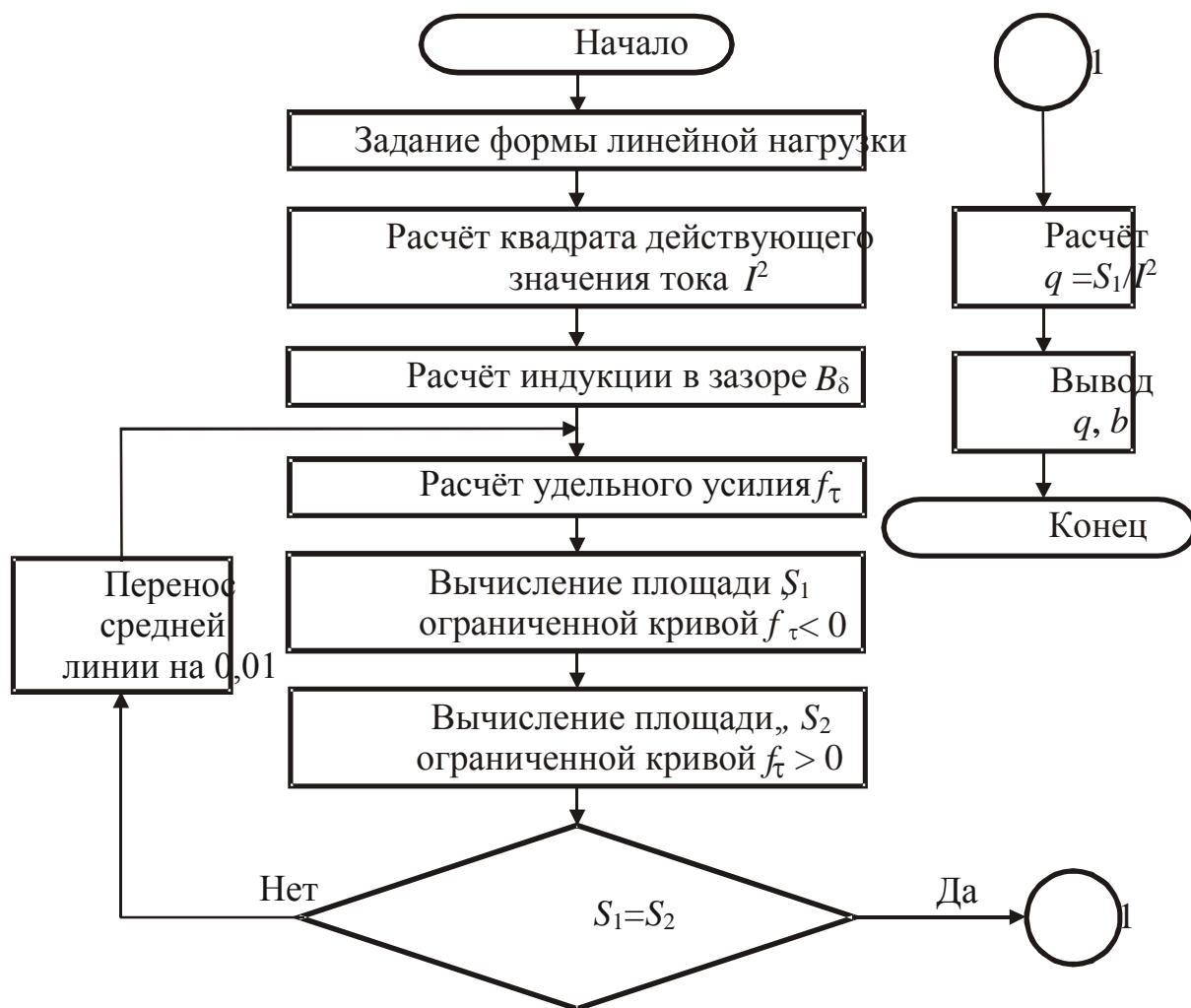


Рис. 4.2. Схема алгоритма оптимизации формы поверхностного тока

-максимизация функционала (3.66). Для этого даётся приращение тока в одной из фаз (положительное и отрицательное относительно исходного) на фиксированную величину. Считаем, что элементарный шаг максимизации успешен, если значение функционала увеличилось, по крайней мере, не уменьшилось. Если элементарный шаг максимизации не удовлетворяет этому условию, то восстанавливаем исходное значение тока в фазе и повторяем элементарный шаг максимизации для другой фазы;

– вывод результатов, где указывается величина показателя оптимизации и величины полюсной дуги.

Программная реализация алгоритма оптимизации выполнена в пакете Borland с [76].

Оптимизация формы линейной плотности поверхностного тока рассматривалась для случаев питания статорных обмоток: от индивидуальных источников питания на каждую фазу (например, однофазный мостовой инвертор); двух параллельно работающих автономных инвертора по трёхфазной мостовой схеме; по схеме при  $120^\circ$  проводимости вентиляей. Для каждого варианта силовой схемы учитывалось насыщение магнитной системы машины, ограничением предельного значения МДС.

В случае, когда каждый пазовый ток мог регулироваться независимо от других, а магнитная цепь электрической машины предполагалась идеально линейной, за исходный график линейной нагрузки принималась прямоугольная форма токов, причём ток возбуждения был равен току якоря. Расчёт показал, что оптимум достигался при равных величинах токов в пазах. При этом относительная величина полюсной дуги  $b = 0,5$ .

При учете насыщения реальная кривая намагничивания 1 электрической машины аппроксимировалась ломаной 2-3 (рис. 3.9), а степень насыщения учитывалась коэффициентом  $k = B_2/B_1$ , где  $B_1$  – индукция в зазоре, которая была бы при идеальной (ненасыщающейся) магнитной системе,  $B_2$  – максимальная реальная индукция в зазоре [36].

В этом случае оптимальной кривой линейной нагрузки оставалась горизонтальная прямая, но оптимальная величина полюсной дуги увеличивалась (рис. 3.10). Величина критерия  $q$  снижалась. Так, при  $B_2/B_1 = 0,5$  показатель  $q$  уменьшился на 42%, а полюсная дуга увеличилась до  $b = 0,63$ .

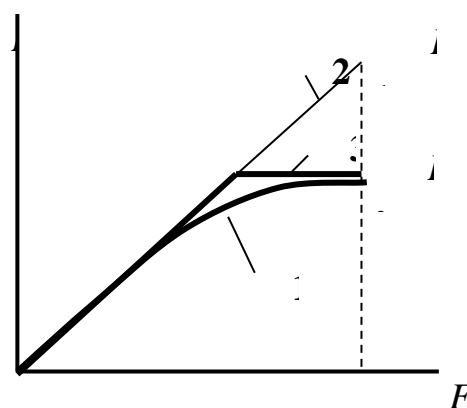


Рис. 4.3. Реальная (1), идеальная (2) и расчетная (3) кривые намагничивания электрической машины

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Весьма распространенной в настоящее время является трехфазная мостовая схема автономного инвертора. В случае шестифазного СРДНВ обмотки фаз статора собираются в две звезды, сдвинутые пространственно на 30 электрических градусов, и подключаются к двум параллельно работающим автономным инверторам. Оптимизация формы линейной нагрузки дала в этом случае следующие результаты. Наибольшее значение показателя  $q$  наблюдается при 180-

градусной проводимости вентилей, правда, этот показатель на 11% ниже, чем в исходной схеме. При этом  $b = 0,5$ . Оптимальная форма полуволны тока фазы статора СРДНВ (рис. 3.11) составлена из трех горизонтальных отрезков

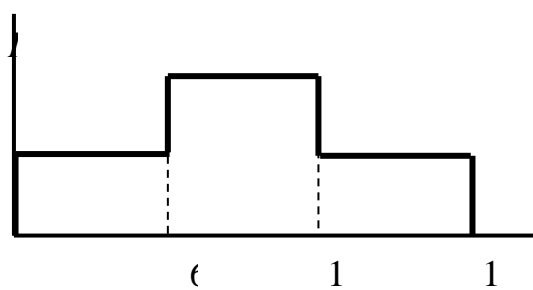


Рис. 4.5. Форма полуволны тока фазы статора СРДНВ при питании от трёхфазного инвертора напряжения

исходным случаем. При этом  $b \approx 0,67$ .

Переход на 120-градусную проводимость вентилей снижает показатель  $q$  эффективности использования двигателя на 19% по сравнению с исходным вариантом.

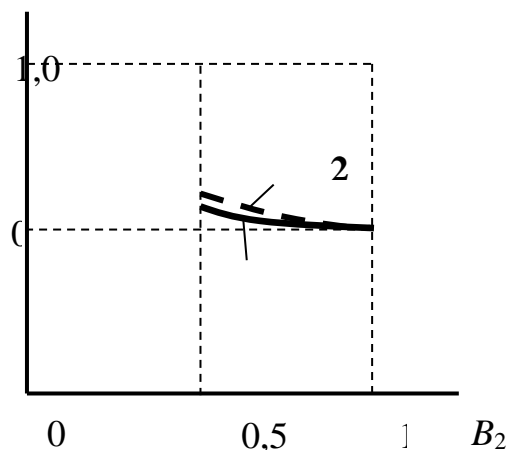


Рис. 4.4. Зависимость полюсной дуги  $b$  от степени насыщения магнитной системы: 1 – при независимом питании обмоток; 2 – при питании обмоток от двух трехфазных инверторов

продолжительностью 60 градусов каждый, при этом средний отрезок в два раза выше крайних, равных между собой по амплитуде. При учете насыщения магнитной системы электродвигателя наблюдается снижение этого показателя. Так, при  $B_2/B_1 = 0,5$  наблюдалось снижение показателя  $q$  почти на 50% по сравнению с

Для того чтобы сравнить СРДНВ с традиционным реактивным двигателем рассмотрен случай, когда последний питается от источника синусоидального напряжения. В этом случае линейная плотность поверхностного тока вдоль расточки статора описывается уравнением

$$A(x) = A_m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right),$$

а МДС согласно (3.18)

$$F(x) = \int A(x) \cdot dx + C = -A_m \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)\right) \cdot \frac{\tau}{\pi}.$$

Удельное касательное усилие вдоль расточки статора определяется выражением:  $f_\tau = A(x) \cdot B_\delta(x)$ . Выбрав длину полюсной дуги  $\alpha_\delta = 0,5$ , найдём электромагнитный момент,

$$\begin{aligned} M &= \frac{D}{2} \cdot l_\delta \cdot \int_0^{2\tau} A(x) \cdot B_\delta(x) \cdot dx = \\ &= \frac{D}{2} \cdot l_\delta \int_0^{2\tau} A_m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \cdot \frac{\tau}{\pi} \cdot A_m \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \cdot \frac{\mu_0}{L_\delta} \cdot dx = \quad (4.4) \\ &= k \cdot A_m^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\tau}{\pi} \cdot \frac{\tau}{2 \cdot \pi} \cdot \cos\left(2 \frac{\pi}{\tau} x\right) \Big|_0^{\tau/2} = k \cdot \frac{A_m^2 \cdot \tau^2}{\pi^2}, \end{aligned}$$

где  $k = \frac{D}{2} \cdot l_\delta \cdot \frac{\mu_0}{L_\delta}$ .

Отношение электромагнитного момента к квадрату амплитуды линейной плотности поверхностного тока

$$q = \frac{M}{A_m^2} = k \cdot \frac{2 \cdot \tau^2}{\pi^2}.$$

Для СРДНВ это отношение равно

$$q = k \cdot \tau^2 \cdot \frac{1}{4}.$$

Таким образом, когда реактивный двигатель питается от источника синусоидального напряжения, его показатель  $q$  снижен на 23%. Учитывая, что синхронные реактивные двигатели в традиционных вариантах использования работают в схемах частотного регулирования (т.е. без датчиков положения

ротора) или непосредственно от нерегулируемой сети переменного тока, где необходимо заботиться о запасе статической устойчивости двигателя, то показатель  $q$  снижается еще, по меньшей мере, в два раза [37].

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

## 5. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С СРДНВ

### 5.1 Постановка задачи синтеза

Синтез системы управления объектом регулирования предполагает выбор структуры и параметров корректирующих связей на основании свойств объекта регулирования и требований со стороны рабочего механизма (технического задания).

Решение задачи синтеза структуры управления возможно с применением различных способов приближённого математического описания объектов управления: структурно-топологических, векторно-матричных, частотно-топологических моделей [37].

В случае, когда объект регулирования малоизучен, резко возрастает интерес к частотно-топологическим моделям разрабатываемых систем электропривода, особенно в тех случаях, когда имеется аппаратура для определения экспериментальных частотных характеристик реальных объектов.

В классе линейных и линеаризованных систем регулирования применение частотных методов анализа и синтеза позволяет иметь простую связь частотной характеристики со структурой и параметрами схемы и её звеньев. Возможность экспериментального определения частотных характеристик исключает порой необходимость определения точного математического описания звеньев. Экспериментальные частотные характеристики звеньев и систем электропривода являются комплексными, интегральными оценками и учитывают реальные взаимосвязи в системе.

Выделим те особенности СРДНВ, которые необходимо учитывать при синтезе структуры регулирования:

- часть статорной обмотки СРДНВ, находящаяся над межполюсным промежутком, образует эквивалентную обмотку возбуждения, а другая, находящаяся над полюсом, – является эквивалентной якорной обмоткой;
- токи, протекающие по обмотке возбуждения, создают поле возбуждения, якорные же токи создают поле реакции якоря;

– электромагнитный момент формируется как результат взаимодействия поля возбуждения, создаваемого эквивалентной обмоткой возбуждения и якорных проводников;

– коммутация токов в эквивалентных обмотках возбуждения и якоря должна выполняться в функции положения ротора.

Для того чтобы регулировать электромагнитный момент, в СРДНВ необходимо уметь изменять величины потока возбуждения и токов якоря. По аналогии с электроприводом постоянного тока регулировать момент двигателя можно воздействием на якорь двигателя при постоянном потоке, т.е. регулируя ток якорной обмотки, при неизменном токе возбуждения.

Применение индивидуальных источников фазных токов позволяет формировать электромагнитный момент аналогично схеме электропривода постоянного тока последовательного возбуждения. При этом удаётся избежать одного из существенных недостатков систем управления электропривода постоянного тока последовательного возбуждения – сложность реализации тормозных режимов и реверса привода.

Так как требования технологического процесса к электроприводу переменного тока остаются в принципе такими же, как и к электроприводу постоянного тока, то для статических режимов работы в большинстве случаев их можно обобщить в виде привычной для приводов постоянного тока желаемой прямоугольной или почти прямоугольной механической характеристики, содержащей два участка (рис.5.1):

– участка 1 поддержания заданного значения скорости в диапазоне допустимого изменения рабочих нагрузок и

– участка 2 ограничения момента при перегрузках электропривода со стороны рабочего механизма.

Как и в электроприводах постоянного тока, наиболее распространённой структурой управления в приводах переменного тока остаётся система подчинённого регулирования, в которой внутренний контур регулирования

момента охвачен внешним контуром регулирования скорости. Такая структура имеет ряд преимуществ:

- универсальность схемы;
- простота расчёта и наладки;
- наименьшая по сравнению с другими схемами чувствительность к изменению параметров звеньев силовой части.

Для схем подчинённого регулирования характерны следующие недостатки: противоречивые условия настройки контуров, возможность возникновения неустранимых колебаний при “больших” воздействиях. Однако эти схемы отличает простота расчёта и наладки, поэтому они получили наиболее широкое распространение в отечественных и зарубежных электроприводах. В связи с этим при синтезе структуры управления электроприводом будем ориентироваться на типовые структуры электропривода постоянного тока.

В отличие от привода постоянного тока, в котором коммутация секций обмотки якоря осуществляется щёточно-коллекторным контактом (коллектор выполняет в машине постоянного тока в двигательном режиме функцию механического инвертора и одновременно является датчиком положения ротора), переключение тока в статорных обмотках СРДНВ осуществляет вентильный преобразователь по сигналам датчика положения ротора.

Требование к точности датчика положения определяться числом фаз машины, так, например, в шестифазном СРДНВ требуемая точность равна 30 электрическим градусам.

Ниже с использованием экспериментальных ЛЧХ рассматриваются динамические свойства объекта регулирования (СРДНВ), варианты функциональных схем исследуемого электропривода, описывается синтез структуры управления. По техническому заданию выполнен опытный

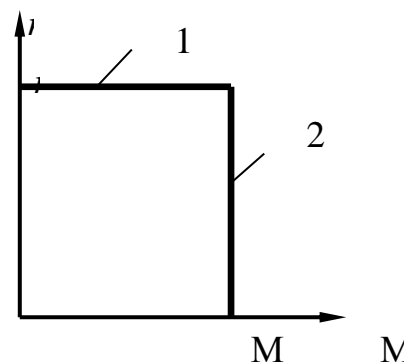


Рис. 5.1. Желаемая механическая характеристика регулируемого электропривода

образец электропривода, на котором исследовались статические характеристики привода, сопоставлялись его динамические характеристики электропривода и асинхронных частотнорегулируемых электроприводов переменного тока.

## 5.2 Функциональные схемы управления СРДНВ

Разнообразие систем управления электроприводом с СРДНВ требует их классификации. Наиболее важными классификационными признаками являются: способ возбуждения, схема силовых цепей и функциональный (рис. 5.2).

Так в зависимости от способа возбуждения СРДНВ система управления электроприводом может иметь несколько вариантов: независимого, последовательного и двухзонного регулирования [38].

Самой простой в наладке является схема независимого возбуждения, т.к. поток возбуждения остаётся постоянным, а следовательно, остаются постоянными

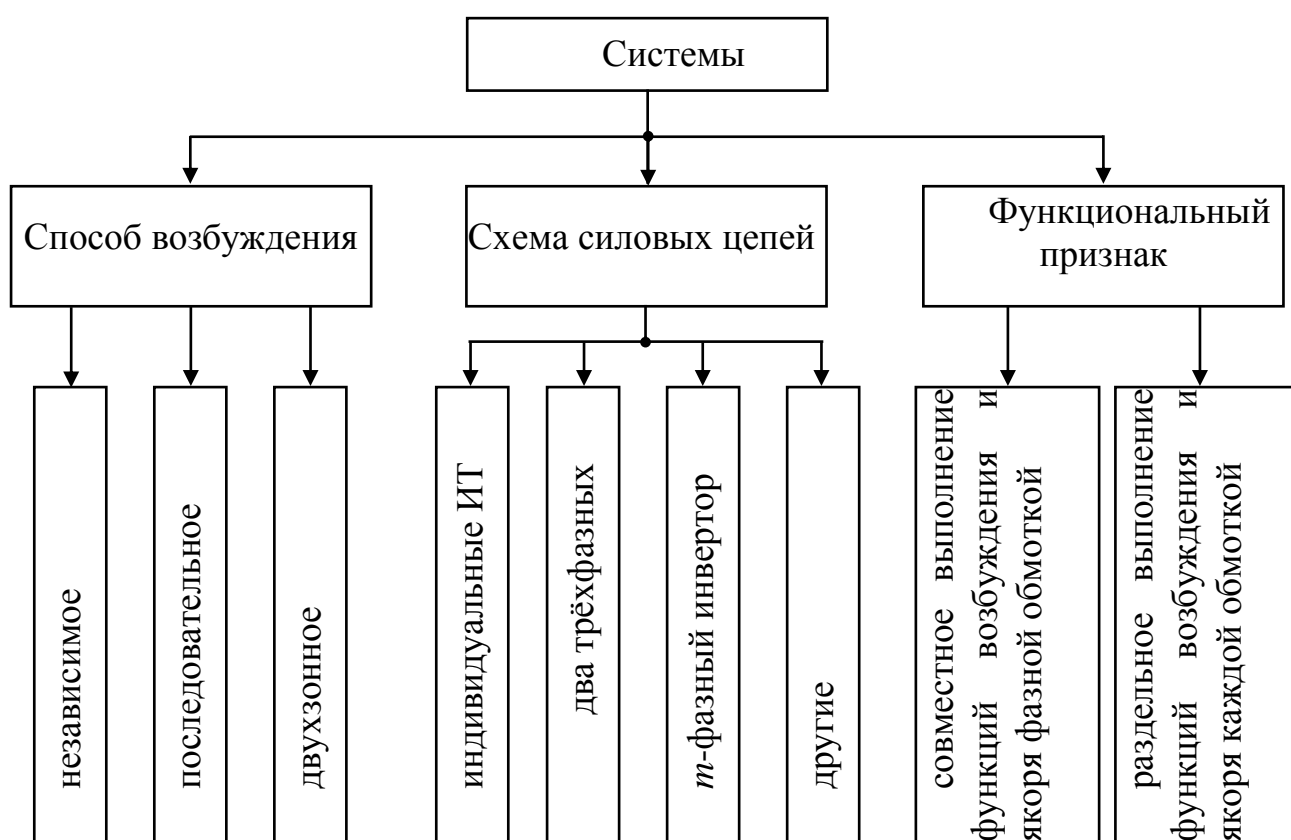


Рис. 5.2. Классификация систем управления электроприводом с СРДНВ

коэффициенты:  $C_M$  – пропорциональности момента якорному току;  $C_E$  – ЭДС скорости. В электроприводах с большим диапазоном изменения момента нагрузки целесообразно включение СРДНВ по схеме последовательного возбуждения. В тех электроприводах, у которых работа на высоких скоростях происходит с уменьшенными значениями момента статической нагрузки, регулирование скорости можно вести ниже основной скорости как в электроприводе с постоянным возбуждением, а при скоростях выше основной ослаблением поля возбуждения. Здесь выгода от ослабления поля двигателя выше основной получается за счёт снижения установленной мощности преобразователя [39].

Фазные обмотки СРДНВ могут подключаться к индивидуальным источникам тока (ИТ). Возможно питание двигателя от двух трёхфазных инверторов (в случае шестифазного СРДНВ). В общем случае  $m$ -фазного двигателя применима схема  $m$ -фазного инвертора.

Наиболее полное использование машины по габаритам даёт схема с индивидуальными источниками питания, но в этом случае число вентиля преобразователя будет максимальным и равным  $4m$  ( $m$  – число фаз). Лучшее использование преобразователя даёт схема с  $m/3$  трёхфазными мостовыми инверторами (при условии, что число фаз машины кратно трём). В данном случае число ключей равно  $2m$ , при этом удельные показатели машины снижаются на 15%. Если число фаз машины не кратно трём, можно применять  $m$ -фазный инвертор. Общее число ключей определяется аналогично  $2m$ . К сожалению,  $m$ -фазные преобразователи в виде единых модулей электротехнической промышленностью серийно не выпускаются [40].

Наконец функциональный признак учитывает конструктивные особенности обмотки машины. В простейшем случае каждая фаза машины выполняет совместно функции возбуждения и якоря. В общем случае, если поставить задачу наиболее полного использования преобразователя по габаритам, более оптимальной может оказаться конструкция СРДНВ со статорными обмотками, выполняющими отдельно функции возбуждения и якоря.



Будем считать, что контур тока, а следовательно, контур косвенного регулирования электромагнитного (при независимом возбуждении) настроен на оптимальное быстроедействие. В этом случае необходимо выполнить настройку контура скорости, которую можно проводить по тому же алгоритму, что и для электроприводов постоянного тока [41, 42].

Тип регулятора скорости определяется требованиями технологического процесса [43]. Если контур регулирования скорости с П-регулятором отвечает требуемой точности поддержания то его следует применять как более простой. В тех случаях, когда требуемая точность оказывается выше необходимо применять более сложный ПИ-регулятор скорости. В любом случае настройка регулятора скорости начинают с П канала, коэффициент которого выбирается по правилу технического оптимума [44, 45]. Предельные же его значения будут ограничены не условиями устойчивости, а наличием оборотных пульсаций с выхода датчика скорости [46]. Как показывает анализ величин возможных допусков при сборке деталей, обеспечивающих механическое сопряжение датчика скорости и выходного вала рабочего механизма, предполагаемые суммарные величины несоосностей валов редуктора и ротора датчика в соответствии с существующими возможностями технологии металлообработки могут составить не менее  $\varepsilon = 0,2$  мм при обработке сопрягаемых деталей шлифовкой, не менее 0,4 мм – при обработке расточкой, доходить до 0,5 мм и более – при токарной обработке. Если предположить соединение валов датчиков через однопальцевую муфту, принять радиус вращения поводка  $R = 10$  мм, то появляется обратная погрешность, имеющая частоту вращения (оборотная погрешность) и амплитуду  $\varepsilon/R \approx 4 \dots 5\%$  [47]. Поданные на вход высокоточной системы регулирования (или системы с высоким быстроедействием), а следовательно, с высоким коэффициентом усиления системы регулирования, эти сигналы приводят к большим вынужденным колебаниям тока якоря при постоянных величинах момента статической нагрузки и скорости вращения привода. Повысить быстроедействие системы, а следовательно, и диапазон регулирования скорости можно применением высокоточных датчиков скорости и специальных муфт, имеющих

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

высокую податливость в осевом и радиальном направлениях, и очень жёстких при передаче крутящего момента [48, 49].

Настройка И-канала регулятора РС осуществляется по правилу симметричного оптимума [50].

Результатом синтеза системы управления является структурная схема электропривода с независимым возбуждением, представленная на рис. 4.10, позволяющая выполнять расчёт установившихся и переходных режимов электропривода.

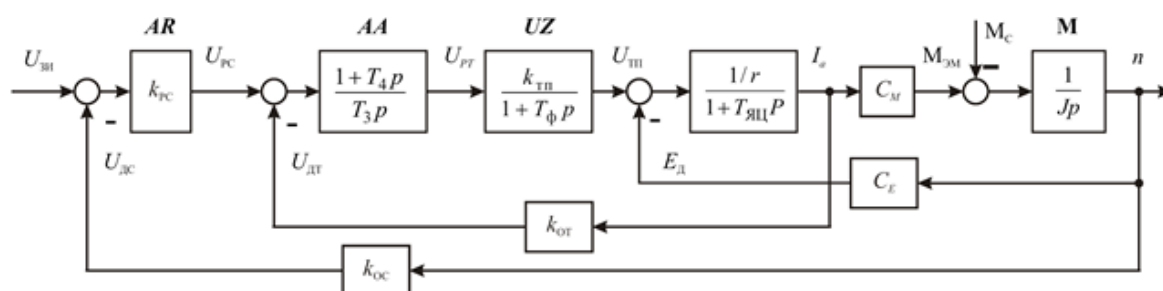


Рис. 4.10. Структурная схема электропривода с СРДНВ

## 5.2 Динамические характеристики СРДНВ

Целью данного п. является дать реальную оценку разработанной системы электропривода. Окончательный, бесспорный ответ может дать эксперимент, учитывающий все особенности привода. Рассматриваемый электропривод имеет много конкурентов, которые являются общепризнанными и имеют высокие динамические показатели [51]. В связи с этим анализ динамических характеристик электропривода с СРДНВ проводился в сравнении с лучшими образцами зарубежных аналогов: Simovert, Unidrive [52].

Современные регулируемые электропривода переменного тока реализуются по схемам с различными способами формирования электромагнитного момента (в полярной системе координат или в декартовой). Обобщённая структурная схема частотнорегулируемого асинхронного электропривода (рис. 4.27) включает в себя РС, контур косвенного регулирования электромагнитного момента двигателя КРМ, звено Д, учитывающее механическую инерцию привода [54, 53]. В звене

КРМ косвенное регулирование момента производится с выделением виртуальных составляющих тока статора:  $I_w$  – активной и  $I_\mu$  – реактивной. Контур регулирования токов  $I_w$  и  $I_\mu$  включены параллельно (рис. 4.27, б). Контур регулирования тока  $I_w$  работает в функции выходного сигнала регулятора РС. Контур регулирования тока  $I_\mu$  чаще включают автономно. Настройка этих контуров производится регуляторами  $PT_w$  и  $PT_\mu$ . Неизменяемая часть каждого из контуров регулирования включает в себя схему управления автономным инвертором, инвертор, асинхронный двигатель и его модель, с помощью которой выделяют (вычисляют) величины [55] сигналов  $I_w$  и  $I_\mu$ .

Испытуемый электропривод содержал асинхронный электродвигатель типа МТФ111-6 (3,5 кВт, 380 В, 895 об/мин), статорные цепи которого подключались к преобразователю частоты SIMOVERT MASTERDRIVES 6SE7021-3EB61 (8,7 кВА, 380 В, 13,2 А) или к преобразователю частоты UNIDRIVE UNI1405 (4 кВт, 380 В, 9,5 А) [56].

Пробный синусоидальный сигнал подавался на свободный вход РС через аналого-цифровой преобразователь АЦП. Выходные сигналы регулятора РС, сигналов задания на токи  $I_{w\text{зад}}$ ,  $I_{\mu\text{зад}}$ , величины виртуальных токов  $I_w$ ,  $I_\mu$  измерялись прибором через цифро-аналоговый преобразователь ЦАП. Измерение скорости производилось цифровым датчиком скорости – энкодером [56, 57].

Экспериментальные ЛЧХ последовательно включенных АЦП-ЦАП (рис. 4.27, в) приведены на рис. 4.28. Они достаточно точно аппроксимируются последовательным соединением звена чистого запаздывания со временем запаздывания  $\tau \approx 5$  мс и двумя апериодическими звеньями с постоянными времени  $T \approx 2,5$  мс [58, 59].

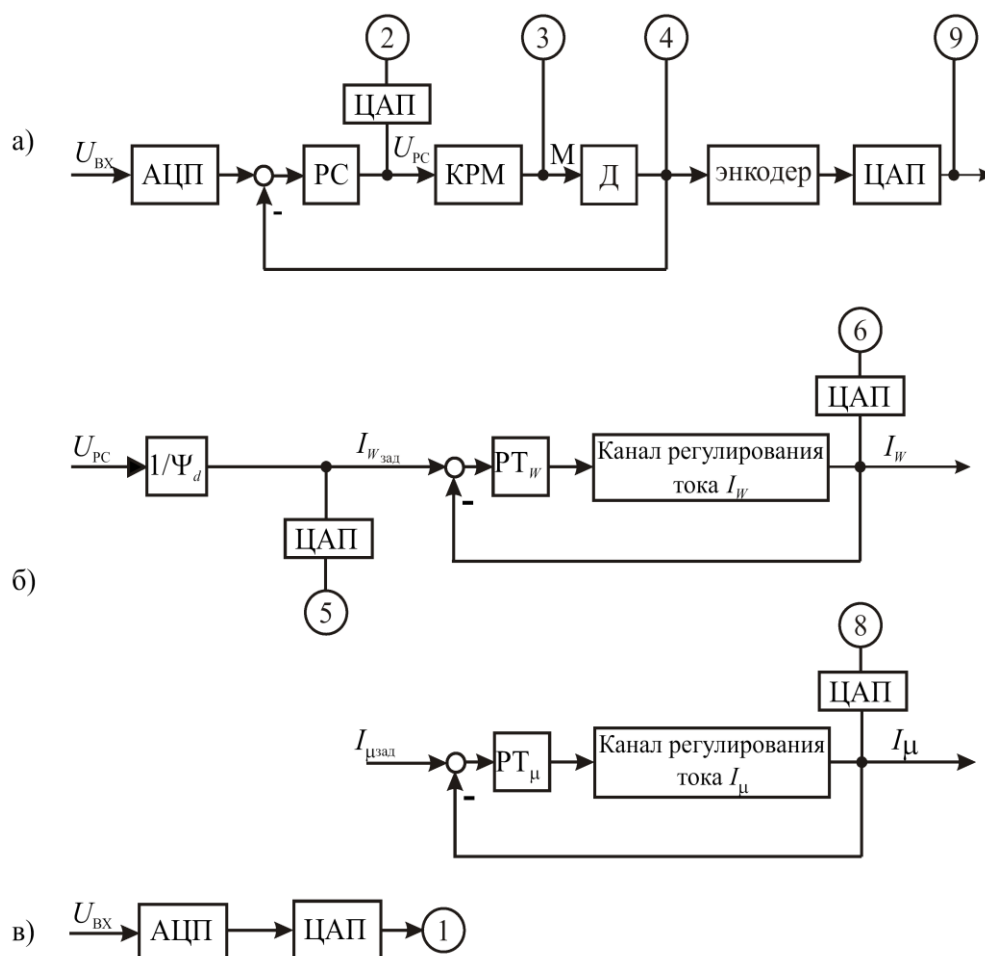


Рис. 5.3. Структурные схемы асинхронных электроприводов, поясняющие метоликув

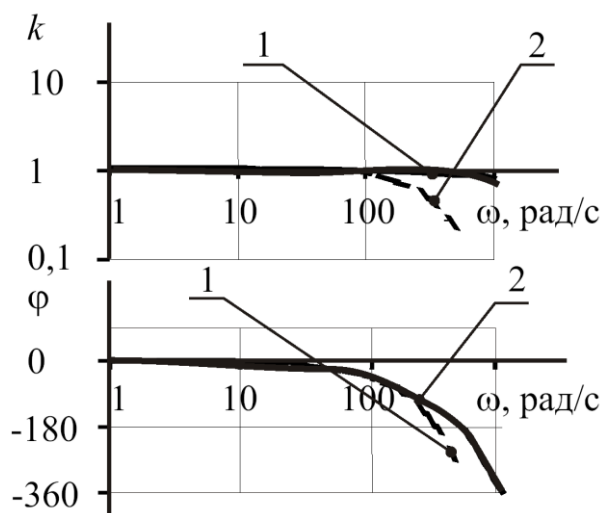


Рис. 5.4. ЛЧХ последовательно соединённых АЦП и ЦАП:  
1 – с преобразователем Simovert;  
2 – с преобразователем Unidrive

ЛЧХ замкнутого контура регулирования тока  $I_w$  (канал  $I_{w\text{зад}} - I_w$ ) имеет полосу равномерного пропускания частот (см. рис.4.29, кривая 1), достигающую до  $\omega \approx 500$  рад/с [60]. Во втором случае ЛЧХ замкнутого контура регулирования (рис. 4.29, кривая 2) ограничена справа меньшими значениями частот  $\omega \approx 120$  рад/с, но это указывает лишь на то, что модель асинхронного двигателя в этом случае составлена более корректно [61].

Наличие эффекта чистого запаздывания на ЛЧХ звеньев и контуров регулирования следует объяснить дискретным характером преобразования сигналов, заложенным в современные системы управления преобразователями частоты. Более того, создаётся впечатление, что сегодня фирмы-изготовители вентиляных преобразователей частоты для приводов переменного тока часто тратят большой объём вычислительных ресурсов программируемых микроконтроллеров на решение (порой избыточных) задач сервиса, а вопросы динамики учитывают недостаточно [62].

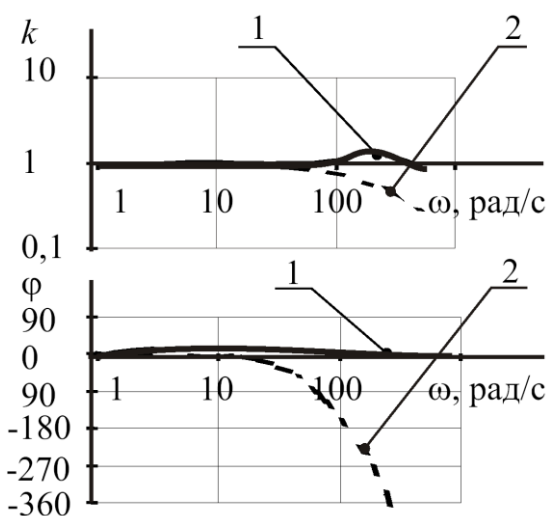


Рис. 5.5. ЛЧХ замкнутого контура регулирования активной составляющей тока  $I_w$ : 1 – Simov-ert; 2 – Unidrive

ЛЧХ контура косвенного регулирования электромагнитного момента СРДНВ получена дифференцированием ЛЧХ разомкнутого контура регулирования скорости (см. рис. 4.4) или, что эквивалентно, сложением ЛЧХ разомкнутого

контура скорости и дифференцирующего звена  $T_{др}$  (где  $T_{д}$  – механическая постоянная двигателя). Результаты исследований показали, что системы управления контуром косвенного регулирования момента (КРМ) в электроприводе с СРДНВ и асинхронных электроприводах имеют близкие динамические показатели как по полосе равномерного пропускания частот ( $\omega_{равн} \approx 200 - 300$  рад/с), так и по диапазону частот, когда фазовая характеристика контура [63] не опускается ниже 180 градусов (отстающих) (рис. 4.30).

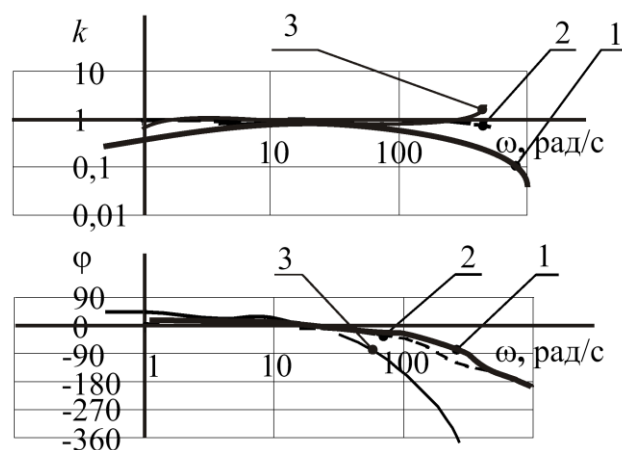


Рис. 5.6. ЛЧХ КРМ:  
1 – СРДНВ; 2 – Simover; 3 – Uni-

Внешние контуры регулирования скорости (КРС) разных вариантов электроприводов имеют близкие значения полосы равномерного пропускания

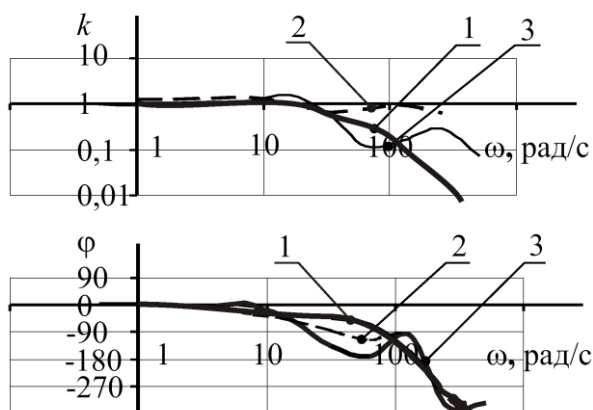


Рис. 5.7. ЛЧХ контура регулирования скорости: 1 – СРДНВ; 2 – Simover; 3 – Unidrive

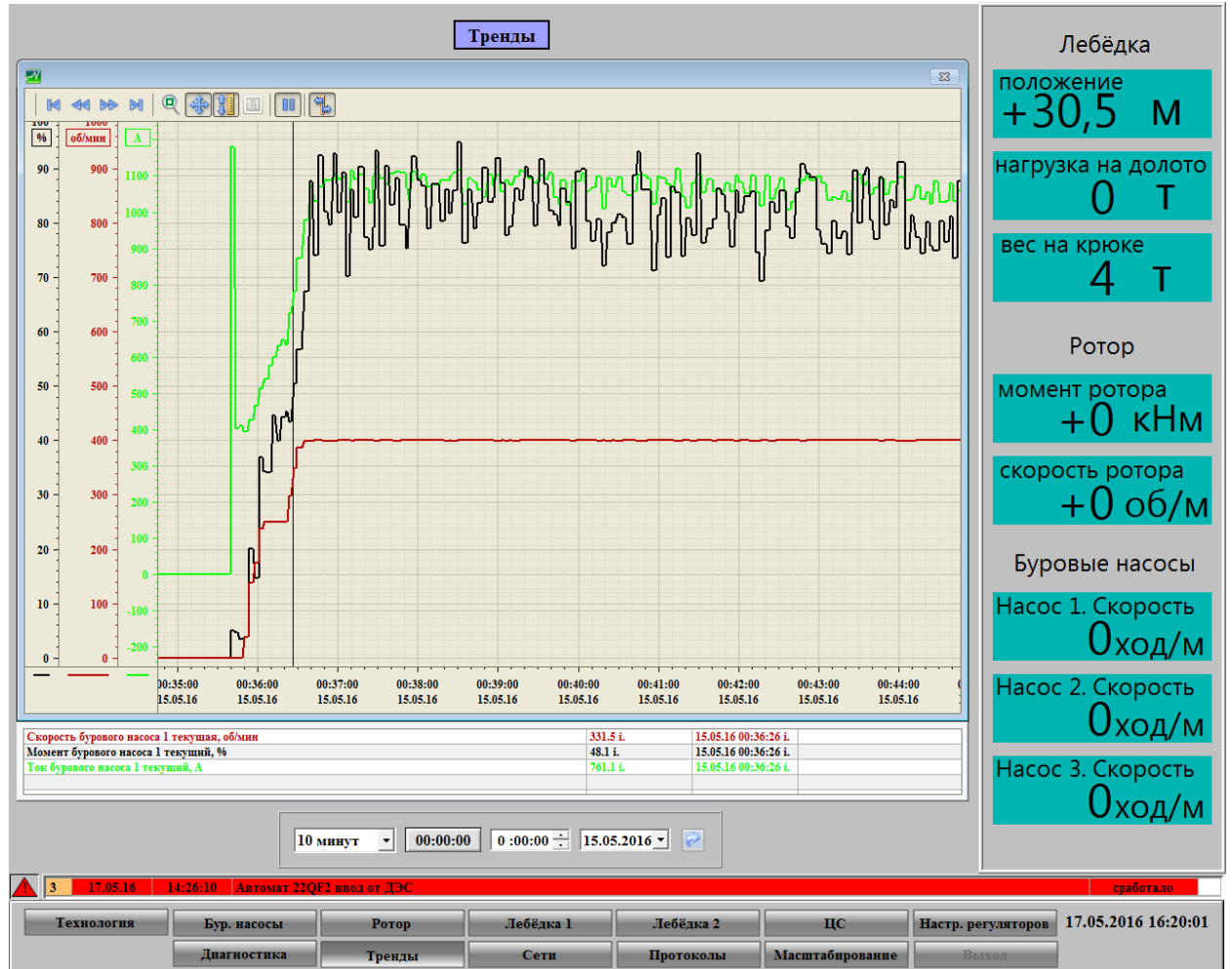
частот (рис. 4.31). Это следует объяснить тем, что на макете были представлены образцы электрических машин, которые имели линейные нагрузки на статоре и геометрические размеры, характерные для серийных асинхронных двигателей [64].

Между тем, в СРДНВ благодаря высокой механической жёсткости ротора можно значительно увеличить  $\lambda$  – отношение длины ротора к диаметру – и

тем самым снизить механическую инерцию ротора [65].

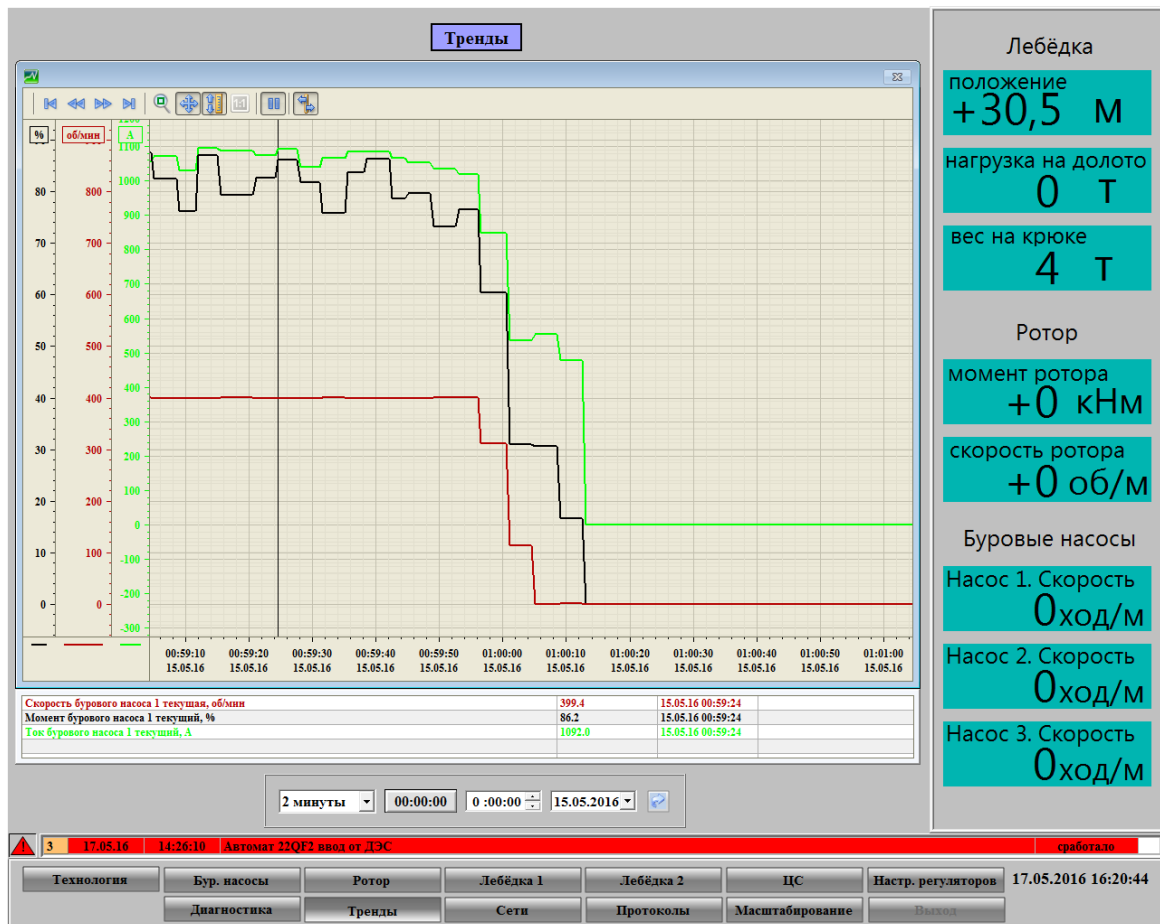
## 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОБЪЕКТЕ

В ходе преддипломной практики в должности инженера-наладчика на объекте БУ-4500 «Уралмаш», были сняты пуско-тормозные режимы работы буровых насосов.



Разгон насоса

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
-----	------	----------	---------	------



Лебёдка

положение  
**+30,5 м**

нагрузка на долото  
**0 Т**

вес на крюке  
**4 Т**

Ротор

момент ротора  
**+0 кНм**

скорость ротора  
**+0 об/м**

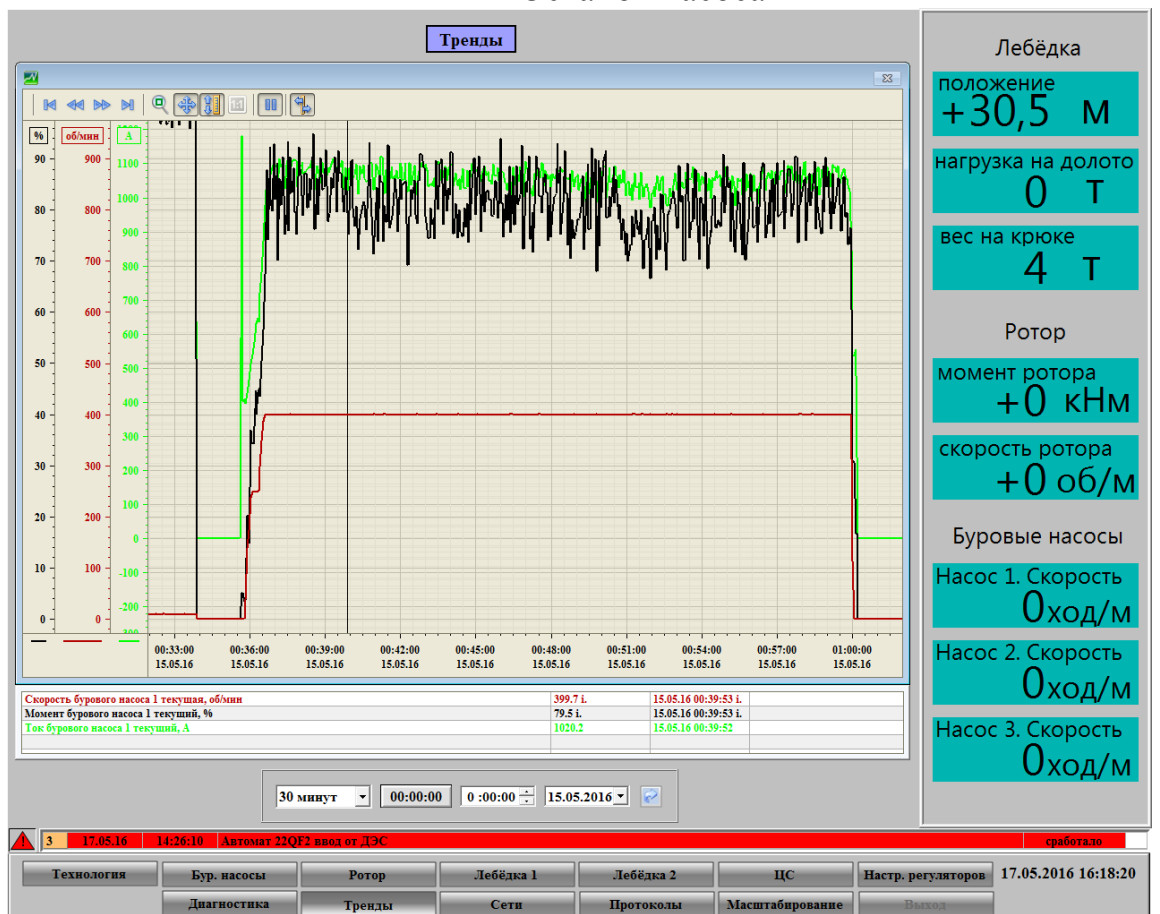
Буровые насосы

Насос 1. Скорость  
**0ход/м**

Насос 2. Скорость  
**0ход/м**

Насос 3. Скорость  
**0ход/м**

### Останов насоса



Лебёдка

положение  
**+30,5 м**

нагрузка на долото  
**0 Т**

вес на крюке  
**4 Т**

Ротор

момент ротора  
**+0 кНм**

скорость ротора  
**+0 об/м**

Буровые насосы

Насос 1. Скорость  
**0ход/м**

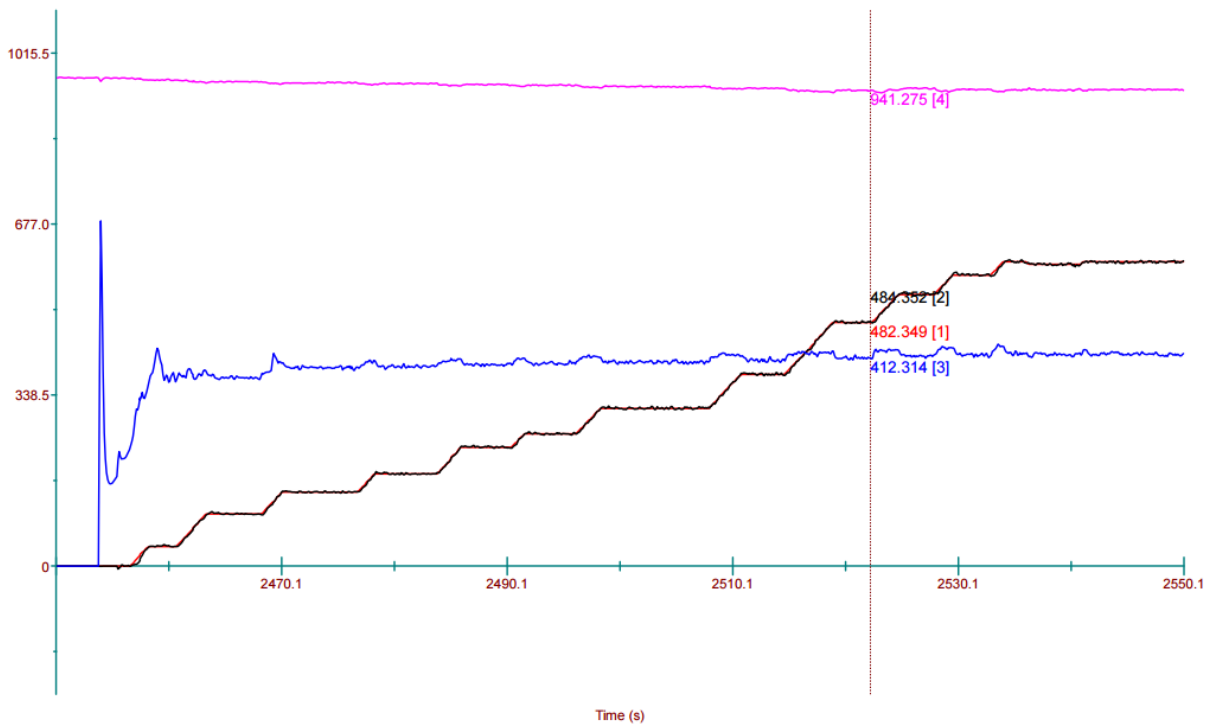
Насос 2. Скорость  
**0ход/м**

Насос 3. Скорость  
**0ход/м**

### Цикл насоса

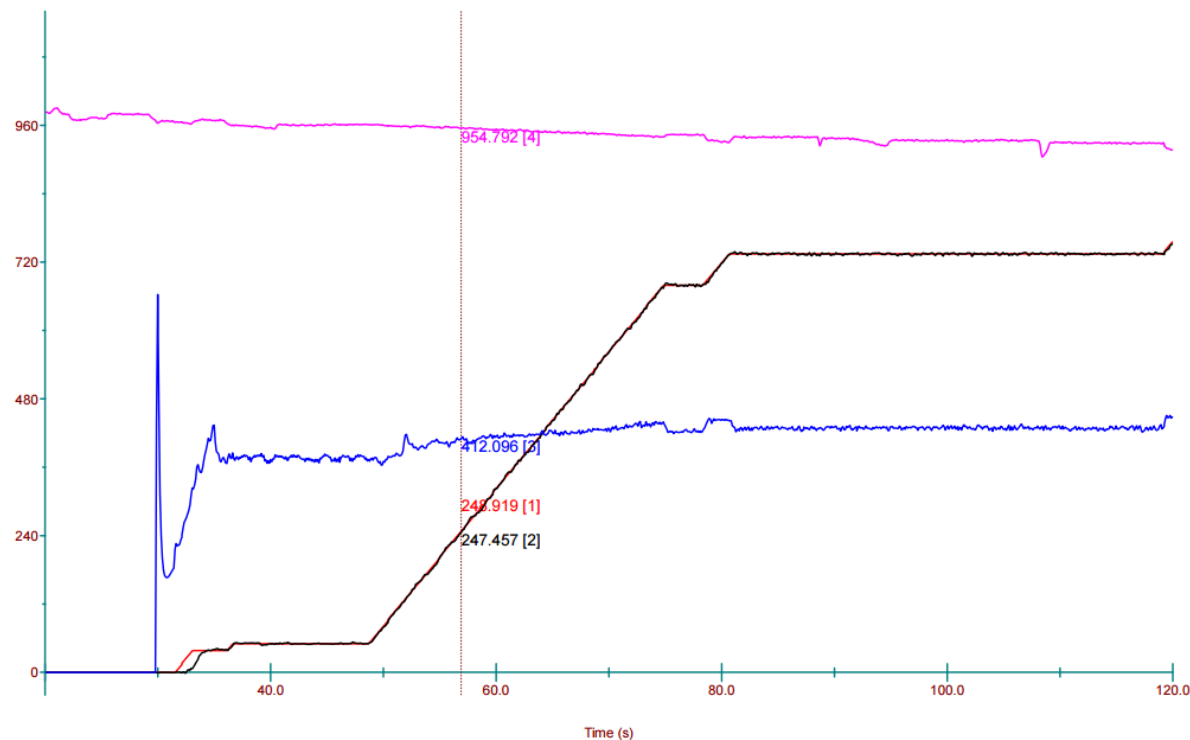
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата





- [1] {0}{12}02.01: SPEED REF 2 [rpm]    - [2] {0}{12}01.02: SPEED ESTIMATED [rpm]    - [3] {0}{12}01.06: MOTOR CURRENT [A]

### Запуск в ручном режиме

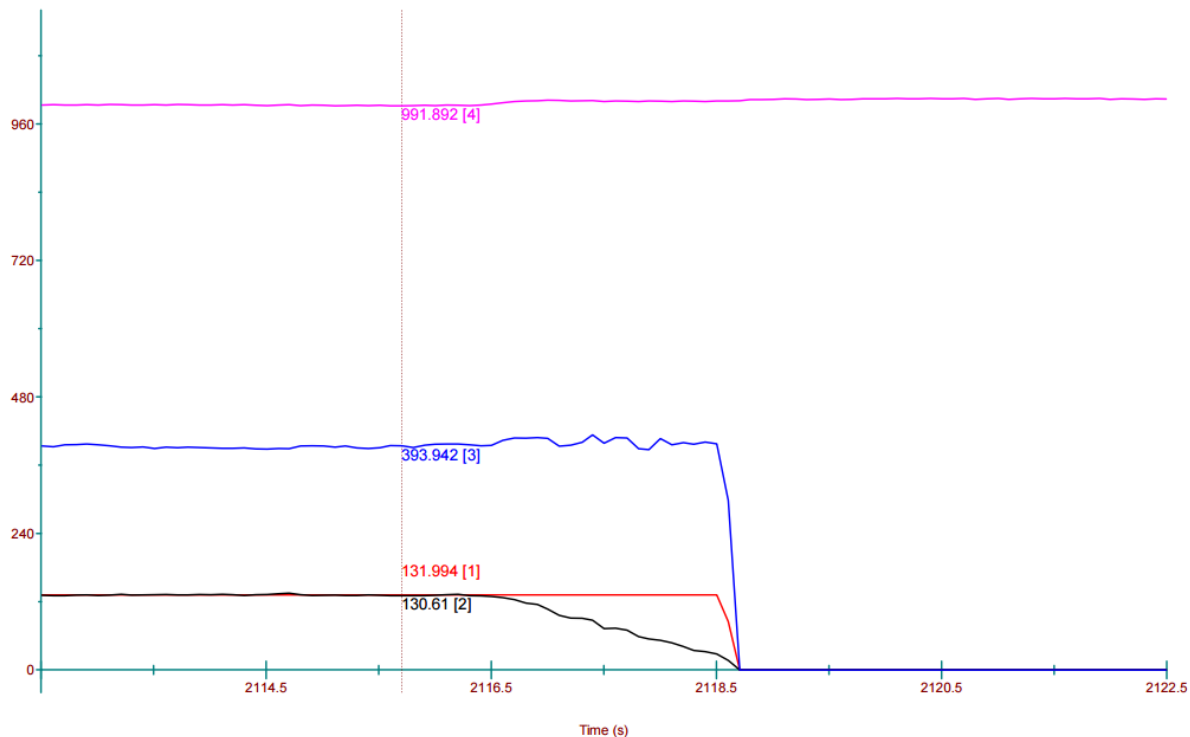


- [1] {0}{13}02.01: SPEED REF 2 [rpm]    - [2] {0}{13}01.02: SPEED ESTIMATED [rpm]    - [3] {0}{13}01.06: MOTOR CURRENT [A]

### Пуск насоса от АСУ

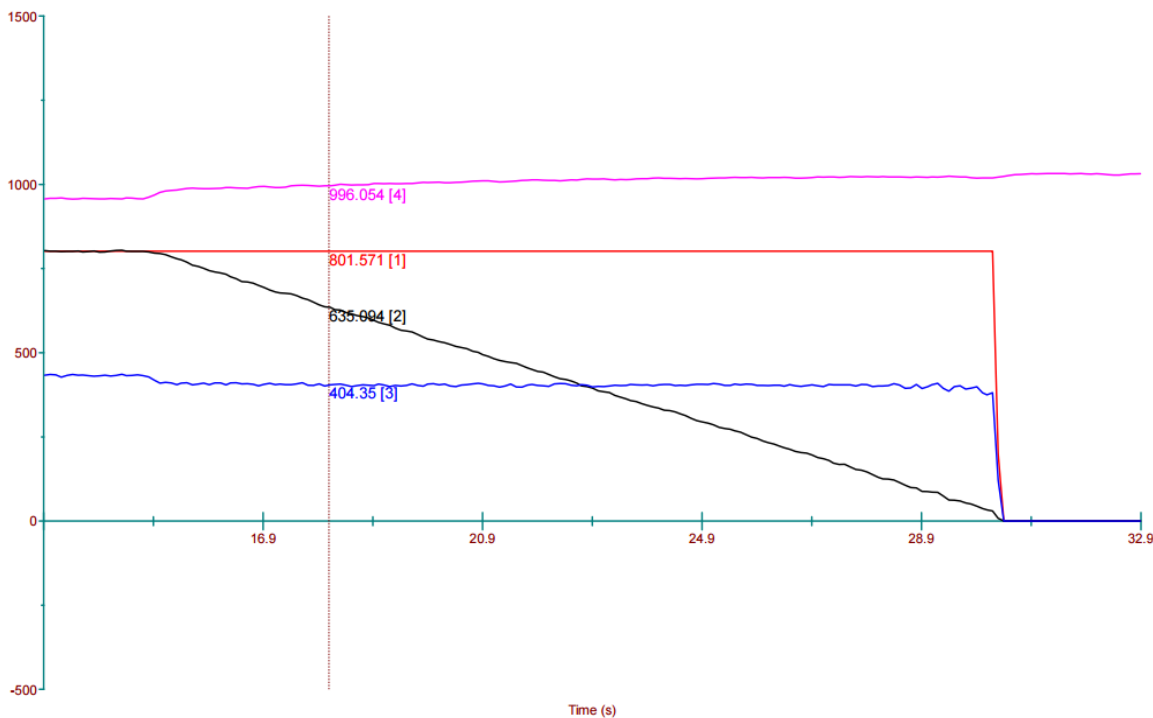
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2017.050.ПЗ



- [1] {0}{13}02.01: SPEED REF 2 [rpm]    - [2] {0}{13}01.02: SPEED ESTIMATED [rpm]    - [3] {0}{13}01.06: MOTOR CURRENT [A]

### Насос останов штатный режим



- [1] {0}{13}02.01: SPEED REF 2 [rpm]    - [2] {0}{13}01.02: SPEED ESTIMATED [rpm]    - [3] {0}{13}01.06: MOTOR CURRENT [A]

### Насос останов на выбеге

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2017.050.ПЗ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью дипломного проекта является модернизация электропривода бурового насоса.

Данный дипломный проект был посвящен электроприводу бурового насоса с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

Были рассмотрены основные технические требования к ЭП бурового насоса.

Проведен анализ работы электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения, синтез систему управления ЭП с СРМНВ.

Следует отметить, оптимизированные синхронные реактивные двигатели занимают промежуточное положение между асинхронными и индукторными двигателями. Как показал обзор литературы, большая часть вариантов улучшения удельных возможностей машины остаётся в классических рамках, и связана с увеличением магнитной несимметрии ротора, при этом законы управления чаще всего остаются синусоидальными. Такие решения способствуют усложнению конструкции машины и не позволяют наиболее оптимально использовать электрическую машину совместно с электрическим преобразователем.

Были выделены конструктивные преимущества машины:

- бесконтактность;
- простая и технологическая конструкция массивного ротора;
- высокая механическая жёсткость ротора;
- “холодный” ротор;
- простая обмотка на статоре.

Выполнен анализ возможных вариантов математических моделей СРДНВ. Показано, что наиболее удобными для решения задач синтеза системы электропривода на базе СРДНВ являются два варианта:

- а) представление СРДНВ обращённой машиной постоянного тока;
- б) модель, использующая понятие обмоточной функции электрической машины.

Получена детализированная структурная схема СРДНВ.

Показано, что расчёт электромагнитного момента СРДНВ можно вести, используя общепринятые методики, разработанные для машин постоянного тока.

Указаны особенности выбора основных параметров машины (главных размеров статора, электромагнитных нагрузок, числа фаз, воздушного зазора, обмоточных данных фазных катушек).

Показано, что СРДНВ имеет весьма высокие величины удельных моментов (по данным эксперимента на **15 – 20%** выше чем у асинхронного двигателя, и на **50%** в сравнении с двигателем постоянного тока), что следует объяснить благоприятными условиями использования электромагнитных материалов, а именно: выбором специальных законов управления фазными токами по сравнению с асинхронным двигателем; и преднамеренным сдвигом физической нейтрали на край полюса, так, что в СРДНВ благоприятно используются все проводники обмотки статора, включая те, которые расположены над межполюсным промежутком по сравнению с двигателем постоянного тока.

Показано, что в электроприводе с СРДНВ предпочтительны структуры систем управления, принятые в регулируемых электроприводах постоянного тока (независимого и последовательного возбуждения). Статические характеристики (механические, регулировочные) этих электроприводов аналогичны соответствующим характеристикам электроприводов постоянного тока.

Теоретически показано и экспериментально проверено, что структуры электропривода на базе СРДНВ по динамическим характеристикам не уступают, а по величине перегрузочного момента (до  $4M_n$  и более) превосходят лучшие зарубежные аналоги электроприводов переменного тока на базе преобразователей: Uni-drive, Simovert.

Электропривод с СРДНВ наиболее перспективен для рабочих механизмов с тяжёлыми условиями эксплуатации, где актуальны такие его преимущества, как бесконтактность, высокая жёсткость вала, большие перегрузки по моменту и высокие регулировочные показатели.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блантер, С. Г. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности / С.Г. Блантер, И.И. Суд. – 2-е изд. перераб. и доп. М., Недра, 1980. – 478 с.
2. Борисов, А.М. Автоматизация технологических процессов (технические средства, проектирование, лабораторный практикум): Учебное пособие./ Н.Е. Лях – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2001. – Ч.1. – 404 с.
3. Каталог продукции ООО «Крановые и рольганговые системы» – Россия, 454000, г. Челябинск: *e-mail*: [mail@kranros.ru](mailto:mail@kranros.ru), <http://www.kranros.ru/> – 19с.
4. Каталог продукции ООО «АББ Индустри и Стройтехника» – Россия, 117861, г. Москва: *e-mail*: [ruibs@ru.abb.com](mailto:ruibs@ru.abb.com), <http://www.abb.ru/ibs> – 310с.
5. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под редакцией Л. Г. Мамиконянца. – 4-е издание, переработанное и дополненное – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., ил.
6. ОСТ 26-02-807 – 73 Основные параметры буровых установок.
7. Программируемый контроллер *Simatic S7-300*. Руководство по работе и программированию.
8. Порожский, К.П. Буровые комплексы: учебное пособие / К.П. Порожский. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. – 768с.
9. Шабанов, В.А. Основы регулируемого электропривода основных механизмов бурения, добычи и транспорта нефти: учебное пособие / В.А. Шабанов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – 156с.
10. Установка буровая «Уралмаш – БУ 4500/270 ЭК – БМ» Электрооборудование, техническое описание и инструкция по эксплуатации. – ПО «Уралмаш» ОГК ЭПА, 1984. – 127с.
11. Энергосберегающие асинхронные двигатели / В.А. Чувашев, С.С. Наливайко, А.В. Шишов и др. // Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 2–11.
12. Кравчик, А. Э. Основные направления совершенствования асинхронных двигателей общего назначения / А. Э. Кравчик, М. В. Андрианов // Лифт, оборуд.: эксплуатация и ремонт. — 2007. № 1-2. - С. 2—4.

					ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

13. Ковалев, Л. К. Синхронные электродвигатели с радиально-тангенциальными магнитами / Л. К. Ковалев, Ю. Ю. Кавун, Д. С. Дежин // Электричество. 2007. - № 11. - С. 16-23.

14. Масленников, В.С. Трапецеидальная форма ЭДС вращения вентильных двигателей / В.С. Масленников // Электротехника. – 2001. – № 8. – С. 25–29.

15. Алиев, И. И. Асинхронный энергосберегающий двигатель / И. И. Алиев // Электротехника. 2001. - № 11. - С. 39-41.

16. Афонин, А. А. Исследование беспазовых электрических машин с постоянными магнитами / А. А. Афонин, В. В. Гребеников // Доп. Нац. АН Украины. -2009.-№5.-С. 99-104.

17. Вольдек, А. И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А. И. Вольдек. Изд. 2-е перераб. и доп. - Л.: Энергия, 1978. 832 с.

18. Голланцев, Ю. А. Пульсации пускового момента вентильного индуктор-но-реактивного двигателя / Ю. А. Голланцев // Электричество. 2003. - № 6. -С. 37-42.

19. Голубев, А. Н. Многофазный синхронный электропривод / А. Н. Голубев, А. А. Лапин // Электричество. 2005. - № 2. - С. 43-47.

20. Голубев, А. Н. Синхронный электропривод в режимах работы с неполным числом фаз / А. Н. Голубев, Ф. И. Сайфульмулюков // Вестник ИГЭУ. -2007.-№4.- С. 77-81.

21. Горожанкин, А.Н. Коммутационные потери в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". 2009. - Выпуск 12. - №34 (167). - С. 56-59.

22. Григорьев, М. А. Вентильный электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения: дис. канд. техн. наук: 05.09.03.: защищена 25.03.04: утв. 25.09.04 / Григорьев Максим Анатольевич. Челябинск, 2004. - 172 с.

23. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: учебник для вузов. В 2 Т. Т. 1 / А. В. Иванов-Смоленский. 3 изд., стереот. - М.: Издательский дом МЭИ. - 2006. 652 с.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

24. Изолированные датчики тока и напряжения. Характеристики. Применение. Расчёты. Тверь, ООО ТВЕЛЕМ. - 29 с.

25. Ильинский, Н. Ф. Журнал "Электричество" и развитие электропривода / Н. Ф. Ильинский // Электричество. 2005. - № 7. - С. 70-72.

26. Ильинский, Н. Ф. Заметки об электроприводе XXI века / Н. Ф. Ильинский // Приводная техника. 2000. - № 1 (23). - С. 20-21.

27. Ильинский, Н. Ф. Перспективы развития регулируемого электропривода / Н. Ф. Ильинский // Электричество. 2003. - № 2. - С. 2-7.

28. Ильинский, Н. Ф. Перспективы применения вентильно-индукторного электропривода в современных технологиях / Н. Ф. Ильинский // Электротехника. 1997. - № 2. - С. 1-3.

29. Ильинский, Н. Ф. Электропривод и энерго- и ресурсосбережение / Н. Ф. Ильинский // Энергосбережение теория и практика: Труды 3 Всероссийской школы-семинара молодых учёных и специалистов, Москва, 21-29 сент., 2006. М.: Изд. дом МЭИ. - 2006. - С. 24-30.

30. Исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода со свойствами живучести / Ю. Н. Дементьев, Г. И. Однокопылов, И. Г. Однокопылов // Изв. вузов. Пробл. энергетики. 2008. - № 9-10, часть 1. - С. 142-150.

31. История электротехники / Акад. электротехн. наук Рос. Федерации; Я. А. Шрайберг, О. Н. Веселовский, К. С. Демирчян и др.; под общ. ред. И. А. Глебова. М.: МЭИ, 1999. - 523-с.:ил.

32. Казаков, Ю. Б. Влияние параметров широтно-импульсного регулирования напряжения на добавочные потери в асинхронном двигателе / Ю. Б. Казаков, В. А. Андреева // Электричество. 2008. - № 9. - С. 39-44.

33. Юпочев, В. И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В. И. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.

34. Ковалев, Е. Д. Элементная база силовой полупроводниковой электроники в России. Состояние и перспективы развития / Е. Д. Ковалев, Ю. А. Евсеев, А. М. Сурма // Электротехника. 2005. - № 8. - С. 3-23.

35. Ковалев, Л. К. Предельные характеристики синхронных машин, с постоянными магнитами и высокотемпературными сверхпроводниковыми элементами в роторе / Л. К. Ковалев, Ю. Ю. Кавун, Д. В. Голованов // Электричество. 2008. -№ 12. - С. 16-23.

36. Кононенко, Е. В. Синхронные реактивные машины / Е. В. Кононенко. М.: Энергия, 1990.

37. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. М.: Высшая школа, 2000. 148 с.

38. Копылов, И. П. Справочник по электрическим машинам. В 2 Т. Т. 1 / И. П. Копылов, Б. К. Клоков М.: Энергоатомиздат, 1988. 456 с.

39. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. М.: Высшая школа, 2000. 607 с.49: Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн,-Т. Корн М: Наука, 1968. 720 с.

40. Кудрявцев, А. В. Современные преобразователи частоты в электроприводе / А. В. Кудрявцев, А. Н. Ладыгин // Приводная техника. 1998. - № 3. -С. 21-28.

41. Линдер, Ш. Силовые полупроводниковые приборы. Обзор и сравнительная оценка / Ш. Линдер // Электротехника. 2007. - № 10. - С. 4—11.

42. Макаров, Л. Н. Совершенствование серийных асинхронных машин в условиях массового производства / Л. Н. Макаров // Электричество. 2005. -№ 7. - С. 62-69.

43. Перспективы развития электромеханики в XXI веке / А. В. Иванов-Смоленский, И. П. Копылов, Е. М. Лопухина и др. // Электротехника. 2000. -№ 8. - С. 1^4.

44. Перспективы разработки и производства стандартных асинхронных электродвигателей / А. Кравчик, О. Кругликов, М. Лазарев и др. // Оборудование.- 2006.-№ 1.-С. 14-18.

45. Плеханов, С. Н. Некоторые вопросы развития современного электропривода / С. Н. Плеханов // Электро: электротехника, электроэнергетика, элек-тротех. промышленность. 2009. - № 1 - С. 39-42.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74



46. Постников, И. М. Проектирование электрических машин / И. М. Постников. Киев: Государственное издательство технической литературы УССР. - 1952. 736 с.

47. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усыгин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". 2010. - Выпуск 13.-№14 (190).-С. 47-51.

48. Проектирование электрических машин: учебн. для вузов. / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2002. 757 с.

49. Развитие регулируемого электропривода с новыми типами машин переменного тока / Л. А. Садовский, В. Л. Виноградов, А. А. Максимов, А. П. Тёмирев // Приводная техника. 2001. - № 2 (30). - С. 35-44.

50. Реактивные высокотемпературные сверхпроводниковые электродвигатели / Л. К. Ковалев, С. М.-А. Конев, К. В. Илюшин и др. // Электричество; -2003.-№9.- С. 31-39.

51. Розанов, Ю. К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники / Ю. К. Розанов // Электричество. 2005. - № 7. - С. 52-61.

52. Садовский, Л. А. Перспективы применения новых типов двигателей в современных регулируемых и следящих электроприводах / Л. А. Садовский // Приводная техника. 2003. - № 2 (42). - С. 31-40.

53. Самосейко, В. Ф. Оценка энергетической эффективности работы электромеханического преобразователя / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер // ЭЭТ: электроника и электрооборудование транспорта. 2009. - № 2-3. - С. 44—46.

54. Сверхпроводимость в электромеханике и электроэнергетике / В. С. Высоцкий, В. Е. Сытников, К. В. Илюшин и др. // Электричество. 2005. - № 7. -С. 31-40.

55. Статор синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин //

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2007. - С. 114-117.

56. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". 2008. - Выпуск 9. - №11 (111). - С. 52-53.

57. Усынин, Ю. С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие. / Ю. С. Усынин. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. - 358 с.

58. Усынин, Ю. С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю. С. Усынин, М. А. Григорьев, К. М. Виноградов // Электричество. 2007. - №3 - С. 21-26

59. Шабаев, В. А. Анализ источников шума вентильно-индукторного двигателя / В. А. Шабаев // Электротехника. 2005. - № 5. - С. 62-64.

60. Шмитц, Н. Введение в электромеханику / Н. Шмитц Д. Новотный // Пер. с англ. -М.: Энергия, 1969. 366 с.

61. Шумов, Ю. Н. Состояние и тенденции развития электрических машин средней и большой мощности / Ю. Н. Шумов // Приводная техника. 2009. -№ 1.-С. 32-43.

62. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю. С. Усынин, Н. Д. Монюшко, М. А. Григорьев, Г. В. Караваев// Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». Вып. 1. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. - № 1. - С. 70-76.

63. Энергосберегающие асинхронные двигатели / В. А. Чувашев, С. С. Наливайко, А. В. Шишов и др. // Электромеханика. 2009. - № 5. - С. 2-11.

64. Weh, H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output / H. Weh // Electrical Machines Institute of the Technical University of Braunschweig. 1984. - Bd. 6. - P. 135-144.

65. Law, D. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine / D. Law, A. Chertok, T. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications. 1994. -Vol. 30.-№5.-P. 1185-1192.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

66. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part I: Model Development / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion. 1996. - № 1. - Vol. 11. - P. 49-56.

67. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part II: Saturation Modeling and Results / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion. 1996. - № 1. - Vol. 11. - P.56-62.

68. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/24. Синхронная реактивная машина / Ю. С. Усынин, М. А. Григорьев, К. М. Виноградов, А. Н. Горожанкин, С. А. Чупин № 2007126685/09; заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4.

69. Глухов, Д. М. Моделирование работы многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах эксплуатации / Д. М. Глухов, О. О. Муравлёва // Томский политех, ун-т. 2006. 13 с.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2017.050.ПЗ</i>	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77