

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ»

На правах рукописи

Соловьев Андрей Михайлович

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЫХ РАБОТ НА
ТВЕРДЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ ПУТЕМ ОСВОЕНИЯ И
МОДЕРНИЗАЦИИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА

Специальность

25.00.14 - «Технология и техника геологоразведочных работ»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –

Заслуженный деятель науки РФ,

доктор технических наук,

профессор А.М. Лимитовский

Москва 2016 г.

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Анализ привода буровых установок на твердые полезные ископаемые и основные задачи исследования в повышении его эффективности.....	9
§ 1 Анализ привода буровых установок на твердые полезные ископаемые.....	9
§ 2 Анализ систем плавно-регулируемого привода буровых установок.....	14
§ 3 Анализ научных трудов в области плавно-регулируемого электропривода в бурении на твердые полезные ископаемые. Задачи исследования.....	30
Глава 2. Математическая модель системы привода с частотно-регулируемым двигателем.....	35
§ 1 Управление частотой вращения регулируемого электропривода с асинхронным двигателем.....	35
§ 2 Электромеханическое преобразование энергии в двигателе привода, работающего от полигармонического источника напряжения.....	41
§ 3 Анализ схемы замещения регулируемого АД для i- ой гармоники выходного напряжения АИН.....	47
§ 4 Потери и КПД частотно-регулируемого АД	55
§ 5 Построение компьютерной модели на базе программной среды Matlab	57
§ 6 Анализ энергопотребления привода при бурении.....	60
Глава 3. Экспериментальные исследования буровых установок УКБ-4 и ЗИФ-650 оснащенных частотно-регулируемым электроприводом.....	66
§ 1 Цели, задачи и оборудование натурального эксперимента	66
§ 2 Исследования электропривода УКБ-4.....	68

§ 3 Методика эксперимента	74
§ 4 Исследования электропривода ЗИФ-650.....	77
§ 5 Результаты экспериментальных исследований	78
Глава 4. Техничко-экономическая эффективность использования частотно-регулируемого привода в бурении.....	85
§ 1 Методические основы технико-экономической оценки затрат на энергообеспечение буровых работ	85
§ 2 Основные зависимости для подсчета суммы приведенных затрат....	86
§ 3 Системы энергоснабжения геологоразведочных работ и их технико-экономические модели.....	88
§ 4 Обоснование исходных параметров и задачи техничко-экономического исследования.....	91
§ 5 Составление математических моделей затрат	93
§ 6 Анализ результатов математического моделирования приведенных затрат по вариантам	100
Заключение и основные выводы.....	105
Список литературы.....	107

УДК 622.24:621.3:33

Введение

В настоящее время основной объем геологоразведочных работ выполняется буровым способом. Без бурения не обходится разведка практически ни одного вида полезных ископаемых как твердых, так жидких и газообразных. Широкое распространение получили несколько видов бурения в зависимости от поставленных задач, но наибольшее распространение получил вращательный способ. Он может применяться практически для всех видов скважин.

Техническими средствами для проведения вращательного бурения в зависимости от стадии геологоразведочных работ могут служить различные буровые установки:

- На стадии предварительной разведки месторождений полезных ископаемых из-за слабой освоенности районов и рассредоточенности коммуникаций, в основном, применяются самоходные буровые установки или передвижные установки с приводом от двигателя внутреннего сгорания (ДВС), реже с гидроприводом. (УРБ 2А2, УРБ 3АМ, УРБ-5АГ, БА15, ПБУ-1200ППГП и др.)[51]
- На стадии детальной или эксплуатационной разведки месторождений полезных ископаемых в большинстве случаев (около 70%) используются буровые установки с электроприводом (УКБ-4, УКБ-5,ЗИФ-1200МР и др).

Особенности электрической энергии дают преимущества электроприводу, применяемому в бурении: возможность экономичной передачи электроэнергии на большие расстояния, простота распределения электроэнергии между потребителями, проста преобразования в иные виды (тепловую, механическую, световую). Кроме того электропривод экономически выгоден: замена ДВС электроприводом, питающимся от региональных энергосистем, при колонковом бурении увеличивает производительность труда на 30%, а годовые затраты на ремонт электродвигателей снижаются в десятки раз по сравнению с затратами на ремонт дизелей той же мощности.[64]

Объем разведочного бурения в Российской Федерации находится на уровне 1,5-2 миллионов погонных метров в год [34] и имеет тенденцию к росту, а энергозатраты на бурение исчисляются десятками миллионов киловатт-часов и могут достигать половины всех затрат на проведение геолого-разведочных работ.

Известно, что энергосбережение это наиболее дешевый и безопасный способ увеличения энергогенерирующих мощностей. Затраты на экономию 1 кВт мощности обходятся 4-5 раз дешевле, по сравнению со стоимостью вновь вводимого 1 кВт мощности.[46]

В соответствии с Энергетической стратегией России снижение удельной энергоемкости производства является важнейшим стратегическим направлением и одним из ключевых принципов, без реализации которого не может быть обеспечен прогнозируемый рост экономики страны. В соответствии с расчетными параметрами Энергетической стратегии России удельная энергоемкость ВВП должна снизиться по отношению к уровню 2000 года на 45-55% к 2020 году [34], что относится и к геологоразведочной отрасли.

Поэтому оптимизация привода в части снижения энергозатрат на бурение погонного метра скважины является актуальным направлением, особенно сейчас, в условиях роста стоимости отпускаемой электроэнергии и стоимости за её подключение в случае питания от региональной ЛЭП.

Целью данной работы является: повышение энергетических параметров буровой установки на базе плавно-регулируемого электропривода.

Идея работы: снижение энергозатрат буровых работ на твердые полезные ископаемые посредством освоения и модернизации частотно регулируемого привода.

Главным направлением повышения эффективности привода буровых установок является использование плавно-регулируемого автоматизированного электропривода постоянного или переменного тока.

Основные задачи повышения эффективности привода буровых установок – увеличение производительности установки: ускорение спускоподъемных операций, плавное регулирование частоты вращения; снижение стоимости работ: повышение надежности установки, снижение энергопотребления.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Модернизация традиционного асинхронного электропривода буровых установок на твердые полезные ископаемые с целью повышения его энергетических параметров должна производиться на основе плавного регулирования частоты вращения с учетом особенностей производства геологоразведочных работ посредством освоения преобразователей частоты со звеном постоянного тока.

2. Разработанная математическая модель частотно регулируемого асинхронного привода обеспечивает построение электромеханических характеристик, отражающих изменение основных энергетических параметров, в том числе коэффициента полезного действия в зависимости от изменения нагрузки на двигателе.

3. Замена традиционного асинхронного привода с механической редукцией на частотно регулируемый обеспечивает:

- Снижение уровня пусковых токов в среднем в 5-6 раз что стабилизирует работу системы энергообеспечения особенно соизмеримой с потребителем мощности
- Повышение коэффициента мощности - $\cos(\varphi)$ до 15% и снижение тем самым потерь электроэнергии
- Повышение коэффициента полезного действия до 15% и снижение приведенных затрат на энергоснабжение

в случае централизованного электроснабжения до 10%

в случае локального электроснабжения до 20%.

Достоверность и обоснованность научных выводов, положений и технико-технологических решений основана на применении математических методов исследований, доказана достаточным фактическим материалом и высокой сходимостью полученных экспериментальных результатов с результатами полученными методом математического моделирования.

Научная новизна:

- 1) Установлена закономерность снижения пусковых токов при замене традиционного электропривода буровой установки на плавно-регулируемый, а так же возможность удержания их в пределах номинальных значений;
- 2) Установлены зависимости изменения основных энергетических параметров ($\cos(\varphi)$, КПД, потребляемые токи, напряжение и мощность) от нагрузки в системах традиционного и плавно-регулируемого привода буровой установки УКБ-4;
- 3) Установлены зависимости снижения затрат на энергообеспечение за счет использования плавно-регулируемого привода буровых установок при системах локального и централизованного электроснабжения.

Практическая ценность работы заключена в том, что в результате аналитических и экспериментальных исследований:

- обоснована целесообразность и перспективность использования частотно-регулируемого электропривода на буровых работах;
- разработана методика экономической оценки эффективности использования частотно-регулируемого электропривода на буровых установках.
- разработана математическая модель позволяющая определить энергетические параметры всего бурового станка при использовании частотно-регулируемого электропривода.

Публикации по теме диссертации: результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 13 работах, в том числе 6 работ из перечня научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю – доктору технических наук, профессору Лимитовскому А.М. за постоянное внимание и неоценимую помощь в выполнении данной диссертации, всему коллективу кафедры «Механизации, автоматизации и энергетики горных и геологоразведочных работ» МГРИ-РГГРУ.

Глава 1. Анализ привода буровых установок на твердые полезные ископаемые и основные задачи исследования в повышении его эффективности

§ 1 Анализ привода буровых установок на твердые полезные ископаемые

Привод эксплуатируемых в отрасли буровых установок на твердые полезные ископаемые (ТПИ) представлен электродвигателями, двигателями внутреннего сгорания и гидравлическими двигателями.

К приводу вращателя буровой установки предъявляются противоречивые требования. С целью предотвращения обрыва колонны при возможных прихватах требуется мягкая характеристика привода, которая обеспечит значительное снижение частоты вращения буровой колонны в аварийных ситуациях. С другой стороны, технология бурения требует постоянства скорости вращения породоразрушающего инструмента при изменяющемся моменте, без чего невозможно обеспечить оптимальный режим работ и высокую производительность. Регулирование частоты вращения двигателя при этом осуществляется исходя из условий постоянства крутящего момента.

Ввиду высокой мобильности, привод от дизеля или иного двигателя внутреннего сгорания применяется на стадиях предварительной разведки и поиска месторождений полезных ископаемых в силу низкой освоенности района и рассредоточенности коммуникаций, а также в условиях города.

Однако такой привод имеет несколько существенных недостатков: низкий моторесурс по сравнению с электроприводом, что значительно увеличивает стоимость ремонтов и обслуживания буровых установок; низкую экономичность – сравнительно высокое удельное потребление топлива на единицу мощности; ступенчатое регулирование скорости вращения исполнительного механизма, что не позволяет точно соблюдать технологический режим бурения и максимально использовать мощность двигателя привода; загрязнение воздушного бассейна ядовитыми и вредными продуктами горения; низкие динамические свойства при

переменных режимах работы; высоки уровень шума (до 100 дБ , что выше допустимой нормы - 85 дБ) снижает трудоспособность буровой бригады и производительность труда; сравнительно высокую пожароопасность.[21] (Отмечено, что количество пожаров на буровых установках с дизелем в 4—5 раз больше, чем с электроприводом. [3])

Годовые затраты на ремонт дизеля в 30—35 раз больше годовых затрат на ремонт электродвигателя той же мощности. Трансмиссия станка, включающая в себя раздаточную коробку, угловой редуктор, клиноременную передачу и вал с карданными сочленениями, является узлом с пониженной надежностью. Вибрации дизеля и трансмиссии, накладываясь на вибрации системы станок — буровой снаряд, повышают вероятность попадания в зоны резонансных вибраций, что резко снижает производительность бурения и увеличивает износ оборудования. Жесткое сочленение дизеля и станка при динамических режимах в период спускоподъемных операций ведет к перегрузке узлов дизеля, закоксовыванию поршневых колец, обрыву поршня, клапанов и т. д. Опыт эксплуатации показывает, что моторесурс дизеля, работающего в электростанции с электромагнитной связью на станок в 1,5— 2 раза выше, чем при непосредственной связи со станком. [3]

Дизельные варианты привода буровых установок легче электроагрегатных (дизельная электростанция и буровая с электроприводом) на 7—20%, однако это практически не сказывается на расходах по перемещению. К. п. д. электроагрегатных установок ниже, чем у дизельных из-за двойного преобразования энергии (механической в электрическую и наоборот), но они имеют более экономичные дизели, что ведет к снижению расхода топлива. Амортизационные отчисления на электроагрегаты в 2—3 раза меньше, чем на дизельный привод. Электромагнитное звено генератор — электродвигатель снижает ударные нагрузки на дизель электростанции.[101]

Гидропривод обычно применяется на самоходных буровых установках. Он имеет хорошие динамические параметры, низкий удельный вес и обеспечивает

плавное регулирование частоты вращения буровой колонны, но имеет пониженный КПД из-за особенностей своей конструкции – двигатель внутреннего сгорания (или электродвигатель), приводит в действие насос, который через гидropередачу передает энергию гидромотору. Такой привод имеет ряд недостатков: высокую сложность конструкции и повышенную цену, сложность ремонтов и обслуживания; нагрев и утечки рабочей жидкости (что иногда требует применения средств тепловой защиты и специальных охлаждающих устройств), особенно при высоких значениях давления; необходимость обеспечения защиты от проникновения в рабочую жидкость воздуха, а так же обеспечения её чистоты в процессе эксплуатации.[12]

Геолого-технические условия бурения скважин характеризуются большим разнообразием, обусловленным непостоянством физико-механических свойств буримой среды. Поэтому при бурении применяется породоразрушающий инструмент широкого ассортимента. Для его эффективного использования необходимо учитывать рациональные технологические режимы работы в породах всех разновидностей. Для обеспечения эффективности процесса разрушения буримых пород при различных типах породоразрушающего инструмента буровой станок должен обладать широким диапазоном скорости вращения шпинделя.[44]

Нижняя граница диапазона скорости вращения шпинделя определяется:

- режимом приработки режущих элементов буровой коронки,
- необходимостью малых частот вращения шпинделя при производстве ловильных и вспомогательных работ,
- необходимостью малых частот вращения, при бурении горных пород, характеризующихся плохой способностью к кернаобразованию.

Исходя из этого, нижняя граница частоты вращения современного бурового станка должна находиться в пределах 10— 15 об/мин, что практически осуществимо только при плавно-регулируемом приводе.[44]

Верхняя граница частоты вращения шпинделя бурового станка в значительной степени определяет его производительность. Исследования,

проведенные ВИТР и другими организациями, показывают, что механическая скорость бурения алмазными коронками находится в прямой зависимости от частоты вращения бурового снаряда в диапазоне от 180 до 2000 об/мин. Так, испытания, проведенные ВИТР в Кировоградской области еще при Советском Союзе, показали, что увеличение частоты вращения бурильного вала с 200 до 1300 об/мин приводит к увеличению механической скорости бурения с 1,2 до 4,2 м/ч, т. е. в 3,5 раза [77].

Для современных буровых установок отечественного производства верхняя граница частоты вращения бурового снаряда принята 1500 об/мин [100], исходя из требований прочности бурильной колонны и резкого возрастания необходимой приводной мощности. Усовершенствование конструкции бурильной колонны, уменьшение диаметра бурового снаряда, применение смазок и другие прогрессивные направления усовершенствования бурового инструмента не снимают с повестки дня требование увеличения отдаваемой приводом мощности. Регулируемый электропривод позволяет максимально использовать установленную мощность двигателя, что создает значительный резерв повышения производительности.

В Российской Федерации в бурении на твердые полезные ископаемые наибольшее распространение получил привод, на базе асинхронных короткозамкнутых электродвигателей, момент вращения которых передается рабочим органам через коробку передач.[11]

Асинхронный двигатель экономичен, прост по конструкции, надежен в эксплуатации и имеет высокую перегрузочную способность ($\lambda = 2,5-3,5$). Он значительно легче и дешевле двигателя постоянного тока и двигателя внутреннего сгорания той же мощности.[54]

Но такие системы в настоящее время не могут полностью удовлетворить возросшие требования технологии бурения, поскольку не обеспечивают плавного изменения частоты вращения рабочих органов, а следовательно, не позволяют[100]:

- максимально использовать мощность приводного двигателя ;
- обеспечить плавный пуск двигателя ;
- исключить динамические перегрузки ;
- обеспечить легкий выход из зон резонансных колебаний ;
- создать оптимальные условия для очистки скважины в процессе бурения ;
- обеспечить оптимальный расход электроэнергии.

Кроме того переключение передач производится при остановленном буровом станке, следовательно, динамические нагрузки и ускорения в узлах станка определяются продолжительностью проскальзывания муфты сцепления при ее включении.

Длительное проскальзывание ограничивает ускорения, но при этом в муфте сцепления выделяется значительное количество тепла, что является причиной быстрого выхода ее из строя. При малом времени проскальзывания муфты сцепления разгон от 0 до 1500 об/мин вызовет динамические нагрузки, опасные для деталей станка и особенно алмазной коронки, весьма чувствительной к ударным нагрузкам.[100,94]

Известно, что система буровой станок — буровой снаряд в процессе работы при определенных частотах попадает в зону резонансных колебаний, что значительно увеличивает потребляемую мощность и динамические нагрузки на станок и буровой снаряд. Это особенно опасно в случае использования алмазных коронок. Выход из зон резонансных колебаний возможен в существующих станках путем переключения на низшую передачу, что приводит к значительному снижению производительности бурения. Увеличение диапазона скорости вращения бурового снаряда, приводит к увеличению количества зон резонансных колебаний.

Применение регулируемого привода обеспечивает легкий выход из зон резонансных колебаний путем изменения частоты вращения на 30—40 об/мин, что практически не снижает производительность бурения. Отмечены случаи,

когда для выхода из зон резонансных колебаний достаточно было резко увеличить частоту вращения бурового снаряда и затем плавно вернуться на то же число оборотов.[94]

Главное направление устранения этих недостатков - разработка и применение автоматизированного плавно-регулируемого электропривода.

§ 2 Анализ систем плавно-регулируемого привода буровых установок

Задача плавного регулирования скорости вращения бурового снаряда может быть решена с помощью гидропривода, механического вариатора или регулируемого электропривода.

В настоящее время часто применяется плавное регулирование скорости вращения буровых установок с помощью гидравлических, электромагнитных или механических вариаторов – это позволяет точно подобрать значение подачи и обеспечить требуемый технологический режим бурения, но современные вариаторы имеют существенный недостаток – сравнительно низкий коэффициент полезного действия, по сравнению с плавно-регулируемым электроприводом.[75]

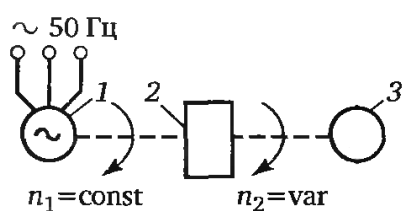


Рис. 1.1. Привод с вариатором частоты вращения:

1 – электродвигатель; 2 – вариатор; 3 – буровой станок.

Такие приводы состоят из нерегулируемого асинхронного короткозамкнутого или синхронного электродвигателя и приспособления, преобразующего неизменную скорость вращения электродвигателя в переменную скорость вращения шпинделя бурового станка (рис. 1.1). К этим устройствам принадлежат гидравлические и механические вариаторы, электромагнитные и гидравлические муфты скольжения различных

ТИПОВ.

Главным преимуществом таких электроприводов является их низкая стоимость, а так же возможность использования надежных и простых нерегулируемых электродвигателей любого типа (асинхронных с короткозамкнутым ротором, синхронных и др.).

Недостатком этой группы электроприводов является наличие потерь скольжения.

Привод с электромагнитными муфтами скольжения.

В приводе буровых установок в ряде случаев используются электромагнитные муфты скольжения индукторного типа (ИМС), которые являются основным элементом

электропривода. Индукторная муфта скольжения (рис. 1.2) состоит из индуктора с обмоткой возбуждения и якоря. Обмотка возбуждения получает питание от источника постоянного или выпрямленного тока. Якорь ИМС соединен с асинхронным короткозамкнутым (или синхронным) электродвигателем, а индуктор — с механизмом (насосом или буровым станком). Якорь и индуктор изготавливаются из массивных отливок и поковок. Вращающий момент от двигателя к насосу передается через электромагнитное поле в зазоре между якорем и индуктором. Частота вращения буровой установки регулируется изменением тока возбуждения ИМС.[61]

Процесс регулирования частоты вращения любого механизма удобно анализировать с помощью механических характеристик. Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его вращающего момента от частоты вращения.

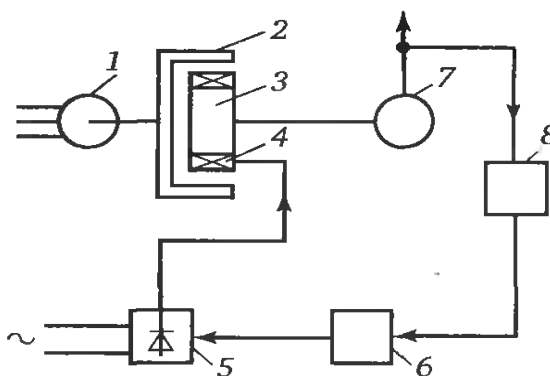


Рис. 1.2. Регулируемый электропривод с электромагнитной муфтой скольжения индукторного типа (ИМС):

1 – электродвигатель; 2 – якорь ИМС; 3 – индуктор ИМС; 4 – обмотка ИМС; 5 – возбуждатель ИМС(управляемый выпрямитель); 6 – блок автоматики; 7 – буровой станок; 8 – датчик скорости вращения.

Механические характеристики ИМС для разных значения тока возбуждения представлены на рис. 1.3. Характерной особенностью ИМС является наличие

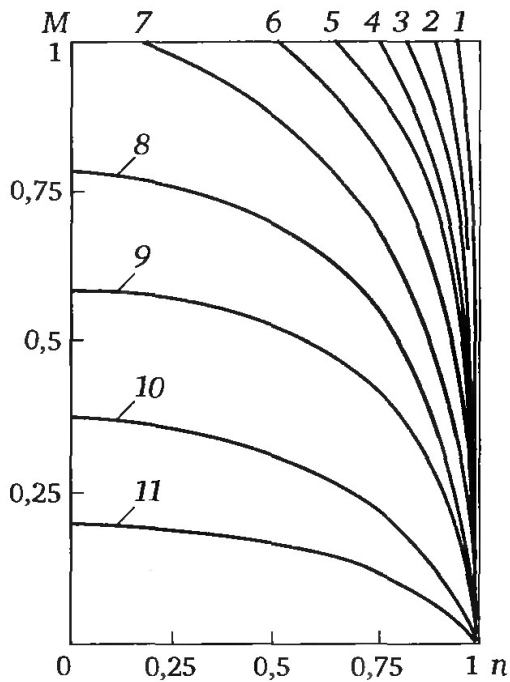


Рис. 1.3. Механические характеристики ИМС:

1 — при номинальном токе возбуждения; 2-11 — при токе возбуждения, равном 0,9; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05 номинального значения соответственно.

потерь скольжения, которые выделяются в виде тепла в якоре ИМС. Это тепло в ИМС с передающим моментом до 2кН·м (200 кгс·м) отводится обычно воздушным охлаждением, а при передаваемых моментах больше 5 кН·м (500 кгс·м) устраивается водяное охлаждение.

ИМС возможно использовать в электроприводе мощностью до 250 кВт, а сравнительно низкая стоимость ИМС делает экономически выгодным их применение в некоторых случаях. Но в целом, по отрасли такие приводы не нашли широкого распространения, т.к. имеют высокие потери при регулировании, а следовательно низкий КПД.

Привод с

гидромуфтами. Гидравлическая муфта (ГМ) состоит из двух колес: турбинного и насосного, помещенных в общую полость, заполненную машинным маслом (рис. 1.4). Турбинное (ведомое) колесо через механическую передачу соединяется с буровым станком, а насосное (ведущее) колесо — с электродвигателем, частота вращения которого практически постоянна. Частота вращения ведомого колеса изменяется в зависимости от степени заполнения полости муфты рабочей жидкостью (маслом).[21]

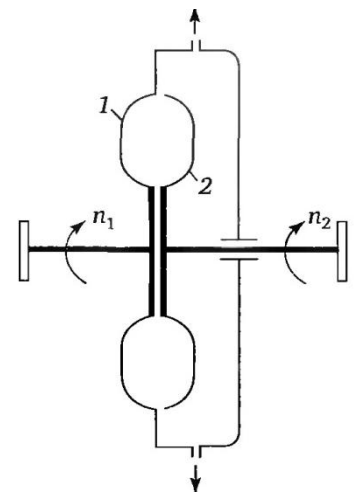


Рис. 1.4. Гидромуфта:

1 — ведущее колесо;
2 — ведомое колесо.

На рис. 1.5 показаны механические характеристики ГМ. Обращает на себя внимание наличие неустойчивой зоны работы ГМ (участок, ограниченный линиями $a-b$ и $d-c$), обусловленной скачкообразными переформированиями

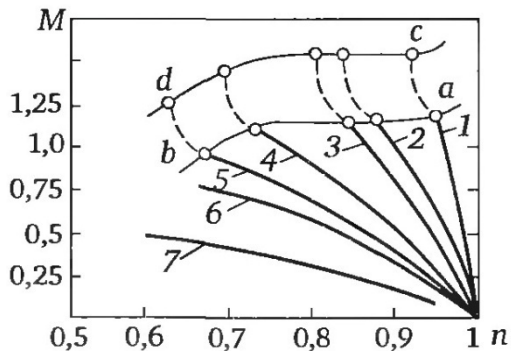


Рис. 1.5. Механические характеристики гидромуфты:

1 — при номинальном расходе жидкости; 2-7 — при пониженном расходе жидкости.

потока жидкости в ГМ под действием центробежных сил. Чтобы буровой станок работал устойчиво, механическая характеристика бурового станка должна располагаться ниже зоны неустойчивой работы. Это обстоятельство следует учитывать при выборе ГМ. В процессе регулирования частоты вращения ГМ так же, как и электромагнитная муфта, работает со скольжением, поэтому электроприводы с ГМ по своим энергетическим характеристикам аналогичны приводу с электромагнитной

муфтой скольжения или электроприводу с дополнительными резисторами в цепи ротора фазного асинхронного электродвигателя.

Потери скольжения нагревают рабочую жидкость (масло), поэтому для отвода тепла в состав ГМ включают холодильники. К недостаткам ГМ относится также сложность конструкции, обусловленная необходимостью подавать рабочую жидкость (масло) во вращающиеся полости насосного и турбинного колес.

Поскольку габариты ГМ так же, как и ИМС, зависят от передаваемого момента, а момент обратно пропорционален номинальной частоте вращения электропривода, применение ГМ целесообразно преимущественно в буровых установках с высокими значениями частоты вращения — в алмазном бурении. В этом случае ГМ получаются довольно компактными.

Разновидностью ГМ является гидравлический вариатор скорости с многодисковой муфтой скольжения.

По энергетическим характеристикам вариатор аналогичен гидромуфте, электромагнитной муфте скольжения и другим регулируемым приводам, работающим с потерями скольжения.[61]

Основным отличием гидравлического вариатора скорости от ИМС и ГМ является его способность работать без скольжения при соответствующем повышении давления масла в системе управления.

Электропривод с механическими вариаторами. Существуют вариаторы различных типов: лобовые, шаровые, торцовые и т.д.

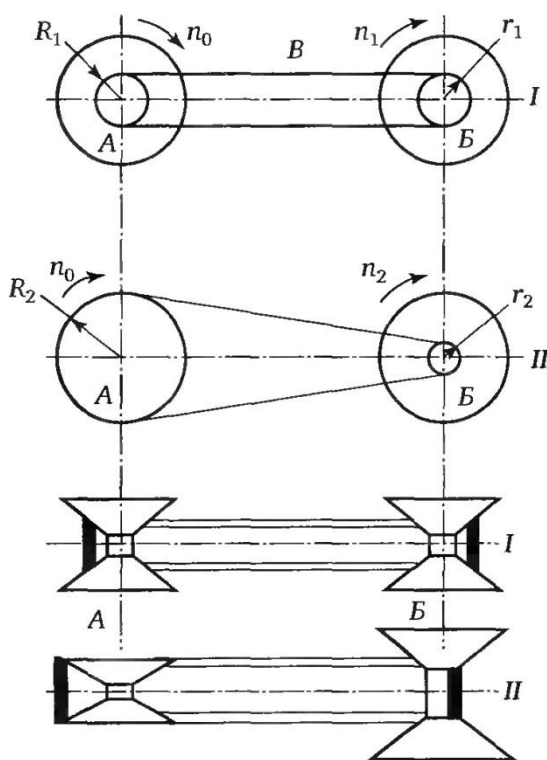


Рис. 1.6. Клиноременный вариатор с раздвижными конусами:

A – ведущий шкив; *B* – ведомый шкив; *B* – ремень.

вращения ведомого шкива:

В буровых установках в большинстве случаев используются клиноременные вариаторы с раздвижными конусами. Основными элементами вариатора являются ведущий и ведомый шкивы, а также бесконечный клиновой ремень. Каждый из шкивов состоит из пары раздвижных конусов. Когда одну пару раздвигают, другая сдвигается. При этом ремень так перемещается в конусах, что рабочий радиус одной пары уменьшается, а другой — увеличивается. За счет этого изменяется передаточное отношение вариатора и осуществляется регулирование частоты вращения бурового станка при неизменной частоте вращения электродвигателя. Частота

$$n = \frac{n_0 \zeta R}{r}$$

где n_0 — постоянная частота вращения ведущего шкива; R — рабочий радиус ведущего шкива; r — то же ведомого шкива; ζ — коэффициент, учитывающий

проскальзывание (до 0,97). На рис. 1.6 вариатор показан в двух положениях. В нейтральном положении I расстояния между конусами одинаковы, $R_1 = r_1$ следовательно, $n_1 = n_0$. Когда конусы ведомого шкива раздвигаются, конусы ведущего сдвигаются (положение II), при этом рабочие радиусы изменяются: $R_2 > r_1$, а следовательно $n_2 > n_0$. Когда конусы ведущего шкива раздвигаются и сближаются конусы ведомого шкива, то $n_2 < n_0$. Передаточное отношение таких вариаторов обеспечивает диапазон изменения частоты вращения механизма в пределах до 1:8—1:12. Передаваемая мощность привода с вариаторами не превышает обычно 100—200 кВт.[61]

Потери мощности в вариаторах такого типа составляют 4—7% в зависимости от мощности и глубины регулирования.

Исследования многих организаций показывают, что наиболее распространенные в мировой практике фрикционные вариаторы имеют ограниченный диапазон регулирования, сложны в изготовлении и срок службы их слишком мал. [61]

Гидротрансформаторы и гидродвигатели получили широкое распространение в зарубежной практике благодаря малой массе на единицу мощности, компактности и хорошим механическим характеристикам, обеспечивающим требованиям технологии бурения. В гидросистемах с объемным регулированием просто осуществляется реверсирование, они имеют широкий диапазон и высокую плавность регулирования. К недостаткам гидропривода можно отнести трудоемкость и сложность в изготовлении, небольшой ресурс работы и сравнительно низкую надежность. Наличие дополнительной гидравлической передачи между двигателем и исполнительным механизмом обуславливает сниженное значение коэффициента полезного действия по сравнению с плавно-регулируемым электроприводом.

Наиболее плавно и просто регулирование скорости вращения исполнительного механизма достигается при использовании в качестве привода **электродвигателей постоянного тока**.

На рисунке 1.7 представлены механические характеристики: жесткая - двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением (1) и мягкая - двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением (2).[62]

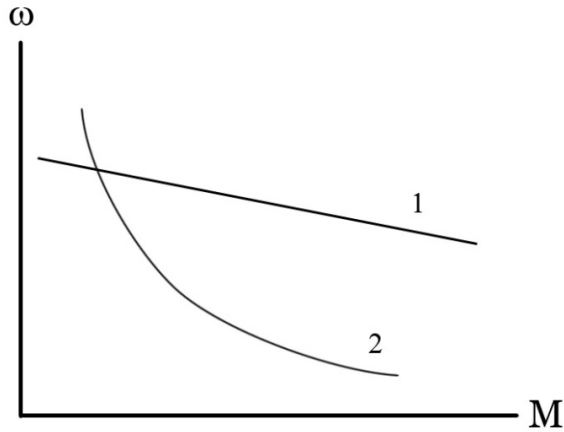


Рис. 1.7. Механические характеристики двигателей постоянного тока

Существуют и другие разновидности характеристик. Например, механическая характеристика электродвигателя постоянного тока со смешанным возбуждением занимает промежуточное положение между характеристиками электродвигателей с параллельным и последовательным возбуждением.

Из механических характеристик видно, что при приложении нагрузки скорость вращения изменяется меньше всего у двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением, что обеспечивает практически неизменную скорость вращения бурового снаряда при возникновении динамических нагрузок в процессе бурения.

Если в процессе регулирования тем или иным способом изменить механическую характеристику, например сделать ее более мягкой за счет введения дополнительного резистора в роторную цепь электродвигателя, момент вращения электродвигателя станет меньше момента сопротивления. Под воздействием отрицательного динамического момента буровой станок начинает работать с замедлением до тех пор, пока вращающий момент и момент сопротивления опять не уравновесятся. Таким образом, процесс регулирования частоты вращения бурового станка непрерывно сопровождается изменениями вращающего момента электродвигателя и момента на буровом снаряде.

Частота вращения двигателей постоянного тока изменяется путем изменения величины питающего напряжения цепи статора, изменением сопротивления цепи якоря и изменением магнитного потока (тока возбуждения) электродвигателя.[62]

Регулирование с помощью введения в якорную цепь дополнительного резистора применяется редко по причине своей неэкономичности. В добавочном резисторе теряется мощность:

$$P_a = I_a^2 R_d,$$

где I_a – ток якорной цепи, А; R_d – сопротивление добавочного резистора, Ом.

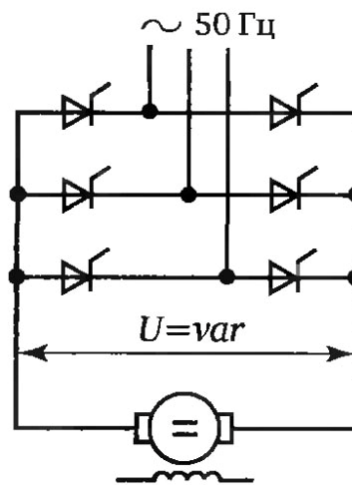


Рис. 1.8. Схема регулируемого электропривода постоянного тока

Для преобразования переменного напряжения в напряжение постоянного тока, регулируемое по величине, может быть использована система генератор-двигатель, или тиристорный преобразователь (ТП-Д). При разработке привода тиристорным преобразователям отдавалось предпочтение, поскольку они надежны, компактны и имеют высокий коэффициент полезного действия.

Система ТП-Д была испытана в плавно-регулируемом приводе буровой установки УКБ-7. Производственные испытания этой установки показали, что более полное использование установленной мощности привода, возможность обеспечения параметров режима бурения, близких к оптимальным, возможность легкого выхода из зон резонансных колебаний дали прирост скорости бурения на 25%, а потребление энергии при этом снизилось на 40% по сравнению буровыми

установками оснащенными традиционным электроприводом [65]. Однако кроме этих достоинств был выявлен и ряд недостатков: использование в полевых условиях двух токов разного рода, при передвижном характере работ, снижает его надежность бурового оборудования и затрудняет его эксплуатацию, что существенно нивелирует отмеченные достоинства такого плавно-регулируемого привода.

Другое исследование, проведенное М. С. Фильштинским показало, что при одинаковой частоте вращения бурильной колонны механическая скорость бурового снаряда с твердосплавной коронкой СА2 на станке с регулируемым электроприводом увеличилась на 25—27%, а с коронкой СА4 на 40—50%. В интервале до 1500 м выявлено три зоны резонансных колебаний независимо от осевой нагрузки и глубины бурения на скоростях вращения бурового снаряда 140—190, 500—600, 850—900 об/мин.[21]

Особенность конструкции электродвигателя постоянного тока - это наличие щеточного аппарата и коллектора. Это усложняет эксплуатацию электропривода, вследствие чего, в буровых установках электроприводы постоянного тока широкого распространения не получили.

Более перспективными, чем плавно-регулируемый электропривод постоянного тока, являются новые разработки плавно-регулируемого привода на основе двигателей переменного тока. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с помощью изменения частоты тока в питающей сети является экономичным способом регулирования и позволяет получить хорошие механические характеристики электропривода по плавности и диапазону.

В геологоразведочных организациях накоплен большой опыт работы с электродвигателями переменного тока, поэтому внедрение нового вида электропривода не будет представлять значительной сложности, хотя и потребует повышения квалификации обслуживающего персонала.[65]

Частота вращения асинхронного двигателя равна: $w = (2\pi f / p)(1-s)$

где: w – угловая скорость, f – частота питающей сети, p – число пар полюсов, s – скольжение.

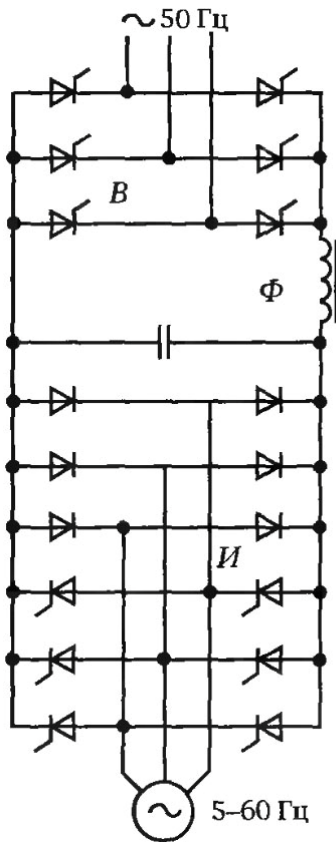


Рис. 1.9. Схема частотного электропривода с инвертором напряжения

Отсюда видно, что все способы регулирования угловой скорости асинхронных электродвигателей можно разделить на две основные группы.[93] К первой группе относятся способы регулирования скорости, при которых изменяется угловая скорость вращающего поля статора двигателя. Это осуществляется изменением частоты тока питающей сети f или числа пар полюсов двигателя p .

Исходя из особенностей конструкции асинхронных двигателей, способ регулирования с помощью изменения числа пар полюсов не применяется в бурении, т.к. не обеспечивает плавного регулирования.

Ко второй группе относятся способы, при которых изменяется величина скольжения двигателя s . Это осуществляется введением в цепь ротора или статора двигателя реостатов или катушек индуктивности, или

введением в цепь ротора внешней противо-эдс, изменением напряжения, подводимого к статору двигателя.

Существенным недостатком такого способа регулирования, как и для двигателей постоянного тока, являются наличие значительных потерь мощности в статорной или роторной цепи, пропорциональных скольжению.

Наиболее перспективным способом регулирования асинхронных двигателей является способ изменения частоты питающей сети с помощью управляемых тиристорных преобразователей, что с успехом осваивается в практике бурения на нефть.[99]

Для обеспечения устойчивой работы двигателя, поддержания высоких энергетических показателей, ограничения перегрузки его обмоток по току и магнитному потоку, в преобразователе частоты должно поддерживаться заданное соотношение между его выходными и входными параметрами. Это соотношение зависит от механической характеристики бурового станка, и получается из уравнения частотного регулирования Костенко:[61]

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}$$

На практике чаще всего используются преобразователи общего назначения, обеспечивающие соотношение[61]

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = \text{const} \quad (1.1)$$

На рис. 1.10 представлены механические характеристики асинхронного электродвигателя при частотном регулировании и соблюдении соотношения (1.1). При уменьшении частоты f_2 механическая характеристика не только меняет свое положение в координатах n — M , но несколько изменяет свою форму. В частности, снижается максимальный момент электродвигателя. Обусловлено это тем, что при соблюдении соотношения (1.1) и изменении частоты f_1 не учитывается влияние активного сопротивления статора на величину вращающего момента двигателя.

При частотном регулировании с учетом этого влияния максимальный момент остается неизменным, форма механической характеристики сохраняется, меняется только ее положение.

Частотные преобразователи выполняются на базе автономных инверторов тока (АИТ) или на базе автономных инверторов напряжения (АИН).

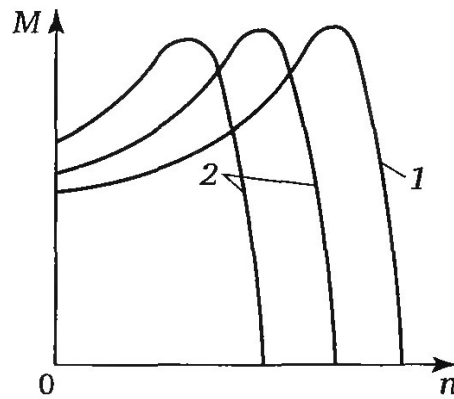
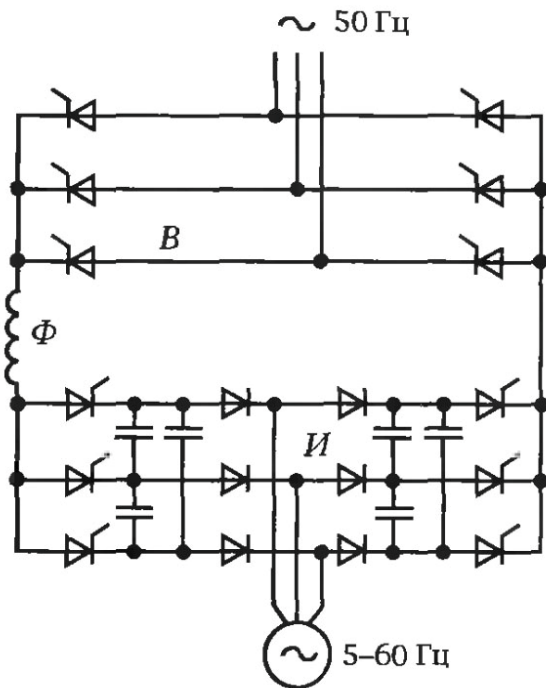


Рис. 1.10. Механические характеристики частотного электропривода на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при максимальных (1) и пониженных (2) частотах

В частотных преобразователях на базе АИН (см. рис. 1.9) в звене



постоянного тока выпрямляется напряжение. Сглаживающий фильтр в этих преобразователях состоит из реактора, включенного последовательно с инвертором, и конденсатора, подключаемого параллельно АИН. На выходе преобразователя форма кривой выходного напряжения (обычно прямоугольная) определяется порядком переключения тиристоров, а форма кривой тока (синусоидальная) зависит от характера нагрузки.[61]

Рис. 1.11. Схема частотного привода с инвертором тока

В частотных преобразователях на базе АИТ (см. рис. 1.11) в звене постоянного тока выпрямляется ток. Сглаживающий фильтр состоит из реактора, включаемого последовательно с инвертором. На выходе преобразователя форма кривой выходного тока определяется порядком переключения тиристоров, а форма кривой напряжения (синусоидальная) — характером нагрузки.

Частотные преобразователи с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) на базе АИН имеют более высокие энергетические характеристики по сравнению с другими видами преобразователей частоты. Это достигается за счет того, что на выходе преобразователя обеспечивается форма кривых тока и напряжения, приближающаяся к синусоидальной. В таких преобразователях, в отличие от описанных выше, могут использоваться неуправляемые выпрямители.[93]

В последнее время в практике зарубежного и отечественного электромашиностроения наибольшее распространение получили частотные преобразователи на IGBT-модулях (биполярных транзисторах с изолированным затвором).[93]

IGBT-модуль является высокоэффективным ключевым элементом. Он обладает малым падением напряжения, высокой скоростью и малой мощностью переключения.

Преобразователь частоты с ШИМ на базе АИН на IGBT-модулях и векторным алгоритмом управления асинхронным электродвигателем имеет ряд преимуществ по сравнению с другими типами частотных преобразователей. Он имеет высокое значение коэффициента мощности при изменении выходной частоты во всем диапазоне.

Принципиальная схема преобразователя представлена на рис. 1.12. Несинусоидальность кривых выходного напряжения и тока частотных преобразователей должна учитываться при выборе электродвигателя для частотного электропривода.

Выше отмечено, что на выходе частотного преобразователя формируется кривая напряжения (тока), несколько отличающаяся от синусоиды, содержащая высшие гармонические составляющие. Их наличие влечет за собой увеличение потерь в электродвигателе. В связи с этим происходит перегрузка электродвигателя при работе электропривода на частотах вращения, близких к номинальной. При работе на сниженных частотах вращения у

самовентилируемых электродвигателей применяемых в приводе буровых установок ухудшаются условия охлаждения.[61]

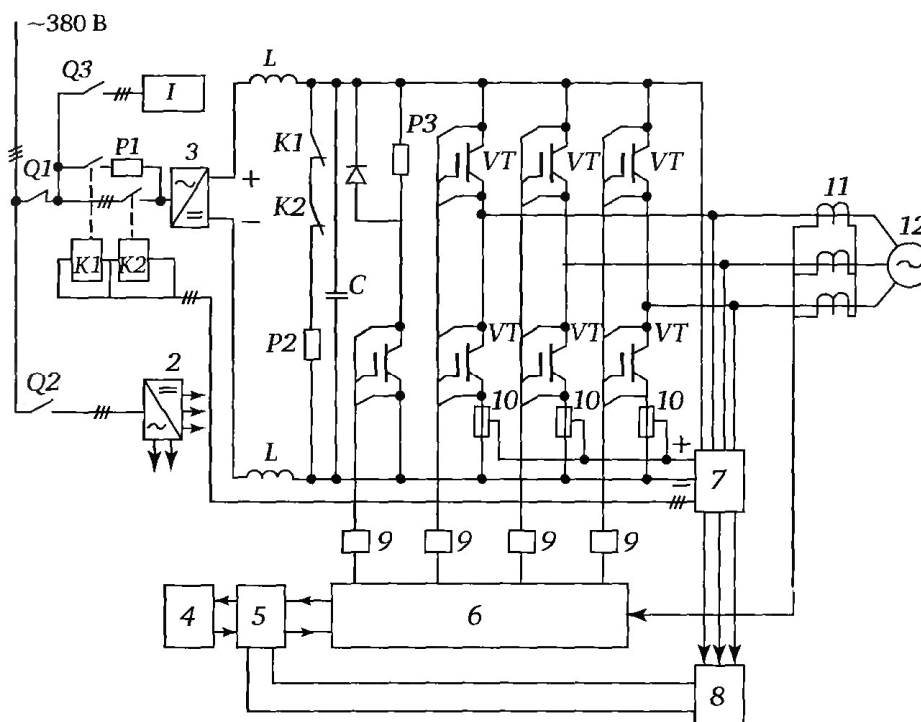


Рис. 1.12. Схема частотного преобразователя на IGBT-модулях:

1 — блок вентиляторов; 2 — источник питания; 3 — выпрямитель неуправляемый; 4 — панель управления; 5 — плата пульта управления; 6 — ШИМ; 7 — блок преобразования напряжения; 8 — плата системы регулирования; 9 — драйверы; 10 — предохранители блока инвертора; 11 — датчики тока; 12 — асинхронный короткозамкнутый двигатель; Q1, Q2, Q3 — выключатели силовой цепи, цепи управления и блока вентиляторов; K1, K2 — контакторы заряда конденсаторов и силовой цепи; C — блок конденсаторов; R1, R2, R3 — резисторы ограничения тока заряда конденсаторов, разряда конденсаторов и узла слива; VT — силовые ключи инвертора (IGBT-модули)

Для режимов работы с частотами, близкими к номинальному значению (50 Гц), наблюдается появление гармоник высших порядков в сочетании с ухудшением условий охлаждения, что приводит к снижению допустимой механической мощности на 2—5%. По этой причине максимальный момент электродвигателя снижается на 1—2%, его КПД — на 1—4%, $\cos(\varphi)$ — на 5—7%.[61]

Согласно рекомендациям, изложенным в [44], для асинхронного самовентилируемого электродвигателя в приводе механизма, при условии, что его

момент изменяется пропорционально квадрату частоты вращения, допустимая мощность на валу двигателя должна быть снижена до значения

$$P_{\text{доп}} = P_{\text{ном}} \frac{(7,2+p)}{(8,64+p)} \quad (1.2)$$

где p — число пар полюсов электродвигателя.

Во избежание перегрузки электродвигателя необходимо или ограничить верхнее значение его частоты вращения, или оснастить привод более мощным электродвигателем. Последняя мера обязательна тогда, когда предусматривается работа электродвигателя бурового станка с частотой $f_2 > 50$ Гц. Ограничение верхнего значения частоты вращения двигателя осуществляется ограничением частоты f_2 до 50 Гц. Увеличение номинальной мощности приводного электродвигателя осуществляется с учетом (1.2) с округлением до ближайшего стандартного значения.

Частотно-регулируемый электропривод - это эффективное средство ограничения динамических перегрузок и повышения точности обеспечения режима работы станка. Такой привод увеличивает долговечность бурового станка и породоразрушающего инструмента.

Буровые станки колонкового бурения проектируются с общей коробкой передач, предназначенной для регулирования частоты вращения шпинделя и лебедки. При этом оказывается, что коробка передач, спроектированная по оптимальной частоте вращения шпинделя, не будет давать оптимальной частоты вращения лебедки. При выборе передаточных чисел коробки принимается компромиссное решение, учитывающее условия работы вращателя и лебедки.

Частотно-регулируемый электропривод обеспечивает легкое формирование оптимальных характеристик для вращателя и лебедки, осуществляемое простым переключением. Преимуществами применения частотно-регулируемого электропривода лебедки являются:[46]

- повышение безопасности работ за счет более плавного приподъема и снятия колонны с подкладной вилки, а также выноса рабочего места бурильщика на значительное расстояние от лебедки;
- меньшая утомляемость бурового мастера за счет простоты и легкости управления;
- повышение срока службы каната, колонны труб и механических узлов вращателя и лебедки благодаря уменьшению динамических нагрузок;
- возможность осуществления плавного подъема вышки с помощью управляемой с выносного пульта лебедки станка;
- уменьшение вероятности потери керна при более плавном подъеме буровой колонны;
- более широкий диапазон скоростей подъема и спуска груза;
- упрощение конструкции лебедки и увеличение срока службы тормозных колодок.

Кроме того, исключается фрикцион - малонадежный узел, и улучшается кинематика станка, по причине упрощения коробки передач.

При регулировании частоты вращения асинхронного двигателя с помощью изменения частоты в питающей сети, возможно обеспечить различные режимы работы: 1) с постоянным вращающим моментом; 2) с постоянной мощностью на валу; 3) с моментом, пропорциональным квадрату частоты.

Основными недостатками привода системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель можно считать большую сложность преобразовательного устройства и сравнительно высокую стоимость оборудования.

Современные частотные преобразователи, оснащенные мощными микропроцессорами, позволяют осуществить векторный режим управления асинхронным двигателем. В этом режиме преобразователь вычисляет положения вектора потокосцепления статора с ротором и управляет им, воздействуя на токи и напряжение в статорных обмотках двигателя. Такой режим управления, кроме

точности регулирования, позволяет сохранить момент двигателя неизменным при снижении частоты напряжения вплоть до нуля.

Таким образом возможно упростить конструкцию бурового станка исключив из него коробку передач – дорогостоящий и сложный в ремонте узел. Стоимость коробки передач примерно равна стоимости частотного преобразователя для распространенных станков УКБ-4 и УКБ-5. Поэтому конечная стоимость частотно-регулируемого бурового станка останется практически неизменной.

На основе приведенных доводов можно утверждать: частотно-регулируемый привод является наиболее перспективным направлением повышения производительности труда и снижения стоимости работ при геологоразведочном бурении.

Все выше сказанного позволяет сформулировать **идею работы**: снижение энергозатрат буровых работ на твердые полезные ископаемые посредством освоения и модернизации частотно регулируемого привода.

§ 3 Анализ научных трудов в области плавно-регулируемого электропривода в бурении на твердые полезные ископаемые. Задачи исследования.

В работе [28] подробно рассматриваются динамические процессы в электроприводе и бурильной колонне бурового станка при крутильных автоколебаниях, методы борьбы с этими автоколебаниями, вопросы повышения надежности и отказоустойчивости привода буровой установки, а так же энергосберегающие режимы работы электропривода с использованием диагностической информации, получаемой от асинхронного электродвигателя. Автором работы создана механическая и электрическая модели бурильной колонны, проанализирована совместная работа электропривода станка и колонны бурильных труб.

Объектом изучения в работе [28] был выбран асинхронный электродвигатель привода вращателя буровой установки и лебедки, так как он имеет наибольшую

мощность. Нагрузка на этот привод была представлена моделью бурильной колонны, учитывающей автоколебательные процессы при ее вращении. Все прочие электроприводы буровой установки автором работы не рассматривались и их влияние на оптимизацию энергетических затрат при бурении не учитывалось. При этом диагностические методы выявления неисправностей асинхронного двигателя, предложенные в работе, применимы и для любого привода на базе асинхронного двигателя.

В современных буровых установках обычно применяется регулируемый электропривод. В зависимости от мощности, назначения, условий эксплуатации и других факторов в составе привода используются двигатели различных типов и применяются разные законы управления ими. Комплексный подход к проблеме выбора энергоэффективных регулируемых электроприводов и законов их управления отражен в работе [82]. Для определения энергоэффективных режимов была создана база универсальных моделей для различных типов преобразователей и электродвигателей, построенных на основе единства математического аппарата, подхода и уровня допущений. Построенные модели позволяют судить о свойствах, рациональных способах практической реализации, энергетическом эффекте и областях применения различных регулируемых электроприводов, сопоставить возможности различных типов электродвигателей. Также был разработан метод оценки энергетической эффективности для различных режимов управления электроприводом, проведен сравнительный анализ эффективных в энергетическом плане режимов управления двигателями.

Приведенные в работе [82] математические модели систем автоматического управления электроприводов подходят для определения статических и динамических свойств электроприводов, а так же при расчете мощности преобразователя частоты и двигателя, при проверке электродвигателя по перегрузке и нагреву, расчете запаса по напряжению и току преобразователя, а также для оценки экономии электроэнергии при выполнении электроприводом заданной технологической задачи. На практике, применительно к буровым установкам, эти результаты позволяют в ходе проектирования точнее подобрать

тип привода, преобразователь и установить приемлемый закон управления. Но наилучшие показатели эффективности системы можно получить только установив характер изменения нагрузки во времени.

Регулируемые электроприводы на базе тиристорных преобразователей частоты при работе вносят искажения в синусоидальную форму напряжения питающей сети, что при значительной мощности электроприводов буровой установки снижает коэффициент мощности и увеличивает потери электроэнергии. Проблемой оптимизации систем соизмеримой мощности при эксплуатации буровых установок и способами компенсации реактивной мощности занимался автор работы [100]. В работе рассматривался регулируемый привод буровых установок на базе вентильных двигателей и тиристорных преобразователей большой мощности. Именно такой тип привода вносит наибольшие помехи в сеть. Эти помехи в значительной мере устраняются путем применения фильтров (реакторов). Значительная часть работы и была посвящена оптимальному выбору фильтров и их взаимодействию с приводом и питающей сетью соизмеримой мощности.

Наиболее подробно плавно-регулируемый электропривод на основе частотных преобразователей в геологоразведочном бурении рассматривался в работе И.Н. Оливетского “Повышение динамических показателей геологоразведочного бурового оборудования на основе применения плавно регулируемого электропривода”.

Автор пришел к выводу о том, что наиболее перспективным направлением развития привода буровых установок является автоматизированный электропривод на основе частотных преобразователей и короткозамкнутых асинхронных двигателей.

В вышеуказанной работе была построена математическая модель плавно-регулируемого асинхронного электропривода, предложена методика для определения необходимых параметров асинхронного двигателя по каталожным данным.

Однако в работе в основном рассматривается совместная работа плавно- и ступенчато-регулируемого электропривода и колонны бурильных труб. Автор рассматривает плавно-регулируемый привод как средство воздействия на волновые процессы в буровой колонне. Он приходит к выводу, что управляя моментом и скоростью вращения электродвигателя возможно значительно снизить динамику в работе буровой колонны, гася возникающие в ней волновые процессы при пуске, торможении, а так же при аварийных ситуациях, таких как прихват или прижег буровой коронки.

Кроме того, при определении энергопотребления частотно-регулируемой буровой установки не учитывались потери в ее коробке передач, которые будут различными при ступенчатом регулировании и при плавном, т.к. при плавном регулировании возможно задавать нужную скорость вращения шпинделя вращателя при меньшем числе задействованных зубчатых пар в коробке передач.

На основе вышесказанного можно сделать вывод о том, что вопрос экономии электроэнергии при частотном регулировании буровой установки необходимо рассмотреть более подробно.

Выводы:

1. На основании анализа приводов буровых установок, использующихся на геологоразведочных работах на твердые полезные ископаемые и научных трудов в этой области установлено: частотно-регулируемый привод на основе асинхронных двигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором является одним из наиболее перспективных.
2. Для освоения плавно-регулируемого привода переменного тока, наиболее перспективным является привод на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, управляемого тиристорным частотным преобразователем напряжения со звеном постоянного тока и широтно-импульсной модуляцией на основе IGBT модулей.

3. С целью более полного основания целесообразности освоения частотно регулируемого привода необходимо провести комплекс теоретических, экспериментальных и технико-экономических исследований, позволяющих дать комплексную оценку эффективности внедрения данного направления в совершенствовании привода буровых установок.

В связи с вышесказанным, необходимо решить следующие задачи:

- 1) Разработать математические модели электропривода для анализа энергетических показателей буровых установок вращательного действия при классическом ступенчатом регулировании и плавном регулировании.
- 2) Разработать математическую модель для определения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя.
- 3) Определить основные энергетические характеристики ступенчато- и частотно-регулируемого привода.
- 4) Проведение экспериментальных исследований бурового станка с частотно-регулируемым приводом переменного тока для сравнения полученных данных с результатами математического моделирования и подтверждения адекватности математической модели.
- 5) Провести сравнительный анализ энергетических показателей при ступенчатом и плавном регулировании.
- 6) Определение экономической эффективности использования частотно-регулируемого привода в бурении геологоразведочных скважин для различных систем электроснабжения.

Глава 2. Математическая модель частотно-регулируемого привода переменного тока.

Задача данной главы - построение математической модели привода на основе частотно-регулируемого асинхронного двигателя. Цель - разработка методов по аналитическому определению энергетических параметров частотно-регулируемого привода.

Для решения вышеизложенной задачи необходимо:

- Выполнить анализ структуры частотно-регулируемого электропривода на базе асинхронного двигателя;
- Выполнить анализ электромеханического преобразования энергии в асинхронном двигателе, работающего от полигармонического источника напряжения
- Выбрать схему замещения частотно-регулируемого асинхронного двигателя, питающегося от полигармонического источника напряжения
- Определить потери в элементах привода: в коробке передач, в асинхронном двигателе и в преобразователе частоты.

§ 1 Анализ системы частотного управления асинхронным двигателем

Структурная схема управления частотой вращения, характерная для большинства современных преобразователей частоты представлена на рисунке 2.1. Она состоит из силовых элементов: выпрямителя, звена постоянного тока, автономного инвертора (АИН); и элементов системы управления. Обобщенная структура системы управления включает в себя регулятор частоты вращения, регулятор тока, регулятор магнитного потока, регулятор максимального напряжения, блок расчета частоты вращения, блок расчета магнитного потока, блок предварительной регулировки напряжения, преобразования из трехфазной

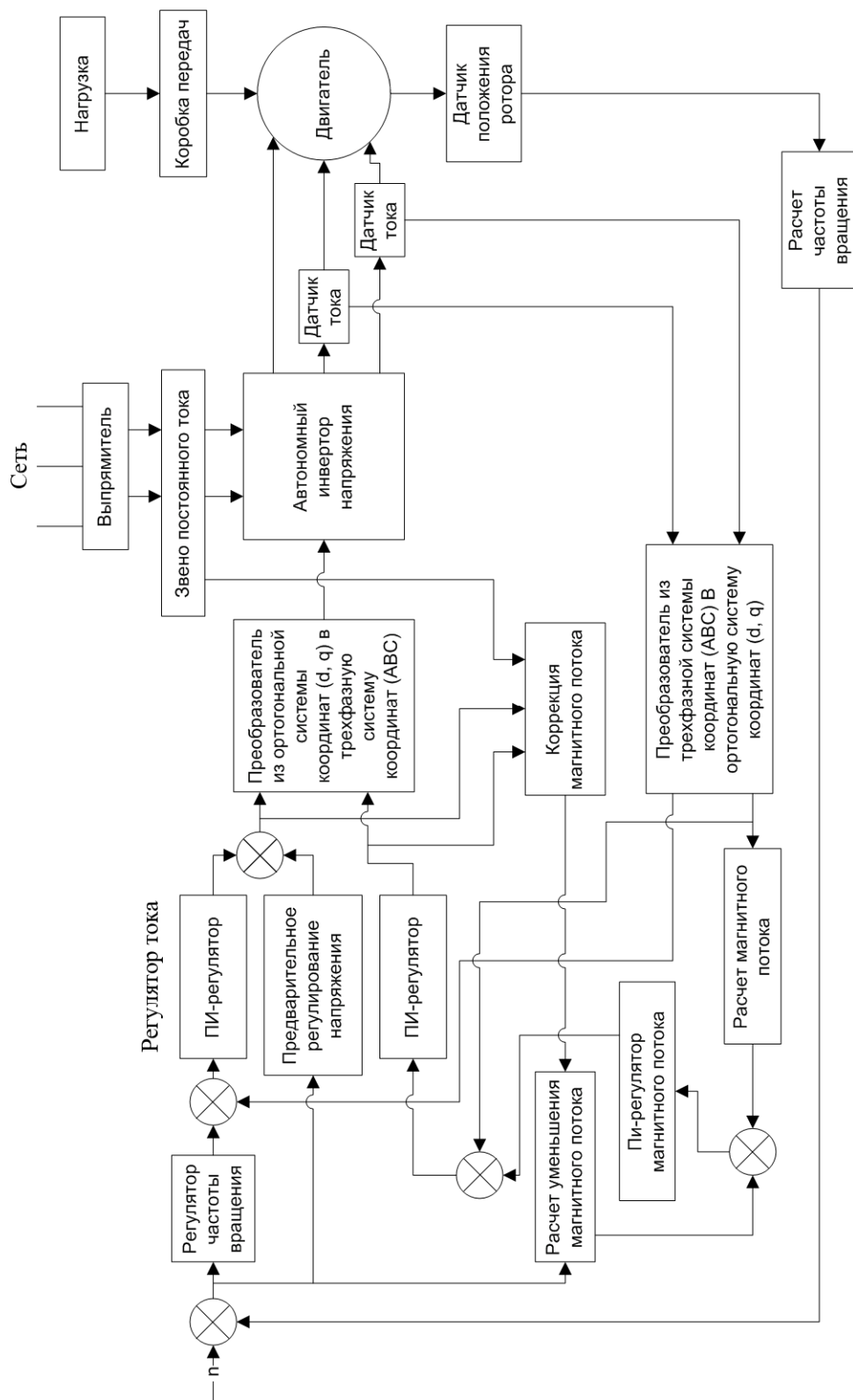


Рисунок 2.1 Структурная схема управления частотой вращения асинхронного двигателя

системы координат в ортогональную систему координат (d, q), блок обратного преобразования из ортогональной системы координат в трехфазную систему, информационные устройства (датчики тока АИН, датчики напряжения звена постоянного тока, датчики температуры).

Регулятор частоты вращения состоит из пропорционально-интегрального регулятора (ПИ - регулятора), регулятор тока состоит из двух ПИ-регуляторов: регулятора активной составляющей тока с предварительным зависящим от частоты вращения регулированием и регулятора тока намагничивания. Исходная установка регулятора осуществляется автоматически при адаптации ПЧ к АД. Регулятор магнитного потока также представляет собой ПИ-регулятор, его использование обусловлено кратковременными ускорениями, а также при работе АД в диапазоне частот вращения с ослаблением магнитного потока. Регулятор максимального напряжения состоит из ПИ-регулятора и служит для коррекции магнитного потока в зависимости от напряжения звена постоянного тока U_{zk} , которое может изменяться в зависимости от колебаний напряжения сети и может резко возрастать при торможении АД. Блок предварительной регулировки напряжения предназначен для компенсации скольжения за счет увеличения напряжения в небольшом диапазоне. Преобразователь координат (ABC)→(d,q) выполняет преобразование фазных токов статора АД из трехфазной системы координат (ABC) в ортогональную систему координат (d,q) по уравнениям:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_B \sin \left(\gamma + \frac{5}{3} \pi \right) + I_C \sin \left(\gamma + \frac{4}{3} \pi \right) \right] \\ I_q &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_B \sin \left(\gamma + \frac{7}{6} \pi \right) + I_C \sin \left(\gamma + \frac{5}{6} \pi \right) \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

где: γ - фазовый угол;

I_B и I_C - токи трехфазной системы координат;

I_d и I_q - токи ортогональной системы координат.

Преобразователь координат $(d,q) \rightarrow (ABC)$ выполняет преобразование напряжения из ортогональной системы координат (d, q) в трехфазную систему координат по уравнениям:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= U_d \cos(\gamma) + jU_q \sin(\gamma); \\ \bar{U}_B &= U_d \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + jU_q \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right); \\ \bar{U}_C &= U_d \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + jU_q \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right);\end{aligned}\tag{2.2}$$

где U_d и U_q - напряжения ортогональной системы координат;

U_A , U_B и U_C - напряжения трехфазной системы координат.

При этом следует отметить, что модули трех фаз напряжений между собой равны:

$$|\bar{U}_A| = |\bar{U}_B| = |\bar{U}_C| = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}\tag{2.3}$$

Формирование напряжения осуществляется АИН в виде последовательности импульсов одинаковой амплитудой и различной длительностью. Законы формирования выходного напряжения АИН для ПЧ различных фирм не одинаковы. Наибольшее распространение получили симплексные алгоритмы трехуровневой ШИМ, в которых выходной сигнал

АИН принимает одно из трех значений $+U_{ZK}/2$, 0 , $-U_{ZK}/2$. При этом выходное напряжение любой из фаз АИН можно разложить в ряд Фурье:

$$U(t) = \sum_{i=1}^{\infty} U_{mi} \cdot \sin(\omega \cdot i \cdot t + \varphi_i)\tag{2.4}$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ - круговая частота первой гармоники, i - номер гармоники.

До частоты коммутации ключей АИН четные гармоники в выражении (4) отсутствуют в виду того что $U_A(t)$, $U_B(t)$ и $U_C(t)$ являются четными периодическими функциями с периодом:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.5)$$

Кроме того, учитывая, что АИН работает на трехфазную симметричную нагрузку в выражении (2.4) отсутствуют гармоники кратные трем до частоты коммутации ключей АИН, поэтому можем записать выражение для номеров гармоник выходного напряжения АИН:

$$i = (6c \pm 1), \quad (2.6)$$

где $c = 1, 2, \dots$

Общие оценки амплитуд гармоник, касающиеся всех ПЧ, с произвольным алгоритмом формирования выходного напряжения, любыми ключами АИН сделать невозможно. Но следует отметить, что амплитуды высших гармоник зависят от напряжения звена постоянного тока, частоты коммутации ключей АИН, частоты первой гармоники АИН.

Исходя из структуры системы управления и силовой части ПЧ, можно выделить следующие виды электромагнитных помех, воздействующих на АД системы привода:

- 1) отклонение действующего значения напряжения первой гармоники;
- 2) отклонение частоты первой гармоники;
- 3) одновременное отклонение напряжения и частоты первой гармоники, выходного напряжения АИН;
- 4) несинусоидальность.

Для двигателей, предназначенных для работы от сети промышленного напряжения характерен такой вид помех как несимметрия питающего трехфазного напряжения. Учитывая, что АД регулируемого ЭП работающего от ПЧ является единственным потребителем, подключенным к ПЧ, то в этом случае нагрузка всех трех фаз ПЧ одинаковая и нарушения симметрии напряжения не происходит. Наибольшее влияние на энергетические параметры

системы привода из выделенных видов электромагнитных помех оказывает не синусоидальность выходного напряжения.

Преобразование энергии в ПЧ происходит с потерями в элементах силовой части и потерях на управление. Потери в ПЧ могут быть разделены:

$$\sum P_{\text{ПЧ}} = P_{\text{выпр}} + P_{\text{зпт}} + P_{\text{АИН}} + P_{\text{СУ}} \quad (2.7)$$

где: $P_{\text{выпр}}$ - потери в выпрямителе ПЧ;

$P_{\text{зпт}}$ - потери в звене постоянного тока ПЧ;

$P_{\text{АИН}}$ - потери в АИН ПЧ, состоящие из потерь на протекание тока и потерь на коммутацию.

$P_{\text{СУ}}$ - потери на управление и потери в дополнительных устройствах, встроенных в ПЧ.

Тогда с учетом (2.7) КПД ПЧ определяется выражением;

$$\eta_{\text{ПЧ}} = \left(1 - \frac{\sum P_{\text{ПЧ}}}{P_3} \right) \cdot 100\% \quad (2.8)$$

Однако ПЧ является конструктивно законченным элементом регулируемого ЭП и потому не всегда имеется возможность разделить потери в ПЧ на составляющие по выражению (2.7). КПД в таких случаях определяется непосредственно по выражению:

$$\eta_{\text{ПЧ}} = \frac{P_1}{P_3} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

Таким образом выделены виды помех, оказывающих влияние на работу двигателя системы привода. Наибольшее влияние оказывает не синусоидальность выходного напряжения АИН. В связи с этим необходимо рассмотреть электромеханическое преобразование энергии в двигателе ЭП, при работе от полигармонического источника напряжения. Другие виды помех (отклонение напряжения и частоты) следует учитывать при инженерном расчете АД и фильтрующих устройств, предназначенных для работы в регулируемом ЭП с ПЧ.

Определены потери, выделяющиеся в ПЧ системы привода. Кроме этого требуется экспериментальное исследование спектрального состава выходного напряжения АИН в зависимости от частоты несущей ШИМ, средствами позволяющими проводить исследования в полосе частот от минимальной до частоты превышающей частоту коммутации ключей АИН.

§ 2. Электромеханическое преобразование энергии в двигателе привода, работающего от полигармонического источника напряжения

Как было отмечено в предыдущем параграфе основным фактором, оказывающим негативное влияние на работу АД регулируемого ЭП, является несинусоидальный характер выходного напряжения АИН. Таким образом, необходимо рассмотреть электромеханическое преобразование энергии в АД работающего от полигармонического источника напряжения, которым является АИН.

Для электромагнитного момента, действующего между статором и ротором, можем записать общее отношение [93]:

$$M = - \frac{\partial W}{\partial \Delta} \quad (2.10)$$

где W - энергия магнитного поля в зазоре, Вт·с; Δ - угол поворота ротора относительно неподвижного статора, рад. При рассмотрении будем полагать воздушный зазор равномерным. Из известного выражения для энергии магнитного поля можем записать:

$$M = - \frac{l \cdot \delta}{2 \cdot \mu_0} R \frac{\delta}{\partial \Delta} \int_0^{2\pi} [B(\alpha, t)]^2 d\alpha \quad (2.11)$$

где l - длина пакета АД;

δ - воздушный зазор между пакетами статора и ротора;

μ_0 - магнитная проницаемость воздуха;

R - радиус ротора АД;

α - полярная координата.

Магнитная индукция определяется известным из электротехники выражением:

$$B(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{\delta} F(\alpha, t) \quad (2.12)$$

где $F(\alpha, t) = F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)$ - результирующая МДС равная сумме МДС статора $F_1(\alpha, t)$ и ротора $F_2(\alpha, t)$ соответственно.

Подставляя в $B(\alpha, t)$ из (2.11) в (2.13), получаем:

$$M = -\frac{l \cdot \mu_0}{2 \cdot \delta} R \frac{\delta}{\partial \Delta} \int_0^{2\pi} [F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)]^2 d\alpha \quad (2.13)$$

Так как при неподвижном статоре и связанной с ним системой координат от положения ротора зависит лишь его МДС, то уравнение (2.13) может быть записано в виде:

$$M = -\frac{l \cdot \mu_0}{\delta} R \int_0^{2\pi} [F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)] \frac{\partial F_2(\alpha, t)}{\partial \Delta} d\alpha \quad (2.14)$$

Если на статоре расположена симметричная 3 - фазная обмотка с p парами полюсов, то для МДС статора можно записать общее выражение:

$$F_1(\alpha, t) = \sum_i F_{mi} \sin(i \cdot \alpha \pm \omega \cdot t) \quad (2.15)$$

где i - порядок гармоник поля статора.

При равномерном воздушном зазоре, равном δ и $\mu_\delta = \infty$, МДС статора возбуждает в зазоре магнитное поле, распределение индукции которого получается из уравнения (2.15):

$$B_1(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{\delta} F_1(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{\delta} \sum_i F_{mi} \sin(i \cdot \alpha \pm \omega \cdot t) \quad (2.16)$$

Произвольная гармоника магнитного поля i -ого порядка вращается относительно статора с угловой скоростью $\omega_i = +\omega/i$, что следует из выражения (2.6). Если ротор вращается с угловой скоростью ω_r , то скорость той же гармоники по отношению к ротору будет:

$$\omega_{ri} = \pm \frac{\omega}{i} - \omega_r \quad (2.17)$$

Эта гармоника индуцирует в обмотке ротора ЭДС и ток, который создаст спектр гармоник МДС ротора, определяемый параметрами роторной обмотки (реакция якоря). Для этого спектра в системе координат, связанной с ротором, можно записать;

$$F_{2i} = \frac{\delta}{\mu_0} \sum_{\mu} B_{\mu i} \cdot \sin (\mu \cdot \alpha' \pm (\pm \omega - i \cdot \omega_r)t - \varphi_{\mu}) \quad (2.18)$$

Если система координат связана со статором, то $\alpha' = \alpha - \omega_r \cdot t$ и уравнение (2.18) принимает вид:

$$F_{2i} = \frac{\delta}{\mu_0} \sum_{\mu} B_{\mu i} \cdot \sin (\mu \cdot (\alpha - \omega_r \cdot t) \pm (\pm \omega - i \cdot \omega_r) \cdot t - \varphi_{\mu}) \quad (2.19)$$

Результирующая МДС ротора может быть представлена как сумма всех гармоник порядка μ от всех гармоник порядка i :

$$F_2(\alpha, t) = \frac{\delta}{\mu_0} \sum_i \sum_{\mu} B_{\mu i} \cdot \sin (\mu \cdot (\alpha - \omega_r \cdot t) \pm (\pm \omega - i \cdot \omega_r) \cdot t - \varphi_{\mu}) \quad (2.20)$$

Подставляя (2.15) и (2.20) в (2.14), получаем общее выражение для момента:

$$\begin{aligned}
M = -l \cdot R \left\{ \int_0^{2\pi} \sum_i F_{mi} \cdot \sin(i \cdot \alpha \pm \omega \cdot t) \cdot \sum_i \sum_\mu B'_{\mu i} \cdot \cos[\mu \cdot (\alpha - \right. \\
\left. \omega_r \cdot t) \pm (\pm \omega - i \cdot \omega_r) \cdot t - \varphi_\mu] d\alpha + \frac{\delta}{\mu_0} \int_0^{2\pi} \sum_i \sum_\mu B_{\mu i} \cdot \cos[\mu \cdot (\alpha - \right. \\
\left. \omega_r \cdot t) \pm (\pm \omega - i \cdot \omega_r) \cdot t - \varphi_\mu] \cdot \sum_i \sum_\mu B'_{\mu i} \cdot \cos[\mu \cdot (\alpha - \omega_r \cdot t) \pm \right. \\
\left. (\pm \omega - i \cdot \omega_r) \cdot t - \varphi_\mu] d\alpha \right\}
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Второй член выражения (2.21) равен нулю, так как

$$\int_0^{2\pi} \sin(x) \cdot \cos(x) dx = 0, \text{ а первый член, содержащий выражение типа}$$

$$\int_0^{2\pi} \sin(ax) \cdot \cos(bx - c) dx = \begin{cases} 0, & \text{при } a \neq b \\ \sin(c), & \text{при } a = b \end{cases}$$

Как следует из (2.21), вращающий момент для определенной гармоники поля статора $i = p$ возникает, если находится гармоника поля ротора того же порядка $\mu = p$. Этот момент равен:

$$\begin{aligned}
M_p = -l \cdot R \int_0^{2\pi} F_{mp} \cdot \sin(p \cdot \alpha \pm \omega \cdot t) \cdot \\
\sum_i B'_{pi} \cdot \cos[p \cdot (\alpha - \omega_r \cdot t) \pm (\pm \omega - i \cdot \omega_r) \cdot t - \varphi_p] d\alpha
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Результирующий момент получается суммированием моментов, созданных всеми гармониками порядка p , т. е. всеми гармониками поля статора, для которых существуют гармоники ротора того же порядка. Интегрируя выражение (2.22) получаем:

$$\begin{aligned}
M = \sum_p M_p &\cong \sum_p \sum_i \sin(p \cdot \omega_r \cdot t \pm (\pm \omega - i \cdot \omega_r) \cdot t + \varphi_p \pm \omega \cdot t) = \\
&= \sum_p \sum_i \sin[(p \cdot \omega_r \pm (\pm \omega - i \cdot \omega_r) \pm \omega) \cdot t + \varphi_p]
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Результирующий момент согласно (2.22) изменяется во времени синусоидально, и его среднее значение равно нулю. Момент, независимый от времени, возникает только тогда, когда член в квадратных скобках в аргументе синусоидальной функции равен нулю, т.е.

$$p \cdot \omega_r \pm (\pm \omega - i \cdot \omega_r) \pm \omega = 0 \quad (2.23)$$

Уравнение (2.23) удовлетворяется при всех ω , если $p = i$ т.е. гармоника поля статора p создает в спектре гармоник реакции якоря гармонику того же порядка p . Выражение (2.23) может выполняться при определенной частоте вращения и при условии, что $p \neq i$, т.е. существует гармоника порядка p в спектре полей статора и ротора, однако роторная гармоника порядка p вызвана статорной гармоникой другого порядка. Уравнение в этом случае удовлетворяется, только тогда, когда гармоники полей статора и ротора одного и того же порядка имеют одинаковые скорости в пространстве, т.е. только при определенной частоте вращения

$$\omega_r = \pm \frac{2 \cdot \omega}{p - i} \quad (2.24)$$

Если $p = i$, то двигатель будет изменять скорость до тех пор, пока его вращающий момент не сравняется с моментом нагрузки, что характерно для асинхронного двигателя. Если $p \neq i$, то вращающий момент двигателя будет изменяться и вызывать повороты ротора по отношению к первоначальной системе, ротор будет сохранять первоначальную скорость, определяемую уравнением (2.24), что характерно для синхронного двигателя. Если в спектре гармоник поля статора и ротора содержатся гармоники одинакового порядка p , причем гармоника поля ротора вызвана гармоникой поля статора другого порядка ($p \neq i$), то эти гармоники создают синхронный момент.

Асинхронный момент от i -ой гармоники и заданной частоте первой гармоники равен:

$$M_i = \frac{P_{\Sigma i}}{\omega_1 \cdot s} \quad (2.25)$$

Как следует из (2.23) асинхронные моменты возникают тогда, когда в спектре гармоник статора и ротора имеются гармоники одинакового порядка, причем гармоника спектра ротора вызвана гармоникой спектра статора другого порядка. Синхронные моменты возникают как при вращающемся роторе, так и при неподвижном.

Так как $p \pm I = c_2 \cdot Z_2$, то угловая скорость ротора, при которой возникают синхронные моменты с учетом (2.24) определяется выражением:

$$\omega_r = \pm \frac{2 \cdot \omega}{c_2 \cdot Z_2} \quad (2.26)$$

Следовательно, все гармоники поля статора i , порядок которых удовлетворяет условию (2.23) вызывают провал в механической характеристике от результирующего синхронного момента при частоте вращения ротора ω_r .

Расчет результирующего синхронного момента возможен, но очень трудоемок. Из (2.21) следует, что если ротор повернется на угол

$$\Delta\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{p - i} = \frac{2 \cdot \pi}{c_2 \cdot Z_2} = \frac{t_2}{c_2} \quad (2.27)$$

где t_2 - зубцовое деление ротора. Синхронный момент будет иметь то же значение, что и до поворота ротора. Следовательно, наибольший пространственный период момента равен:

$$t_2 = \frac{2\pi}{Z_2} \quad (2.28)$$

Если зубцовая гармоника МДС ротора, созданная полем рабочей гармоники с p парами полюсов, имеет тоже число пар полюсов, что и зубцовая гармоника МДС статора, то следует ожидать возникновения значительного синхронного момента. Условия возникновения такого момента определяются соотношением:

$$c_1 \cdot z_1 \pm p = c_2 \cdot z_2 \pm p \quad (2.29)$$

где $c_1, c_2 \in Z$ (целые числа).

Наибольшие моменты создаются, если $c_1 = c_2 = 1$. В этом случае равенство (2.29) принимает вид:

$$|z_1 - z_2| = 2p \quad (2.30)$$

или

$$\begin{cases} z_1 + p = z_2 - p \\ z_1 - p = z_2 + p \end{cases} \quad (2.31)$$

Частота вращения ротора ω_r при которой возникают синхронные моменты, равна:

$$\omega_r = \pm \frac{2\omega}{z_2} \quad (2.32)$$

В результате рассмотрения электромеханического преобразования энергии в двигателе системы привода установлено, что асинхронные моменты, возникающие при работе АД от полигармонического источника напряжения, не оказывают существенного влияния на вращающий момент двигателя, от основной гармоники напряжения. Однако при уменьшении частоты вращения, уменьшении содержания основной гармоники и увеличении содержания высших гармоник могут возникать существенные синхронные моменты, действия которых можно уменьшить путем выбора числа пазов на стадии инженерного расчета асинхронного двигателя.

§ 3 Анализ схемы замещения регулируемого АД для i -ой гармоники выходного напряжения АИН

Для того чтобы определить энергетические параметры АД, работающего от полигармонического источника напряжения необходимо провести анализ схемы замещения частотно-регулируемого АД для i -ой гармоники выходного напряжения АИН. Анализ схемы замещения будем вести для заданной частоты первой гармоники f_1 , так как параметры схемы замещения $L_{\mu(i)}$, $L_{1(i)}$, $L'_{2(i)}$, $r'_{2(i)}$

являются функциям частоты и при частотном управлении меняют свои величины в зависимости от насыщения путей потоков рассеяния и влияния поверхностного эффекта [90].

В основу анализа электромагнитных параметров асинхронного двигателя положена схема замещения (рис.2.2), впервые предложенная Т.Г. Сорокером[79]. Эта схема отличается от общепринятых включением на выводы внешней цепи резистора $r_{ст}$, потери в котором равны потерям в стали $P_{ст}$, а также включением конденсатора C_1 на выводы внешней цепи, учитывающем волновую емкость обмотки статора.

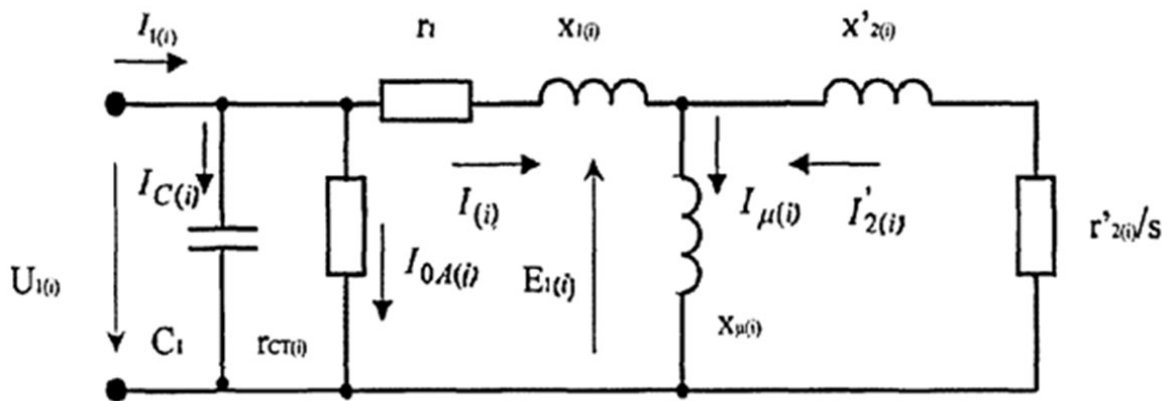


Рис. 2.2 Схема замещения асинхронного короткозамкнутого электродвигателя

Потери в стали определяются потоком, соответствующим полным потокосцеплениям обмотки статора (включающим и потокосцепления рассеяния). Исходя из этого

$$I_{0A(i)} = \frac{U_{1(i)}}{r_{C(i)}} = \frac{P_{ст(i)}}{3U_{1(i)}} \quad (2.33)$$

Емкость конденсатора C_1 зависит от обмотки АД и характеризует волновые свойства обмотки, определяет токи утечки через изоляцию обмотки. Исходя из этого

$$I_{C(i)} = 2\pi \cdot f(i) \cdot C_1 \cdot U_{1(i)} \quad (2.34)$$

Схеме замещения рис.2.2 соответствует векторная диаграмма рис.2.3.

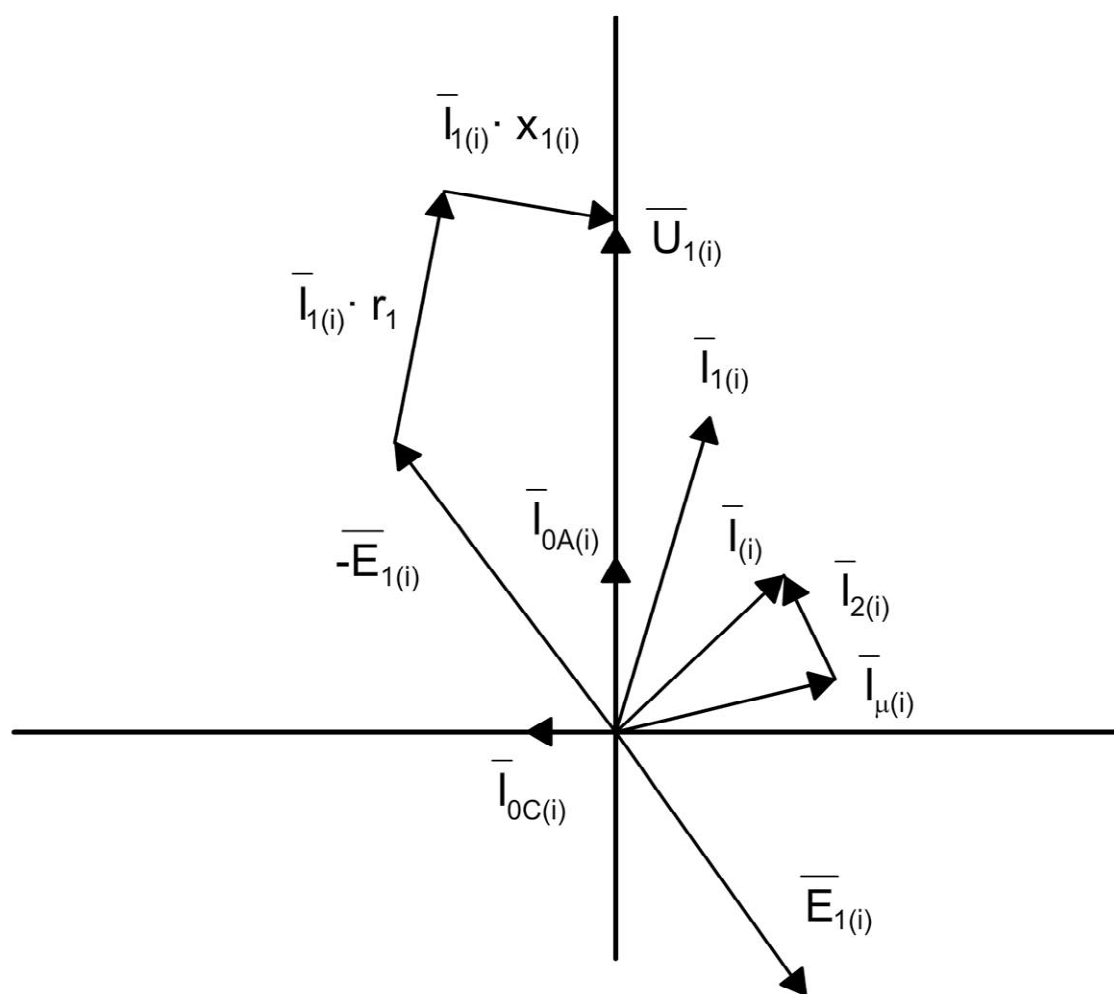


Рис 2.3 Векторная диаграмма соответствующая схеме замещения асинхронного короткозамкнутого электродвигателя

На первом этапе принимаем, что параметры схемы замещения: r_1 , $r'_{2(i)}$ (активные сопротивления обмоток статора и ротора); $X_{1(i)}$, $X_{2(i)}$ (индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора) и $X_{\mu(i)}$ (главное индуктивное сопротивление статора) - постоянны. Для определения зависимости 'электромагнитной мощности от скольжения $P_{ЭМ(i)} = f(s)$ схема замещения может быть упрощена (рис 2.4). Для этой схемы справедливы следующие соотношения:

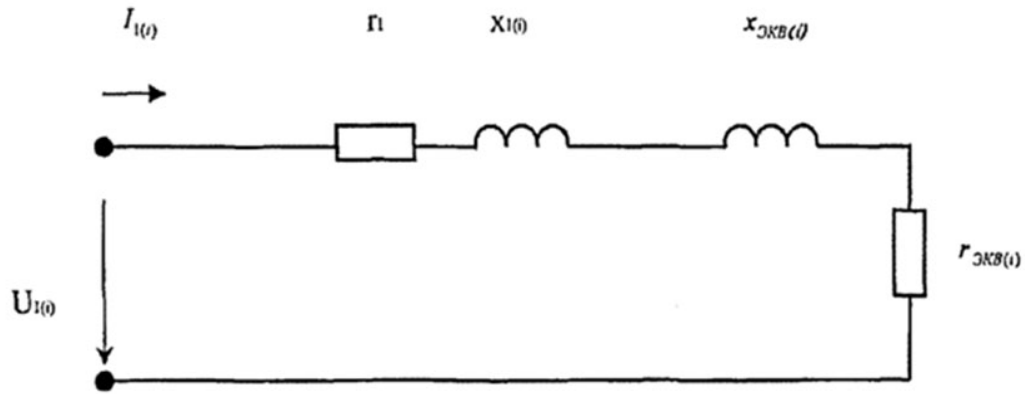


Рис. 2.4 Упрощенная схема замещения асинхронного короткозамкнутого электродвигателя

$$\bar{Z}_{\text{ЭКВ}(i)} = \frac{\bar{Z}_{\mu(i)} \cdot \bar{Z}'_{2(i)}}{\bar{Z}_{\mu(i)} + \bar{Z}'_{2(i)}} = r_{\text{ЭКВ}(i)} + j \cdot x_{\text{ЭКВ}(i)} \quad (2.35)$$

$$\text{где } \bar{Z}_{\mu(i)} = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_1 \cdot L_{\mu(i)} \quad (2.36)$$

$$\bar{Z}'_{2(i)} = \frac{r'_{2(i)}}{s} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_1 \cdot L'_{2(i)} \quad (2.37)$$

$$r_{\text{ЭКВ}(i)} = \frac{\frac{x_{\mu(i)}^2}{r'_{2(i)}} \cdot \frac{1}{s_i}}{1 + \left(\frac{x_{\mu(i)} + x'_{2(i)}}{\frac{r'_{2(i)}}{s_i}} \right)^2} \quad (2.38)$$

$$x_{\text{ЭКВ}(i)} = x_{\mu(i)} \cdot \frac{1 + \frac{x'_{2(i)}}{r'_{2(i)}} \cdot (x_{\mu(i)} + x'_{2(i)}) \cdot \frac{1}{s_i}}{1 + \left(\frac{x_{\mu(i)} + x'_{2(i)}}{\frac{r'_{2(i)}}{s_i}} \right)^2} \quad (2.39)$$

Скольжение i -ой гармоники определяется выражением:

$$s_i = 1 - (1 - s) \cdot \frac{f_1}{f_i} \quad (2.40)$$

Полное сопротивление этой схемы замещения $\bar{Z}_{(i)}$ равно:

$$\bar{Z}_{(i)} = (r_1 + r_{\text{ЭКВ}(i)}) + j \cdot (x_{1(i)} + x_{\text{ЭКВ}(i)}) \quad (2.41)$$

Причем $r_1, x_{1(i)}$ - постоянные параметры, $r_{\text{ЭКВ}(i)}, x_{\text{ЭКВ}(i)}$ - переменные, зависящие от скольжения s_i .

В соответствии со схемой замещения (рис.2.4) электромагнитная мощность $P_{\text{ЭМ}(i)}$ равна:

$$P_{\text{ЭМ}(i)} = 3 \frac{U_{1(i)}^2}{|\bar{Z}_{(i)}|^2} \cdot r_{\text{ЭКВ}(i)} \quad (2.42)$$

С учетом (2.38) и (2.39) получим следующую зависимость электромагнитной мощности от скольжения:

$$P_{\text{ЭМ}(i)} = 3 \frac{U_{1(i)}^2 \cdot r_{\text{ЭКВ}(i)}}{(r_1 + r_{\text{ЭКВ}(i)})^2 + (x_{1(i)} + x_{\text{ЭКВ}(i)})^2} \quad (2.43)$$

Выразим из (2.43) скольжение s_i :

$$s_i = \frac{\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{U_{1(i)}^2}{P_{\text{ЭМ}(i)}} - r_1 \right) \pm \sqrt{\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{U_{1(i)}^2}{P_{\text{ЭМ}(i)}} - r_1 \right)^2 - \left[\left(\frac{r_1}{x_{1(i)}} \right)^2 + \left(1 + \frac{x_{1(i)}}{x_{\mu(i)}} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \left[r_1 \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}} \right) \right]^2 + \left[x_{1(i)} \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}} \right) + \frac{x'_{2(i)}}{r'_{2(i)}} \right]^2 \right\}}}{r'_{2(i)} \cdot \left\{ \left[\frac{r_1}{r'_{2(i)}} \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}} \right) \right]^2 + \left[\frac{x_{1(i)}}{r'_{2(i)}} \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}} \right) + \frac{x'_{2(i)}}{r'_{2(i)}} \right]^2 \right\}} \quad (2.44)$$

В выражении (2.44) двигательному режиму соответствует знак "-". На рис.2.5 показана зависимость электромагнитной мощности от скольжения. Из выражения (2.43) получим максимальное (критическое) значение электромагнитной мощности $P_{\text{ЭМ,кр}(i)}$.

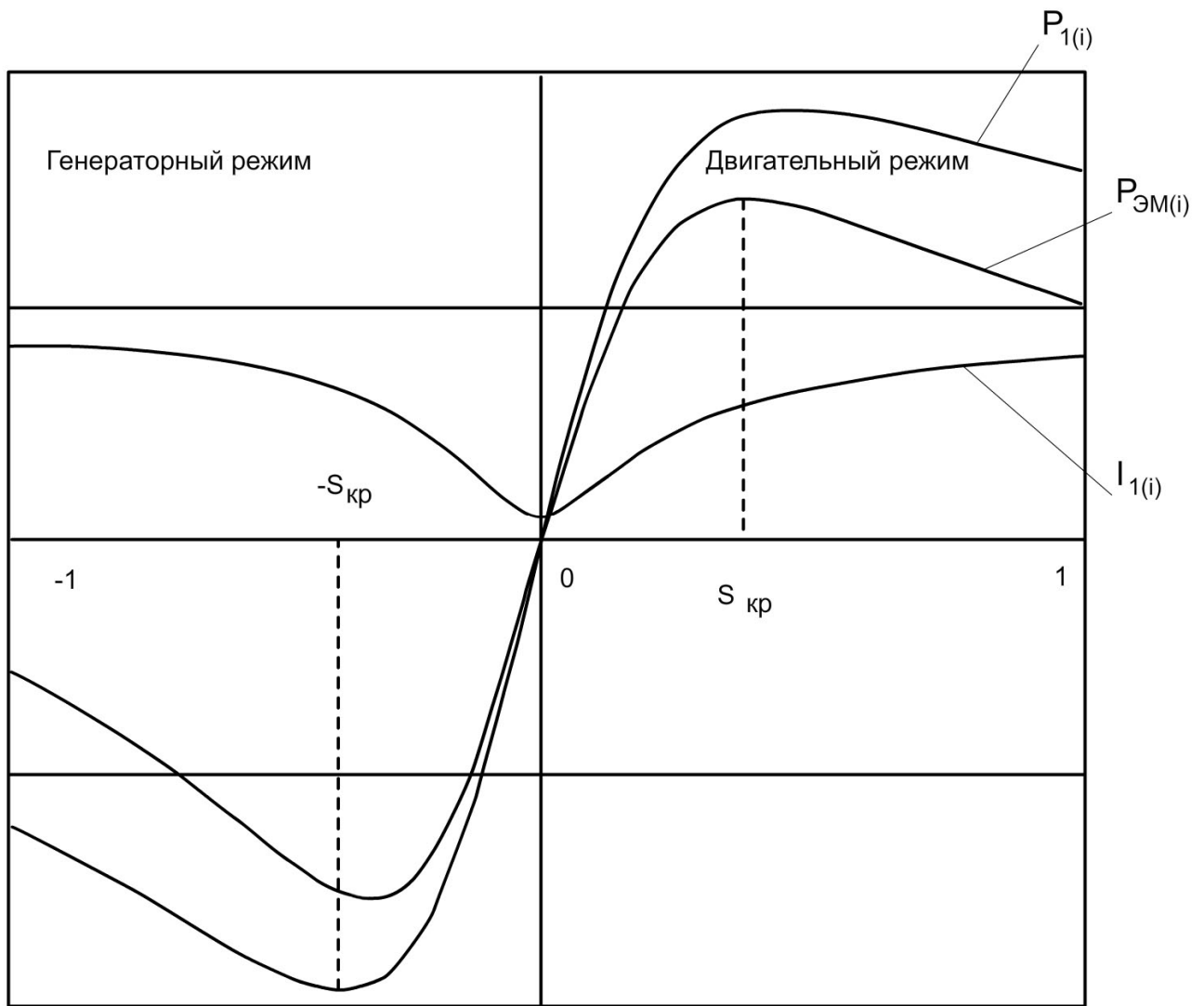


Рис 2.5 Зависимость электромагнитной мощности от скольжения

$$P_{ЭМ.кр(i)} = \frac{3 \cdot U_{1(i)}^2}{2 \left(r_1 + \sqrt{\left[\left(\frac{r_1}{x_{\mu(i)}} \right)^2 + \left(1 + \frac{x_{1(i)}}{x_{\mu(i)}} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \left[r_1 \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}} \right) \right]^2 + \left[x_{1(i)} \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}} \right) + \frac{x'_{2(i)}}{r'_{2(i)}} \right]^2 \right\}} \right)} \quad (2.45)$$

И критическое скольжение $s_{кр(i)}$

$$s_{KP(i)} = \pm \sqrt{\frac{\left[\left(\frac{r_1}{x_{\mu(i)}}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_{1(i)}}{x_{\mu(i)}}\right)^2\right]}{\left[r_1 \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}}\right)\right]^2 + \left[x_{1(i)} \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}}\right) + \frac{x'_{2(i)}}{r'_{2(i)}}\right]^2}} \quad (2.46)$$

По параметрам схемы замещения можно для любого значения скольжения определить электромагнитную мощность АД.

Схему замещения (рис.2.2) можно преобразовать в схему, показанную на рис.2.6. Из этой схемы видно, что ток $\bar{I}_{1(i)}$ равен:

$$\bar{I}_{1(i)} = \bar{I}_{C(i)} + \bar{I}_{0A(i)} + \bar{I}_{(i)} \quad (2.47)$$

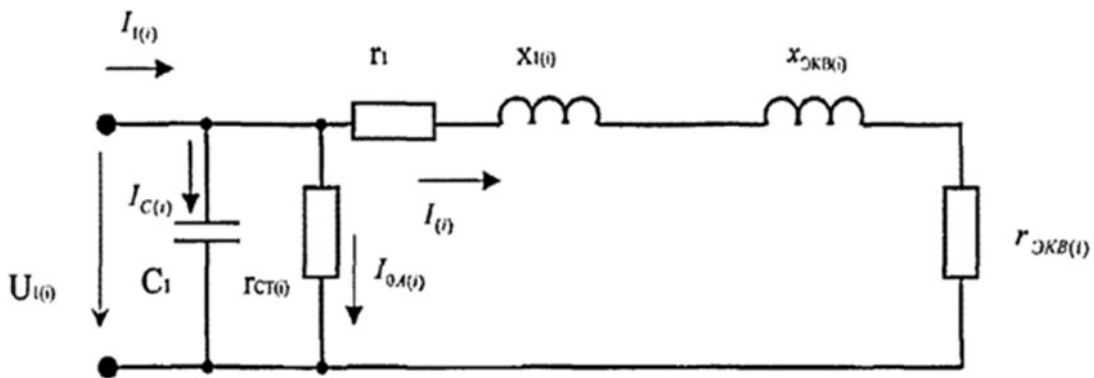


Рис. 2.6 Схема замещения асинхронного двигателя после преобразований

При этом ток $\bar{I}_{(i)}$ можно представить в виде двух векторов, активной и реактивной составляющих:

$$\bar{I}_{(i)} = \bar{I}_{A(i)} + \bar{I}_{R(i)} \quad (2.48)$$

Так как

$$I_{(i)} = \frac{U_{(i)}}{|\bar{Z}_{(i)}|}, \cos(\varphi'_{(i)}) = \frac{r_1 + r_{\Sigma KB(i)}}{|\bar{Z}_{(i)}|} \text{ и } \sin(\varphi'_{(i)}) = \frac{x_{1(i)} + x_{\Sigma KB(i)}}{|\bar{Z}_{(i)}|}$$

то

$$(2.49)$$

$$I_{A(i)} = I_{(i)} \cos(\varphi'_{(i)}) = \frac{U_{1(i)} \cdot r_{\text{ЭКВ}(i)}}{|\bar{Z}_{(i)}|^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_{\text{ЭКВ}(i)}}\right)$$

Подставив $|\bar{Z}_{(i)}|^2 = (r_1 + r_{\text{ЭКВ}(i)})^2 + (x_{1(i)} + x_{\text{ЭКВ}(i)})^2$ в (2.49) получаем:

$$I_{A(i)} = \frac{U_{1(i)} \cdot r_{\text{ЭКВ}(i)}}{(r_1 + r_{\text{ЭКВ}(i)})^2 + (x_{1(i)} + x_{\text{ЭКВ}(i)})^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_{\text{ЭКВ}(i)}}\right) \quad (2.50)$$

Аналогично получается выражение для реактивной составляющей:

$$I_{R(i)} = \frac{U_{1(i)} \cdot (x_{1(i)} + x_{\text{ЭКВ}(i)})}{(r_1 + r_{\text{ЭКВ}(i)})^2 + (x_{1(i)} + x_{\text{ЭКВ}(i)})^2} \quad (2.51)$$

Модуль тока равен:

$$I_{(i)} = \sqrt{I_{A(i)}^2 + I_{R(i)}^2} \quad (2.52)$$

На основании (2.47) получим выражение для модуля тока

$$I_{1(i)} = \sqrt{(I_{A(i)} + I_{0A(i)})^2 + (I_{R(i)} + I_{C(i)})^2} \quad (2.53)$$

В схеме замещения (рис.2.2) не точно учитываются потерн в обмотке статора: по схеме $P_{M1(i)} = 3 \cdot I_{(i)}^2 \cdot r_1$, а фактически $P_{M1(i)} = 3 \cdot I_{1(i)}^2 \cdot r_1$

Допущенная погрешность равна:

$$3 \cdot I_{1(i)}^2 \cdot r_1 - 3 \cdot I_{(i)}^2 \cdot r_1 \approx 2 \cdot I_{0A(i)} \cdot (I_{A(i)} + I_{0A(i)}) \cdot 3 \cdot r_1$$

Ее следует учитывать при определении потребляемой АД мощности $P_{1(i)}$ и $\cos(\varphi)_{(i)}$:

$$P_{1(i)} = 3 \cdot U_{1(i)} \cdot (I_{A(i)} + I_{0A(i)}) \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r_1}{r_{\text{СТ}(i)}}\right) \quad (2.54)$$

$$\cos \varphi_{(i)} = \frac{I_{A(i)} + I_{0A(i)}}{I_{1(i)}} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r_1}{r_{\text{СТ}(i)}}\right) \quad (2.55)$$

Из рис. 2.2 видно, что намагничивающий ток при нагрузке $I_{\mu 1(i)}$ и ток ротора, приведенный к первичной цепи, $I'_{2(i)}$ соответственно равны:

$$I_{\mu H(i)} = \frac{E_{1(i)}}{x_{\mu(i)}} \quad (2.56)$$

$$I'_{2(i)} = \sqrt{I_{A(i)}^2 + (I_{R(i)} + I_{\mu H(i)})^2} \quad (2.57)$$

Где $E_{1(i)}$ - ЭДС первичной цепи при нагрузке,

$$E_{1(i)} = I_{(i)} \sqrt{r_{\text{ЭКВ}(i)}^2 + x_{\text{ЭКВ}(i)}^2} = U_{1(i)} \sqrt{\frac{r_{\text{ЭКВ}(i)}^2 + x_{\text{ЭКВ}(i)}^2}{(r_1 + r_{\text{ЭКВ}(i)})^2 + (x_{1(i)} + x_{\text{ЭКВ}(i)})^2}} \quad (2.58)$$

ЭДС холостого хода $E_{0(i)}$ равна:

$$E_{0(i)} = I_{\mu(i)} \cdot x_{\mu(i)} = \frac{U_{1(i)} \cdot x_{\mu(i)}}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1(i)} + x_{\mu(i)})^2}} \quad (2.59)$$

Ток холостого хода равен:

$$I_{1(i)} = \sqrt{I_{0A(i)}^2 + (I_{\mu(i)} + I_{C(i)})^2} \quad (2.60)$$

Максимальный момент первой гармоники равен:

$$M_{\text{кр}} = \frac{3 \cdot U_{1(i)}^2}{2 \left(r_1 + \sqrt{\left[\left(\frac{r_1}{x_{\mu(i)}} \right)^2 + \left(1 + \frac{x_{1(i)}}{x_{\mu(i)}} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \left[r_1 \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}} \right) \right]^2 + \left[x_{1(i)} \cdot \left(1 + \frac{x'_{2(i)}}{x_{\mu(i)}} \right) + \frac{x'_{2(i)}}{r'_{2(i)}} \right]^2 \right\}} \right)} \frac{9550}{n_c} \quad (2.61)$$

Таким образом, проведен анализ схемы замещения регулируемого АД для i -ой гармоники выходного напряжения АИН, установлены зависимости энергетических параметров (потребляемой мощности, тока) от скольжения. По полученным зависимостям необходимо определять потери и КПД двигателя привода.

§ 4 Потери и КПД частотно-регулируемого АД

В соответствии со схемой замещения для i -ой гармоники АД (рис.2.4), в активных сопротивлениях выделяются потери: потери в стали $P_{\text{ст}(i)}$ потери в

обмотке статора $P_{M1(i)}$, потери в обмотке ротора $P_{M2(i)}$. С учетом принципа наложения, потери в соответствующих частях электрической машины равны:

$$P_{CT} = \sum_i P_{CT(i)} \quad (2.62)$$

$$P_{M1} = \sum_i P_{M1(i)} \quad (2.63)$$

$$P_{M2} = \sum_i P_{M2(i)} \quad (2.64)$$

В выражениях (2.62)-(2.64) учитываются также дополнительные потери, вызванные высшими гармониками. Потери в стали рассчитываются по спектру выходного напряжения АИН. Потери в обмотке статора для i -ой гармоники равны:

$$P_{M1(i)} = 3 \cdot I_{1(i)}^2 \cdot r_1 \quad (2.65)$$

Учитывая (2.63) и (1.5) выражение (2.65) принимает вид:

$$P_{M1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \quad (2.66)$$

Потери в обмотке ротора можно определить с учетом (2.62)-(2.64) по выражению:

$$P_{M2} = (P_1 - P_{M1} - P_{CT}) \cdot s \quad (2.67)$$

Кроме вышеперечисленных потерь, подводимая мощность к АД P_1 расходуется на потери от трения и вентиляции - механические потери $P_{Мех}$ и добавочные потери $P_{доб}$. На добавочные потери оказывают влияние множество факторов: неравномерность воздушного зазора, зубчатость статора и ротора, скос пазов, нарушение изоляции листов стали пакета статора и ротора, нарушение изоляции стержней ротора, форма паза ротора и многие другие. Величина добавочных потерь АД общепромышленного назначения, работающих от источника синусоидального напряжения достигает 2% от подводимой мощности к АД, но согласно [70] принимается равной 0,5 %. При необходимости величину

добавочных потерь можно уточнить при испытаниях одним из методов, описанных в [79].

Таким образом, сумма потерь в частотно-регулируемом АД равна:

$$\sum P = P_{M1} + P_{CT} + P_{M2} + P_{MEH} + P_{ДОБ} \quad (2.68)$$

Учитывая (2.68), коэффициент полезного действия частотно-регулируемого АД равен:

$$\mu_{AD} = \left(1 - \frac{\sum P}{P_1}\right) \cdot 100\% \quad (2.69)$$

§ 5 Построение компьютерной модели на базе программной среды MATLAB (Simulink).

Решение системы уравнений, описывающих работу частотно-регулируемого привода – весьма трудоемкая задача. Для решения задач подобного рода существуют различные компьютерные технологии, в основе которых лежат пакеты прикладных программ. Наиболее распространенным среди таковых является пакет MATLAB с различными дополнениями, из числа которых Toolbox Simulink, удобный при проведении анализа электромеханических процессов, протекающих в электроприводе.

Основным достоинством этого дополнения является наличие библиотечных моделей, имитирующих практически все элементы, входящие в состав ЭП, в том числе и исполнительные двигатели. Поэтому для решения системы уравнений моделирующих частотно-регулируемый привод был выбран программный пакет Matlab Simulink.

Решение системы уравнений с помощью структурной модели осуществлялось следующим образом. Каждое звено решает соответствующее уравнение отдельно(или несколько уравнений), а все звенья одновременно – всю систему.

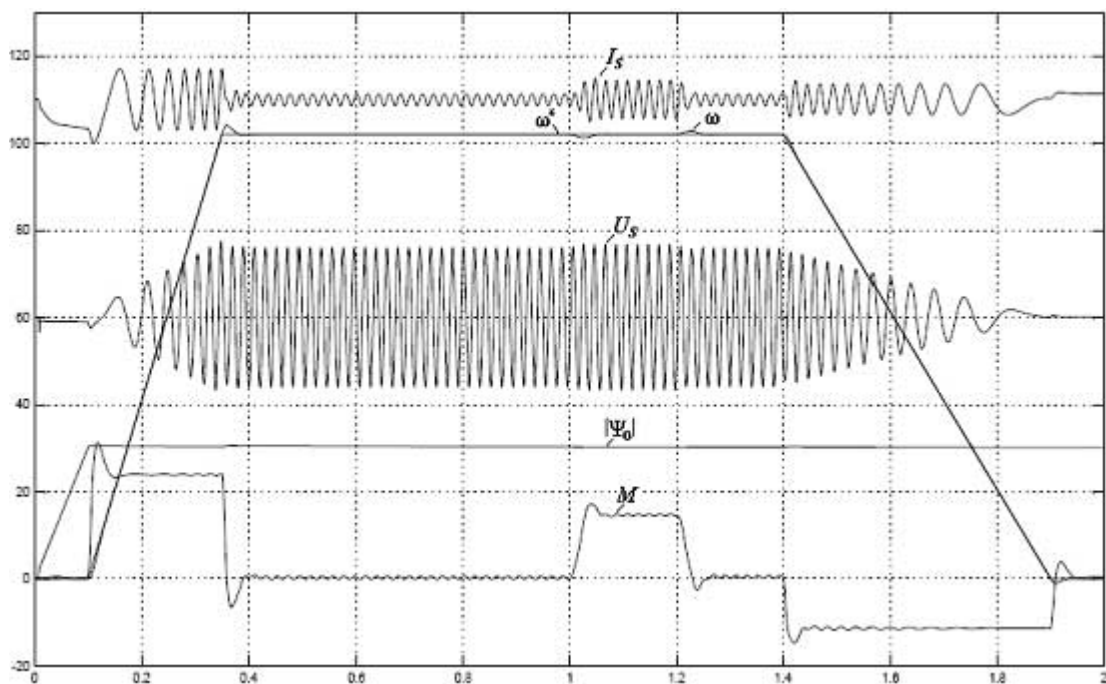


Рис.2.8. Диаграммы электромеханических процессов, протекающих в компьютерной модели электропривода с алгоритмом векторного управления по вектору главного потокосцепления

На рисунке 2.9 представлена зависимость коэффициента полезного действия от приложенной нагрузки к валу двигателя при частотах 5, 25 и 50 Гц.

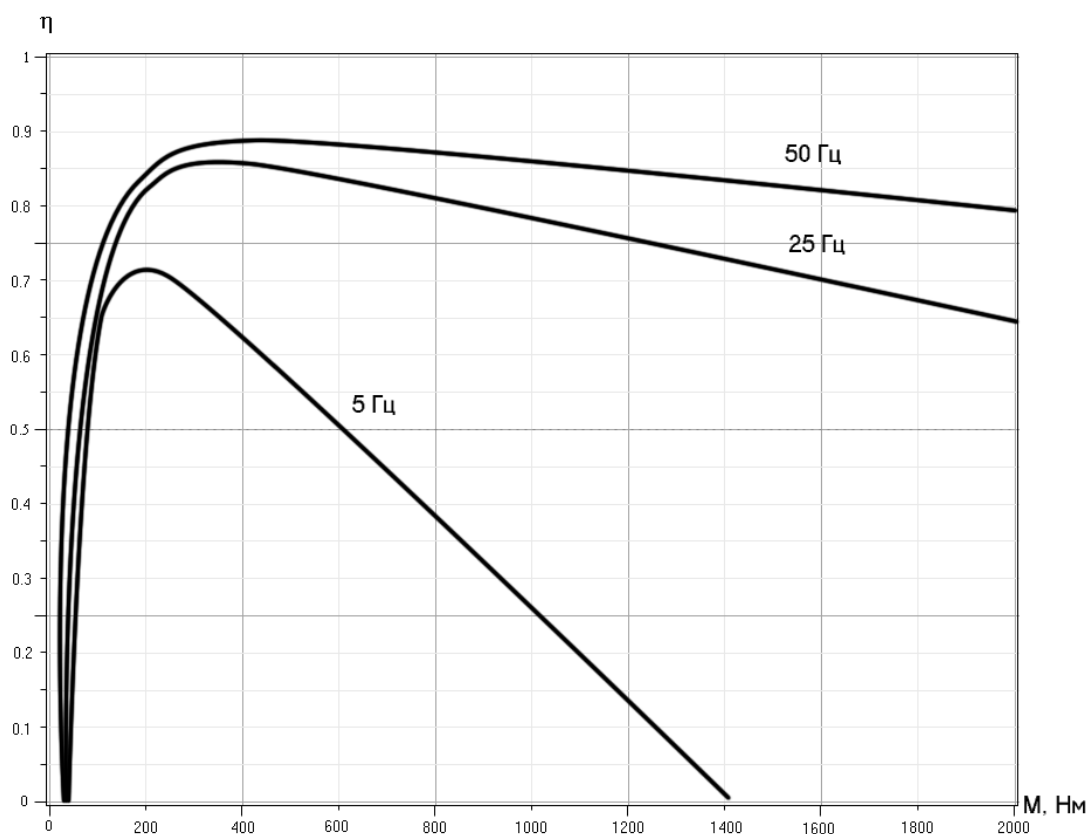


Рис 2.9 Зависимость КПД от момента нагрузки при частотах 5, 25 и 50 Гц.

На рисунке 2.10 представлена скоростная характеристика двигателя привода.

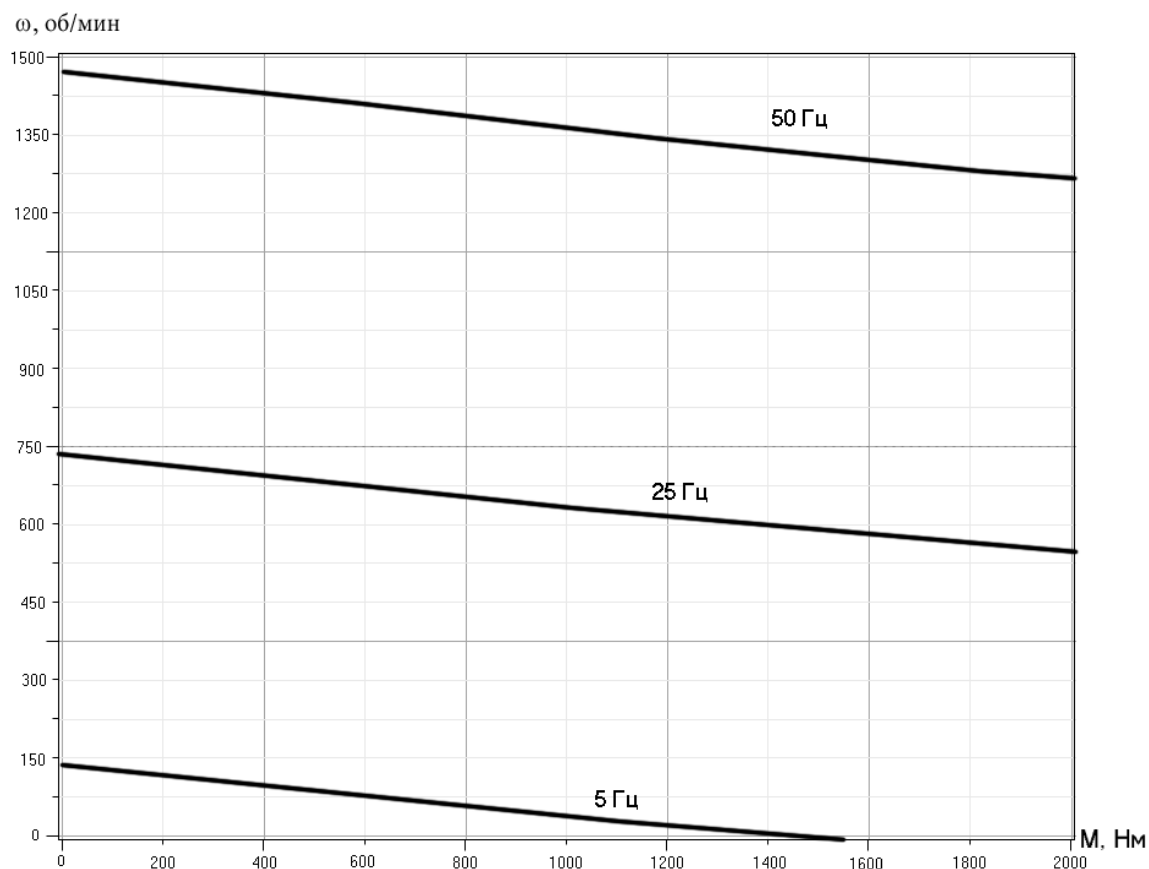


Рис. 2.10 Скоростная характеристика асинхронного двигателя привода.

На основе полученных характеристик частотного привода можно оценить его энергопотребление в различных режимах работы и сравнить с энергопотреблением классического ступенчато регулируемого привода.

§ 6 Анализ энергопотребления привода при бурении.

Для определения потребляемой мощности при бурении воспользуемся методикой ВИЭМС, как наиболее распространенной и точной.

Мощность потребляемая приводом бурового станка:

$$P_{\text{БР}} = P_{\text{Б}} + \Delta P_{\text{ДВ}} + P_{\text{МН}} ;$$

где: $P_{\text{Б}}$ — мощность вращателя бурового станка, кВт; $\Delta P_{\text{ДВ}}$ — потери в электродвигателе вращателя, кВт; $P_{\text{МН}}$ — мощность маслососа, кВт.

Мощность бурового станка:

$$P_B = P_{XX} + (P_3 + P_{BT})(1-k)^{-1};$$

где: P_{XX} – потери мощности в станке на холостом ходу, кВт; P_3 – мощность на разрушение забоя, кВт; P_{BT} – мощность на вращение бурильных труб, кВт; k – коэффициент потери мощности в станке.

Мощность на разрушение забоя:

$$P_3 = 0.25 C_{OC} \omega (0.137 + f_{II})(D_{KP} + d_{KP});$$

где: C_{OC} – осевая нагрузка, кН; ω – угловая скорость бурового инструмента, рад/с; f_{II} – коэффициент трения коронки о горную породу забоя; D_{KP} – наружный диаметр коронки, м; d_{KP} – внутренний диаметр коронки, м;

Мощность на вращение бурильных труб:

$$P_{БК} = 29.4 \cdot 10^{-4} \cdot S \cdot q \cdot (d/D_{KP}) \cdot \omega^{1.8} \cdot L^{0.75} \cdot (1 + 60 \cdot J) \cdot (1 + 0.44 \cdot \cos(\alpha)) + 23.4 \cdot 10^{-2} \cdot \delta \cdot \omega \cdot C_{OC};$$

где: S – коэффициент, учитывающий свойства промывочной жидкости; q – вес 1 м бурильных труб, кН/м; L – глубина бурения, м; J – интенсивность искривления скважины, град/м; α – угол наклона скважины, град; δ – радиальный зазор между бурильными трубами и стенками скважины, м.

Потери мощности в электродвигателе:

$$\Delta P_{ДВ} = 3 \cdot 10^{-2} \cdot P_H \cdot (1 + 2.5 \cdot (P_B/P_H)^2);$$

где: P_H – номинальная мощность электродвигателя, кВт.

Мощность на работу маслонасоса:

$$P_{МН} = P_{ВМН} + \Delta P_{ДВМ}$$

где: $P_{ВМН}$ – мощность на валу маслонасоса, кВт; $\Delta P_{ДВМ}$ – потери мощности в электродвигателе маслонасоса, кВт.

Мощность на валу маслонасоса:

$$P_{ВМН} = 4 \cdot 10^{-4} p;$$

где: p – давление в гидросистеме станка, кПа;

Потери мощности в электродвигателе маслоснасоса, кВт:

$$\Delta P_{\text{ДВМ}} = 3 \cdot 10^{-2} P_{\text{НМН}} \cdot (1 + 2.5 \cdot (P_{\text{МН}} / P_{\text{НМН}})^2);$$

где: $P_{\text{НМН}}$ – номинальная мощность электродвигателя маслоснасоса, кВт.

Мощность, потребляемая при выполнении спускоподъемных операций (СПО):

$$P_{\text{СПОПР}} = P_{\text{СПО}} + \Delta P_{\text{ДВ}}$$

где: $P_{\text{СПО}}$ – средняя мощность на валу электродвигателя (лебедки) при выполнении СПО, кВт; $\Delta P_{\text{ДВ}}$ – потери в электродвигателе при мощности на валу $P_{\text{СПО}}$.

Средняя мощность $P_{\text{СПО}}$ на СПО определяется через энергозатраты на подъем бурового снаряда в рейсе:

$$P_{\text{СПО}} = W_{\text{СПО.П}} \cdot (t_{\text{СПО}} \cdot (1 - K_{\text{Л}}))^{-1} + \Delta P_{\text{ХХ.Л}}$$

где: $W_{\text{СПО.П}}$ – полезно затрачиваемая энергия при выполнении СПО рейса, кВт·ч; $K_{\text{Л}}$ – коэффициент, характеризующий потери мощности в станке на передаче лебедки, соответствующей средней скорости выполнения СПО; $\Delta P_{\text{ХХ.Л}}$ – потери мощности в станке при нулевой нагрузке лебедки, кВт.

Значения $K_{\text{Л}}$ и $\Delta P_{\text{ХХ.Л}}$ определяются по справочным данным.

Полезно затрачиваемая энергия при выполнении СПО:

$$W_{\text{СПО.П}} = 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \left\{ \frac{(L_2^2 + L_2 \cdot l_{\text{СВ}}) \cdot (2 \cdot l_{\text{СВ}} + C) + C \cdot L_1^2 + C \cdot L_1 \cdot l_{\text{СВ}}}{4 \cdot l_{\text{СВ}}} \times \right. \\ \times \left[q \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho} \right) \cdot \cos \theta_{\text{СР}} \cdot (1 + f \cdot \tan \theta_{\text{СР}}) \right] + \\ \left. + (L_2 + L_1) \left[G_{\text{ЭТБ}} \cdot \left(\frac{C}{l_{\text{СВ}}} + 1 \right) + \frac{C \cdot q \cdot \alpha_T}{2} \right] \right\}$$

где: K_1 – коэффициент, учитывающий затраты энергии на трение при проскальзывании пускового диска относительно тормоза подъема и на работу трубоизворота, $K_1=1,2$; K_2 – коэффициент, учитывающий потери энергии в

талевого системе ($K_2=1,05\dots1,3$); C -коэффициент, равный 1 м; l_{CB} – длина бурильной свечи, м; q – удельный вес 1 м бурильных труб, кН/м; α_T – коэффициент, учитывающий вес соединений бурильных труб; $\rho_{ж}$, ρ – соответственно плотность промывочной жидкости и материала бурильных труб, т/м³; f – коэффициент трения бурильных труб о стенки скважины ($f=0,3$); $G_{ЭТБ}$ – вес элеватора и талевого блока, кН; L_1 , L_2 – глубина скважины в начале и в конце рейса, м.

$$L_1 = L_{cp} - l_p/2; \quad L_2 = L_{cp} + l_p/2;$$

Θ_{cp} – средний зенитный угол скважины на заданной глубине, град:

$$\Theta_{cp} = \Theta_n + J(L_1 + L_2)/4$$

где: Θ_n – начальный зенитный угол заложения скважины, град; J – интенсивность искривления скважины, град/м.

Используя описанную выше методику определяем затраты мощности на бурения типовой скважины глубиной 500 м. (геолого-технический наряд смотри таблицу. 2.1)

На рисунке 2.11 изображен график потребляемой мощности при бурении с частотным и классическим приводом.

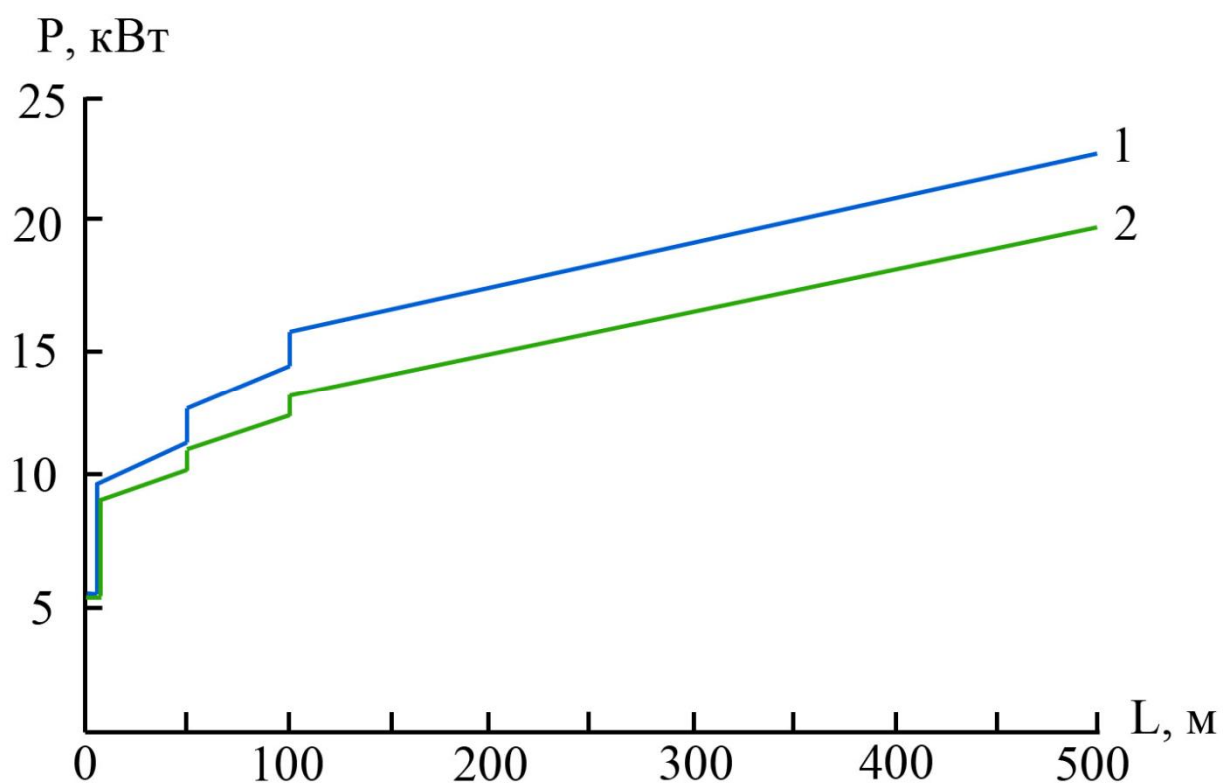


Рис. 2.11. Графики потребляемой мощности при частотном и ступенчатом регулировании скорости вращения бурового снаряда.

Из рисунка 2.11 видно что потребление мощности при использовании частотно-регулируемого привода ниже до 20% по сравнению со ступенчато-регулируемым приводом.

Таблица 2.1. Конструкция рассматриваемой скважины.

№ п/п	Интервал, м		Мощность, м	Название пород	Категория по буримости	Диаметр коронки, мм
	от	до				
1	0	5	5	Кимберлитовая брекчия с массивной текстурой цемента	III	112

2	5	50	45	Кимберлитовая брекчия с массивной текстурой цемента	V	93
3	50	100	50	Автолитовая кимберлитовая брекчия	VI	59
4	100	500	400	Кимберлитовая брекчия	VII	

Выводы:

1. Разработана модель частотно-регулируемого электропривода переменного тока, а так же его нерегулируемая модель.
2. Построены электромеханические характеристики частотно-регулируемого привода, получены осциллограммы переходных процессов, потребляемой мощности, тока и напряжения при различной по величине нагрузке на двигатель.
3. Получена кривая изменения КПД частотно-регулируемого привода, определены все его электромеханические составляющие.
4. Определена структура электромеханических потерь в процессе управления двигателем.
5. Определены затраты мощности на колонковое бурение скважины при ступенчатом и частотном регулировании частоты вращения.

Глава 3. Экспериментальные исследования буровых установок УКБ-4 и ЗИФ-650 оснащенных частотно-регулируемым электроприводом

§ 1 Цели, задачи и оборудование натурального эксперимента

Экспериментальные исследования плавно- и ступенчато-регулируемого электропривода проводились на учебно-научном Сергиево-Посадском полигоне Российского Государственного Геологоразведочного Университета имени Серго Орджоникидзе на буровой установке УКБ-4, а также в Тульском НИГП на буровой установке ЗИФ-650. Исследования на двух различных типах буровых установок с разными по мощности и серии двигателями позволяют получить более точные и подробные данные для дальнейшего анализа.

Цель экспериментальных исследований:

1. Подтвердить экспериментально данные полученные аналитически;
2. Определить влияние преобразователя частоты на качество электроэнергии питающей сети;
3. Исследовать величину пусковых токов при пуске электродвигателя буровой установки с использованием преобразователя частоты и без него;
4. Измерить расход электроэнергии при различных режимах работы бурового станка с использованием преобразователя частоты и без него.

Измерительные приборы, используемые в ходе экспериментальных исследований:

1. Измерительный комплект К-50;
2. Осциллограф аналоговый, тип С1-68, осциллограф цифровой Tektronix TDS-2024B, осциллограф цифровой АКИП-4113/1.
3. Мультимер и прибор 43101 – для вспомогательных работ, при монтаже электроцепи.

Плавное регулирование асинхронного электродвигателя буровой установки осуществлялось с помощью преобразователя частоты Siemens micromaster 440, номинальной мощностью 22 кВт.

Таблица 3.1 Основные технические характеристики преобразователя частоты micromaster 440.

Частота сети	47 Гц ... 63 Гц
Выходная частота	0 Гц ... 650 Гц
Коэффициент мощности	≥ 0.95
КПД	96 % ... 97 %
Перегрузочная способность	1.5 x номинальный выходной ток в течении 60 сек., каждые 300 сек., и 2 x номинальный выходной ток в течении 3 сек., каждые 300 сек.
Пусковой ток	Не выше расчетного входного тока
Законы управления	Векторное управление, управление моментом, линейная зависимость V/f; прямое управление потоком FCC; квадратичная зависимость V/f; программируемая зависимость V/f
Частота импульсов	4 кГц (Заводская установка) 2 кГц ... 16 кГц (ступенями по 2 кГц)
Дискретность задания	0.01 Гц
Торможение	Торможение постоянным током, Комбинированное торможение, встроенный тормозной блок (для преобразователей от 0.12 кВт ... 75 кВт)
Степень защиты	IP 20
Рабочая температура (без понижения)	-10°C ... +50°C
Высотные характеристики	До 1000 м над уровнем моря без снижения мощности
Функции защиты по:	Пониженного напряжения
	Перенапряжению
	Перегрузке
	Замыканию на землю
	Короткому замыканию
	Блокировке двигателя
	опрокидывания двигателя
	Перегреву двигателя по I _{2t}
	Перегреву преобразователя
	изменения параметров
Нормы и сертификация	uL ,с uL, CE, c-tick
Габаритные размеры и вес	тип E: 650 x 275 x 245 мм, 22 кг

На рисунке 3.1 представлен внешний вид подключенного преобразователя частоты со снятой передней крышкой.



Рис 3.1 Внешний вид преобразователя

§ 2 Исследования электропривода УКБ-4

Силовой привод вращателя и лебедки буровой установки УКБ-4 оснащен асинхронным короткозамкнутым электродвигателем переменного тока серии 4А мощностью 22 кВт, марка двигателя 4А180S4УЗ.

Таблица 3.2 Основные характеристики двигателя силового привода станка СКБ-4.

Номинальная мощность	22 кВт
Коэффициент мощности	0,9
К.П.Д.	0,9
Кратность пускового момента	1,4
Перегрузочная способность	2,2
Высота от основания до оси	180 мм

Вращающий момент двигателя передается через соединительную муфту в коробку передач бурового станка. Откуда он передается либо к вращателю, либо к барабанам лебедки.

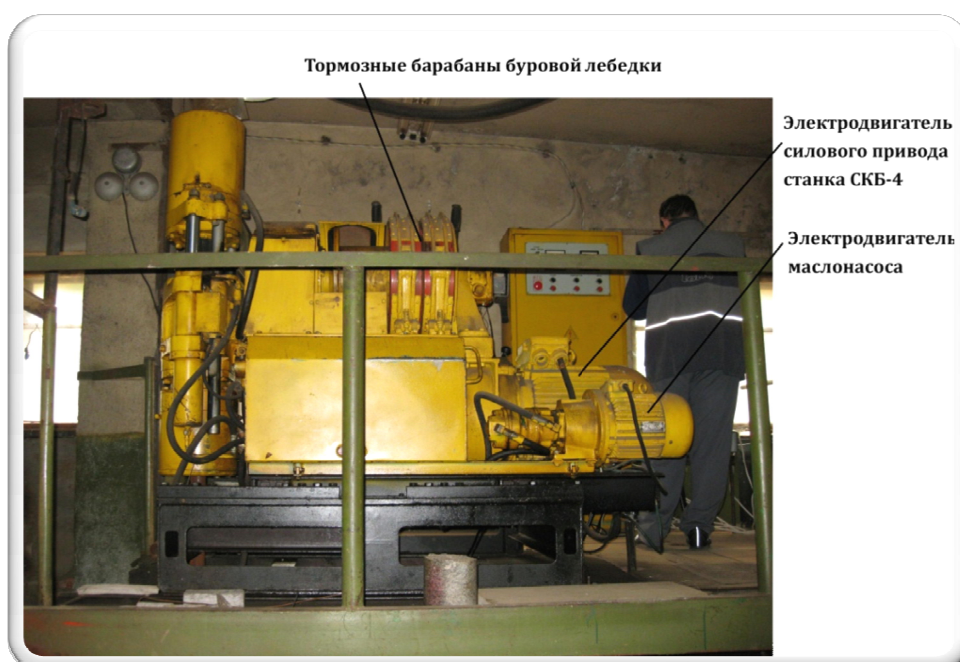


Рис 3.2. Буровой станок СКБ-4. Вид сбоку.

Также буровой станок СКБ-4 оснащен гидросистемой, выполняющей функции подъема и опускания шпинделя станка; перехвата ведущей трубы буровой колонны; перемещения станка к скважине и от нее, при выполнении спускоподъемных операций. В качестве привода гидросистемы используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, мощностью 8 кВт.

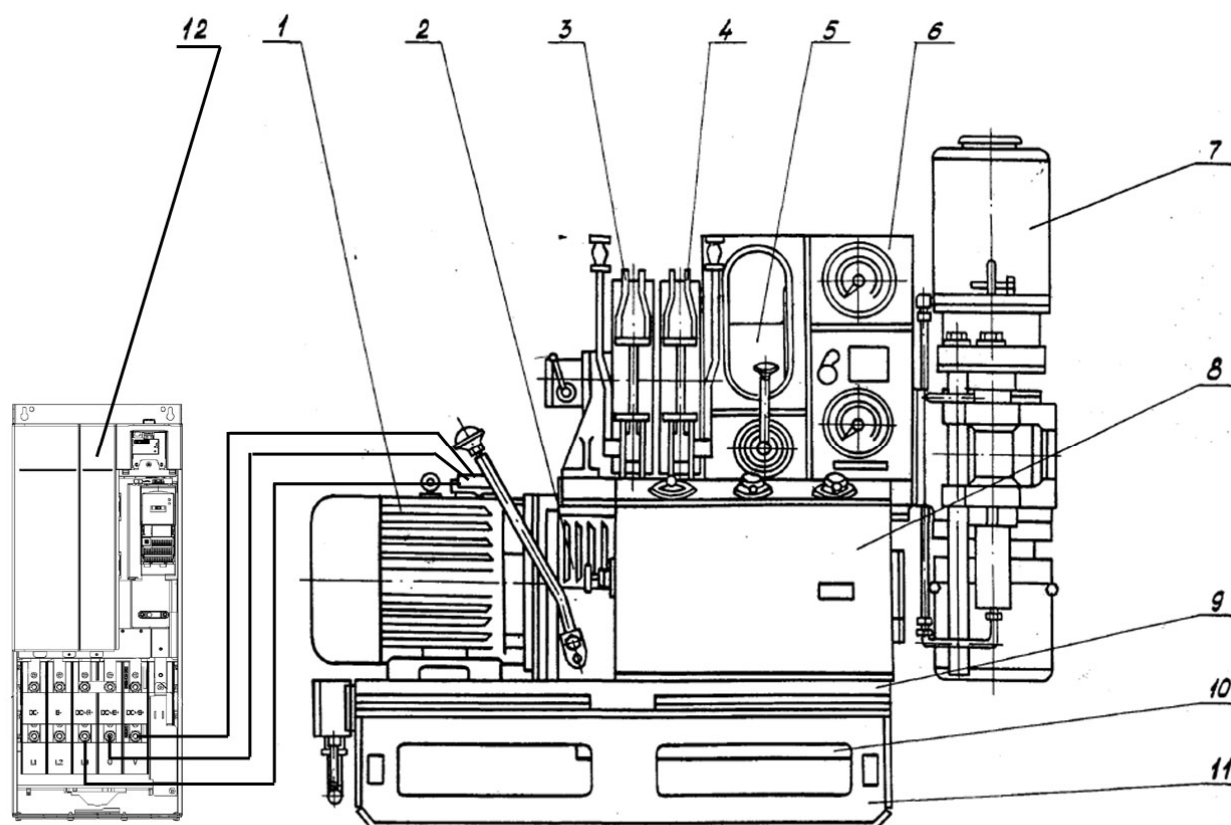


Рис. 3.3 Частотно регулируемый буровой станок СКБ-4

1- Двигатель 4А180S4УЗ, 2 – сцепление; 3 – тормоз подъема; 4 – тормоз спуска; 5 – лебедка; 6 – трансмиссия; 7 – вращатель; 8 – гидросистема станка с автоперехватом; 9 – станина; 10 – цилиндр перемещения станка; 11 – рама; 12 – преобразователь частоты.

Кроме того, в состав буровой установки входит плунжерный буровой насос, также оснащенный короткозамкнутым асинхронным электродвигателем.

Электрическая схема бурового станка СКБ-4 представлена на рисунке 3.4.

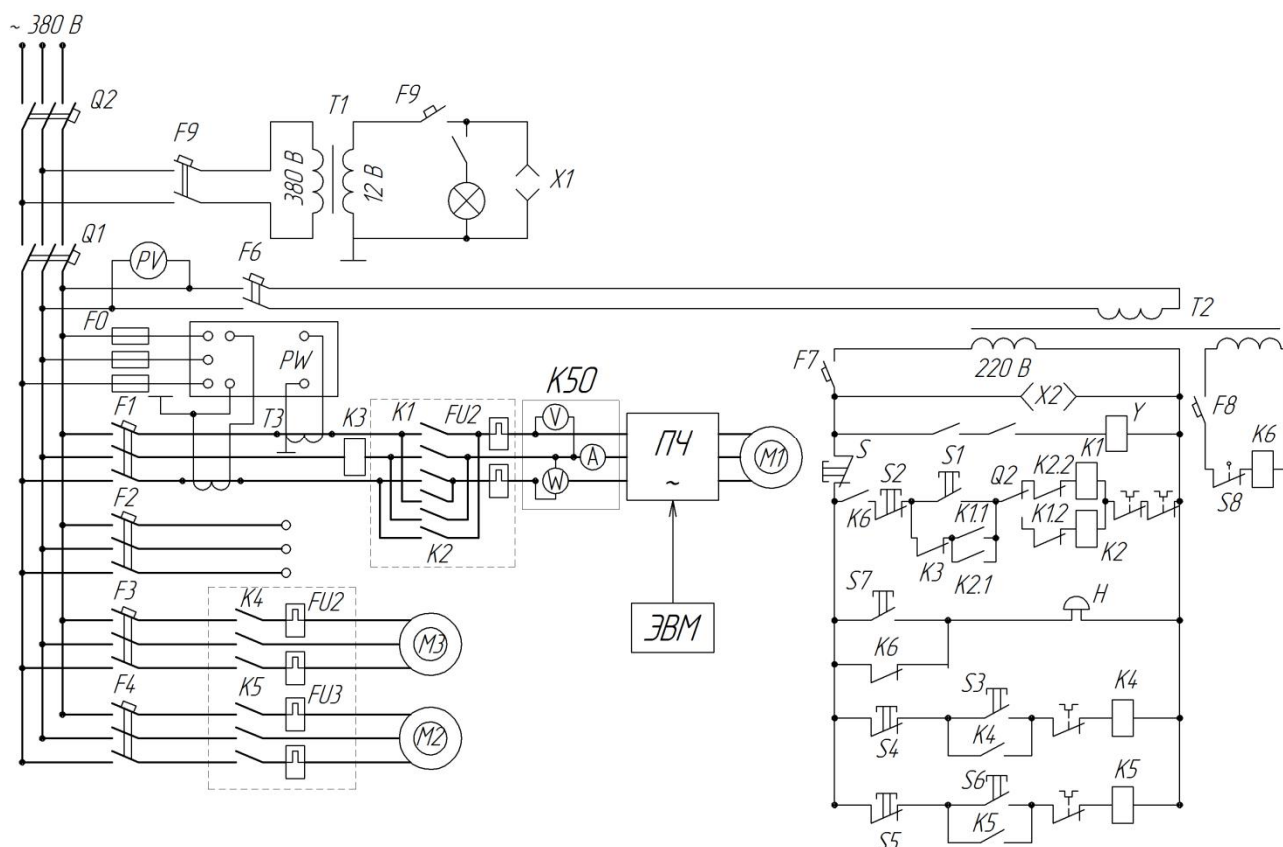


Рис 3.4 Электрическая схема бурового станка СКБ-4

Статорные обмотки электродвигателя вращателя М1 подключены к преобразователю частоты (ПЧ) Siemens micromaster 440. Питание ПЧ осуществляется от электросети переменного напряжения 380 В через силовые контакты магнитного контактора К1. Контактор К2 служит для реверса двигателя при отсутствии ПЧ, поэтому он не используется. F1, F2, F3, F4 – автоматические воздушные выключатели, Q1, Q2 – силовые рубильники.

М2 – двигатель маслонасоса установки, М3 – двигатель бурового насоса.

Нагрузка на валу двигателя вращателя создавалась за счет бурения гранитного блока породы, её величина изменяется в зависимости от скорости вращения бурового снаряда и осевого давления на блок породы.

Текущая величина осевого давления определялась по буровому дриллометру, а скорость вращения изменялась в зависимости от передачи, включенной в коробке передач (в случае ступенчатого регулирования). При работе

электродвигателя вращателя от преобразователя частоты (ПЧ), скорость вращения бурового снаряда задается на преобразователе через его панель управления.

Микропроцессорная система управления электроприводом входит в состав ПЧ. Управление электроприводом может осуществляться как со стороны панели управления ПЧ, так и с подключенного к нему компьютера. Требуемый темп разгона и замедления электропривода устанавливается при параметрировании ПЧ.

Наблюдение за изменениями переменных электропривода возможно с помощью компьютера, подключенного к ПЧ, измерительных приборов комплекта К50 и осциллографа.

Измерительный комплект К50 позволяет измерять ток, напряжение и активную мощность в каждой фазе по очереди. В случае использования преобразователя частоты значение токов и текущая мощность определялась по снятым осциллограммам, т.к. преобразователь частоты является нелинейным потребителем, в результате чего в питающих его проводах протекают несинусоидальные токи. (рис 3.5) Для определения значения токов был разработан алгоритм, в котором используется численное интегрирование. В его основе заложена классическая формула нахождения коэффициента мощности как отношение активной мощности к полной, т. е.

$$\cos \phi = \frac{P}{S}$$

где P - активная мощность; S - полная мощность. Полная мощность определяется по формуле :

$$S = UI$$

где U и I - действующие (эффективные) значения напряжения и тока, определяемые следующими выражениями:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

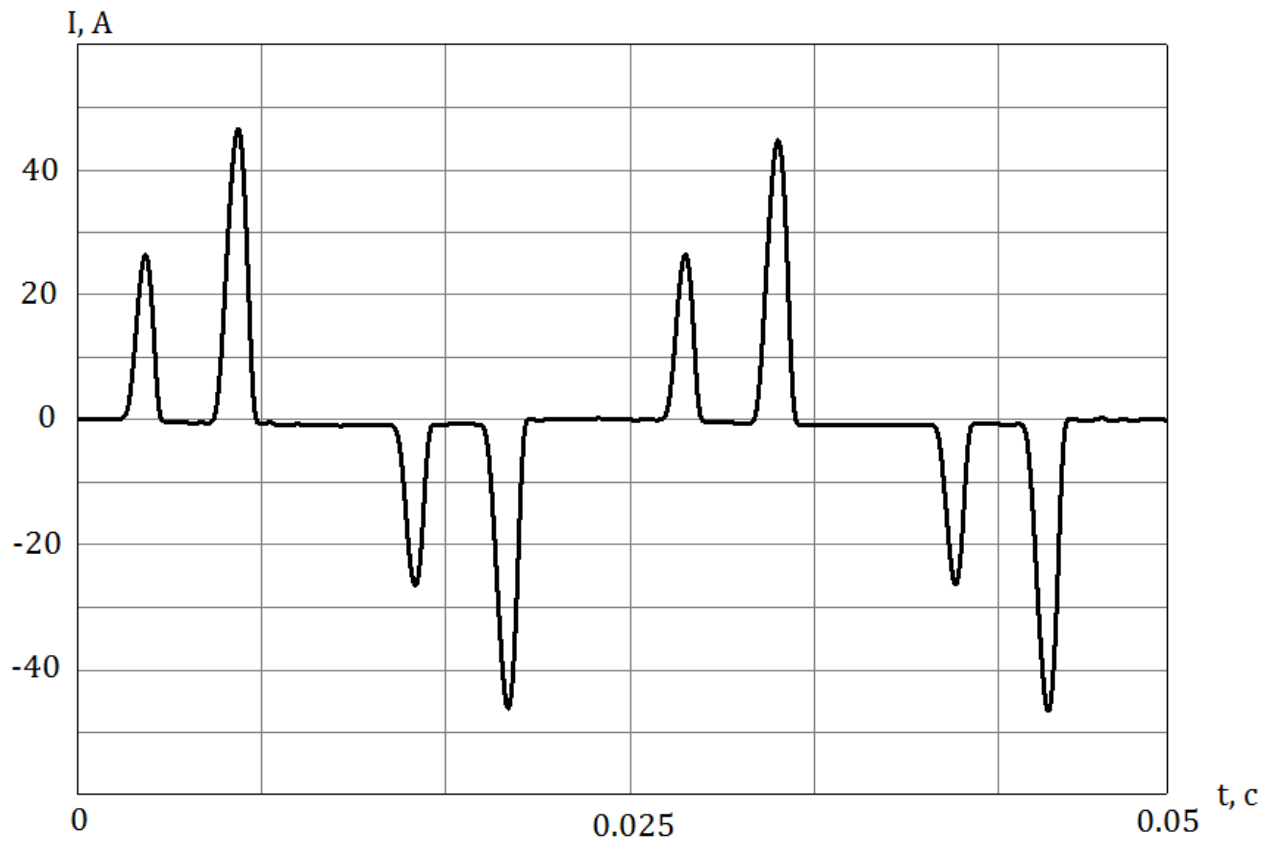


Рис. 3.5 Осциллограмма тока в фазе А при питании двигателя от преобразователя частоты.

Активная мощность периодического тока произвольной формы определяется как средняя мощность за период [73]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt$$

Если мгновенные значения напряжения и тока выразить в виде тригонометрических рядов, то получим:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{k=0}^{\infty} U_{km} \cdot \sin(k\omega t + \psi_{uk}) \right] \left[\sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \cdot \sin(k\omega t + \psi_{ik}) \right] dt$$

Так как среднее за период значение произведения мгновенных значений синусоид различной частоты равно нулю и тригонометрические ряды абсолютно сходятся при любых частотах ω [73], то

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{k=0}^{\infty} U_{km} \cdot I_{km} \cdot \sin(k\omega t + \psi_{uk}) \cdot \sin(k\omega t + \psi_{ik}) \right] dt$$

После интегрирования:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{km} \cdot I_{km} \cdot \cos(\varphi_k)}{2} = \sum_{k=0}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \cos(\varphi_k)$$

где $\varphi_k = \varphi_{uk} - \varphi_{ik}$

Из этого следует вывод, что средняя мощность несинусоидального тока равна сумме средних мощностей отдельных гармоник (постоянная составляющая рассматривается как нулевая гармоника с $\varphi_0=0$)

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k$$

Полная мощность определялась по формуле:

$$S = UI = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 \sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}$$

Реактивная мощность определялась как сумма реактивных мощностей отдельных гармоник:

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k$$

Надо отметить, что для несинусоидальных токов квадрат полной мощности обычно больше суммы квадратов активной и реактивной мощностей:

$$S^2 \geq P^2 + Q^2$$

При реализации алгоритма вычисляющего активную, реактивную, полную мощность, а так же коэффициент мощности была выбрана частота дискретизации 15 кГц на канал или 300 отсчётов на период основной частоты. Выбор длины отрезка интегрирования в одну секунду позволяет учесть все гармоники с интервалом 1 Гц вплоть до частоты 7500 Гц, т. е. до 150-й гармоники основной частоты. 12-битовое квантование даёт точность измерения тока и/или напряжения в 0,05 %, что заведомо лучше точностных показателей любого измерительного прибора. Уровень шумов в условиях промышленного стенда составляет 2-3 %, так что по этому показателю имеется двухкратный запас.[38]

Вычисления проводились в системе с округлением на самой последней стадии, перед выдачей результата, поэтому чисто вычислительные погрешности при реализации данного алгоритма можно не учитывать. Таким образом, алгоритм, заложенный в программе, определяет значение коэффициента мощности с большой точностью, что позволяет дать объективную оценку эффективности работы оборудования, к тому же, программа может быть использована для расчёта коэффициентов мощности трёхфазного асинхронного двигателя и любого потребителя электрической энергии.

§ 3 Методика эксперимента

Эксперимент проводился в 2 этапа.

На первом этапе нагрузка на буровой станок задавалась путем бурения гранитного блока твердосплавной коронкой диаметром 72 мм.

В первую очередь были получены данные по току напряжению, активной мощности и форме синусоиды напряжения при работе бурового станка без преобразователя частоты. Частота питающего двигателя напряжения была номинальной (50 Гц), соответственно частота вращения электродвигателя в этом случае равнялась 1450 об/мин. Было произведено 28 замеров при осевой нагрузке от 500 до 2000 кг с шагом 250 кг на 1, 2, 3 и 4 скоростях бурового станка (155, 280, 390, 435 об/мин). Затем эти замеры были повторены дважды для снижения ошибок при замерах и исключения возможных случайных ошибок.

Так же для всех случаев нагрузки были проведены контрольные замеры силы тока в нейтральном проводе.

В ходе выполнения экспериментальных исследований обмотки электродвигателя вращателя бурового станка были соединены звездой.

Сила тока, величина фазного напряжения и активная мощность были измерена с помощью комплекта К50. Форма синусоиды напряжения – с помощью осциллографа (рис 3.6).

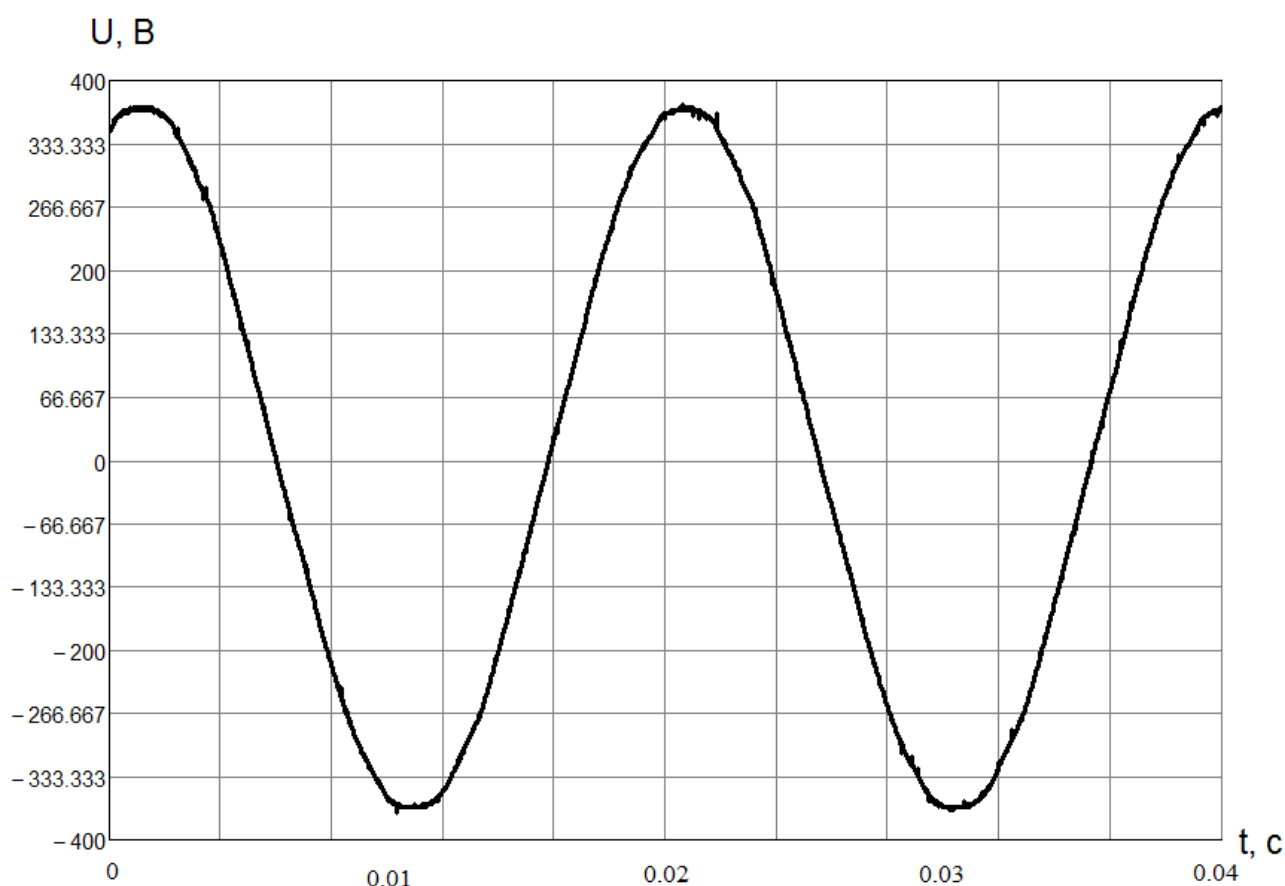


Рис 3.6 Осциллограмма фазного напряжения в сети питающей двигатель вращателя бурового станка СКБ-4 при его работе на номинальной нагрузке.

Затем к электродвигателю вращателя был подключен преобразователь частоты и дальнейшее регулирование частоты вращения бурового снаряда станка СКБ-4 осуществлялось за счет изменения частоты вращения электродвигателя, а не с помощью коробки передач. При этом в коробке передач станка была постоянно включена 4 скорость (435 об/мин при номинальной частоте вращения

двигателя). Это объясняется тем, что при этом есть возможность сравнить работу станка на сниженных оборотах за счет механической передачи в коробке и за счет снижения частоты питающего напряжения, а так же оценить влияние преобразователя на к.п.д. станка при одинаковой механической передаче. Кроме того если бы была включена наивысшая 8 скорость в коробке передач (1600 об/мин) с минимальным количеством задействованных зубчатых пар, то ввиду снижения максимального крутящего момента электродвигателя при низких частотах питающего напряжения (5-15 Гц) не возможно было бы осуществлять бурение на низких частотах вращения бурового снаряда.

2 этап. Ввиду отсутствия длинной буровой колонны, а так же небольшого диаметра коронки довести нагрузку на электродвигатель вращателя до номинального значения не представлялось возможным, поэтому был проведен еще один ряд замеров при нагрузке создаваемой тормозом лебедки бурового станка.

Дискретно регулируя нагрузку создаваемую тормозом буровой лебедки были сняты необходимые данные при высоких нагрузках на электродвигателе вращателя бурового станка. Для точного задания необходимой нагрузки на двигатель, на рычаг тормоза лебедки подвешивался набор грузов известной массы. Изменением количества грузов изменялась нагрузка, передаваемая через рычаг на тормозные колодки лебедки, таким образом создавалась нагрузка на валу двигателя.

По угловой скорости вращения барабана лебедки, его ширине, диаметру и коэффициенту трения колодки о барабан был установлен момент сопротивления приведенный к валу электродвигателя вращателя бурового станка.

Пуск двигателя этого станка всегда осуществляется при выжатом сцеплении коробки передач, поэтому снятие осциллограммы пусковых токов были произведены при включенной нейтральной скорости коробки передач станка.

В одну из фаз электросети, питающей двигатель вращателя был подсоединен последовательно трансформатор тока УТТ-5М. Его коэффициент трансформации

был равен 10и. Во вторичную обмотку трансформатора тока был подключен последовательно резистор сопротивлением 2 ома. Измеряя осциллографом падение напряжения на резисторе были установлены значения тока в фазе электросети. Также параллельно второй щуп осциллографа был подсоединен между этой фазой и нулевым проводом для определения напряжения этой фазы.

В ходе выполнения эксперимента были получены осциллограммы тока и напряжения в питающей сети при работе бурового станка в широком диапазоне нагрузок – от холостого хода до номинальной нагрузки. Также были получены осциллограммы переходных процессов в питающей сети при старте двигателя вращателя бурового станка.

Длительность записи переходных процессов в электросети составила от 0,2 до 6 секунд.

§ 4 Исследования электропривода ЗИФ-650

Силовой привод вращателя и лебедки буровой установки ЗИФ-650 оснащен асинхронным короткозамкнутым электродвигателем переменного тока серии 4А мощностью 30 кВт, в связи с тем что номинальная мощность электродвигателя значительно превышает мощность преобразователя частоты, буровой станок был переоборудован асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором мощностью 18 кВт, серии АО.

Вращающий момент двигателя передавался через муфту скольжения в коробку передач, откуда дальше через станок на вращатель. Нагрузка создавалась за счет бурения бетонного блока твердосплавной коронкой, диаметром 72 мм.

Методически испытания плавно-регулируемого привода на станке ЗИФ-650 проводились аналогично первому этапу испытаний привода бурового станка СКБ-4.

Ввиду значительного износа используемого бурового станка ЗИФ-650, данные полученные при его испытании имеют худшую величину сходимости с результатами компьютерного моделирования.

§ 5 Результаты экспериментальных исследований

На рисунке 3. 7 представлена осциллограмма тока потребляемого из сети при пуске станка СКБ-4, без использования частотного преобразователя.

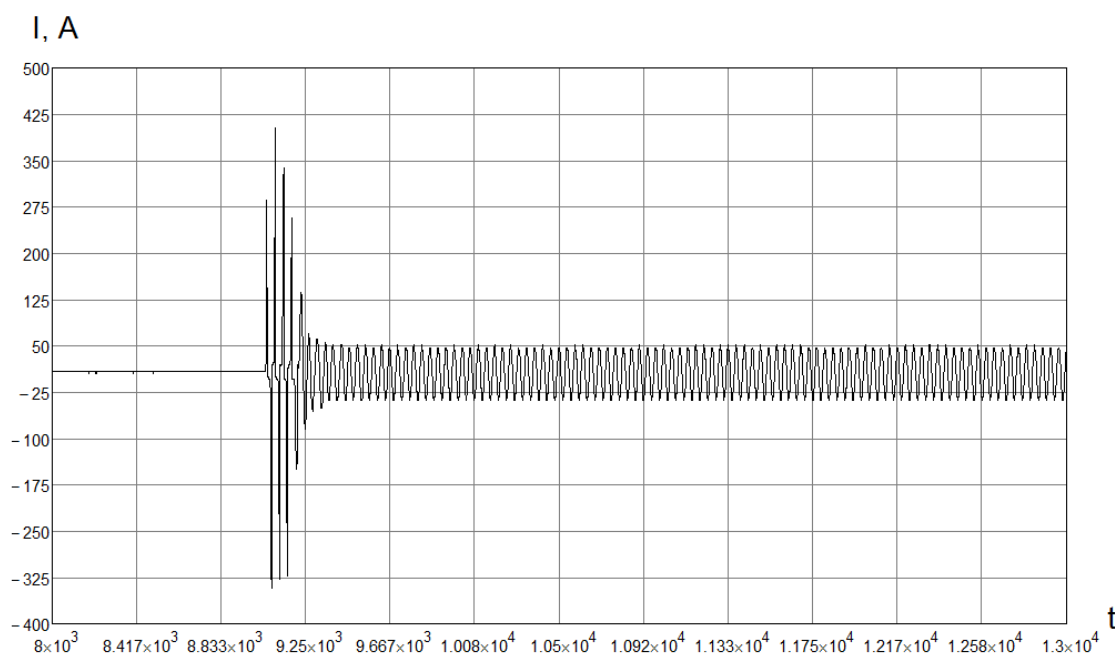


Рис.3.7 Осциллограмма тока при пуске двигателя вращателя станка СКБ-4

Анализируя эту осциллограмму приходим к выводу о наличии значительных пусковых токов, превышающий номинальный в 5-6 раз, в сети в момент пуска двигателя вращателя. На рисунке 3.8 представлена осциллограмма пусковых токов двигателя, полученная путем математического моделирования. При сравнении видно что результаты математического моделирования совпадают с реальными данными как по амплитуде, так и по длительности переходного процесса.

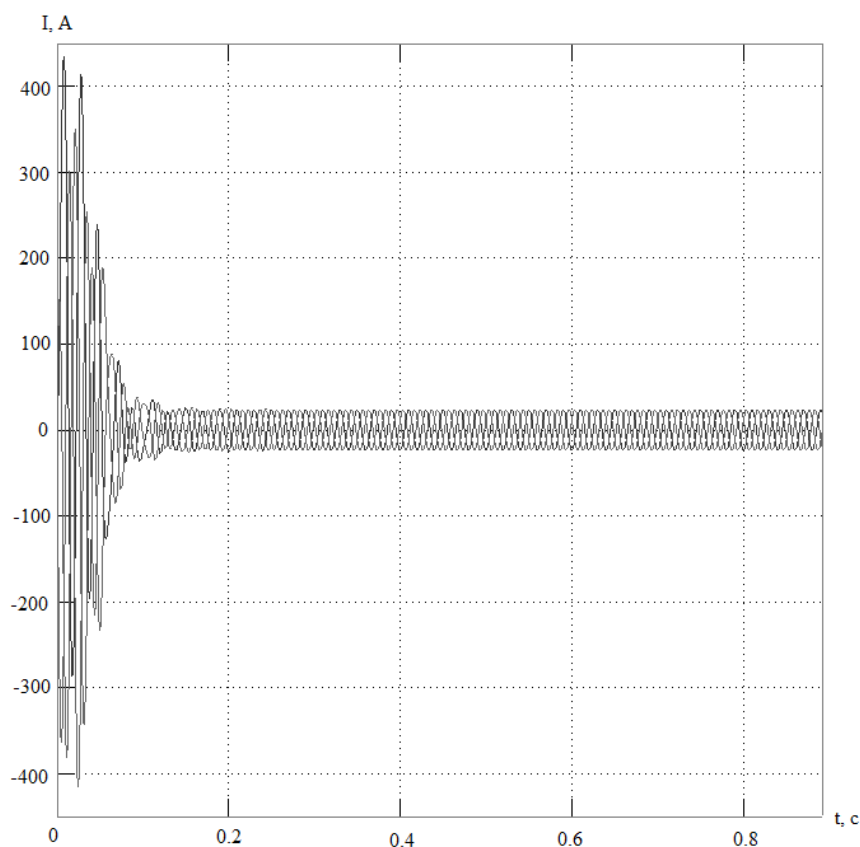


Рис. 3.8. *Осциллограмма тока при пуске двигателя вращателя станка СКБ-4, полученная путем математического моделирования*

Ниже на рис 3.9 представлена осциллограмма тока в одной из фаз питающих буровой станок при его пуске с использованием преобразователя частоты.

В случае плавного старта двигателя вращателя с помощью преобразователя частоты ток превышает номинальное значение не более чем на 20%. Из вышесказанного следует вывод о значительном снижении динамических нагрузок при стартах электропривода вращателя.

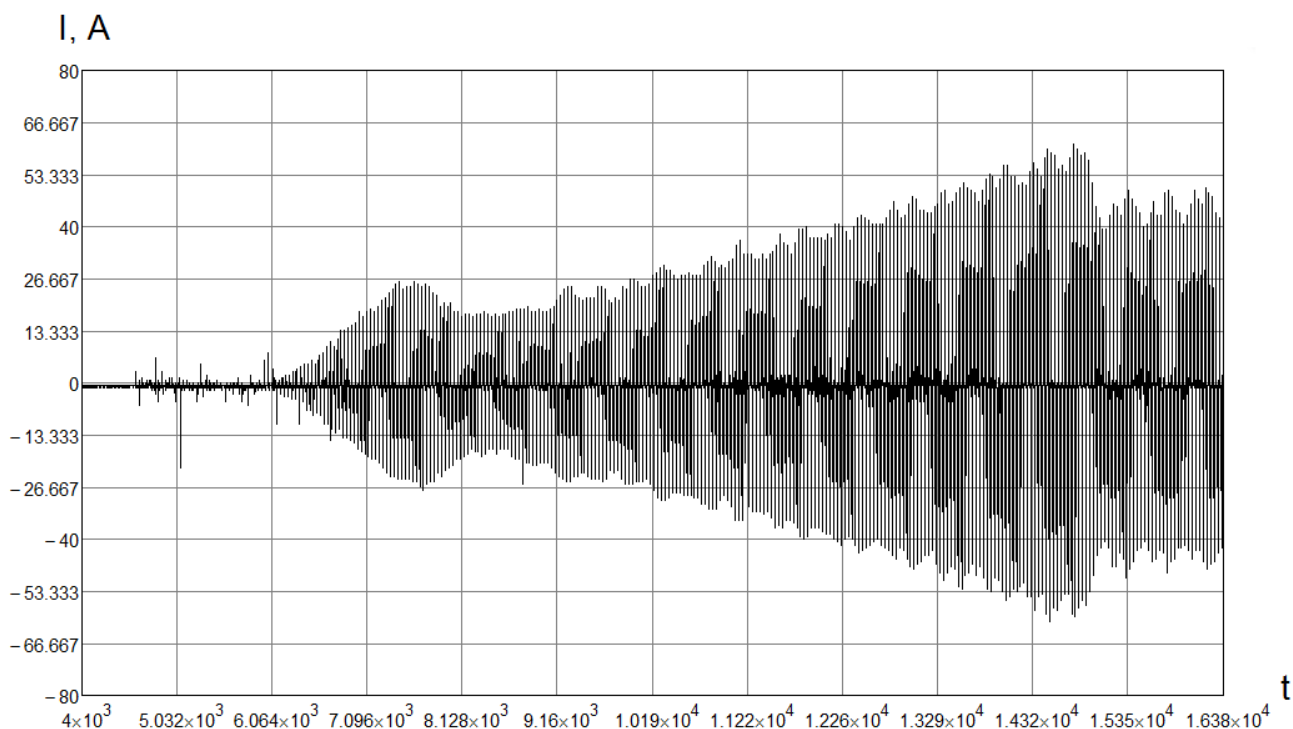


Рис.3.9 Осциллограмма тока при пуске двигателя вращателя станка СКБ-4 с использованием преобразователя частоты

Анализируя осциллограммы токов и напряжений полученных экспериментальным путем и осциллограммы полученные в результате математического моделирования можно сделать вывод о достоверности математической модели.

В ходе экспериментов по управлению амплитудой питающего напряжения было обнаружено, что в режимах значительной недогрузки двигателя снижение амплитуды даёт энергосберегающий эффект, а именно повышает значения коэффициента мощности асинхронного двигателя, при этом частота вращения вала двигателя изменяется незначительно (не более 10%).

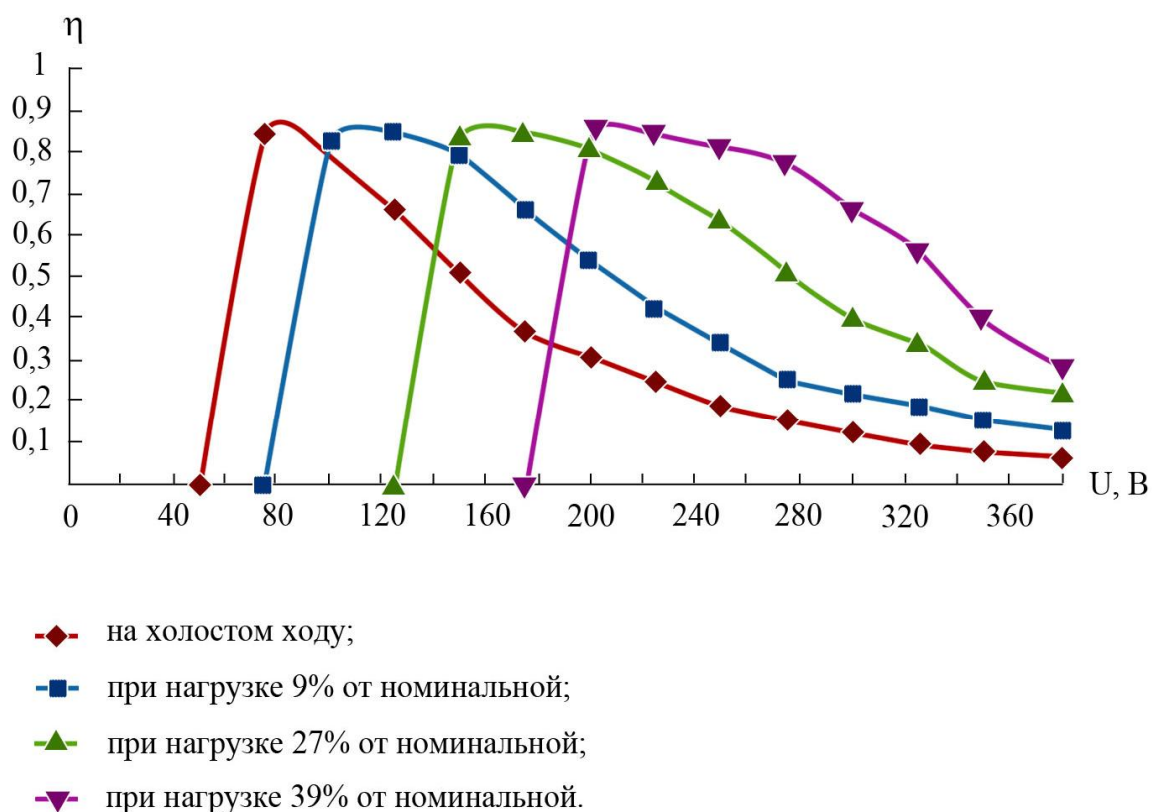


Рис. 3.10 Зависимость коэффициента мощности двигателя от напряжения питания

Понижение амплитуды питающего напряжения приводит к увеличению коэффициента мощности (рис. 3.10). Так, например, на холостом ходу уменьшение амплитуды питающего напряжения с 380 до 75 В привело к повышению коэффициента мощности со значения 0,21 до 0,86 при незначительном падении частоты вращения выходного вала асинхронного двигателя. А при нагрузке 27 % от номинальной удалось достигнуть значения коэффициента мощности 0,86 при напряжении питания 160 В. Причём во всех случаях частота вращения выходного вала двигателя изменяется несущественно, что позволяет предположить возможность применения такого управления с целью снижения энергопотребления в реальных технологических процессах в бурении.

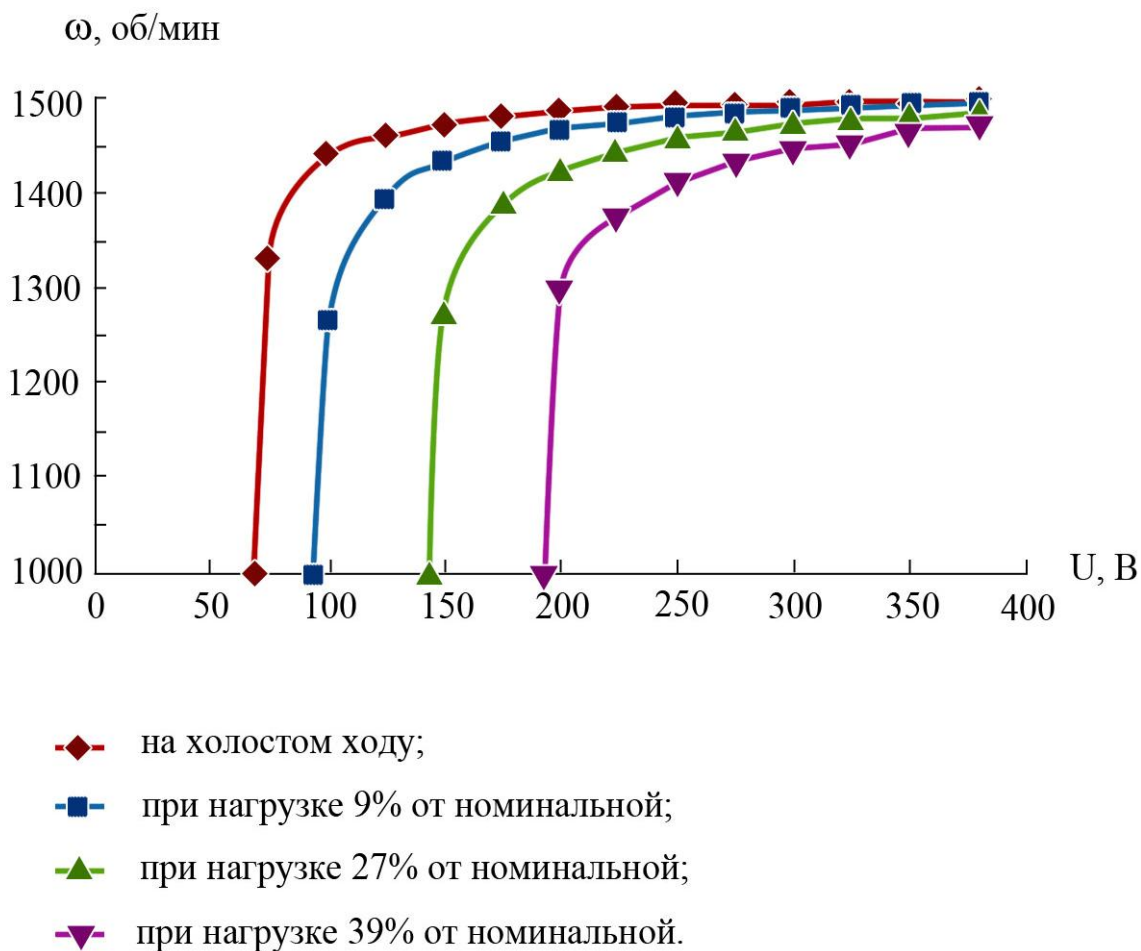


Рис. 3.11 Падение частоты вращения выходного вала двигателя при снижении напряжения питания для четырёх уровней нагрузки

На рис. 3.11 показан диапазон падения скорости вращения выходного вала при снижении амплитуды питающего напряжения для четырёх уровней нагрузки. Из графика видно, что для каждого случая (при каждой нагрузке) существуют области постоянного значения частоты вращения вала, малого изменения, значительного её снижения и область останова. В большинстве случаев падение производительности недопустимо, а повышение производительности, наоборот, приводит к увеличению производительности и снижению времени бурового цикла, что положительно отразится и на себестоимости работ. Для поддержания частоты вращения вала двигателя в допустимых пределах, а соответственно и производительности на высоком уровне проводились эксперименты с

увеличением частоты питающего напряжения, при изменяющейся нагрузке на выходном валу (рис. 3.12).

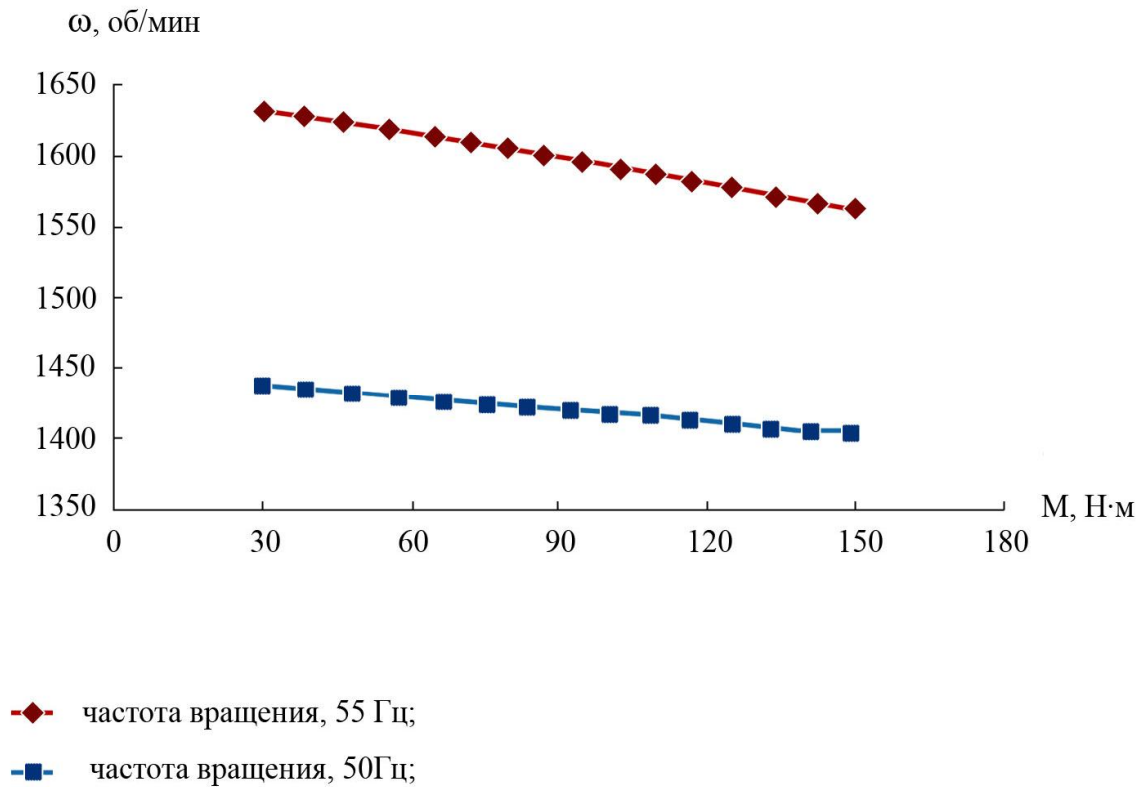


Рис. 3.12 Зависимость частоты вращения вала двигателя от нагрузочного момента при изменении частоты

Даже при незначительном повышении используемой частоты (с 50 до 55 Гц) частота вращения выходного вала возрастает, а это значит, что возрастает и производительность.

Для снижения энергопотребления и повышения производительности асинхронного двигателя в режиме недогрузки необходимо одновременно осуществлять амплитудное и частотное управление двигателем, т. е. поддерживать оптимальные значения коэффициента мощности и частоты вращения вала двигателя в конкретном нагрузочном режиме. Задача заключается в том, чтобы при заданном моменте нагрузки и заданной скорости ротора определить такие значения частоты и амплитуды напряжения, при которых двигатель работал бы с максимальной энергоэффективностью, т. е. обеспечивался

минимум потерь, поддерживалось оптимальное значение коэффициента мощности.

Выводы:

1. Для снижения энергопотребления и повышения производительности асинхронного двигателя в режиме недогрузки необходимо одновременно осуществлять амплитудное и частотное управление двигателем
2. Использование частотно-регулируемого привода значительно снижает пусковые токи, что позволяет обеспечить пуск двигателя при питании от локального энергоисточника равной мощности
3. Данные полученные экспериментальным путем имеют высокую сходимость с результатами, полученными путем математического моделирования частотно регулируемого привода буровой установки УКБ-4, чем подтверждают достоверность математической модели и возможность ее использования при обосновании оптимальных параметров бурения.
4. Результаты экспериментальных исследований подтвердили вывод о том, что частотно регулируемый электропривод позволяет получить более благоприятные переходные процессы при различных режимах работы буровой установки УКБ-4.
5. Результаты экспериментальных исследований подтвердили достоверность математической модели и вывод сделанный на основе математического моделирования, что частотно регулируемый электропривод позволяет экономить до 30% электроэнергии при бурении, за счет более точного подбора технологического режима бурения.

Глава 4. Техничко-экономическая эффективность использования частотно-регулируемого привода в бурении

§ 1 Методические основы технико-экономической оценки затрат на энергообеспечение буровых работ

В настоящее время наиболее объективным способом технико-экономической оценки возможных вариантов проведения геологоразведочных работ является способ, основанный на расчете и сравнении специального экономического показателя - приведенных затрат.[64]

Смысл этого показателя в том, что конечная стоимость будущих работ пересчитывается с некоторой процентной ставкой к настоящему времени, что позволяет не только сравнить стоимости различных проектов будущих работ, но и оценить возможные альтернативные вложения и выбрать наиболее экономически целесообразный путь. В приведенных затратах учитывается остаточная стоимость оборудования приведенная к моменту начала работ, экономия на налоге на прибыль в связи с текущими затратами, амортизационными отчислениями и т.д.

Методика расчета приведенных затрат на энергообеспечение буровых работ для возможных и наиболее распространенных вариантов энергоснабжения разрабатывалась в МГРИ-РГГРУ – под научным руководством профессора А.М. Лимитовского, при участии кафедры корпоративных финансов АНХ при правительстве РФ.

Основные результаты этих многолетних исследований и разработок, включая новейшие, актуальные именно для современного этапа развития нашей страны, отражены в ряде недавно выпущенных учебных пособий и руководств . Методика используемая в данной работе основана на последних результатах этих исследований и разработок.

§ 2 Основные зависимости для подсчета суммы приведенных затрат

Для определения приведенных затрат рассчитывают расходы по всем статьям за принятый единичный период (месяц, квартал, год) и их сумму за расчетное число периодов, приведенную к настоящему времени.

Основная формула определения приведенных затрат имеет вид:

$$З = -K - K_0 - Ц - И + D + E + A$$

где: K – начальные капиталовложения (стоимость оборудования, линий электропередач и т.п.);

K_0 – необходимый начальный оборотный капитал (в основном, это запас топлива);

$Ц$ – стоимость подключения к районной линии электропередач;

$И$ – стоимость текущих затрат (на заработную плату, электроэнергию и пр.);

D – остаточная стоимость оборудования, приведенная к исходному моменту;

E – экономия на налоге на прибыль в связи с текущими затратами;

A – экономия на налоге на прибыль в связи с амортизационными отчислениями.

$$И = И_{\kappa} \cdot \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i}, \text{ руб.}$$

где: $И_{\kappa}$ – текущие эксплуатационные затраты за принятый временной период (квартал, месяц);

i – ставка альтернативного вложения (квартальная, месячная) в долях единицы;

n – количество временных интервалов, за которое проводится анализ.

$$D = \frac{K(1 - pn)}{(1 + i)^n}, \text{ руб.}$$

где: p – коэффициент амортизации оборудования.

$$E = И_{\kappa} \cdot C \cdot \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i}, \text{ руб.,}$$

где: C – ставка налога на прибыль.

$$A = K \cdot p \cdot C \cdot \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i}, \text{ руб.}$$

Начальные капиталовложения определяются по справочникам как сумма укрупненных показателей стоимости энергетического оборудования и элементов системы электроснабжения.

Эксплуатационные затраты на рассматриваемый отрезок времени складываются из ряда издержек:

$$I_k = I_э + I_{нэ}, \text{ руб.}$$

$I_э$ - издержки на электроэнергию или топливо,

$I_{нэ}$ - издержки, связанные с потерей энергии в линиях и трансформаторах,

$N_{дэс}$ - количество дизельных электростанций,

κ_p - районный коэффициент к зарплате ($\kappa_p = 1 \div 2$),

n_c - число смен* в рассматриваемом периоде (месяце, квартале, годе);

n_c - число смен в рассматриваемом периоде,

L - длина линий электропередач от районной сети до места ведения работ.

Если энергия поступает от районной сети, то

$$I_э = P_c \cdot T \cdot C_э, \text{ где}$$

P_c - средняя потребляемая мощность, кВт;

T - время работы потребителей за принятый период, ч.;

$C_э$ - стоимость 1 кВт ч электроэнергии, руб. / кВт ч;

Если электроэнергия вырабатывается дизельными электростанциями, то

$$I_{эд} = P_c \cdot T \cdot q \cdot C_m,$$

где: C_m - стоимость топлива руб./кг;

q - удельный расход топлива на выработку 1 кВт ч, кг/кВт ч.

Издержки, связанные с потерями энергии в линиях электропередач:

$$\text{от госсети: } I_{нэ} = \frac{P_c^2 \cdot T \cdot C_э \cdot l}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \gamma \cdot s}, \text{ руб.}$$

$$\text{от ДЭС: } I_{нэд} = \frac{P_c^2 \cdot T \cdot l \cdot C_m \cdot q}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \gamma \cdot s}, \text{ руб.}$$

где: U - напряжение кВ, l - длина электропередачи, км, s - сечение проводов мм²,

γ - проводимость $м / Ом \cdot мм^2$, $\cos \varphi$ - коэффициент мощности, S_c – средняя полная мощность.

Издержки, связанные с потерями энергии в трансформаторах:

$$I_{нэт} = 0,02 \cdot S_m \cdot T \cdot C_э, \text{ руб.},$$

где S_m - мощность установленных трансформаторов, $кВ \cdot А$.

где N - число скважин, пробуренных в принятый период;

d - расстояние между скважинами, $км$;

K_d – стоимость 1 $км$ линии,

j – количество одновременно работающих буровых установок.

p - коэффициент амортизационных отчислений.

В зависимости от варианта электроснабжения участка работ некоторые составляющие приведенных затрат будут отсутствовать, так, например, в случае питания от региональной линии электропередач будет отсутствовать начальный оборотный капитал, а в случае использования индивидуальных энергоисточников - не будет издержек на распределительные линии и т.д. Поэтому для повышения точности оценки экономической эффективности использования частотно-регулируемого электропривода в бурении необходимо рассмотреть основные типовые варианты электроснабжения.

§ 3 Системы энергоснабжения геологоразведочных работ и их технико-экономические модели

Варианты электроснабжения геологоразведочных работ основаны на классификации по наиболее важным признакам [64]:

- 1) по типу источника энергии - локальный источник или районная сеть;
- 2) по характеру его эксплуатации - стационарный источник энергии или передвижной;
- 3) по его местоположению - центральный или рассредоточенный.

В качестве базовых вариантов электроснабжения буровых работ с позиции оценки эффективности освоения частотно-регулируемого электропривода следует рассматривать:

- 1) Питание осуществляется от региональной линии электропередач (ЛЭП), при этом возможны два способа распределения энергии в непосредственной близости от буровых установок (рис 4.1):
 - а. На участке проведения буровых работ устанавливается одна общая трансформаторная подстанция, а к буровым установкам подводятся низковольтные распределительные линии.
 - б. Рядом с каждой буровой установкой устанавливается индивидуальная трансформаторная подстанция;

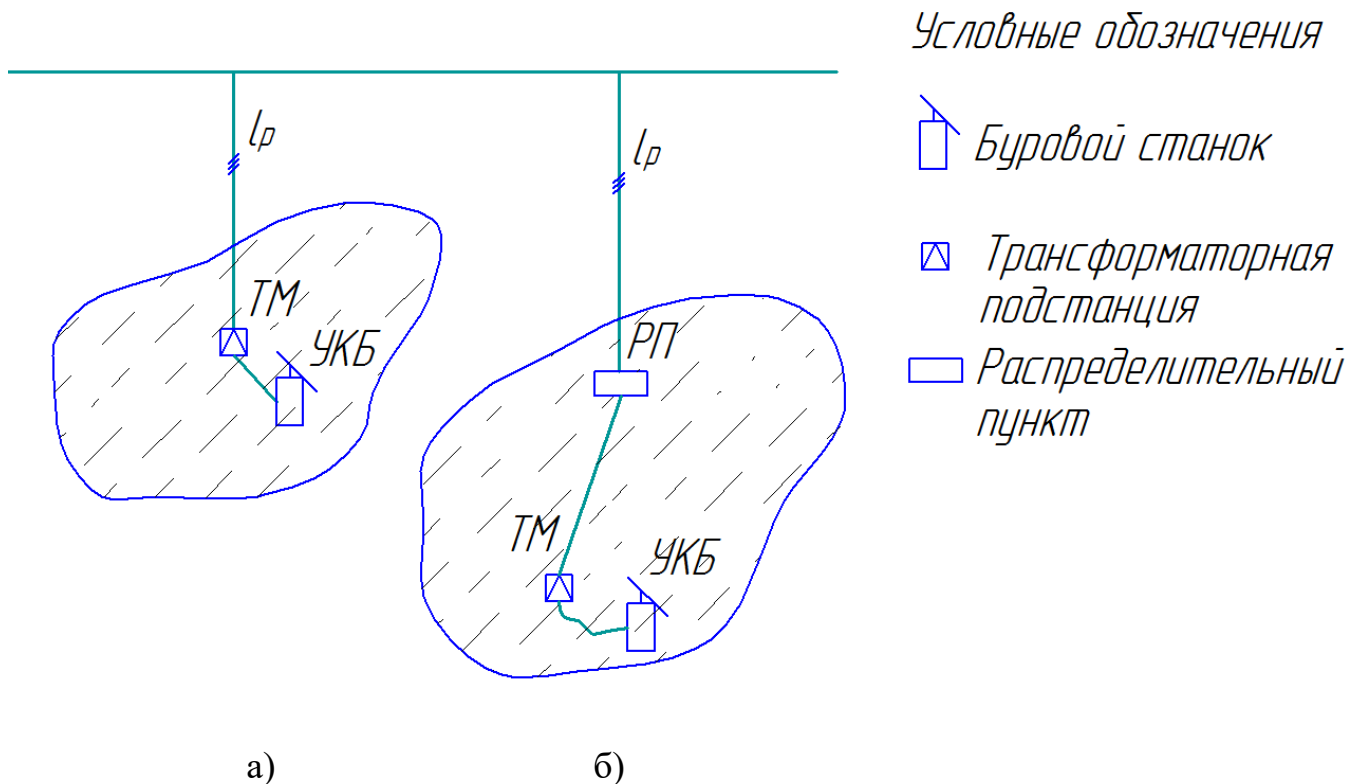
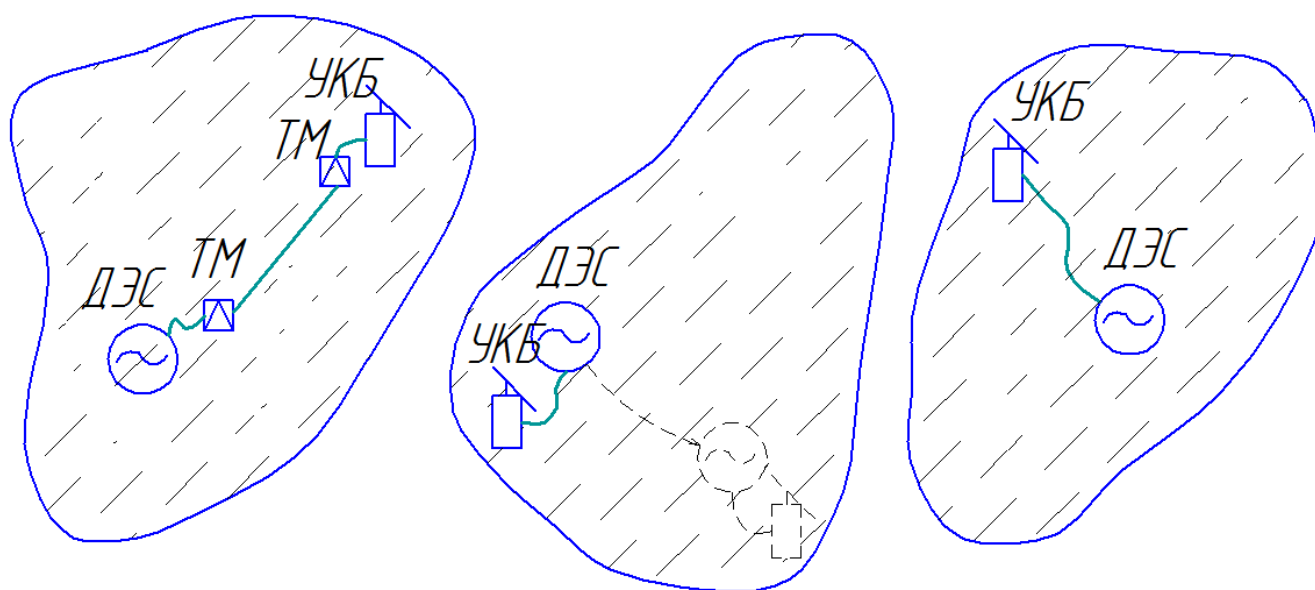


Рис. 4.1. Схемы электроснабжение от районной линии электропередач.

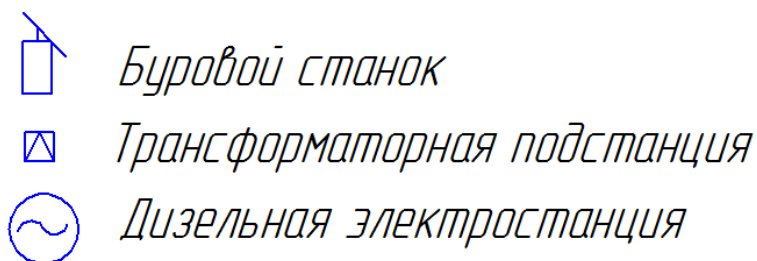
а) с единой трансформаторной подстанцией; б) с индивидуальными трансформаторными подстанциями. (l_p – линия электропередачи.)

- 2) Питание осуществляется от дизельной электростанции (ДЭС), при этом возможны варианты (рис 4.2):

- а. Буровые установки снабжает энергией одна общая ДЭС, при этом электроэнергия передается с трансформацией (на повышенном напряжении);
- б. Для каждой установки используются индивидуальные дизельные электростанции.
- в. Буровые установки снабжает энергией одна общая ДЭС, при этом электроэнергия передается без трансформаций;



Условные обозначения



а)

б)

в)

Рис. 4.2 Схема электроснабжения от дизельных электростанций

а) единая ДЭС с трансформацией энергии; б) индивидуальная ДЭС; в) единая ДЭС без трансформации.

Другие возможные варианты электроснабжения, например такие как: питание от нетрадиционных или возобновляемых источников электроэнергии,

смешанные варианты (например часть участка работ питается от единой ДЭС, а другая от индивидуальных) мы не будем рассматривать в данной работе, т.к. они применяются значительно реже.

Для каждого варианта проводится технико-экономический расчет с целью определения приведенных затрат.

Для определения приведенных затрат составляются и рассматриваются математические модели этих затрат для каждого конкретного варианта электроснабжения.

Использование частотно-регулируемого привода отражается в начальных капиталовложениях и издержках на электроэнергию.

Затем проводится сравнение приведенных затрат на энергоснабжение при проведении геологоразведочных работ по классической схеме и с использованием частотно-регулируемого электропривода буровых установок.

§ 4 Обоснование исходных параметров и задачи технико-экономического исследования

Геологоразведочные работы могут проводиться в различных климатических зонах, поэтому важным исходным параметром является районный коэффициент. Территория Российской Федерации пересекает несколько климатических зон, при этом районный коэффициент будет меняться от 1 – на юге до 2 – в районах крайнего севера.

Вторым важным параметром является количество буровых установок, которыми ведется бурение. Однако количество буровых установок будет влиять на экономический эффект от использования частотно-регулируемого привода в основном количественно, а не качественно. Поэтому все расчеты будут проводиться для одного бурового станка.

Также важно заранее определить тип буровых установок, для которых составляются математические модели затрат. В настоящей работе, как

математическое моделирование электропривода бурового станка, так и его экспериментальные исследования проводились для буровой установки УКБ-4. Поэтому и математические модели приведенных затрат составлялись для энергообеспечения буровых работ, проводимых буровыми установками УКБ-4.

Следующий исходный параметр, оказывающий значительное влияние на величину приведенных затрат – стоимость электроэнергии, или топлива в случае использования дизельных электростанций. В настоящее время стоимость электроэнергии значительно варьируется в зависимости не только от климатической зоны и близости к крупным районным электростанциям, но и от конкретного места работ, владельца местных распределительных электросетей и д.р. Поэтому определение приведенных затрат будет проводиться для диапазона цен от 1 руб/кВт до 3 руб/кВт. Аналогичная ситуация и со стоимостью дизельного топлива. Интервал цен на него в Российской Федерации составляет от 12 до 28 руб/кг. Кроме того в современных условиях весьма значим такой параметр, как стоимость подключения к линии электропередач, его величина меняется по регионам Российской Федерации от 500 до 15000 руб/кВт.

Последний наиболее важный параметр – количество скважин, которые бурит станок за определенный период времени. Этот параметр зависит от многих факторов, таких как глубина скважины, тип буримых горных пород, возможных осложнений, необходимости отбора керна для всей скважины или ее участка и пр. Для бурового станка УКБ-4 при работе в 3 смены и бурения скважин глубже 300 м это в среднем 12 скважин за квартал.

Стоимость распределительных линий, дизельных электростанций и трансформаторных подстанций взята средняя по Российской Федерации.

Из всего вышесказанного вытекает постановка задач исследования:

1. На основе представленной классификации систем энергообеспечения геологоразведочных работ и современных технико-экономических разработок составить математические модели приведенных затрат по двум базовым вариантам: подключение к региональной электросети (с использованием плавно-

регулируемого привода и без него) и питание от передвижной дизельной электростанции (с использованием плавно-регулируемого привода и без него).

2. Произвести технико-экономические расчеты по базовым вариантам энергообеспечения для буровой установки УКБ-4 применительно к различным технико-экономическим условиям эксплуатации с целью определения приведенных затрат для различных условий проведения буровых геологоразведочных работ.

3. Провести сравнение результатов расчетов приведенных затрат для работ, проводимых буровыми установками с традиционным электроприводом и с частотно-регулируемым электроприводом.

4. По результатам расчетов проанализировать влияние основных параметров (расстояние до региональной сети, стоимостные параметры, продолжительность работ) на экономическую эффективность использования частотно-регулируемого электропривода.

§ 5 Составление математических моделей затрат.

1. Питание осуществляется от региональной линии электропередач (ЛЭП).

1.1 На участке проведения буровых работ устанавливается одна общая трансформаторная подстанция, а к буровым установкам подводятся низковольтные распределительные линии. (рисунок 4.3)

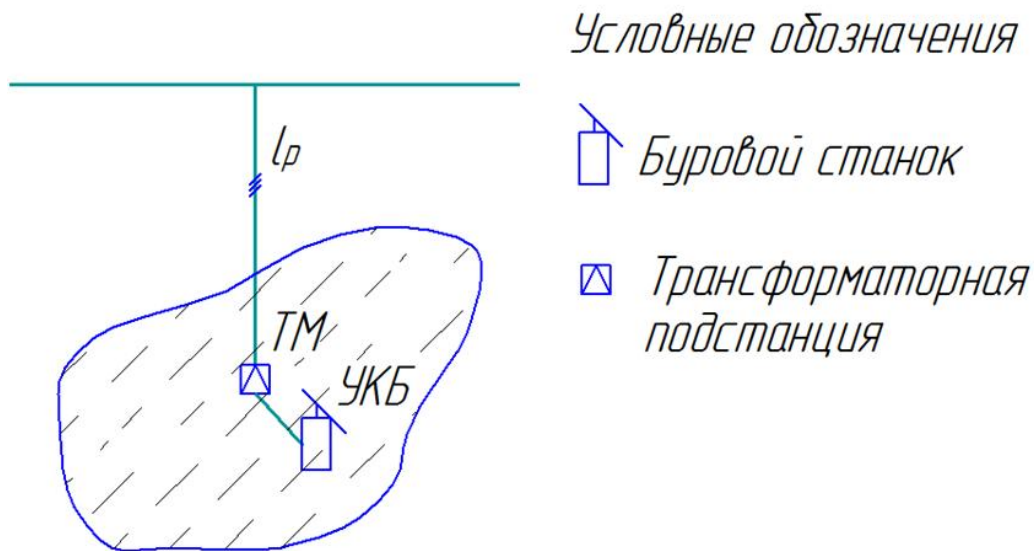


Рис. 4.3. Схемы электроснабжение от районной линии электропередач с единой трансформаторной подстанцией

В формуле расчета приведенных затрат будет отсутствовать начальный оборотный капитал, и она примет вид:

$$З = -К - Ц - И + D + E + A$$

Капитальные вложения, K , включают в себя стоимость линий электропередачи и трансформаторной подстанции.

Эксплуатационные затраты на рассматриваемый отрезок времени состоят из ряда издержек:

$$I_k = I_э + I_{нэ}, \text{ руб.}$$

$I_{нэ}$ - издержки, связанные с потерей энергии в линиях и трансформаторах,

Издержки на электроэнергию:

$$I_э = P_c \cdot T \cdot C_э, \text{ где}$$

P_c - средняя потребляемая мощность, кВт;

T - время работы потребителей за принятый период, ч.;

$C_э$ - стоимость 1 кВт ч электроэнергии, руб. / кВт·ч;

Издержки, связанные с потерями энергии в линиях электропередач:

$$I_{нэ} = \frac{P_c^2 \cdot T \cdot C_э \cdot l}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \gamma \cdot s}, \text{ руб.}$$

где: U – напряжение кВ , l – длина электропередачи, км , s – сечение проводов мм^2 ,

γ – проводимость $\text{м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$, $\cos \varphi$ – коэффициент мощности, S_c – средняя полная мощность.

Издержки, связанные с потерями энергии в трансформаторах:

$$I_{\text{нэт}} = 0,02 \cdot S_m \cdot T \cdot C_3, \text{ руб.},$$

Разница в приведенных затратах при работе буровой установки с частотно-регулируемым и классическим приводом заключается в величине средней потребляемой мощности и капитальных вложениях.

При расчете приведенных затрат для буровой установки с частотно регулируемым приводом средняя потребляемая мощность P_c будет ниже чем в случае расчет приведенных затрат для буровой установки с классическим приводом.

Снижение величины средней потребляемой мощности учитывается коэффициентом K_x . Выше было доказано что буровая установка с частотным приводом в некоторых случаях может потреблять энергии до 40% меньше. Поэтому Коэффициент K_x имеет значение в пределах от 1 до 0.6. Таким образом:

$$P_{c.чп} = K_x \cdot P_c$$

Капитальные вложения, в случае буровой установки с частотно регулируемым приводом будут выше, в связи с дополнительными затратами на преобразователь частоты и вспомогательное оборудование. Однако современные преобразователи позволяют получить высокие значения крутящего момента в широком диапазоне регулируемой частоты вращения. Поэтому из состава частотно регулируемых установок возможно исключение коробки передач или замена ее на более дешевый вариант имеющий 2 скорости передачи.

Стоимость коробки передач сопоставима со стоимостью частотного преобразователя, поэтому увеличение капитальных вложений в случае расчета издержек для частотно-регулируемой буровой установки можно не учитывать.

1.2 Рядом с каждой буровой установкой устанавливается индивидуальная трансформаторная подстанция; (рисунок 4.4)

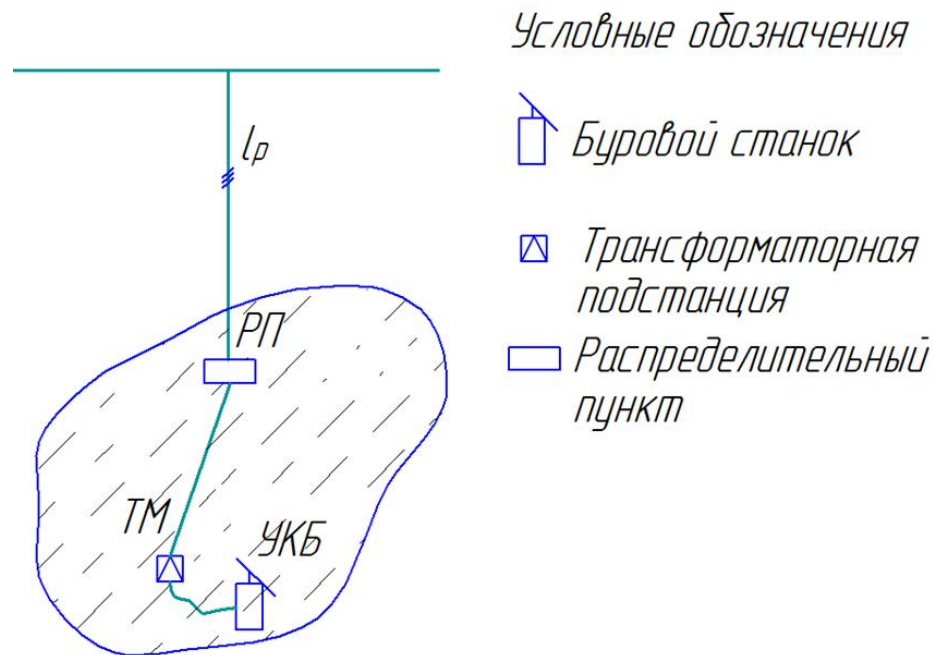


Рис. 4.4. Схемы электроснабжение от районной линии электропередач с индивидуальными трансформаторными подстанциями

В этом случае начальный оборотный капитал так же отсутствует и формула приведенных затрат имеет вид:

$$З = -К - Ц - И + D + E + A$$

Капитальные вложения, K , так же включают в себя стоимость линий электропередачи и трансформаторной подстанции.

Эксплуатационные затраты на рассматриваемый отрезок времени имеют аналогичный вид что и в предыдущем варианте.

Разница заключается в расчете издержек на потерю энергии в линии электропередачи и капитальных затрат на ее сооружение, т.к. индивидуальные трансформаторные подстанции размещены в непосредственной близости к

буровой установке, практически вся линия электропередачи будет высоковольтной и потери в ней минимальными.

Увеличение капитальных вложений в случае расчета издержек для частотно-регулируемой буровой установки так же не учитываются.

2. Питание осуществляется от дизельной электростанции

2.1 Буровые установки снабжает энергией одна общая ДЭС, при этом электроэнергия передается с трансформацией (на повышенном напряжении). (Рис 4.5.)



Рис. 4.5 Схема электроснабжения от дизельной электростанции с трансформацией энергии

В основной формуле определения приведенных затрат будет отсутствовать стоимость подключения к районной линии электропередачи:

$$З = - K - K_0 - И + D + E + A$$

Капитальные вложения включают в себя стоимость дизельной электростанции, трансформаторных подстанций и линии электропередачи до буровой установки. Начальный оборотный капитал K_0 равен стоимости топлива на работу буровой установки за рассчитываемый период времени.

Эксплуатационные затраты на рассматриваемый отрезок времени складываются из ряда издержек:

$$I_k = I_{\text{э}} + I_{\text{нэ}}, \text{ руб.}$$

I_9 - издержки на топливо,

$I_{нэ}$ - издержки, связанные с потерей энергии в линиях и трансформаторах,

Издержки на электроэнергию определяются по расчетной формуле:

$$I_9 = P_c \cdot T \cdot q \cdot C_m,$$

где: C_m - стоимость топлива руб./кг;

q - удельный расход топлива на выработку 1 кВт ч, кг/кВт ч.

Издержки, связанные с потерями энергии в линиях электропередач:

$$I_{нэ\partial} = \frac{P_c^2 \cdot T \cdot l \cdot C_m \cdot q}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \gamma \cdot s}, \text{ руб.}$$

Издержки, связанные с потерями энергии в трансформаторах:

$$I_{нэм} = 0,02 \cdot S_m \cdot T \cdot C_э, \text{ руб.},$$

Разницу в приведенных затратах при работе буровой установки с частотно-регулируемым и классическим приводом так же характеризует коэффициент K_x , учитывающий снижение средней потребляемой мощности P_c при использовании частотно регулируемого привода. Коэффициент K_x имеет значение в пределах от 1 до 0.6.

Увеличение капитальных вложений в случае расчета издержек для частотно-регулируемой буровой установки не учитывается.

2.2 Буровые установки снабжает энергией одна общая ДЭС, при этом электроэнергия передается без трансформаций. (Рис 4.6.)

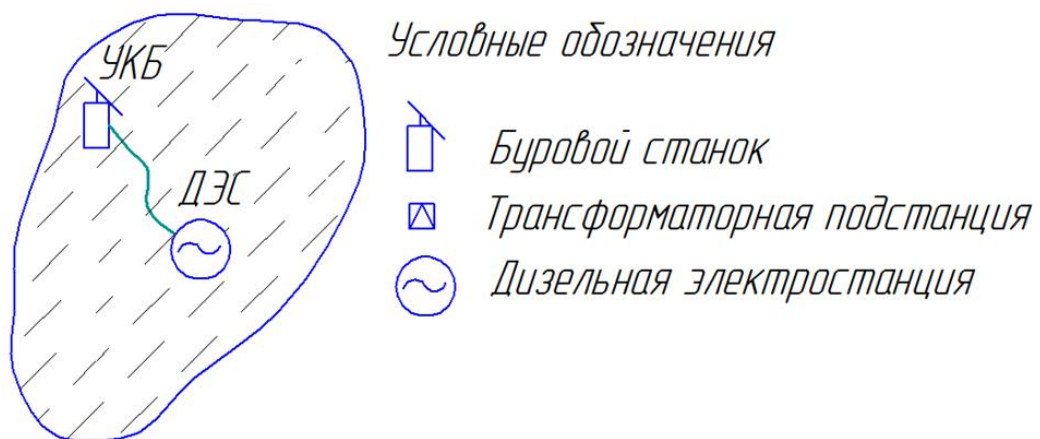


Рис. 4.6 Схема электроснабжения от дизельной электростанции без трансформации энергии

В основной формуле определения приведенных затрат так же будет отсутствовать стоимость подключения к районной линии электропередачи:

$$З = -К - K_0 - И + D + E + A$$

Капитальные вложения включают в себя стоимость дизельной электростанции и линии электропередачи до буровой установки. Начальный оборотный капитал K_0 определяется так же как и в предыдущем случае.

Издержки, связанные с потерями энергии в трансформаторах отсутствуют.

2.3 Для каждой установки используются индивидуальные дизельные электростанции. (Рис 4.7.)

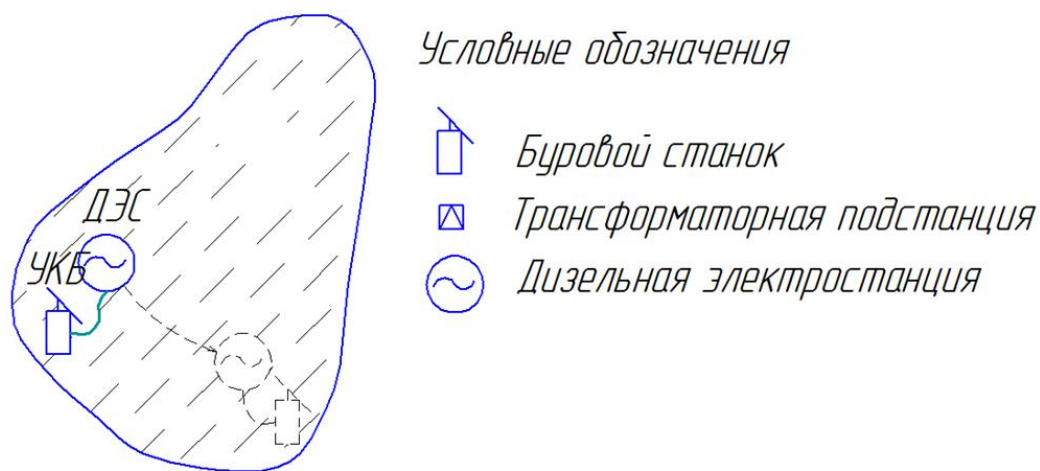


Рис. 4.7 Схема электроснабжения от индивидуальных дизельных электростанций

Основная формула определения приведенных затрат аналогична предыдущему варианту:

$$З = -К - K_0 - И + D + E + A$$

Капитальные вложения включают в себя стоимость дизельной электростанции. Начальный оборотный капитал K_0 равен стоимости топлива на работу буровой установки за рассчитываемый период времени.

Эксплуатационные затраты на рассматриваемый отрезок времени складываются из издержек на электроэнергию:

$$I_k = I_э, \text{ руб.}$$

$I_э$ - издержки на топливо,

Издержки, связанные с потерей энергии в линиях не учитываются в связи с небольшой длиной электропередающего кабеля.

Издержки на электроэнергию определяются по расчетной формуле:

$$I_э = K_x \cdot P_c \cdot T \cdot q \cdot C_m,$$

Увеличение капитальных вложений в случае расчета издержек для частотно-регулируемой буровой установки так же не учитывается.

§ 6 Анализ результатов математического моделирования приведенных затрат по вариантам.

На рисунке 4.8 представлен график изменения приведенных затрат при использовании частотно регулируемого привода на буровой установке УКБ-4, питаемой от дизельной электростанции. Z – приведенные затраты на электроснабжение буровой установки с частотно-регулируемым приводом. Z_0 – приведенные затраты на электроснабжение буровой установки с классическим приводом. K_x – коэффициент учитывающий снижение средней потребляемой мощности частотно регулируемой буровой установки по сравнению с такой же установкой оборудованной традиционным приводом.

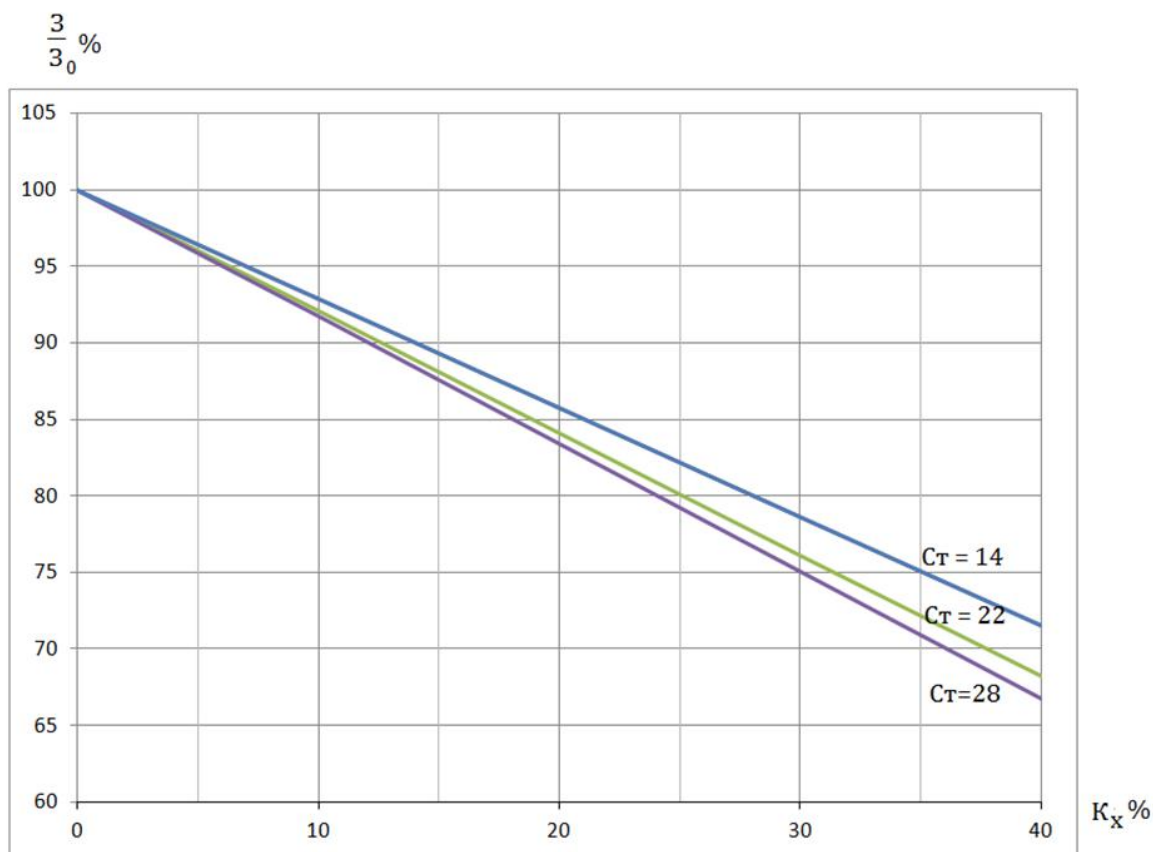


Рис. 4.8 График изменения приведенных затрат при использовании частотно регулируемого привода на буровой установке УКБ-4, питаемой от дизельной электростанции

C_T – стоимость 1 л топлива для дизельной электростанции

Расчеты, результаты которых представлены на рис 4.3, проводились для 1 бурового станка, работающего 1 год в 3 смены, при районном коэффициенте равном 1.

Из графика видно, что с использованием частотно-регулируемого привода на буровой установке УКБ-4, питаемой от индивидуальной дизельной электростанции, приведенные затраты снизились в среднем на 15%.

На рисунках 4.9, 4.10, 4.11 представлены графики изменения приведенных затрат при использовании частотно регулируемого привода на буровой установке УКБ-4, питаемой от районной линии электропередач, стоимость 1 кВт*ч 2 руб/кВт, районный коэффициент 1, стоимость подключения 5000 руб/кВт

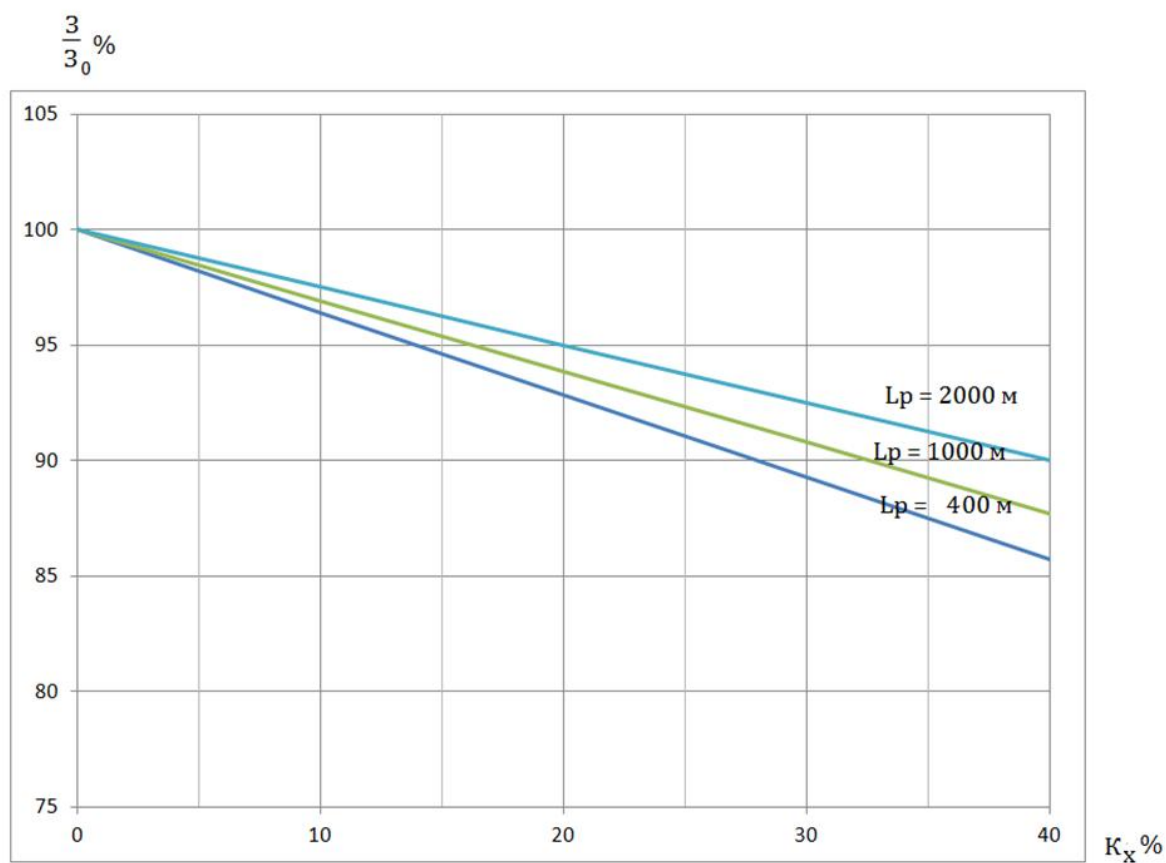


Рис. 4.9 График изменения приведенных затрат при использовании частотно регулируемого привода на буровой установке УКБ-4, питаемой от государственной линии

L_p – расстояние от места работы буровой установки до районной линии электропередач.

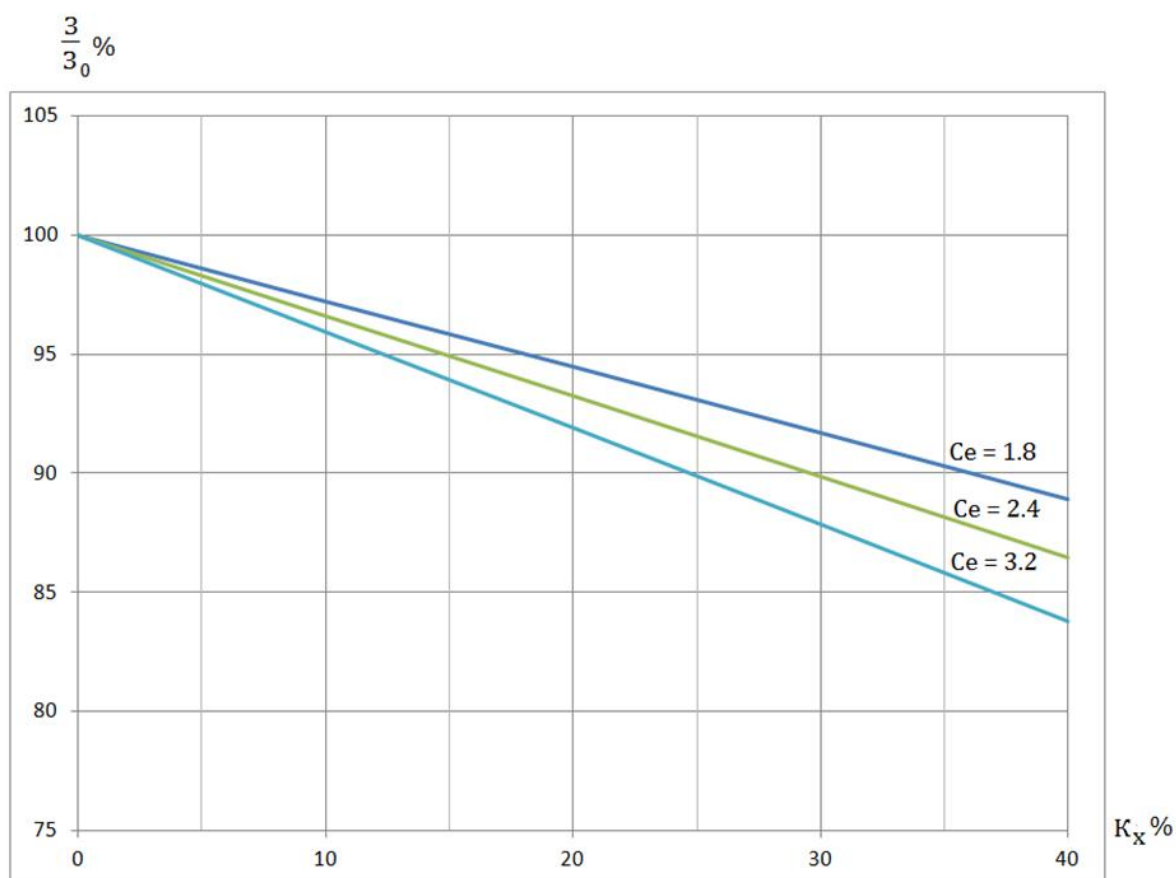


Рис. 4.10 График изменения приведенных затрат при использовании частотно регулируемого привода на буровой установке УКБ-4, питаемой от государственной линии

C_e – стоимость 1 кВт*ч электроэнергии.

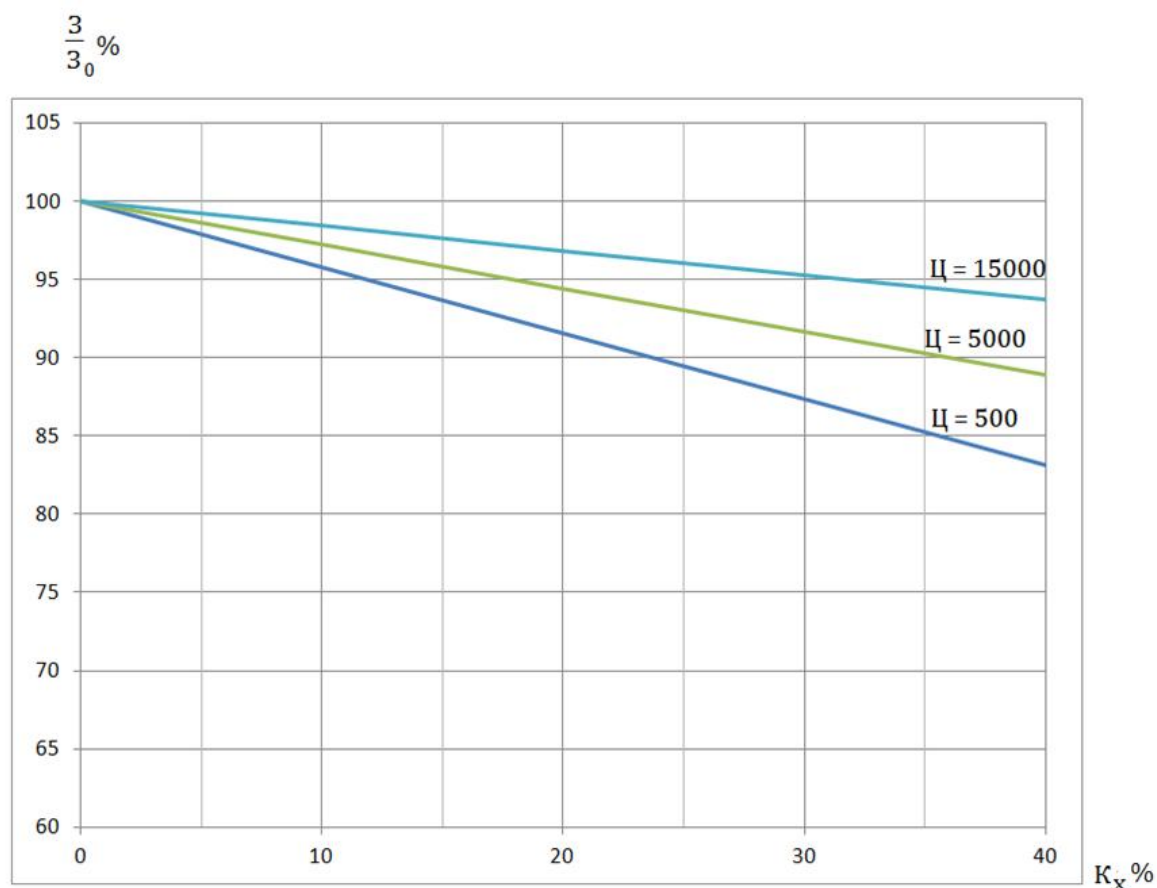


Рис. 4.11 График изменения приведенных затрат при использовании частотно регулируемого привода на буровой установке УКБ-4, питаемой от государственной линии

Ψ – стоимость подключения 1 кВт*ч электроэнергии.

Из графиков видно, что с использованием частотно-регулируемого привода, на буровой установке УКБ-4, питаемой от районной линии электропередач, приведенные затраты снизились в среднем на 7%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В представленной работе на основе проведенных анализов, разработанных математических моделей и установленных закономерностей решена задача по снижению энергозатрат буровых работ на твердые полезные ископаемые посредством освоения и модернизации частотно регулируемого привода. Эта задача имеет существенное значение для совершенствования технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых России.

Основные выводы заключаются в следующем:

1. Высокий уровень энергозатрат в технологии разведочного бурения предопределяет необходимость повышения энергетических параметров и модернизации электропривода буровых установок на основе освоения частотно регулируемых систем со звеном постоянного тока.
2. Разработанная модель частотно регулируемого привода буровой установки УКБ-4, позволяет исследовать его основные энергетические параметры, оценить изменения их в динамике и получить необходимые данные для экономического анализа эффективности работы привода в различных геолого-технических условиях.
3. На основе разработанной модели, исследовав работу частотно-регулируемого привода, построены основные энергетические характеристики буровой установки УКБ-4. Доказано значительное повышение коэффициента мощности (до 15%) ее электропривода при нагрузке, меньше номинальной.
4. Исследование трехфазного асинхронного электродвигателя, применяемого на буровых установках УКБ-4 позволили определить удельные потери в нем при его работе от различных типов преобразователей частоты: наилучшие показатели получены при использовании преобразователя частоты со звеном постоянного тока и широтно-импульсной модуляцией напряжения.
5. На основе исследования динамических режимов работы бурового станка СКБ-4, установлено что, применение частотно регулируемого привода

позволяет снизить пусковые токи в обмотках статора приводного электродвигателя до уровня номинальных значений, чем существенно стабилизировать динамические нагрузки и повысить энергетические характеристики.

6. Результаты математического моделирования подтверждены реальными данными, полученными при экспериментальных исследованиях частотно-регулируемого бурового станка СКБ-4, а также станка ЗИФ-650М.
7. На основе натурных исследований буровой установки УКБ-4. Доказано, что внедрение частотно регулируемого привода дает экономический выигрыш по затратам на электроэнергию – до 30%.
8. Разработаны математические модели технико-экономических расчетов приведенных затрат для различных систем электроснабжения на бурение геологоразведочных скважин при частотном и ступенчатом регулировании частоты вращения породоразрушающего инструмента. Снижение приведенных затрат на энергоснабжение составляет в случае централизованного электроснабжения – до 10%, в случае локального электроснабжения – до 20%.
9. Установлено, что частотно регулируемый привод имеет лучшие энергетические и динамические параметры, чем традиционный ступенчато-регулируемый, что позволяет увеличить срок службы бурового станка и его межремонтные периоды.
10. Модернизация электропривода буровой установки на основе освоения частотного регулирования позволяет не только существенно повысить ее энергетические параметры, но в перспективе снизить массогабаритные и стоимостные характеристики, обеспечить условия для полного внедрения автоматизации в технологии бурения.

Список литературы

1. Абрамович Б.Н., Жуковский Ю.Л., Сычев Ю.А., Устинов Д.А. Электроснабжение предприятий: учебное пособие // Спб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2005 , 299с.
2. Абрамович Б.Н., Устинов Д. А. Электропривод и электроснабжение горных предприятий // СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2004, 84 с.
3. Алексеев В.В., Акимов В.Д., Пинчук И.П. Двигатели внутреннего сгорания для производства геологоразведочных работ и основы технической термодинамики. – М., ЗАО «Геоинформмарк», 2002, 371 с.: ил.
4. Алексеев В.В., Гланц А.А., Чайкин А.С. Передвижные и стационарные электростанции в геологоразведочных организациях. М. Недра, 1984.
5. Алексеев В.В., Гланц А.А. Экономия топливно-энергетических ресурсов в геологических организациях. М. Недра. 1986.
6. Алексеев В.В., Гланц А.А., Алексеева Т.В. Энергоснабжение геологоразведочных организаций. М. 1980.
7. Антонов М.В. Технология производства электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1993. 592 с.
8. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. – Спб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.: ил.
9. Арифалин Б. А. Методика определения мощности на шпинделе вращателя буровых станков // в кн. Методика и техника разведки. – Л.: ОНТИ ВИТР, 1979, №30.
- 10.Бабаев С.Г. Надежность и долговечность бурового оборудования. М.: Недра, 1974, 184с.
- 11.Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах т 1 (статика и кинематика) // М., 1971 , 512 с. с илл.
- 12.Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. - 392 с., ил.

13. Башкатов Д.Н. Оптимизация разведочного бурения. Н-Новгород, 2007
14. Бернштейн А.Я. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе // М. : Энергия, 1980. - 328 с.
15. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1964
16. Булгаков Е.С., Арсентьев Ю.А., Ганджумян Р.А., Сердюк Н.И., Старцев О.И., Тунгусов А.А. Грузоподъемные устройства, механизмы вращения и подачи буровых установок. – М.: РГГРУ, 2007. – 424 с.: ил. – 168, табл. – 65, библиогр. назв. – 22.
17. Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А. И. Важнов. - М.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. - 256 с.
18. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным // М.: Наука 1979 , 449с.
19. Васильев В.В., Симак Л.А., Рыбникова А.М.. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK. Учебное пособие для студентов и аспирантов // К.: НАН Украины, 2008, – 91 с.
20. Воздвиженский Б.И., Волков С.А., Волков А.С. Колонковое бурение. М.: Недра, 1982
21. Волков А.С., Долгов Б.П. Вращательное бурение разведочных скважин: Учебное пособие для учащихся профтехобразования и рабочих на производстве. – 3-3 изд., перераб. И доп. – М.: Недра, 1988 – 320 с.: ил. 113.
22. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Физматгиз, 1963 , 872 с.
23. Ганджумян Р.А., Калинин А.Г., Сердюк Н.И. Расчеты в бурении / Справочное пособие // Под редакцией А.Г. Калинина, - М: РГГРУ, 2007. – 668 стр.
24. Герасимов В.Г. и др. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 2 Электротехнические изделия и устройства / Под общ. Ред. Профессора МЭИ В.Г. Герасимова и др. М.: Издательство МЭИ, 1998. 518 с.
25. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – Спб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

26. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.
27. Глазырин А.С. Аналитические методы математического моделирования электромеханических систем // Томский политехнический университет, 2009 , 217 с.
28. Григорьев М.И. Теоретические основы, диагностические средства и методы энергосберегающей эксплуатации асинхронного электропривода буровых установок. Автореферат дис. дтн: 05.15.14, 41 с., Москва, 1998.
29. Дашченко А.Ф., Кириллов В.Х., Коломиец Л.В., Оробей В.Ф. MATLAB в инженерных и научных расчетах. Одесса «Астропринт» 2003.
30. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.: ил.
31. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: LVR-Пресс, 2008. – 784 с.: ил.
32. Единые нормы времени на бурение разведочных, структурно-поисковых и картировочных скважин. Центральное бюро нормативов по труду при НИИ Труда Госкомитета по труду и социальным вопросам Совета Министров СССР. М. 1978.
33. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий // М.: Электроатомиздат, 2000, 169 с.
34. Жернаков А.П., Акимов В.Д., Алексеев В.В. Экономия топливно-энергетических ресурсов при геологоразведочных работах. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 317 с.
35. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. Учебник для вузов. Изд. 4-е. // М.: Энергия, 1975 г., 752 с.
36. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003, - 243 с.
37. Змиева К.А. Методика повышения энергоэффективности асинхронного электродвигателя посредством организации амплитудно-частотного

- управления электропитанием. Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. №3.
- 38.Змиева К.А., Кулагин О.А., Кузнецова Е.В., Иванова М.Н., Григорьев С.Н. К вопросу о методах расчета коэффициента мощности трехфазного асинхронного двигателя. Автоматизация и современные технологии. 2011. №12.
- 39.Иванов Б.С. Осциллограф – ваш помощник // М.: МП «Символ-Р» и ред. журнала «Радио», 1991 , 64 с.
- 40.Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины // т. I, т. II, М.: МЭИ, 2006
- 41.Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике ./ Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. - М. : Энергия, 1975.-184 с.
- 42.Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. М. Издательский центр “Академия”. 2008.
- 43.Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе // М.: Высшая школа, 1989 , 64с.
- 44.Ильский А.Л., Миронов Ю.В., Чернобыльский А.Г. Расчет и конструирование бурового оборудования. Учеб. Пособие для вузов. – М.: Недра, 1985. – 452 с.
- 45.Ильский Н.Ф. Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для высш. учеб. заведений. - М.: Издательский центр "Академия", 2008. - 208 с.
- 46.Ильский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе. - М.: Высш. шк. 1989. - 127 с., ил.
- 47.Ионкина П.А. и др. Теоретические основы электротехники. Под ред. П.А. Ионкина. Москва. Высшая школа. 1976.
- 48.Каган А.В. Математическое моделирование в электромеханике // часть 2, Санкт-Петербург, 202 , 73 с.
- 49.Калинин А.Г., Левицкий А.З., Мессер А.Г., Соловьев Н.В. Практическое руководство по технологии бурения скважин на жидкие и газообразные полезные ископаемые: Справочное пособие/Под ред. А.Г. Калинина. // М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2001 , 450 с.: ил.

- 50.Кириллов Р.С. Моделирование векторной системы управления с ориентацией по потокоцеплению ротора // Екатеринбург, 2010 , 30с.
- 51.Кирсанов А.Н., Зиненко В.П., Кардыш В.Г. Буровые машины и механизмы. М., Недра, 1981. 448 с.
- 52.Кириянов Д.В. Самоучитель Mathcad И. – Спб.: БХВ-Петербург, 2003, -560с.
- 53.Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов // М.: Энергоатомиздат, 1998 , 704 с.
- 54.Козловский Е.А. и др. Справочник по бурению. Под ред. Козловского Е.А. Недра. 2000.
- 55.Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. 318 с.
- 56.Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2000. 607 с.
- 57.Копылова И.П. и др. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общей ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1988, 1989. 1 т. 456 с.; 2 т. 688 с.
- 58.Кристалинский Р.Е., Кристалинский В.Р. Преобразования Фурье и Лапласа в системах компьютерной математики: Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 216 с.: ил.
- 59.Куликов В.В. Определение мощности, затрачиваемой на процесс бурения геологоразведочной скважины. Изв. Вузов. Геология и Разведка, №1. 2014.
- 60.Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. – Спб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.: ил.
- 61.Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с. ил.
- 62.Лимитовский А.М. Научные основы, оптимизация и совершенствование электроснабжения геологоразведочных работ. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М. 1980.
- 63.Лимитовский А.М., Гланц А.А. Оптимизация и совершенствование электроснабжения геологоразведочных работ. М. 1983.

- 64.Лимитовский А.М., Косьянов В.А. Электрооборудование и электроснабжение геологоразведочных работ: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: РУДН, 2009 – 384 с.
- 65.Лимитовский А.М., Меркулов М.В., Косьянов В.А. Энергообеспечение технологических потребителей геологоразведочных работ. М., «ИПЦ МАСКА», 2008. – 135 с.
- 66.Лурье М.С., Лурье О.М. Имитационное моделирование схем преобразовательной техники. Красноярск, ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», 2007
- 67.Лурье О.М. Электротехника. Имитационное моделирование в лабораторном практикуме, курсовом и дипломном проектировании. Ч. 1. // Красноярск: СибГТУ, 2005. – 103 с.
- 68.Лурье О.М. Электротехника. Имитационное моделирование в лабораторном практикуме, курсовом и дипломном проектировании. Ч. 2. // Красноярск: СибГТУ, 2006. – 103 с.
- 69.Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – Спб.: Питер, 2005. – 448 с.: ил.
- 70.Масандилов Л.Б. Москаленко В.В. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Москва. Энергия. 1978.
- 71.Меркулов М. В. Оптимизация энергетических комплексов при бурении геологоразведочных скважин в условиях Крайнего Севера. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М.: 2008 - 276 с.
- 72.Меркулов М.В. Оптимизация энергетических комплексов при бурении геологоразведочных скважин в условиях крайнего севера. Автореферат докт. дисс. 2008.
- 73.Минин Г.П. Несинусоидальные токи и их измерение // М.: Энергия, 1979 , 112 с.
- 74.Михалин И.Г. Эксплуатация дизельных электростанций. М. 1972.

75. Муравенко В.А., Муравенко А.Д., Муравенко В.А. Буровые машины и механизмы. Том 1. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002, 520 с.
76. Наугольников С.И., Алексеев В.В. Методические рекомендации по определению индивидуальных норм расхода электроэнергии на буровые работы. М. ВИЭМС. 1989.
77. Оливетский И.Н. Снижение энергозатрат и повышение качества переходных процессов в колонне бурильных труб при геологоразведочном бурении. Дис. ктн: 25.00.14, 150 с., Москва, 2010.
78. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов // М.: Техносфера, 2006, 858 с.
79. Осипов О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод // М.: 2002, 124с.
80. Петров Л. П. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л. П. Петров, О. А. Андрющенко. - М. : Энергоатомиздат, 1986.-200 с.
81. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах // Чебоксары: изд-во Чуваш. Унта, 1998, 172 с.
82. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов. Дис. дтн., Екатеринбург, 2009
83. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: концепция, задачи оптимизации, математические модели и алгоритмы управления. Дис. дтн: 05.09.03, 510 с., Екатеринбург, 2009.
84. Попов В.И., Ахунов Т.А., Макаров Л.Н. Современные асинхронные машины: Новая Российская серия РА. М.: Издательство «Знак», 1999. 256 с.
85. Поршнев С.В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 592 с., ил.
86. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З., Надежность машин. М.: Машиностроение, 1988

- 87.Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением // Л.: Энергоатомиздат, 1987 , 136с.
- 88.Сандлер А.С., Сарбатов Р.С, Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974.
- 89.Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОМОН-Пресс, 2005. – 416 с: ил. (Серия «Библиотека инженера»).
- 90.Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием // М.: АCADEM, 2006 , 265 с.
- 91.Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.: ДизайнПРО, 2004. – 640 с.: ил.
- 92.Федоров В.С. Проектирование режимов бурения. М.: Гостоптехиздат, 1958 , 233с.
- 93.Фираго Б.И. Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. - Мн.: Техноперспектива, 2006, - 363 с.
- 94.Черник Г.В.. Электропривод и электрооборудование установок алмазного бурения. Ленинград. «Недра». Ленинградское отделение. 1978.
- 95.Черных И.В. «Simulink: Инструмент моделирования динамических систем».
- 96.Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: LVR Пресс; Спб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
- 97.Чехет Э.М., Мордач В.П., Соболев В.П. Непосредственные преобразователи частоты для электропривода // Киев: Наук. Думка, 1988 , 223 с.
- 98.Чистяков А.Б., Парфенов Б.М., Свешников В.К. и др. Приводы и их элементы. Рынок продукции: Каталог-справочник. // Под ред. А.Б. Чистякова. М.: Машиностроение, 1995. 432 с.
- 99.Чичеров Л.Г., Молчанов Г.В., Рабинович А.М. и др.Расчет и конструирование нефтепромыслового оборудования: Учеб. Пособие для вузов // М.: Недра, 1987. – 422 с.
100. Шевырев Ю.В. Обоснование и повышение энергетических показателей регулируемых электроприводов буровых установок. Дис. дтн: 05.09.03, 333 с., Москва, 2005.

101. Штерн В.Н. Эксплуатация дизельных электростанций. М. 1980.
102. Юртанов В.Г. Динамика агрегатов буровых установок и повышение их технического ресурса и эффективности эксплуатации. Автореферат дис. дтн: 05.04.07, 40 с., Москва, 1994.
103. Simovert Masterdrives. Vector Control (VC). Betriebsanleitung. Teil 2. Siemens, 1998.