ΡΕΦΕΡΑΤ

Выпускная квалификационная работа 112 с., 59 рисунков, 27 таблиц, 29 источников.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, скалярное управление, насосная станция, регулирование давления, цифровой датчик, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, преобразователь частоты.

Объектом исследования является частотно-регулируемый электропривод переменного тока насосной станции.

Цель работы – разработка системы автоматического регулирования давления в водозаборном узле.

В результате исследования была разработана система автоматического регулирования давления в водозаборном узле.

Достигнутые технико-эксплуатационные показатели: поддержание давления на заданном уровне .

Выпускная квалификационная работа выполнена в теккстовом редакторе Microsoft Word 2010.

Введение

Несмотря на высокие требования по непрерывности подачи воды в противопожарный став шахты, уровень автоматизации весьма низок. Отчасти это объясняется недостаточным финансированием. Однако автоматизация необходима для более эффективного управления технологическим процессом добычи и транспортировки воды, так как это позволит снизить затраты энергии и более эффективно распорядиться имеющимися ресурсами.

Насосная установка – это комплекс устройств необходимый для транспортирования различного рода жидкостей, через трубопроводную сеть,

от источника к потребителю. В состав насосной установки входят насос, привод и трубопроводы (всасывающий и напорный). В качестве насоса для насосной установки применяют центробежные насосы общего назначения, допускающие перекачивание воды с температурой 85 °C. Они являются одной распространенных разновидностей ИЗ самых динамических удобства гидравлических машин В виду простоты конструкции И эксплуатации.

В качестве привода для центробежных насосов ввиду компактности соединений турбомеханизмом, конструкции, простоты С легкой автоматизации и относительно низких эксплуатационных затрат широкое Выбор применение нашли электродвигатели переменного тока. электродвигателя вращения, осуществляется рабочему ПО частоте положению (горизонтальный, вертикальный), мощности, напряжению и виду исполнения. Асинхронные двигатели – простые, компактные, но загружают сеть намагничивающим током ($\cos \phi < 1$). У синхронных двигателей $\cos \phi$ равен или больше единицы, что способствует улучшению коэффициент мощности экономит электроэнергию. Большим недостатком сети И синхронных двигателей является их большая масса и большие габариты, что вызвано его системой возбуждения.

В данной дипломной работе была разработана система автоматического поддержания давления насосной установкой в водозаборном узле.



1 Общие сведения о ООО «Шахта «Алардинская»

Рисунок 1 – Шахта «Алардинская»

Предприятие ООО «Шахта «Алардинская» является филиалом ОАО «Распадская угольная компания», которое осуществляет подземную добычу угля и имеет правовую форму «Общества с ограниченной ответственностью».

Юридический адрес: пос. Малиновка, г. Калтан, Кемеровская обл., ул. Угольная, 56.

Добыча угля осуществляется на Алардинском месторождении каменного угля, которое расположено в Кондомском геолого - экономическом районе Кузбасса города Калтан. В И административно входит В состав месторождения вскрыто 34 пласта угля, в том числе 16 рабочей мощности. Строение пластов чаще сложное, но они весьма тонкие; тонкие средней мощности имеют в основном простое строение. Пласты сложного строения достигают от 2 до 6 породных прослоев суммарной мощности до 1.5м. Глубина залегания пластов угля составляет до гор.-450; мощность - от 4,2м до 10,0 м и угол падения 14 - 18°.

Оценка запасов угля по категориям проведена в соответствии с «Инструкцией по применению классификации запасов к месторождениям угля и горючих сланцев». Балансовые запасы угля по состоянию на 01.01.2015 года составили 548,0 млн.т., в т.ч. промышленные 354,6 млн.т.

Поселок Малиновка, котором расположена В шахта, связан С шоссейными промышленными центрами дорогами И электрифицированной железной Таштагол. дорогой Новокузнецк Промплощадка шахты связана со станцией Малиновка железнодорожной веткой.

Рядом расположены такие предприятия как : разрез «Калтанский»; шахты: «Осинниковская», «Тайжина», а так же: ЮК ГРЭС, КВОиТ, Мундыбашская аглофабрика.

Снабжение электроэнергией промпредприятий и населения производится от ЮК ГРЭС, а технической и питьевой водой с водозаборов, расположенных в пойме реки Кондома

1.1 Краткая характеристика шахты

Шахта имеет два обособленных района: Алардинский и Малиновский. На сегодняшний момент работы ведутся на двух пластах Алардинского месторождения — на пласте 3-3а и пласте 6. Пласт 3-3а имеет сложное строение и пологое залегание. Средняя мощность пласта составляет 5,5 м, «ложная» кровля представляет собой углистый алевролит. Пласт опасен по пыли, горным ударам с глубины 300 м, угрожаемый по внезапным выбросам также с глубины 300 м, склонен к самовозгоранию.

Пласт 6 имеет сложное строение и пологое залегание. Средняя мощность пласта составляет 8,3 м, «ложная» кровля представляет собой углистый алевролит. Пласт опасный по пыли, угрожаемый по горным ударам с глубины 150 м, по внезапным выбросам с глубины 300 м, склонен к самовозгоранию.

Добываемые угли пластов 3-3а и 6 относятся к маркам КС, ТС. Зольность угля составляет 10 % по пласту 3-3а и 9,5 % по пласту 6.

Вскрытие пластов производится наклонными стволами (уклонами). Схема подготовки — панельная. Система разработки — длинные столбы по

простиранию, короткие и наклонные выемочные столбы, все — с полным обрушением кровли.

Процесс добычи ведется с применением механизированного комплекса «Glinik 22/47», конвейера «Rybnik-1100», скребкового перегружателя «Grot-1100» с дробилкой «Scorpion — 3000Р», очистного комбайна KSW-1140E. Проходческие работы — с применением проходческих комбайнов MR 620 компании Sandvik.

На шахте установлен самый мощный в Кузбассе вентилятор главного проветривания (ВГП) фирмы «TLT—Turbo», немецкая дегазационная станция фирмы «PGM», два ленточных магистральных конвейера английской фирмы Continental conveyors Ltd (входит в состав JOY GLOBAL).

1.2 Технология водоочистки

Насосно – фильтровальная станция (НФС) предназначена для очистки и обеззараживания шахтной воды, прошедшей первичную очистку и подачи её в технологический цикл предприятия.

Для очистки сточных шахтных предусмотрены вод комплекс отстойников и насосно-фильтровальная станция физико-химической очистки (НФС). Отстойники № 1[°] и 1[°] (объёмом 6400м³ и площадью 4600м² каждый) предназначены для первичного осаждения угольной взвеси из загрязнённых стоков. В отстойниках № 2 и № 3 (объёмом 30500м³ и 34200м³, площадью 15300м² и 17100м² соответственно) происходит вторичное осаждение взвешенных веществ. Илонакопитель (объёмом 59000м и площадью 21400м) предназначен для обезвоживания и временного хранения угольного осадка. НФС состоит из смесителя вихревого прямоугольного с пирамидальным днищем- 1шт.; осветлитель коридорный прямоугольный-3 шт.; фильтры скорые открытые прямоугольные однослойные с загрузкой из кварцевого песка- 4 шт.; установка для коагулирования –1шт.; дозирующие установки гипохлоритом натрия -2 шт для обеззараживания шахтных сточных вод; ГПХ; резервуары-2шт. объёмом по 400м³ каждый.

Технологическая схема очистки стоков на насосно-фильтровальной станции: шахтная вода по трубопроводу поступает в первичные отстойники № 1а и 16, затем, пройдя первичное осветление, поступает в отстойник №2, куда поступает коагулянт и флокулянт, откуда насосами первого подъёма подаётся в смеситель. Сброс воды из смесителя производится кольцевым лотком, из которого вода поступает в осветлитель, там отстаивается и направляется на скорые фильтры с однослойной загрузкой из кварцевого песка. Вода, используемая для промывки фильтров, возвращается в отстойник №2 и снова идёт на очистку. Очищенная вода поступает в два резервуара чистой воды (РЧВ). Перед подачей в РЧВ вода обеззараживается гипохлоритом натрия. Для этих целей установлены дозирующие установки ГПХ. После очистки и обеззараживания вода из одного РЧВ повторно используется на производственные и вспомогательные нужды шахты, а так же пожаротушение, из второго РЧВ на нужды котельной.



Рисунок 2 - Схема отстойников



Рисунок 3 – Технологическая схема НФС



Рисунок 4 – Схема насосной станции II подъема

2 Обзор систем управления и способов регулирования электропривода

2.1 Системы управления электроприводом

Все ведущие производители на сегодняшний день выпускают регулируемые автоматизированные электроприводы (АЭП) комплектно с компьютерными средствами автоматизации в виде гибко программируемых систем, предназначенных для широкого использования. При этом быстрая компьютеризация электроприводов, механизмов, агрегатов и комплексов является устойчивой тенденцией проектирования АЭП.

Актуальность разработки автоматизированного электропривода насосного агрегата, выполненного в общепромышленном исполнении и не предназначенного для работы на взрывоопасных и пожароопасных производствах и установках, заключается в эффективном выборе системы управления электроприводом (СУЭП) для максимальной эффективности работы и производительности технологического оборудования.

Исходя из требований к СУЭП, при проектировании предлагаются две схемы управления: схема векторного регулирования и схема скалярного управления электроприводом насосной установки, выполненными по системе преобразователь частоты - короткозамкнутый асинхронный электродвигатель (ПЧ-АД).

Выбор способа и принципа управления производится на основании требований К регулированию скорости И показателям качества регулирования: диаапазону регулирования, плавности, точности поддержания заданной скорости. Обязательно нужно учитываются динамические характеристики качества : быстродействие, перерегулирование и др. Так же при выборе системы управления электроприводом обязательно учитывать характер нагрузки, который создается рабочим нужно механизмом. Частотное регулирование электродвигателя осуществляется двумя основными способами.

Скалярный принцип частотного управления является наиболее распространенным в электроприводе. Ему свойственна техническая простота

измерений регулирования абсолютных значений И переменных электродвигателя. Управление осуществляется ПО характеристике, напряжение и частоту статора электродвигателя (U/f²связывающей характеристике), с применением IR-компенсации для поддержания потокосцепления с этой постоянства статора В соответствии характеристикой. В статических режимах позволяет добиться за счет обратных связей нужных свойств электропривода. Применяется ДЛЯ электроприводов, к которым не предъявляются высокие требования.

Векторный принцип частотного управления базируется на принудительной взаимной ориентации векторов потокосцеплений и токов АД в полярной или декартовой системах координат в соответствии с регулирования. За счет регулирования заданным законом модулей переменных и углов между их векторами обеспечивается управление электродвигателем как в статике, так и в динамике, обеспечивая заметное улучшение качества переходных процессов. Именно этот факт является основополагающим при выборе системы с векторным управлением и находит применение в электроприводах со средней и высокой динамикой. Приводы насосов занимают среднее положение между высокодинамичными, динамичными и низкодинамичными.

Так как скалярное управление позволило получить искусственные механические характеристики с требуемой жесткостью и учитывая, преимущества данного вида управления, можно сделать вывод, что данный способ управления может быть применён при проектировании СУЭП по системе ПЧ-АД насосной установки.

2.2 Способы регулирования и механические характеристики электропривода

Асинхронный электропривод со скалярным управлением является на сегодня самыми распространенным. Данный электропривод применяется в составе приводов насосов, вентиляторов, компрессоров и других механизмов, для которых важно поддерживать какой либо из параметров: либо скорость вращения вала двигателя (используя датчик скорости), либо давление в трубопроводе (используя соответствующий датчик).

При проектировании электропривода электродвигатель должен выбираться так, чтобы его механические характеристики соответствовали механическим характеристикам производственного механизма. Механические характеристики дают взаимосвязь переменных в установившихся режимах.

Механической характеристикой механизма называют зависимость между угловой скоростью и моментом сопротивления механизма, приведенными к валу двигателя) $\omega = f(Mc)$.

Для данных характеристик $\beta = \frac{\Delta M_c}{\Delta \omega}$, где M_c - момент сопротивления.



Рисунок 5 – Механические характеристики производственных механизмов

1. Характеристика не зависит от скорости вращения; $M_c = const, X = 1.$

2. Линейно-возрастающая механическая характеристика; $M_{c} = \beta \cdot n, X = 2;$

3. Нелинейно-возрастающая механическая характеристика;

X = 2 – вентилятор, X = 3 – насос. $M_C = M_0 + M \cdot \omega^X$,

4. Нелинейно-спадающая характеристика;

$$M_C = M \cdot \omega^{X-1}, X = 0.$$

Все виды механических характеристик могут быть описаны единой формулой:

$$M_{C} = M_{0} + (M_{C.HOM} - M_{0}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{HOM}}\right)^{X-1},$$

где M_c - момент нагрузки, при скорости вращения ω ;

 $M_{{\scriptscriptstyle C.HOM}}$ - момент нагрузки при скорости $\varpi_{{\scriptscriptstyle HOM}}$;

*M*₀ - момент трения; *X* - показатель степени.

В частотно-регулируемых электроприводах переменного тока для соответствующих моментов производственных механизмов можно сформировать электромагнитные моменты двигателей.

При постоянном моменте нагрузки управление напряжением и частотой статора асинхронного двигателя осуществляется по закону $U_{1i}/f_{1i} = const$;



Рисунок 6 – Кривая зависимости $U_{1i}/f_{1i} = const$



Рисунок 7 – Механические характеристики привода, управляемого по системе ПЧ-АД, при постоянном моменте.

При нелинейно-спадающей нагрузке – закон управления напряжением и частотой принимает вид $U_{1j}/\sqrt{f_{1j}} = const$;



Рисунок 8 – Кривая зависимости $U_{1j}/\sqrt{f_{1j}} = const$



Рисунок 9 – Механические характеристики привода, управляемого по системе ПЧ-АД, при постоянной мощности

При нелинейно-возрастающей «вентиляторной» нагрузке напряжение и частота должны изменяться в соответствии с зависимостью $U_{1j}/f_{1j}^2 = const$;



Рисунок 10 – Кривая зависимости $U_{1i}/f_{1i}^{2} = const$



Рисунок 11 – Механические характеристики привода, управляемого по системе ПЧ-АД, при вентиляторной нагрузке

2.3 Требования, предъявляемые к электроприводу насосов

Насосы, обычно работают на сеть с противодавлением, причем статический напор в сети составляет обычно не менее 20% полного напора. Исключение представляют собой лишь циркуляционные насосы, которые работают на сеть, которая практически не имеет статического напора. Насосы являются механизмами с длительными режимами нагрузки с большим числом работы в год; нагрузка на валу приводного двигателя спокойная, перегрузок практически не возникает. Центробежные насосы - это быстроходные механизмы, номинальная частота вращения приводного двигателя составляет не менее 600 об/мин; верхний предел частоты вращения для насосов ограничен значением 3000 об/мин, лишь в частных случаях требуется более высокая номинальная частота вращения; чаще свего применяется способ регулирования производительности насосов двигателей, диапазон вращения часто изменением частоты вращения невелик, глубокое регулирование требуется лишь в частныхх случаях.

Наиболее большое распространение получили установки С центробежными насосами. В спиральном корпусе насоса находится рабочее колесо с лопатками. При вращении колеса двигателем жидкость, поступающая к центру колеса из заборного резервуара через всасывающий трубопровод и открытую задвижку, центробежной силой выбрасывается по лопаткам на периферию корпуса. В результате в центре рабочего колеса создается разряжение, жидкость засасывается в насос, снова выбрасывается и далее подается в напорный трубопровод. Так в системе при открытой задвижке создается постоянное течение, и центробежный насос имеет равномерный ход. Перед пуском центробежный насос нужно заполнить жидкостью. Насос может находиться как ниже, так и выше уровня жидкости. Если насос расположен ниже уровня, то для его заливки достаточно открыть вентиль задвижки. Если же насос находится выше уровня жидкости, то для заливки требуется создать разряжение внутри корпуса при помощи специального вакуум-насоса, обычно этопоршневые насосы. После заливки насосса может быть включен приводной двигатель. Применяют три способа пуска:

I. Пуск при закрытой напорной задвижке, при котором плавно повышается давление в напорном трубопроводе и исключается пуск при закрытой напорной задвижке, при котором плавно повышается давление в напорном трубопроводе и исключается гидравлический удар. При этом виде пуска от двигателя не требуется повышенный пусковой момент потому что пуск происходит практически вхолостую, но тратится дополнительное время на открытие задвижки.

II. Пуск при открытой напорной задвижке применяется, если насос расположен ниже уровня жидкости в заборном резервуаре и есть обратный клапан – при этом виде пуска не тратится время на открытие задвижки

III. Пуск с одновременным открыванием напорной задвижки насоса можно рассматривать как частные случаи первого и второго способов в зависимости от соотношения времени открывания задвижки и пуска насоса.

Пуск насосов обычно осуществляется на закрытую задвижку, зависимость момента на валу от частоты вращения при пуске носит вентиляторный характер с максимальным моментом для большинства насосов, лежащим в пределах 0,4 – 0,8 номинального.

3 Расчет параметров системы управления насоса 3.1 Описание системы управления Структурная схема

Шахтная вода по трубопроводу поступает в первичные отстойники № 1а и 16, затем, пройдя первичное осветление, поступает в отстойник №2, куда поступает коагулянт и флокулянт, откуда насосами первого подъёма подаётся в смеситель. Сброс воды из смесителя производится кольцевым лотком, из которого вода поступает в осветлитель, там отстаивается и направляется на скорые фильтры с однослойной загрузкой из кварцевого песка. Вода, используемая для промывки фильтров, возвращается в отстойник №2 и снова идёт на очистку. Очищенная на вода поступает в два резервуара чистой воды (РЧВ). Перед подачей в РЧВ вода обеззараживается гипохлоритом натрия. Для этих целей на установлены дозирующие установки ГПХ. После очистки и обеззараживания вода из одного РЧВ повторно используется на производственные и вспомогательные нужды шахты, а так же пожаротушение, из второго РЧВ на нужды котельной.



Оборудование электрощитовой насосной станции.

Рисунок 12 - Электрощитовой зал насосной станции

В электрощитовом зале насосной станции второго подъема установлен шкаф с оборудованием, обеспечивающим управление частотными регуляторами, измерение давлений воды на выходе насосной станции.

Для частотного управления двигателями насосов применено три регулятора мощностью 55 кВт каждый. Регуляторы имеют интерфейс RS-485. Управление регуляторами осуществляется по сети RS-485.1.

Давление на каждом выходе насосной станции измеряется датчиками DMP-331i которые имеют выходной интерфейс RS-232.

Выходные сигналы с датчиков давления поступают на модули ADAM-4521. Контроллеры объединены в сеть RS-485.2.

Центральный пост оператора

Центральный пост оператора — комплекс технических средств, находящийся в операторской. Там находятся шкаф с оборудованием, монитор и консоль управления. Управляет системой промышленный компьютер, который имеет в своем составе корпус РАС-40H с пассивной объединительной платой, процессорную плату PCA-6154 с флэш-диском DiskOnChip, 32 Мбайт ОЗУ и процессором Pentium 150 МГц, интерфейсную плату PCL-745 (два гальванически изолированных канала RS-485). В шкафу смонтированы промышленный компьютер с коммуникационными платами, устройство бесперебойного питания.

Электрощитовая связана с центральным постом оператора двумя каналами RS-485: RS-485.1 и RS-485.2.



Рисунок 13 – Функциональная схема насосной станции

Процессорная плата РСА-6154

Системная информация:

- Процессор: Pentium MMX до 233 МГц, AMD К5, К6, К6-II до 300 МГц;
- O3У: EDO / FPM SIMM x 2 Макс. 128 Мб;
- Кэш-память: 512 Кб Pipeline burst SRAM;
- Чипсет:SiS 5598;
- BIOS: Award 256 K6 Flash BIOS;
- SSD: DiskOnChip 2000;
- Watchdog Timer: 1~62 секунды, 16-битный ISA слот;
- Аккумулятор: Встроенный/10 лет;
- Управление питанием: АРМ 1.1;
- Потребляемая мощность:
 - ➢ 5 B@3.97A Intel P55C-233, 32 M6 DRAM,
 - ≻ Макс.: 5В@5А;
- Размер / вес: 185х122мм / 0,3 кг;
- Влажность: 0%-90% относительной влажности, без конденсации.

Ввод / Вывод:

- MIO: 1 x EIDE (Ultra DMA33), 1 x FDD, 1 x K/B, 1 x mouse, 1 x RS232/422/485, 1 x RS232, 1 x xLTP;
- IrDA: 115Кб/с SIR, IrDA 1.0 совместимый;
- Ethernet: 10/100 Мб/с, разъем RJ45;
- USB: 2 USB ports, USB 1.0 совместимый.

<u>Дисплей:</u>

- Чипсет: SiS5598 встроенный;
- Объем памяти: Макс. 4Мб (UMA);
- Разрешение: CRT 1280х1024 @ 24 бит/пиксел (CRT).



Рисунок 14 – Процессорная плата РСА-6154

Интерфейсная плата PCL-745

- Два независимых RS-422/485 последовательных порта
- Обеспечивает 3000BDC изоляции (PCL-745B/745S)
- Обеспечивает 2500BDC защита от перенапряжений (PCL-743S/745S)
- Передача со скоростью до 921,6 кбит/с
- Широкий выбор IRQ: 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12 или 15
- Поддержка 2-х проводной или 4-проводной операции
- Поддержка Тх, Rх, RTS, CTS и сигналов

- Автоматические RS-485 данные потока управления или контроля РТС
- Место, отведенное для дополнительной защиты от перенапряжений на линии передачи данных (PCL-743B/745B)
- Поддержка стандартов DOS COM1, COM2, COM3, и COM4
- Поддержка сигналов: TxD +, TxD-, RxD +, RxD-, CTS +, CTS-, PTC + и PTC-
- Поддержка Windows 98/2000/XP, Linux
- Мощная и простая в использовании утилита (ICOM Tools)
- Потребляемая мощность: +5В@400мА, 950мА макс.
- Рабочая температура: 0 65 °C
- Размеры: 185 х 100 мм
- Вес: 0,6 кг



Рисунок 15 – Интерфейсная плата РСL-745

Модуль АДАМ-4521

Таблица 1 – Т	ехнические хара	ктеристики	модуля	ADAM-	4521
Таблица 1 – Т	ехнические хара	ктеристики	модуля	ADAM-	4521

Модель	ADAM-4521
Описание	Конвертер RS-232 в RS-485 или RS-422 с
	автоматическим контролем за направлением
	передачи данных и изоляцией для RS-485.
Сторожевой таймер	Есть
Крепление	Монтаж на DIN рейку
Гальваническая изоляция	3000 B (RS-485)
Максимальная длина	1200 м
линии связи	
Максимальное кол-во	256 с использованием репиттеров или 32
модулей в сети	модуля без их использования (RS-485).
Материал корпуса	Пластик
Скорость передачи данных	300 ~ 115200 кБит/сек
Разъемы	Винтовые клеммы (RS-485, RS-422), DB9
	female (RS-232)
Интерфейс	RS-232 (COM)
Напряжение питания	10 B - 30 B
Потребление энергии	1.2 Вт
Размеры (ширина х высота	72 х 25 х 142 мм
х глубина)	
Рабочая температура	$0 \sim 75^{\circ}C$



Рисунок 16 – Модуль ADAM-4521

Промышленная клавиатура ТКG-016

- Количество клавиш: 16
- Степень защиты: IP65 (передняя панель)
- Материал изготовления
 - ✓ клавиши: силиконовая резина
 - ✓ контакты: углепластик
 - ✓ панель: алюминий
- Интерфейс: матричный выход или АТ
- Размеры:
 - ✓ клавиатура 128х98х6 мм
 - ✓ панель 142х128х20 мм
- Диапазон рабочих температур: 0... +50°С



Рисунок 17 – Промышленная клавиатура ТКG-016

Датчик давления с цифровым выходом DMP 331i

Таблица 2 – Технические характеристики DMP 331і

Диапазоны	от 00,17 бар до 020 бар (от 017 кПа до 02	
давления	МПа), избыточное, абсолютное, разрежение	
Выходные	420 мА / 2-х пров.	
сигналы		
Основная	0,1 % ВПИ	
погрешность		
Выходной сигнал	420 мА (опция: Ех-исполнение), RS 232 для	
	настройки «нуля» и «диапазона»	
Сенсор	кремниевый пьезорезистивный	
Присоединение		
DMP 331i:		
- механическое	G1/4", G1/2"	
- электрическое	DIN 43650, Binder 723 (5 конт.), M12x1 (4 конт.),	
	кабельный ввод PG7, Buccaneer	
- опции	возможность перенастройки нуля и диапазона	
Применение DMP	для калибровочных и испытательных стендов,	
331i	поверочных установок, контроль технологических	
	процессов, учет расхода и калориметрия	
Измеряемая среда	сжатый воздух, неагрессивные газы, пар, вода,	
	бензин, дизельное топливо, рабочие жидкости	
	гидравлических систем, тормозная жидкость	



Рисунок 18 – Датчик давления с цифровым выходом DMP 331і

3.2 Выбор двигателя и расчет силовой части

Исходные данные:

Таблица 3 – Технические характеристики насоса 1Д315-50а

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. измерения
Подача	Q	300	м ³ /час
Напор	Н	42,00	М
Частота вращения	n	2900	об/мин
Максимальная потребляемая мощность	N	50,00	кВт
Допускаемый кавитационный запас	$\Delta \mathbf{h}_{ m don}$	6,70	м, не менее
Масса насоса	m	190	КГ

Мощность насоса равна:

$$P_{\rm H} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_{\rm H}} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,083 \cdot 42}{1000 \cdot 0,79} = 43,462 \text{ kBt}$$

где Q – подача насоса, м³/c; Q = $\frac{300 \text{ м}^3/\text{ч}}{3600}$ = 0,083 м³/c;

H – напор, м; ρ –плотность воды, кг/м³; $\eta_{\rm H}$ – КПД насоса.

Мощность приводного электродвигателя выбирают на основе приведенной выше формулы, но с учетом возможного отклонения режима работы насоса от его номинального (паспортного) режима. Чтобы не перегружать двигатель при любых режимах, его мощность выбирают с запасом.

$$P_{\mu} = \frac{k \cdot P_{\mu}}{\eta_{\mu}} = \frac{1,2 \cdot 43,462}{0,98} = 53,219 \text{ kBr};$$

где k — коэффициент запаса, выбираем k = 1,2, так как ЭД является приводом насоса, работающего при постоянной нагрузке в продолжительном режиме, и имеет редкие пуски при закрытой задвижке;

η_п – кпд передачи, при соединении валов двигателя и насоса муфтой η_п=0,98.

Выбираем асинхронный двигатель типа АД255М2.

Определим параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя AД255M2 со следующими каталожными данными:

- Номинальная мощность двигателя: $P_{H} = 55 \kappa Bm$.
- Номинальное фазное напряжение: $U_{1H} = 220B$.
- Номинальное напряжение сети: $U_{\phi H} = 380B$.
- Номинальная частота вращения: $n_H = 2945 o \delta / Mu H$.
- КПД в режиме номинальной мощности: $\eta_{H} = 0.925$ *о.е.*
- Момент инерции двигателя: $J_{\partial s} = 0,173 \kappa \cdot M^2$.
- Коэффициент мощности в режиме номинальной мощности: cos φ = 0,91o.e.
- Кратность пускового тока: $k_i = 7,5 o.e.$
- Кратность пускового момента: $k_n = 2,0o.e.$
- Кратность максимального момента: $k_{\text{max}} = 3, 2o.e.$
- Коэффициент загрузки двигателя: $p_{x} = 0,75$ *о.е.*
- Число пар полюсов: p=1.

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя нужно использовать его математическую модель, которая может быть представлена различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения:



Рисунок 19 – Схема замещения асинхронного двигателя.

- U_{1ф} фазное напряжение подводимое к обмотке статора двигателя;
- I₁ ток обмотки статора;
- _ R₁ активное сопротивление обмотки статора;
- *X*_{1σ} индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;
- I_2' приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;
- R₂['] приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;
- X[']_{2σ} приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;
- I₀ ток холостого хода (намагничивания);
- *X_m* индуктивное сопротивление контура намагничивания

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме:

$$\overline{U}_{1\Phi} - \overline{E}_{m} - j \cdot X_{1} \cdot \overline{I}_{1} - R_{1} \cdot \overline{I}_{1} = 0$$

$$\overline{E}_{m} + j \cdot X_{2}^{'} \cdot \overline{I}_{2}^{'} + R_{2}^{'} \cdot \overline{I}_{2}^{'} / s = 0$$

$$\overline{I}_{1} + \overline{I}_{2}^{'} - \overline{I}_{0} = 0$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений изображена на рисунке 20:



Рисунок 20 – Векторная диаграмма асинхронной машины

Найдем синхронную частоту вращения и номинальное скольжение:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 300006 / MUH$$
$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{3000 - 2945}{3000} = 0.0180.e.$$

Найдем ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_{0} = \sqrt{\frac{I_{11}^{2} - (p_{\mathcal{H}} \cdot I_{1H} \cdot \frac{1 - S_{H}}{1 - p_{\mathcal{H}} \cdot S_{H}})^{2}}{1 - (p_{\mathcal{H}} \cdot \frac{1 - S_{H}}{1 - p_{\mathcal{H}} \cdot S_{H}})^{2}}},$$

где
$$I_{11} = \frac{p_{\mathcal{H}} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p\mathcal{H}} \cdot \eta_{Hp\mathcal{H}}} = \frac{0,75 \cdot 55000}{3 \cdot 220 \cdot 0,901 \cdot 0,925} = 75,208 \text{ A}$$
 — ток статора

двигателя при частичной загрузке,

 $\eta_{H_{DDC}} = \eta_H = 0,925 - K\Pi Д$ при частичной загрузке,

$$\cos\varphi_{pxc} = \cos\varphi \cdot \left(\frac{\cos\varphi_{0,75}}{\cos\varphi}\right) = 0.91 \cdot 0.99 = 0.901$$

коэффициент мощности при частичной загрузке,

$$\cos \phi_{0.75} / \cos \phi_{\rm H} = 0,99$$

относительный коэффициент мощности при частичной загрузке (из графика на рисунке 22),





двигателя

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H} = \frac{55000}{3 \cdot 220 \cdot 0.91 \cdot 0.925} = 99,274A$$

номинальный ток статора двигателя.

$$I_{0} = \sqrt{\frac{75,208^{2} - \left(0,75 \cdot 99,274 \cdot \frac{1 - 0,018}{1 - 0,75 \cdot 0,018}\right)^{2}}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1 - 0,018}{1 - 0,75 \cdot 0,018}\right)^{2}}} = 19,245A$$

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем $\beta = 1$

$$s_{k} = s_{H} \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^{2} - (1 - 2 \cdot s_{H} \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_{H} \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} = 0.018 \cdot \frac{3.2 + \sqrt{3.2^{2} - (1 - 2 \cdot 0.018 \cdot 1 \cdot (3.2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0.018 \cdot 1 \cdot (3.2 - 1)} = 0.125 \text{ o.e.}$$

Найдем значения коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}}\right) = 1 + \left(\frac{19,245}{2 \cdot 7,5 \cdot 99,274}\right) = 1,013;$$

$$A_{1} = m \cdot U_{1H}^{2} \cdot \frac{1 - s_{H}}{2 \cdot C_{1} \cdot k_{\max} \cdot P_{H}} = 3 \cdot 220^{2} \cdot \frac{1 - 0.018}{2 \cdot 1.013 \cdot 3.2 \cdot 55000} = 0.398;$$

Теперь можно определить активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_{2}' = \frac{A_{1}}{\left(\beta + \frac{1}{s_{k}}\right) \cdot C_{1}} = \frac{0,398}{\left(1 + \frac{1}{0,125}\right) \cdot 1,013} = 0,044 \text{Om}$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2 \cdot \beta = 1,013 \cdot 0,588 \cdot 1 = 0,044$$
OM

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_{\kappa H}$:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{{s_k}^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,125^2}\right) - 1^2} = 7,957$$

Найдем значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$x_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2 = 7,957 \cdot 1,013 \cdot 0,044 = 0,351$$
OM

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$x_{2H} = 0,58 \cdot \frac{x_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,351}{1,013} = 0,2010$$
 M

Найдем индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$x_{1H} = 0,42 \cdot x_{KH} = 0,42 \cdot 0,351 = 0,147$$
 OM

По найденным значениям C_1, R_2' и $x_{\kappa H}$ определим критическое скольжение:

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R_2}{\sqrt{R_1^2 + x_{\kappa H}^2}} = \frac{1,013 \cdot 0,044}{\sqrt{0,044^2 + 0,351^2}} = 0,125 \text{ o.e.}$$

Рассчитанные значения *S*_{*к*1} и *S*_{*к*} равны.

Для того чтобы найти ЭДС ветви намагничивания E_1 найдем $\sin \varphi$:

$$\varphi = \arccos(\cos \varphi) = \arccos(0,91) = 0,428$$

 $\sin \varphi = 0,415$

Найдем ЭДС ветви намагничивания *E*₁, наведенную потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_{1} = \sqrt{\left(U_{1H} \cdot \cos\varphi - R_{1} \cdot I_{1H}\right)^{2} + \left(U_{1H} \cdot \sin\varphi - x_{1H} \cdot I_{1H}\right)^{2}} = \sqrt{\left(220 \cdot 0.91 - 0.044 \cdot 99.274\right)^{2} + \left(220 \cdot 0.415 - 0.147 \cdot 99.274\right)^{2}} = 209.663B$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$x_{\mu\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{209,663}{19,245} = 10,895$$
OM

3.3 Выбор типа преобразователя

Выбираем преобразователь частоты фирмы SIEMENS, серии MIDIMASTER ECO.

Преобразователь частоты фирмы SIEMENS, серии MIDIMASTER ECO предназначен для систем водоснабжения, отопления, вентиляции и в установках кондиционирования воздуха. Позволяет сэкономить до 60% эксплуатационных расходов.

Режимы работы: преобразователь Midimaster Есо поддерживает вольтчастотное скалярное регулирование.

Преобразователь частоты выбираем из условий:

$$I_{H,\Pi Y} \ge I_{H,\mathcal{A}}, \ P_{H,\Pi Y} \ge P_{H,\mathcal{A}}.$$

Выбираем модель ECO1-5500/3, со следующими техническими параметрами (таблица 4):

Таблица 4 – Технические параметры ПЧ ЕСО1-5500/3

Мололи	Типо	Число	Напряжение	Мощность	Номинальный	Степень
модель	размер	фаз	питания, В	двигателя,	ток, А	защиты

				кВт		
ECO1-5500/3	7	3	380-500	55	102	IP56

Что удовлетворяет условиям: $102 \ge 99,274A, 55\kappa Bm \ge 55\kappa Bm$.



Рисунок 22 – Преобразователи частоты серии Midimaster Eco

Характеристики преобразователей частоты серии Midimaster Eco:

Таблица 5 – Характеристики преобразователей частоты серии Midimaster Eco

Напряжение питающей сети	3 фазы, 380-500 В (±10%)
Частота сети, Гц	47-63
Коэффициент мощности (не менее)	0.98
Максимальная выходная частота,	400
Гц	-00
Перегрузка по току (в % от	
номинального тока в течение 1	110%
мин.)	
	Квадратичное U/f^2
Способ управления	Режим оптимизации
	энергопотребления

	Генераторное	
Способ торможения	Динамическое	
	Комбинированное	
Вид регулятора для управления		
процессом с замкнутой обратной связью	ПИД	
	Низкое напряжение	
	Перенапряжение	
	Перегрузка по току	
Виды защит	Перегрузка по мощности	
	Короткое замыкание	
	Перегрев двигателя	
	Перегрев преобразователя	
Дискретные входы	6	
(параметрируемые)	0	
Фиксированные частоты вращения	8	
	2, параметрируемые 230 В АС	
гелеиные выходы	/ 1.0 A	
	2 (0 В до 10 В, 2 В до 10 В, -10	
Аналоговые входы	В до +10 В, 0/4 до 20 мА)	
Аналоговые выходы	2 (0/4 TO 20 MA)	
(параметрируемые)	2 (0/4 d0 20 MA)	
Последовательный интерфейс	RS485	
Уровень защиты	IP20, IP56	
Параметры окружающей среды		
температура окружающей среды	От 0°С до +40°С	
температура хранения	От -30°С до +70°С	
высота над уровнем моря	1000 м	
допустимая относительная		
влажность (без образования	95	
конденсата)		

3.4 Расчет и построение естественной механической и

электромеханической характеристик

Найдем синхронную угловую скорость:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{1} = 314,159 \frac{pa\partial}{c}$$

Рассчитаем и построим естественную электромеханическую характеристику:

$$I_{1}(\omega) = \sqrt{I_{0}^{2} + I_{2}'(\omega)^{2} + 2 \cdot I_{0} \cdot I_{2}'(\omega) \cdot \sin \phi_{2}},$$

где
$$\sin \phi_2 = \frac{x_{KH}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{\omega - \omega_0})^2 + x_{KH}^2}}$$

 $I'_{2}(\omega)$ - значение приведенного тока ротора от скольжения;

$$I'_{2} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_{1} + \frac{R'_{2}}{\frac{\omega - \omega_{0}}{\omega_{0}}}\right)^{2} + (x_{1H} + x'_{2H})}}$$

По вышеприведенным формулам рассчитывается естественная электромеханическая характеристика, приведенная на рисунке 23:



Рисунок 23 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя.

Рассчитаем и построим естественную механическую характеристику по следующей формуле:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot (R_1 + \frac{R_2'}{\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}})^2 + x_{\kappa H}^2]}$$

Рассчитаем контрольные точки механической характеристики по паспортным данным:

Номинальная скорость: $\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_n) = 314.159 \cdot (1 - 0.018) = 308,4$ рад/с; Момент номинальный: $M_{HOM} = \frac{P_{HOM}}{\omega_{HOM}} = \frac{55000}{308,4} = 178,34 \text{ H} \cdot \text{M};$ Момент критический: $M_{KP} = M_{HOM} \cdot k_{\text{max}} = 178,34 \cdot 3,2 = 570,688 \text{ H} \cdot \text{M};$ Момент пусковой: $M_{\Pi} = M_{HOM} \cdot k_n = 178,34 \cdot 2,0 = 356,68 \text{ H} \cdot \text{M}.$



Рисунок 24 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

Из графика механической характеристики определяем:

1. синхронная скорость	$\omega_0 = 314,159 \ pa\partial/c;$
момент ХХ	$M(\omega) = 0 H \cdot M;$
2. номинальная скорость	$\omega_{H} = 308.4 pad / c;$
номинальный момент	$M_{H} = 178.34 H \cdot M;$
3. критическое скольжение	$s_k = 0,125, \ \omega_K = 274,985 pad / c$;
критический момент	$M_{\rm Marc} = 578.058 H \cdot M;$
4. скольжение в момент пуска	s = 1;
пусковой момент	$M_{\pi} = 153.055 H \cdot M;$

Эти же точки рассчитаем аналитически:

1.	синхронная скорость	$\omega_0 = 314,159 \ pad/c;$
	момент ХХ	$M(\omega) = 0 H \cdot M;$
2.	номинальная скорость	$\omega_{H} = 308.4 pa\partial / c;$
	номинальный момент	$M_{H} = 178.34 H \cdot M;$
3.	критическое скольжение	$s_k = 0,125, \ \omega_K = 274,985 pad / c$
	критический момент	$M_{_{MAKC}} = 570.688 H \cdot M$;
4.	скольжение в момент пуска	s = 1;
	пусковой момент	$M_{II} = 356.68 H \cdot M;$

Как видно из сравнения аналитически и графически определенных значений в контрольных точках существенно различается только значение пускового момента. Это объясняется тем, что при скольжениях близких к единице проявляется поверхностный эффект, который не был учтен в расчетах.

В значениях остальных контрольных точек больших расхождений не наблюдается

3.5 Расчет построение И естественных механических И электромеханических характеристик разомкнутой системы «Преобразователь частоты - Асинхронный двигатель»

Расчет характеристик производим для частот f_1 =50;30;15;10 Гц.

При законе регулирования
$$Z_p = \frac{U_{1H}}{f^2} = \frac{220}{50^2} = 0,088$$

Найдем относительные значения частот питающего напряжения:

при
$$f_{1_{H1}} = 50$$
 Гц $f_{1^{*1}} = \frac{f_{1\hat{l}}}{f_{1\hat{l}}} = \frac{50}{50} = 1$
при $f_{1_{H2}} = 30$ Гц $f_{1^{*2}} = \frac{f_{2\hat{l}}}{f_{1\hat{l}}} = \frac{30}{50} = 0,6$

.

c

при
$$f_{1H3}=15$$
 Гц $f_{1*3}=\frac{f_{3f}}{f_{1f}}=\frac{15}{50}=0,3$
при $f_{1H4}=10$ Гц $f_{1*4}=\frac{f_{4H}}{f_{1H}}=\frac{10}{50}=0,2$

Найдем фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

$$U_{1H1} = Z_p \cdot f_{1\mu_1}^2 = 0,088 \cdot 50^2 = 220 \text{ B};$$

$$U_{1H2} = Z_p \cdot f_{1\mu_2}^2 = 0,088 \cdot 30^2 = 79,2 \text{ B};$$

$$U_{1H3} = Z_p \cdot f_{1\mu_3}^2 = 0,088 \cdot 15^2 = 19,8 \text{ B};$$

$$U_{1H3} = z_p \cdot f_{1H4}^2 = 0,088 \cdot 10^2 = 8,8 \text{ B}.$$

В соответствии с представленными частотами питающего напряжения произведем расчет значений скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{01} = \frac{2\pi \cdot f_{1H1}}{p} = \frac{2 \cdot 3, 14 \cdot 50}{1} = 314,159 \text{ рад/с};$$
$$\omega_{02} = \frac{2\pi \cdot f_{1H2}}{p} = \frac{2 \cdot 3, 14 \cdot 30}{1} = 188,496 \text{ рад/c};$$
$$\omega_{03} = \frac{2\pi \cdot f_{1H3}}{p} = \frac{2 \cdot 3, 14 \cdot 15}{1} = 94,248 \text{ рад/c};$$
$$\omega_{04} = \frac{2\pi \cdot f_{1H4}}{p} = \frac{2 \cdot 3, 14 \cdot 10}{1} = 62,832 \text{ рад/c}.$$

Определим токи холостого хода при данных частотах регулирования:

$$I_{01} = \frac{U_{1H1}}{X_{\mu H}} = \frac{220}{10,895} = 20,193 \text{ A};$$

$$I_{02} = \frac{U_{1H2}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*2}} = \frac{79,2}{10,895 \cdot 0,6} = 12,116 \text{ A};$$

$$I_{03} = \frac{U_{1H3}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*3}} = \frac{19,8}{10,895 \cdot 0,3} = 6,058 \text{ A};$$

$$I_{04} = \frac{U_{1H4}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*4}} = \frac{8,8}{10,895 \cdot 0,2} = 4,039 \text{ A}.$$

Строим электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ для выбранных частот по выражениям:

$$I_{2}(s,f) = \frac{U_{1}(f)}{\sqrt{\left(R_{1} + \frac{R_{2}'}{s}\right)^{2} + X_{\mathrm{KH}}^{2} \cdot f_{1*}^{2}(f) + \left(\frac{R_{1} \cdot R_{2}'}{s \cdot X_{\mu\mathrm{H}} \cdot f_{1*}(f)}\right)^{2}}},$$

где
$$\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1-s).$$



Рисунок 25 – Искусственные электромеханические характеристики Γ₂(ω) при частотном регулировании скорости

Также строим электромеханические характеристики *I*₁(ω) для выбранных частот по выражениям

$$I_{1}(s,f) = \sqrt{\left(I_{0}(f)\right)^{2} + \left(I_{2}'(s,f)\right)^{2} + 2 \cdot I_{0}(f) \cdot I_{2}'(s,f) \cdot \sin \varphi_{2}(s,f)},$$

$$\omega(s,f) = \omega_{0}(f)(1-s),$$

где
$$\sin \varphi_2(s, f) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f)}};$$

 $I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1^*}(f)}$ – ток холостого хода асинхронного двигателя в

зависимости от частоты.



Рисунок 26 – Искусственные электромеханические характеристики *I*₁(ω) при частотном регулировании скорости

Механические характеристики асинхронного двигателя *M*(ω) рассчитываем для выбранных частот, по выражениям:

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[X_{\hat{e}\hat{i}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu \hat{i}} \cdot f_{1*}(f)}\right)^2\right]},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1-s).$$



Рисунок 27 – Искусственные механические характеристики *M*(ω) при частотном регулировании скорости

3.6 Расчет потерь в асинхронном двигателе при работе на искусственных характеристиках

Определим потери в роторе при работе с насосной нагрузкой. Зададим функцию нагрузки.

Вентиляторная нагрузка для насоса описывается функцией:

$$\boldsymbol{M}_{C} = \boldsymbol{M}_{0} + (\boldsymbol{M}_{C.HOM} - \boldsymbol{M}_{0}) \cdot \left(\frac{\boldsymbol{\omega}}{\boldsymbol{\omega}_{HOM}}\right)^{X-1}$$

где M_c - момент нагрузки, при скорости вращения ω ;

 $M_{{\rm C.HOM}}$ - момент нагрузки при скорости $\varpi_{{\rm HOM}}$;

 M_0 - момент трения;

X - показатель степени, для насоса X = 3.

Номинальный электромагнитный момент двигателя:

$$M_{_{\mathcal{DM},H}} = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R_2}{\omega_0 \cdot s_{_H} \cdot \left[X_{_{KH}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s_{_H}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s_{_H} \cdot X_{_{\mu}}}\right)^2\right]} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,044}{314,159 \cdot 0,018 \cdot \left[0,351^2 + \left(0,044 + \frac{0,044}{0,018}\right)^2 + \left(\frac{0,044 \cdot 0,044}{0,018 \cdot 10,895}\right)^2\right]} = 182,798 \text{ H} \cdot \text{M};$$

Момент трения на валу двигателя:

$$M_{_0} = M_{_{_{\mathcal{M}H}}} - M_{_{\partial e.H}} = 182,798-178,34=4,458 \; \mathrm{H\cdot M}.$$



Рисунок 28 – Искусственные механические характеристики *M*(ω) при частотном регулировании скорости

Найдем частоты вращения, при которых происходит пересечение механических характеристик нагрузки и двигателя:

1.
$$f_{1H1}=50 \ \Gamma \mu - \omega_{p1}=308,6 \ pag/c;$$

2. $f_{1H2}=30 \ \Gamma \mu - \omega_{p2}=182,65 \ pag/c;$
3. $f_{1H3}=15 \ \Gamma \mu - \omega_{p3}=87,1 \ pag/c;$
4. $f_{1H4}=10 \ \Gamma \mu - \omega_{p4}=52,8 \ pag/c;$

Определим момент нагрузки и скольжение для каждой частоты вращения.

$$1. M_{C1} = M_0 + (M_{C.HOM} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_{p1}}{\omega_{HOM}}\right)^2 = 4,458 + (178,34 - 4,458) \cdot \left(\frac{308,6}{308,4}\right)^2 = 178,566 \,\mathrm{H\cdot m};$$
$$s_{p1} = \frac{\omega_{01} - \omega_{p1}}{\omega_{01}} = \frac{314,159 - 308,6}{314,159} = 0,018.$$

2.
$$M_{C2} = M_0 + (M_{C.HOM} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_{p2}}{\omega_{HOM}}\right)^2 = 4,458 + (178,34 - 4,458) \cdot \left(\frac{182,65}{308,4}\right)^2 = 65,449 \text{ H} \cdot \text{m};$$

 $s_{p2} = \frac{\omega_{02} - \omega_{p2}}{\omega_{02}} = \frac{188,496 - 182,65}{188,496} = 0,031.$

3.
$$M_{C3} = M_0 + (M_{C.HOM} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_{p3}}{\omega_{HOM}}\right)^2 = 4,458 + (178,34 - 4,458) \cdot \left(\frac{87,1}{308,4}\right)^2 = 18,327 \text{ H} \cdot \text{m};$$

 $s_{p3} = \frac{\omega_{03} - \omega_{p3}}{\omega_{03}} = \frac{94,248 - 87,1}{94,248} = 0,076.$

4.
$$M_{C4} = M_0 + (M_{C.HOM} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_{p4}}{\omega_{HOM}}\right)^2 = 4,458 + (178,34 - 4,458) \cdot \left(\frac{52,8}{308,4}\right)^2 = 9,554 \text{ H} \cdot \text{m};$$

 $s_{p4} = \frac{\omega_{04} - \omega_{p4}}{\omega_{04}} = \frac{62,832 - 52,8}{62,832} = 0,16.$

Потери в роторе рассчитаем по выражению $\Delta P_2 = \omega_0 \cdot s_{\delta} \cdot M_{\tilde{n}}$

$$\begin{split} \Delta P_{21} &= \omega_{01} \cdot s_{p1} \cdot M_{c1} = 314,159 \cdot 0,018 \cdot 178,566 = 1009,767 \ Bm; \\ \Delta P_{22} &= \omega_{02} \cdot s_{p2} \cdot M_{c2} = 188,496 \cdot 0,031 \cdot 65,449 = 382,442 \ Bm; \\ \Delta P_{23} &= \omega_{03} \cdot s_{p3} \cdot M_{c3} = 94,248 \cdot 0,076 \cdot 18,327 = 131,273 \ Bm; \\ \Delta P_{24} &= \omega_{04} \cdot s_{p4} \cdot M_{c4} = 62,832 \cdot 0,16 \cdot 9,554 = 96,047 \ Bm. \end{split}$$

Анализируя потери в роторе можно сказать, что уменьшение частоты приводит к их уменьшению. Это можно объяснить тем что момент нагрузки прямо пропорционален частоте вращения.

По 4 расчетным точка построим кривую отражающую зависимость потерь в роторе от частоты питающего напряжения. Она изображена на рисунке 30.



Рисунок 29 – Зависимость потерь в роторе от частоты питающего

напряжения

4 Моделирование в среде MatLab

4.1 Расчет переходных процессов скорости и момента

Моделирование асинхронного двигателя осуществим с помощью программы MATLAB Simulink. Для создания имитационной модели найдем следующие параметры двигателя.

Индуктивность фазы обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\mu}}{2\pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,147}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0.0004689 \ \mbox{$\Gamma$$H}. \label{eq:L1star}$$

Индуктивность фазы обмотки ротора:

$$L_{2\sigma} = \frac{X_{2\mu}}{2\pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,201}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0006393 \ \Gamma \mu.$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu H}}{2\pi \cdot f_{1H}} = \frac{10,895}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,035 \ \Gamma \mu.$$

Имитационная модель изображена на рисунке 31.



Рисунок 30 - Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя

Ниже представлены переходные характеристики скорости и момента, а также динамическая характеристика при прямом пуске АД без нагрузки и при набросе нагрузки.



Рисунок 31 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента АД при прямом пуске



Рисунок 32 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента АД при прямом пуске и набросе нагрузки

4.2 Силовой канал электропривода. Структурная схема силового канала

В силовой канал электропривода входят:

 преобразователь частоты, выполняющий функцию электрического преобразователя;

электродвигатель, который выполняет функцию
 электромеханического преобразователя;

• механическая система, которая выполняет функцию механического преобразователя.

При решении задач анализа и синтеза регулируемых асинхронных электроприводов обычно применяются модели электродвигателя, составленные на базе обобщенной электрической машины и выполненные в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат. На рисунке 34 приведена структурная схема силового канала непрерывной линеаризованной системы преобразователь - асинхронный электродвигатель в неподвижной системе координат. Входными координатами структурной схемы являются составляющие напряжения управления преобразователя $U_{\mathrm{y}\Pilpha}$ и $U_{\mathrm{y}\Pieta}$, а выходной величиной – угловая скорость двигателя ω . Структурная схема, рисунок 20, характеризуется следующими промежуточными координатами :

 $U_{1\alpha}, U_{1\beta}, I_{1\alpha}, I_{1\beta}, \psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$ – составляющие напряжения, тока статора и потокосцепления ротора в ортогональной системе координат α и β ;

 $M_{\rm ДВЭМ}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

Математическое описание силового канала системы преобразователь асинхронный электродвигатель, в неподвижной системе координат α,β, ориентированной по вектору потокосцепления ротора.

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = R_{9} \cdot (T_{9}p+1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_{2}^{'} \cdot L_{\mu}}{L_{2}^{2}} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_{\mu}}{L_{2}} \cdot z_{p} \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_{9} \cdot (T_{9}p+1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_{2}^{'} \cdot L_{\mu}}{L_{2}^{2}} \cdot \psi_{2\beta} - \frac{L_{\mu}}{L_{2}} \cdot z_{p} \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_{2}p+1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_{\mu} \cdot I_{1\alpha} + \frac{L_{2}}{R_{2}} \cdot z_{p} \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_{2}p+1) \cdot \psi_{2\beta} - L_{\mu} \cdot I_{1\beta} + \frac{L_{2}}{R_{2}} \cdot z_{p} \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ M_{3M} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_{2}} \cdot z_{p} \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{Jp} \cdot (M_{3M} - M_{c}) \end{cases}$$

На основании данной системы уравнений была составлена структурная схема (рисунок 34). Структурная схема, описывает процессы, происходящие в машине переменного тока, в которой действуют переменные величины напряжений, токов, потокосцеплений синусоидальной формы.



Рисунок 33 - Структурная схема силового канала системы преобразовательасинхронный электродвигатель в неподвижной двухфазной системе

координат

В пакете Simulink системы MATLAB разработана имитационная модель силового канала системы преобразователь - асинхронный электродвигатель в неподвижной системе координат [Б].



Рисунок 34 – Имитационная модель силового канала системы преобразователь - асинхронный электродвигатель



Рисунок 35 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента АД при прямом пуске



Рисунок 36 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента АД при прямом пуске и набросе нагрузки.

Сравним переходные процессы, имитационной модели силового канала системы преобразователь – асинхронный электродвигатель собранной в Simulink на основании системы уравнений, и имитационной модели с использованием готовой модели асинхронного двигателя.



Рисунок 37 – Переходные характеристики скорости ротора и электромагнитного момента АД при прямом пуске, набросе и сбросе нагрузки.

Как видно из рисунка 38, переходные процессы в обоих случаях протекают фактически идентично. Поэтому при моделировании достаточно использовать готовую модель двигателя, из библиотеки SimPowerSystem, пакета Simulink, системы MatLab.

4.3 Синтез регулятора давления

Рассчитаем среднюю скорость течения воды в трубе:

$$v_{cp} = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{0,083}{3,14 \cdot \frac{0,3^2}{4}} = 1,179 \text{ m/c}$$

где Q - подача, M^3 / c ;

D - диаметр трубы, принимаем D = 0,3M.

Рассчитаем давление при движении воды в трубе:

$$P = \frac{\rho \cdot v_{cp}^{2}}{2} + \rho \cdot g \cdot h + p = \frac{1000 \cdot 1,179^{2}}{2} + 1000 \cdot 9,81 \cdot 42 + 196133 = 608847,933 \text{ IIa} = 6 \text{ amm};$$

где ρ - плотность воды, кг/м

*v*_{*cp*} - средняя скорость движения потока воды, м/с;

g - ускорение свободного падения, м/с ;

h - напор, м;

р – дополнительное статическое давление, Па.

Модель насоса. Преобразует циклическую частоту двигателя в давление.



Рисунок 39 – Модель насоса, в MatLab Simulink, выраженная апериодическим звеном

 $T_{o\delta} = 0,1$ — время разгона насоса;

$$K_{o\delta} = \frac{P}{\omega_{\text{mac.m}}} = \frac{6}{303,665} = 0,01976,$$

Моделирование контура стабилизации давления



Рисунок 38 – Структурная схема контура давления

На рисунке 38 приняты следующие обозначения:

К_{пч} – коэффициент передачи инвертора;

К_{об} – коэффициент передачи насоса;

- К_{ос} коэффициент передачи обратной связи;
- Т_{пч} постоянная времени запаздывания автономного инвертора напряжения;
- Т_{об} постоянная времени запаздывания насоса;
- Т_{ос} постоянная времени запаздывания обратной связи.

Синтез регулятора давления на модульный оптимум

Разомкнутый контур давления, настроенный на модульный оптимум, должен иметь следующую передаточную функцию:

$$W_{_{\rm TO}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{_{\rm \mu}} p(T_{_{\rm \mu}} p + 1)}$$

где T_{μ} - малая постоянная времени контура давления.

Передаточная функция разомкнутого контура веса рассматриваемой системы определяется следующим образом:

$$W_{\text{paskd}}(p) = W_{\text{pd}}(p) \cdot \frac{2\pi}{z_{\text{p}}} \cdot \frac{K_{\text{ny}}}{1 + T_{\text{ny}}p} \cdot \frac{K_{\text{of}}}{1 + T_{\text{of}}p} \cdot \frac{K_{\text{oc}}}{1 + T_{\text{oc}}p}$$

отсюда получаем:

$$W_{pq}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} p \cdot (T_{\mu} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\pi q} p + 1)(T_{o6} p + 1)(T_{oc} p + 1)}{k_{\pi q} \cdot k_{o6} \cdot k_{oc}} \cdot \frac{Z_{p}}{2 \cdot \pi}$$

При оптимизации, инерционность в канале обратной связи относится к «малым», и за малую некомпенсируемую постоянную времени всего контура принимают:

$$\begin{split} T_{\mu\kappa} &= T_{\mu} + T_{oc} = 0,0002 + 0,125 = 0,1252 \\ T_{o\delta} &= T_{\pi q} \\ T_{\pi q} &= T_{\mu} \\ W_{p\pi}(p) &= \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\kappa} p \cdot (T_{\mu\kappa} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\mu\kappa} p + 1)(T_{o\delta} p + 1)}{k_{\pi q} \cdot k_{o\delta} \cdot k_{oc}} \cdot \frac{z_{p}}{2 \cdot \pi} \\ W_{p\pi}(p) &= \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\kappa} p} \cdot \frac{(T_{o\delta} p + 1)}{k_{\pi q} \cdot k_{o\delta} \cdot k_{oc}} \cdot \frac{z_{p}}{2 \cdot \pi} \end{split}$$

После сокращения домножим полученное выражение на *T*_{об} после чего приведём выражение к каноническому виду.

$$W_{pq} = \frac{T_{o\delta} \cdot Z_{p}}{2 \cdot T_{\mu\kappa} \cdot k_{nq} \cdot k_{o\delta} \cdot k_{oc} \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \frac{(T_{o\delta}p+1)}{T_{o\delta}p} =$$
$$= \frac{0,1 \cdot 1}{2 \cdot 0,1252 \cdot 1 \cdot 0,01976 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3,14} \cdot \frac{(0,1p+1)}{0,1p} = 3,217 \cdot \frac{(0,1p+1)}{0,1p}$$



Рисунок 39 – Имитационная модель контура давления, собранная в Matlab Simulink.



Рисунок 40 – Переходные процессы контура давления

Таблица 6 – Показатели качества работы контура давления

$t_{PY1}^{(5)}, c$	$t_{PY2}^{(5)}, C$	$\sigma,\%$	$\Delta P_{yCT}, A$	
(Эжидаемые	показатели		
0,51332	0,51332	4,3%	0	
Результаты моделирования				
0,534	0,534	0%	0	

$$t_{PY1,\phi}^{(5)} = t_{PY2,\phi}^{(5)} = 4,1 \cdot (T_{\mu} + T_{oc}) = 4,1 \cdot (0,0002 + 0,125) = 0,51332c; \sigma = 0\%$$

4.4 Нелинейная модель системы поддержания давления в среде MatLab

Теоретически и практически доказано, что в классе законов U_{1j}/f_{1j} невозможно одновременно обеспечить удовлетворительные механические и энергетические характеристики в широком диапазоне скоростей и изменения нагрузки. Основная причина этого – возрастания влияния активного сопротивления обмотки статора при снижении частоты питающего напряжения. В асинхронных частотно-регулируемых электроприводах со скалярным управлением, кроме законов U_{1j}/f_{1j} , получили применение и другие законы регулирования: E_1/f_1 , E_m/f_1 , E_2'/f_1 .

На практике наибольшее распространение получил такие способы частотного регулирования скорости как $E_{1j}/f_{1j} = const$, $E_{1j}/f_{1j}^2 = const$, $E_{1j}/f_{1j}^2 = const$, $E_{1j}/f_{1j} = const$. При регулировании скорости в классе законов E_{1j}/f_{1j} необходимо повышать фазное напряжение $U_{1j} = E_{1j} + I_1 \cdot R_1$ на величину падения напряжения $I_1 \cdot R_1$ на активном сопротивлении обмотки статора, а способ регулирования скорости асинхронного двигателя получил название – частотное регулирование с IR-компенсацией.

Структурная схема системы скалярного частотного управления с IRкомпенсацией приведена на рисунке 43.



Рисунок 41 - Структурная схема системы скалярного частотного управления

с IR-компенсацией

Задатчик интенсивности формирует кривую и темп разгона двигателя. При дистанционном управлении электроприводом сигналом задания скорости является задающее напряжение U₃. Ему соответствует задающая частота f_3 местного управления, в этом случае управление пуском и остановом двигателем производиться с панели преобразователя. Блок "преобразователь частота-напряжение" ПЧН формирует требуемую зависимость скалярного управления между частотой и напряжением преобразователя, чем и устанавливается принятый закон частотного регулирования $E_{1i} / f_{1i}^2 = const$.

При скалярной IR-компенсации сигнал управления U_y является суммой сигналов регулирования U_p и положительной обратной связи по току U_{коp}:

$$U_{v} = U_{p} + U_{\kappa o p} = U_{p} + k_{\kappa M} \cdot R_{1} \cdot I ,$$

где k_{км} – коэффициент положительной обратной связи по току;

R₁- активное сопротивление фазы обмотки статора АД;

I – сигнал пропорциональный действующим значениям токов i_a , i_b , i_c обмоток статора АД.

Сигнал управления является входным для прямого координатного преобразователя (ПКП), на выходе которого формируется три синусоидальных напряжения управления U_{1yA} , U_{1yB} , U_{1yC} сдвинутые относительно друг друга на угол $\pm 2\pi/3$, с амплитудами пропорциональными напряжению управления. Сигналы U_{1yA} , U_{1yB} , U_{1yC} формируют фазные напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН).

Произведем расчет статических характеристик.

Примем коэффициенты компенсации: К_{КМ}=0,25; 0,5; 0,75.

Найдем эквивалентные сопротивление ротора с учетом IR – компенсации

$$R_{1 \ 3KB1} = R_1 \cdot (1 - K_{KM1}) = 0,044 \cdot (1 - 0,25) = 0,033 \text{ Om.}$$
$$R_{1 \ 3KB2} = R_1 \cdot (1 - K_{KM2}) = 0,044 \cdot (1 - 0,5) = 0,022 \text{ Om.}$$
$$R_{1 \ 3KB3} = R_1 \cdot (1 - K_{KM3}) = 0,044 \cdot (1 - 0,75) = 0,011 \text{ Om.}$$

Строим электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ для выбранных частот и коэффициентов $K_{\rm KM}$ (рис.21) по выражениям

$$I_{2}(s, f, K_{\rm KM}) = \frac{U_{1}(f)}{\sqrt{\left(R_{13\rm KB}(K_{\rm KM}) + \frac{R_{2}'}{s}\right)^{2} + X_{\rm KH}^{2} \cdot f_{1*}^{2}(f) + \left(\frac{R_{13\rm KB}(K_{\rm KM}) \cdot R_{2}'}{s \cdot X_{\mu\rm H} \cdot f_{1*}(f)}\right)^{2}}$$

где $R_{1_{3KB}}(K_{KM}) = R_1 \cdot (1 - K_{KM})$ – эквивалентное активное сопротивление статорной цепи.

$$\omega(s,f) = \omega_0(f) \cdot (1-s),$$

 $f_{1*}(f) = \frac{f}{f_{1H}}$ – относительная частота питающего напряжения;

 $\omega_0(f) = \omega_{0H} \cdot f_{1*}(f)$ – скорость идеального холостого хода при данной частоте напряжения питания;

в диапазоне скорости $\omega = 0 \div \omega_0$.



Рисунок 42 – Искусственные электромеханические характеристики Γ₂(ω) при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

Также строим электромеханические характеристики $I_1(\omega)$ для выбранных частот и коэффициентов $K_{\rm KM}$ по выражениям

ток холостого хода асинхронного двигателя в зависимости от частоты.



Рисунок 43 – Искусственные электромеханические характеристики *I*₁(ω) при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

Механические характеристики асинхронного двигателя $M(\omega)$ рассчитываем для выбранных частот и коэффициентов $K_{\rm KM}$ по выражениям

$$M(s,f) = \frac{3 \cdot (U_{1}(f))^{2} \cdot R'_{2}}{\omega_{0}(f) \cdot s \cdot \left[X_{\rm KH}^{2} \cdot (f_{1*}(f))^{2} + \left(R_{1_{3\rm KB}}(K_{\rm KM}) + \frac{R'_{2}}{s}\right)^{2} + \left(\frac{R_{1_{3\rm KB}}(K_{\rm KM}) \cdot R'_{2}}{s \cdot X_{\mu\rm H} \cdot f_{1*}(f)}\right)^{2}\right]} \\ \omega(s,f) = \omega_{0}(f)(1-s).$$



Рисунок 44 – Искусственные механические характеристики *M*(ω) при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

При работе на естественной характеристике (f=50 Гц) IR-компенсация не применяется, так как фазное напряжение повышается выше номинального что недопустимо.

• электромеханические характеристики;

при увеличении коэффициента компенсации момента K_{KM} токи короткого замыкания I_{K3} имеют большие значения, причем эти различия тем больше, чем меньше частота обмоток статора f_1 . Это объясняется тем, что при малых частотах больше доля падения напряжения на активном сопротивлении R_1 , следовательно, больше доля компенсации.

• механические характеристики;

при увеличении коэффициента компенсации момента K_{KM} критический момент увеличивается, а характеристики становятся более жесткими. На графике различия в критическом и пусковом моментах при различных K_{KM} не так заметны. Это можно объяснить тем, что мощность

двигателя велика и сопротивление его статорной обмотки мало, а соответственно и падение напряжения на ней невелико.

4.5 Расчет переходных процессов скорости и момента для режима пуска сброса и наброса нагрузки на валу двигателя замкнутой системы «Преобразователь частоты – Асинхронный двигатель»

В соответствии с функциональной схемой, представленной на рисунке 43, составим имитационную модель привода

Для этого определим передаточные функции входящих в нее блоков. На рисунке 47 представлены математически рассчитанная и аппроксимированная ломаными линиями кривые зависимости $U_{1i}/f_{1i}^2 = const$.



Рисунок 45 - Кривая зависимости U(f)

Кривая задается в блоке ПЧН тремя точками: 1. $f = 1,3\Gamma \mu$, U = 10 B. 2. $f = 20\Gamma \mu$, U = 40 B. 3. $f = 50\Gamma \mu$, U = 220 B.

Инвертор напряжения представим апериодическим звеном. Его передаточная функция:

$$W_{uh}(p) = \frac{k_{uh}}{T_{uh} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,0002p + 1},$$

где $k_{uh} = 1$ - коэффициент передачи инвертора;

$$T_{uh} = \frac{1}{f_{hy}} = \frac{1}{5000} = 0,0002$$

постоянная времени запаздывания автономного инвертора напряжения, где $f_{\mu q} = 5000 \Gamma q$ - несущая частота инвертора.

Положительная обратная связь по току представляется апериодическим звеном:

$$W_{\partial m}(p) = \frac{k_{\kappa M}}{T_{\kappa M} \cdot p + 1} = \frac{0,1}{0,001 \cdot p + 1}$$

где $k_{_{KM}}$ - коэффициент положительной обратной связи по току, примем $k_{_{KM}} = 0,1$;

 $T_{_{KM}}$ - постоянная времени задержки контура тока, время достаточное для определения мгновенного значения тока статора асинхронного двигателя с современными контроллерами составляет $T_{_{KM}} = 0,001$.

Имитационная модель изображена на рисунке 46. Модели входящих в нее блоков представлены на рисунках 47-49.



Рисунок 46 - Имитационная модель замкнутой системы ПЧ-АД с IR-

компенсацией



Рисунок 47 - Имитационная модель прямого координатного преобразователя



Рисунок 48 - Имитационная модель преобразователя частоты



Рисунок 49 - Имитационная модель обратного координатного преобразователя

Снимем переходные характеристики скорости ротора и электромагнитного момента АД и динамическую механическую характеристику при пуске с коэффициентом IR-компенсацией $k_{\kappa m} = 0,1$



Рисунок 50 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске($k_{\kappa m} = 0,1$)

Для сравнения снимем переходные характеристики скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске с коэффициентом IR-компенсацей $k_{_{KM}} = 0,1$ и $k_{_{KM}} = 0,75$.



Рисунок 51 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске

Как видно из полученных характеристик при увеличении коэффициента IR-компенсации, время переходного процесса и колебания электромагнитного момента двигателя увеличиваются.

Создадим имитационную модель, представляющую насосную нагрузку.



Рисунок 52 – Имитационная модель насосной нагрузки

Снимем переходные характеристики давления, скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске под насосной нагрузкой (коэффициент IR-компенсации $k_{_{KM}} = 0,1$).

Для этого в имитационную модель, рисунок 48, добавим регулятор давления и имитационную модель насосной нагрузки.



Рисунок 53 – Имитационная модель автоматической системы регулирования



давления в водозаборном узле

Рисунок 54 – Переходная характеристика давления, скорости ротора, электромагнитного момента и фазного тока АД при пуске, открытии и закрытии клапана

Снимем переходные процессы при падении и нарастании давления до максимальных значений, которые может отрабатывать разработанная система.



Рисунок 55 – Переходная характеристика давления, скорости ротора, электромагнитного момента и фазного тока АД при пуске, падении и нарастании давления до максимальных значений

После нелинейной создания модели контуром С давления, наблюдается меньшая колебательность переходных процессов по сравнению с моделью нерегулируемого электропривода. Время переходных процессов при пуске фактически не изменилось. С введением квантования по времени и постоянной времени транспортной запаздывания, появилось перерегулирование, ЧТО означает, что система требует дальнейшей корректировки параметров регулятора, на реальном техническом объекте.

При снятии переходных процессов, рисунок 54, было промоделировано открытие и закрытие клапана. Поскольку, согласно СНиП 2.04.01-85* давление воды не должно превышать 4 атмосферы. Берем 4 атмосферы как заданное давление, которое необходимо поддерживать. При открытии клапана, моделируем падение давления на 2 атмосферы. Как видно из переходных процессов система быстро, за 1,15 сек., отрабатывает перепад давления. При этом возрастает скорость ротора и электромагнитный момент. При закрытии клапана назад, моделируем повышение давления на 2 атмосферы. Наблюдаем, что система, отрабатывает данный перепад давления за 1,4 сек. Скорость ротора и электромагнитный момент падает.

При снятии переходных процессов падения и нарастания давления, до максимальных значений, которые может отрабатывать разработанная система, рисунок 50, наблюдаем, что система может отрабатывать падение давления в 2 атмосферы, за 1,15 сек. и нарастание давление до 5 атмосфер, за 1,4 сек.

Протоколы схем имитационных моделей привода в программной среде WINDORA – приложения В, Г.