

## Реферат

**Выпускная квалификационная работа 100 с., 30 рисунков, 21 таблица, 20 источников.**

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, скалярное управление, мостовой кран, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, преобразователь частоты.

Объектом исследования является частотно-регулируемый электропривод переменного тока главного подъема мостового крана.

Цель работы – модернизация электропривода механизма главного подъема мостового крана, разработку и расчет системы автоматического регулирования частоты вращения вала электродвигателя в зависимости от нагрузки, а также для плавного пуска и остановки механизма главной подачи крана. В пояснительной записке к проекту описаны технологический процесс, проанализированы технические требования к крану, выбран электродвигатель, преобразователь частоты, выполнено исследование разомкнутой системы ПЧ-АД и переходных процессов скорости и момента для режима пуска.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013 на листах белой бумаги формата А4 с помощью программных средств Mathcad, Matlab, CorelDraw.

## Введение

В современном мире, где технический прогресс развивается все интенсивней, не теряют актуальность задачи, направленные на комплексную механизацию и автоматизацию, полностью преобразующие современные производственные процессы в отраслях народного хозяйства.

Каждый год создаются новейшие модификации, позволяющие повышать эффективность и надежность, с которой мостовые электрические краны упрощают производственные технологические процессы.

Различие в технологических процессах различных областей тяжелой промышленности определяет основную конструкцию кранов. Практически во всех предприятиях используют грузоподъемные машины: в строительстве, автомобиле-машиностроении, в ремонтных цехах. На ряду с этим мостовыми кранами выполняются различные технологические, погрузочно- разгрузочные, монтажные и складские работы в контексте основного технологического процесса.

Краны обладают большой номенклатурой размеров и грузоподъемности. Основное распространение получили модели грузоподъемность которых составляет 5-320 тонн. Приводом для них служит классический асинхронный электродвигатель (в схеме может быть до пяти двигателей) исполнения «фазный ротор» или «короткозамкнутый ротор».

В соответствии с основами стандартизации и унификации промышленного оборудования, электрооборудование мостовых кранов собирается из серийно выпускаемых комплектующих с различиями в схемах управления в виду различной специфики использования кранов. Наряду с общими требованиями, предъявляемыми к электрической части кранов, такими как высокая производительность, надежность, простая эксплуатация и безопасность в обслуживании, сегодня, в век новых экономических моделей, на передний план выходят требования по снижению энергопотребления и затрат на эксплуатацию.

Снизить энергопотребление при работе крана практически в половину позволяет частотное регулирование привода. Наряду со снижением потребления

электроэнергии частотное регулирование позволяет эксплуатировать оборудование с более плавными переходными процессами и снизить динамические нагрузки, которыми подвергается кинематика электропривода, что в свою очередь, положительно сказывается на надежности и долговечности работы кранового оборудования.

Также, при применении частотного регулирования, дополнительные экономические выгоды дает использование асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, с пусковым моментом намного меньшим по сравнению с аналогичными электродвигателями, имеющими конструкцию «фазный ротор».

## 1. Анализ технических требований к крану

### 1.1 Режимы эксплуатации кранов

Краны - это массовые общепромышленные механизмы, применение которых охватывает буквально все отрасли напрямую или косвенно связанные с промышленностью, транспортом или строительством. В связи с разнообразием областей использования, эксплуатация кранов характеризуется различной интенсивностью и режимами работы их и входящих в их конструкцию механизмов. Все это регламентируется соответствующей нормативной документацией.

Российская нормативная база, в соответствии с которой эксплуатируются крановые механизмы и определяются режимы работы кранов, базируется на ГОСТе 25835-83. Группу режима работы можно выбрать из ГОСТа 25546-82. Оба этих документа выполнены в контексте международного стандарта ИСО 4301/1-86.

Рассчитывая и выбирая тип двигателя и аппаратуру управления необходимо руководствоваться предполагаемым режимом эксплуатации кранового оборудования.

ГОСТом 25835-83 предусматривается 6 видов эксплуатации, где каждый вид определен сочетающимися классами, учитывающими использование и нагружение механизмов. Норма времени эксплуатации кранового оборудования определяет класс по использованию. В таблицах 1 и 2 представлены ориентировочные характеристики классов, описывающих использование и нагружение механизмов.

Таблица 1 – Соответствие классов, определяющих использование, использованию механизма по времени.

Классы использования	Как часто используется механизм
A0	Редко
A1	Нерегулярно
A2	Регулярно, но слабо интенсивно
A3	Регулярно, средне интенсивно
A4	Нерегулярно интенсивно (при двухсменной работе)

A5	Интенсивно (трехсменная работа)
A6	Высоко интенсивно (трехсменная работа)

Таблица 2 – Характеристика классов, определяющих нагружение механизмов крана

Класс нагружения механизмов	Характеристики эксплуатационной нагрузки	
	Механизмы, ответственные за подъем	Механизмы, обеспечивающие горизонтальное перемещение
B1	Наличие преобладающих минимальных нагрузок, редкое воздействие максимальных нагрузок (монтажные и ремонтные работы).	Наличие редких пусков и торможений, значительных рабочих и холостых пробегов, малых масс перемещаемого оборудования. Характерно для производств невысокой интенсивности в работе, выполняемой на больших обслуживаемых площадях.
B2	Преобладание средних и минимальных нагрузок, редкое появление максимальных нагрузок.	Наличие редких, но регулярных пусков и торможений, небольших рабочих и холостых пробегов, малых масс перемещаемого оборудования. Характерно для постоянно слабо-интенсивно функционирующих производств.
B3	Характерно преобладание средних и минимальных нагрузок эпизодического характера (производства с разнообразной номенклатурой груза).	Наличие регулярных пусков и торможений, небольших рабочих и холостых пробегов, достаточно больших масс перемещаемого оборудования. Характерно для постоянно высоко-интенсивно функционирующих производств на малых обслуживаемых площадях.
B4	Характерно преобладание максимальных и близких к ним нагрузок, средних нагрузок эпизодического характера (производства с неменяющейся номенклатурой груза).	Наличие частых пусков и торможений, практически полное отсутствие установившихся режимов, перемещение больших масс. Характерно для постоянно высоко-интенсивно функционирующих производств на ограниченных обслуживаемых площадях.

В реальных условиях группа режима эксплуатации механизма крана нередко устанавливается в соответствии с группой режимов эксплуатации кранов в целом, определяемым нормативами (таблица 4).

Таблица 3 – Крановые механизмы и режимы их работы

Классы использование	Работа механизма (норма времени, час.)	Классы нагружения			
		B1	B2	B3	B4
A0	до 800	1М	1М	1М	2М
A1	800-1600	1М	1М	2М	3М
A4	6300-12500	3М	4М	5М	6М
A5	12500-25000	4М	5М	6М	
A6	25000-50000	5М	6М		

Таблица 4 – Корреляция группы режима крана и механизма

Группы режимов кранов	Группы режимов механизмов	
	Механизм, действующий во время каждого этапа в работе крана	Механизм, обеспечивающий установочные операции или действующий эпизодически при работе крана
1К	1М	1М
2К	1М	1М
3К	1М – 2М	1М
4К	2М – 3М	1М – 2М
5К	3М – 4М	1М – 2М
6К	4М – 5М	2М – 3М
7К	5М – 6М	3М – 4М
8К	6М	5М – 6М

## 1.2 Характерные нагрузки и механические характеристики приводов кранов.

Грузоподъемные краны комплектуются электроприводами, имеющими различия с электроприводами, которыми комплектуются другие общепромышленные и специальные механизмы. Особенности работы электроприводов мостовых кранов:

- Необходимость обеспечения возможности плавной смены двигательного режима электродвигателя на генераторный во время спуска;
- Эксплуатация характеризуется невысоким диапазоном, в котором должна регулироваться скорость (часто не более 10:1 – для однозонного регулирования);
- Невысокие требования в отношении быстродействия;
- Окружающая среда должна иметь температуру в пределах  $-40$ – $+40^{\circ}\text{C}$ . Для металлургических цехов данный параметр должен составлять  $-10$ – $+50^{\circ}\text{C}$ ;
- Воздух должен иметь среднюю относительную влажность 90% (окружающая среда с температурой  $+25^{\circ}\text{C}$ );
- Суточное количество осаждающейся из воздуха пыли не более 5г/кв.м.;
- Суточный уровень осаждения присутствующих в воздухе паров кислоты не более 500мг/кв.м.;
- Частота и ускорение вибраций и ударов при передвижении механизма не более 1-50Гц и  $5 \text{ м/с}^2$ , соответственно. При наличии одиночных повторяющихся ударов- ускорение не более  $30 \text{ м/с}^2$ ;
- Нерегулярное квалифицированное обслуживание;
- Простая эксплуатация и стабильная надежность в работе.

Электрические приводы кранов, характеризуя испытываемые нагрузки, возможно подразделить на два вида: с активным статическим моментом, и с реактивным статическим моментом.

К первому виду можно отнести приводы, которые устанавливаются на грузовые лебедки, стреловые лебедки, имеющих неуравновешенную стрелу, а ко второму виду – приводы устанавливаемые на механизмы горизонтального передвижения.

Оптимальные пределы механических характеристик приводов систем, обеспечивающих подъем груза и горизонтальное передвижение отражены на рис.1. Конструкция привода должна гарантировать жесткое нахождение механических характеристик в заданных границах при разнообразных нагрузках.

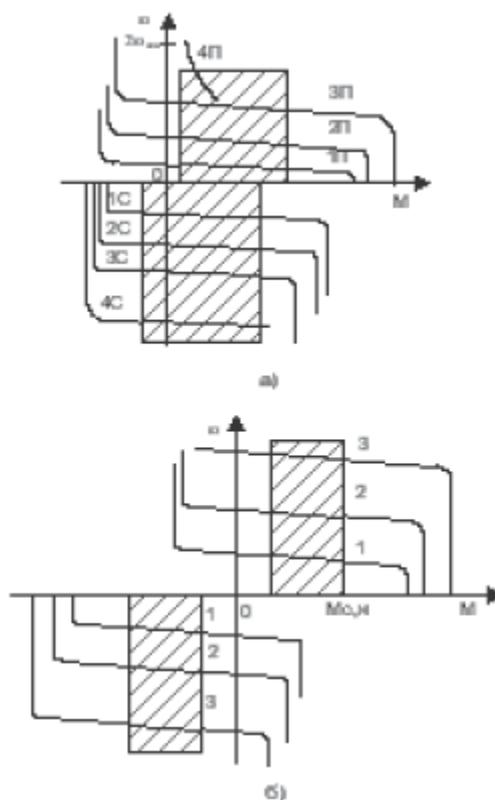


Рис.1 – Определение оптимальных механических характеристик (а-подъем и б – передвижение)

Характеристика сниженной скорости 1П применяется при выполнении операции, когда грузовой канат тестируется на слабину. Чтобы точно установить груз, необходимо использовать характеристику 1С. Третий и четвертый квадранты, изображенные на рисунке, соответствуют режимам тормозного и силового спуска. В них отражена характеристика. Которую можно использовать во время опускания груз.

Если кран имеет большую высоту, на которую поднимается груз, то чтобы повысить производительность, нужно выполнить поднятие и опускание груза или пустого крюка при скорости превышающей номинальную (характеристика 4). Вследствие этого необходимо обеспечение электроприводом двухзонного регулирования скорости.

Работа электропривода механизма, выполняющего горизонтальное перемещение, определяется жесткими рамками при всех заданных значениях нагрузки. При торможении с изменением скорости с высшей на низшую, привод должен гарантировать обеспечение автоматического перехода двигательный-тормозной режимы и ограничить тормозной момент.

Мостовые краны общего назначения (рис. 2) определяются режимом работы, не превышающим 5К.

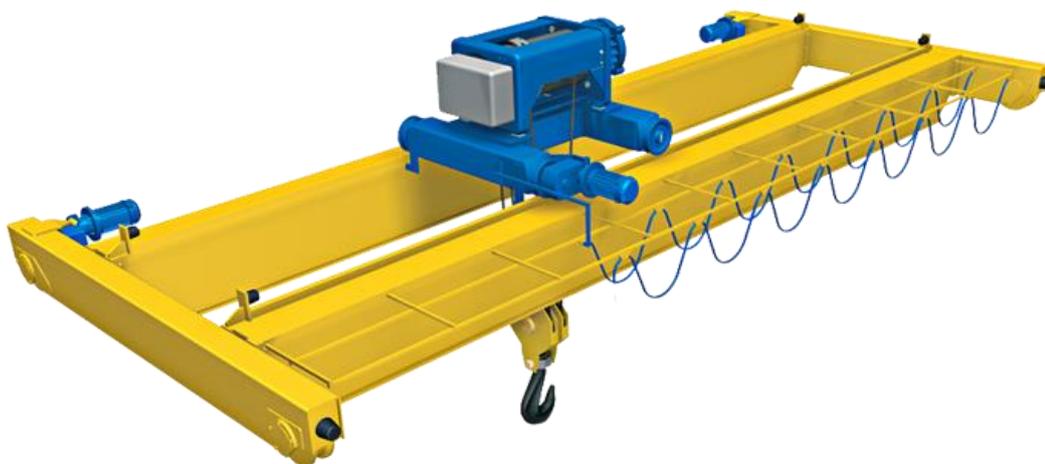


Рис.2 – Мостовой кран общего назначения

Специальные краны, используемые на металлургических производствах, обычно имеют режимы работы, превышающие 5К. На фоне кранов, имеющих общее назначение, или рассматривая специальные краны, используемые на плотинах и гидроэлектростанциях, существует отдельная группа кранов, которые используются не часто и характеризуются режимом работы 1К. Это краны сверхбольшой грузоподъемности (несколько сотен тонн). Краны общего назначения при обычных условиях работы поднимают груз с номинальной

скоростью около 0,25 м/с и перемещают его со скоростью до 1,7 м/с. ГОСТами не определяются точные диапазоны регулирования скоростей, но при этом механизм подъема (если посадочная скорость отдельно не оговаривается) может в этом отношении работать со скоростью одинаковой со скоростями, присущими башенным кранам – 0,08 м/с.

## **2.Выбор типа двигателя и преобразователя частоты**

### **2.1 Особенности частотного регулирования электропривода**

Частотное регулирование в контексте асинхронного двигателя характеризуется следующими особенностями. Во-первых, снижение потерь энергий в электродвигателях в процессе пусковых режимов и процессах торможения, что дает возможность применения высокооборотных электроприводов, а в процессе проектирования электродвигателей фокусироваться на снижении потерь, возникающих в обмотке электродвигателя при номинальных режимах эксплуатации. Проектируя частотно-регулируемый электропривод следует руководствоваться следующим:

- Необходимость сохранения основных геометрических размеров, присущих обычным крановым асинхронным двигателям, т.к. основной процесс определяется режимом работы, а не тем как он регулируется;
- Современные частотно-регулируемые электроприводы, имеющие векторное управление и с механическими характеристиками, формируемыми преобразователем не нуждаются в специальных мерах с целью повысить перегрузочную способность и пусковой момент;
- Системы с частотным регулированием имеют оптимальную частоту вращения электродвигателя порядка 1900-1800об/мин. при легком и среднем режимах работы и 1000-800об/мин. при тяжелом режиме. Но при разработке системы необходимо выдерживать соотношение между максимальной частотой вращения привода и максимально допустимой частотой вращения редуктора;

- Необходимо сохранение работоспособности двигателями в случаях, когда выходное напряжение преобразователя имеет частоту в 1,5-2 превышающую номинальную частоту;

- Чтобы снизить потери в обмотке, она изготавливается из чистого алюминия или меди, с минимальным при этом скольжением. Возможность регулировать выходное напряжение и частоту электродвигателя позволяет более оптимально использовать его активные части и обеспечивать эксплуатацию электродвигателя с минимальными потерями;

- Возможность изготовления электродвигателя на нестандартные параметры напряжения, которые будут соответствовать параметрам выходного напряжения преобразователя.

Все вышеперечисленное, плюс возможность оптимального разграничения регулируемых зон, предоставляет возможность при одинаковых параметрах нагрузки понизить в 1,5-1,8 раз параметры мощности электродвигателя при использовании частотного преобразователя.

## 2.2. Требования, предъявляемые к электроприводу главного подъёма

- Двигатель должен быть защищен от перегрузки и коротких замыканий в силовой цепи и цепи управления. При прекращении питания приводного двигателя должна автоматически отключиться цепь управления, а после восстановления должен быть исключен самозапуск;

- Привод главного подъёма должен быть обеспечен нормально - замкнутым контактом, а при включении двигателя тормоз должен автоматически открываться. Замыкание токоведущих частей электрического устройства привода тормоза на корпус не должно вызвать самопроизвольное включение этого привода. У электродвигателя переменного тока при питании от управляемого преобразователя, снятие механического тормоза должно происходить при величине тока двигателя, который обеспечивает необходимый момент для удержания тележки;

- Привод должен быть реверсивным;

- Класс нагревостойкости изоляционных материалов выбранного типа привода должен быть F или H;
- Работа привода в повторно- кратковременном режиме с ПВ = 40 %;
- Ускорение подъема крюка с грузом не должно превышать  $a_{\max} = 0,3 \text{ м/с}^2$ ;
- Скорость подъема не должна превышать  $V_{\max} = 1,4 \text{ м/с}$ ;
- Диапазон регулирования привода подъема D (4 : 1).

### 2.3. Основные исходные данные для проектирования

Технические требования крану предоставлены в таблице 5.

Таблица 5 – Исходные данные

Наименование	Обозначение	Величина
Масса груза, т	$G_H$	15
Масса крюка, т	$m_k = 600 \text{ кг}$	0.6
Суммарный момент инерции барабана, кг м <sup>2</sup>	$J_b$	1200
Передаточное отношение редуктора	$j$	32,4
Суммарный КПД механизма	$\eta$	0,85
Скорость подъема заданная, м/с	$V$	0,35
Диаметр барабана, м	$D_b$	1.45
Высота подъема, м	$H_{\max}$	16.5
Диапазон регулирования скорости		1:4
Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	$g$	9,81

Подъем груза осуществляется механизмом, изображенным на рисунке 3. Данная конструкция укомплектована крюковой подвеской, полиспастом 6, передаточным устройством 4, снабженного редуктором, муфтами 2 и валами, тормозом 3 и электродвигателем 1.

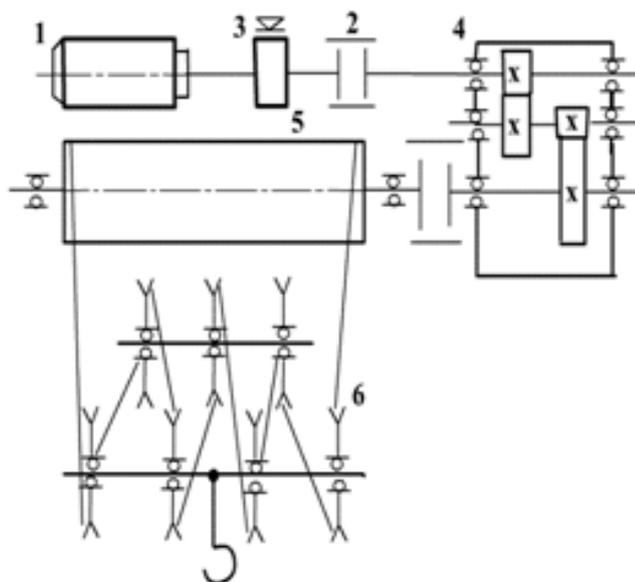


Рис.3 – Кинематическая схема подъемного механизма.

Описанное выше оборудование монтируется на металлоконструкцию крана, сход грузового каната с блоков ограничивают жесткие и отодвигающиеся ограничители.

## 2.8 Выбор преобразователя частоты

Многие ведущие электротехнические корпорации мира сегодня выпускают регулируемые автоматизированные электроприводы (АЭП) комплектно с микропроцессорными средствами автоматизации в виде гибко программируемых систем, предназначенных для широкого использования. Поэтому актуальность проектирования АЭП главного подъема мостового крана, выполненного в общепромышленном исполнении заключается в решении задачи выбора системы управления электроприводом (СУЭП) для максимального повышения эффективности работы и производительности технологического оборудования.

Исходя из требований к СУЭП, при проектировании предлагаются к рассмотрению две схемы управления: схема векторного регулирования и схема скалярного управления электроприводом главного подъема мостового крана,

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: диапазону регулирования, плавности, точности поддержания заданной скорости. Обязательно учитываются динамические показатели качества процесса регулирования: быстродействие, перерегулирование и др. Кроме того, при выборе системы управления электроприводом обязательен учет характера нагрузки, создаваемой рабочим механизмом. Частотное управление электродвигателями осуществляется двумя основными способами.

Скалярный принцип частотного управления является наиболее распространенным в электроприводе. Ему свойственна техническая простота измерения и регулирования абсолютных значений переменных АД. Управление осуществляется по функциональной характеристике, связывающей напряжение и частоту статора электродвигателя ( $U/f$  - характеристике), с применением модуля IR-компенсации для поддержания постоянства потокосцепления статора в соответствии с этой характеристикой. В статических режимах позволяет добиться за счет обратных связей желаемых свойств электропривода. Применяется для электроприводов, в которых отсутствуют высокие требования к динамике.

Векторный принцип управления базируется на принудительной взаимной ориентации векторов потокосцеплений и токов АД в полярной или декартовой системах координат в соответствии с заданным законом регулирования. За счет регулирования модулей переменных и углов между их векторами обеспечивается управление АД как в статике, так и в динамике, обеспечивая тем самым заметное улучшение качества переходных процессов. Именно этот факт является определяющим при выборе системы с векторным управлением и находит применение в электроприводах со средней и высокой динамикой. Приводы таких механизмов как электропривод главного подъема мостового

крана занимают промежуточное положение между высокодинамичными, динамичными и низкодинамичными.

Исходя из того, что разрабатываемая система планируется к использованию в небольшом диапазоне регулирования, и поскольку скалярное управление позволяет получать искусственные механические характеристики с требуемой жесткостью, а также, учитывая преимущества этого вида управления, можно сделать вывод, что данный способ управления может быть применён при проектировании СУЭП по системе ПЧ-АД электропривода главного подъема мостового крана.

С учетом того, что диапазон регулирования скорости электропривода главного подъема мостового крана невелик и механизмы такого класса не требуют обеспечения высокой кратности пускового и максимального моментов, в качестве законов регулирования  $U_1/f_1$  могут быть приняты законы  $U_1/f_1 = \text{const}$  и  $U_1/f_1^2 = \text{const}$  [2]. Последний является более сложным в реализации, но за счет дополнительного снижения напряжения позволяет уменьшить потребляемую из сети энергию. Для повышения пускового момента на малых скоростях до требуемых значений должна быть предусмотрена возможность настройки вольт-частотной характеристики. Определяя параметры вольт-частотной характеристики, нижним частотам ставят в соответствие значения напряжений выше, чем при выбранном законе регулирования.

На основании вышеизложенного и в соответствии с рекомендациями [2] выберем преобразователь, выпускаемый компанией АВВ, тип ACS 601-0070-3. Данный преобразователь описывается следующими основными техническими данными:

- номинальной мощностью в пределах 55Вт;
- номинальным выходным током преобразователя не менее 115А;
- током кратковременных перегрузок 123А;
- трехфазным напряжением питания, 380В, 50Гц;
- с массой – 50кг;



### 3. Разработка системы с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом

#### 3.1 Модель со скалярным частотным управлением

Существующий сегодня научный потенциал ознаменовал появление новых подходов в методах построения системы, включающей асинхронный электропривод и частотный преобразователь. В построении одного из них применяются дифференциальные уравнения, описывающие асинхронный двигатель в контексте теорий общих электрических машин.

На основании этого строится структура, в соответствии с которой частотный привод и управляется.

Используемый нами привод оснащен силовым каналом с входящими в него:

- преобразователем частоты, функционально являющимся электрическим преобразователем;
- электродвигателем, функционально являющимся электромеханическим преобразователем;
- механической системой, функционально являющейся механическим преобразователем.

Решая задачи, связанные анализом и синтезом, затрагивающим оборудование такое как регулируемые асинхронные электропривода, в обычном случае используется модель электродвигателя, составленная базово как обобщенная электрическая машина, и расположенная в поле, которым обладает неподвижная или вращающаяся система координат. В данной системе каждая координата привода рассматривается как векторная величина. Эти величины расположены в качестве проекций на одну и другую координатную ось, и из них можно через координатные преобразования выделить каждую пропорциональную или постоянную величину координаты привода. Точно описать обобщенную электрическую машину можно при помощи дифференциальных уравнений, записываемых в различные координатные

системы. Система описывается с принятыми координатными осями  $\alpha$  и  $\beta$ , которые считаются неподвижными по отношению к статору и осями  $d$  и  $q$ , которые считаются неподвижными по отношению к ротору.

Записываемые относительно этих осей уравнения представляют собой частное математическое описание процесса, происходящего в машине. Для общего случая возможна запись уравнений в отношении произвольно выбранных осей координат, для примера-  $u$  и  $v$ , и из них возможно получение любых частных случаев, из тех как работает электрическая машина. При принятии оси  $u$  в качестве действительной, а оси  $v$  в качестве мнимой, дифференциальным уравнениям будет присуща уже векторная форма.

В данном моделировании необходимо соответствие разрабатываемых характеристик тому, как выполняется погрузка и разгрузка. Чередование данных операций требует изменение характеристик либо искусственно (в ручную), либо автоматически управляя характеристиками или «самоуправляя». Данные механизмы в нужной степени таким самоуправлением не владеют, из-за этого изменение параметров нужно выполнять «искусственно», системами автоматического управления.

Рисунок 9 представляет неподвижную систему координат, с расположенной в ней непрерывной линеаризованной системой ПЧ-АД (Преобразователь частоты - Асинхронный электродвигатель). На рисунке представлена структурная схема силового канала.

Входные координаты данной системы- это составляющая напряжения ( по  $\alpha$  и  $\beta$ ), которым управляется ПЧ -  $U_{yn.\alpha}$  и  $U_{yn.\beta}$

Выходная величина здесь характеризуется скоростью электродвигателя  $\omega$ . Следующие промежуточные координаты характеризуют структурную схему на рисунке 9, а именно, она описывается:

–  $U_{1\alpha}, U_{1\beta}, I_{1\alpha}, I_{1\beta}, \psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$  - составляющими, на которые раскладываются напряжение, ток статора и потокосцепление ротора (ортогональная система координат  $\alpha$  и  $\beta$ );

- $M_{\text{дв.эм}}$  – электромагнитным моментом электродвигателя, Н·м.
- Математическим описанием, которым описан силовой канал модели ПЧ-АД, относительно системы координат  $\alpha$  и  $\beta$ , которая в свою очередь, ориентирована в соответствии с вектором потокосцепления ротора.

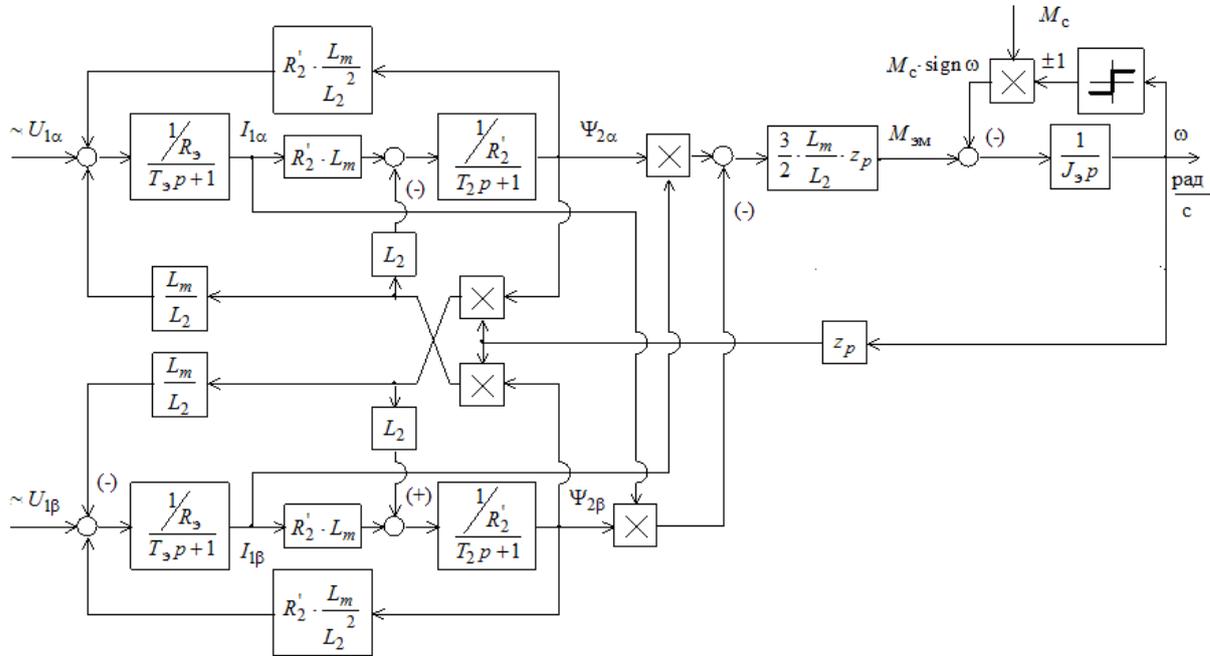


Рис.9 – Силовой канал ПЧ-АД (неподвижная двухфазная система координат  $\alpha$  и  $\beta$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_3 \cdot (T_3 p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_{\mu}}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\alpha} - \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_3 \cdot (T_3 p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2' \cdot L_{\mu}}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\beta} - \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \Psi_{2\alpha} - L_{\mu} \cdot I_{1\alpha} + \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \Psi_{2\beta} - L_{\mu} \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{дв.эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{J_p} \cdot (M_{\text{дв.эм}} - M_c \cdot \text{sign}(\omega)) \end{array} \right.$$

Система уравнений выше является базисом построения структурной схемы ПЧ-АД (неподвижная система координат  $\alpha$  и  $\beta$ ).

Входные величины данной системы определены напряжениями переменного тока – фазными напряжениями (статорные обмотки 2-х фазного асинхронного двигателя):

$$U_{1\alpha}(t) = U_{1m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t); \quad U_{1\beta}(t) = U_{1m} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)$$

Рассмотрим далее, какими параметрами звеньев определяется данная структурная схема электродвигателя.

- Эквивалентными индуктивностями в обмотках:

$$\text{В статоре} - L_1 = \frac{x_1 + x_\mu}{2\pi f} = \frac{0,26 + 4,42}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0149 \text{ Гн}$$

$$\text{В роторе} - L_2 = \frac{x_2' + x_\mu}{2\pi f} = \frac{0,29 + 4,42}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,015 \text{ Гн}$$

Для взаимной индукции:

$$L_{12} = \frac{x_\mu}{2\pi f} = \frac{4,42}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,014 \text{ Гн}$$

Для коэффициента рассеивания:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,385^2}{0,0149 \cdot 0,015} = 0,041.$$

Для эквивалентного сопротивления:

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2^2} = 3,96 + 2,49 \cdot \frac{0,385^2}{0,015^2} = 8,03 \text{ Ом}.$$

Для электромагнитных постоянных времени:

$$T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3} = \frac{0,069 \cdot 0,0149}{8,03} = 0,00358 \text{ с}; \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0,015}{2,49} = 0,0061 \text{ с}.$$

В процессе моделирования в программе Matlab (Simulink) была создана имитационная модель (рис.10) силового канала системы ПЧ-АД (неподвижная система координат).

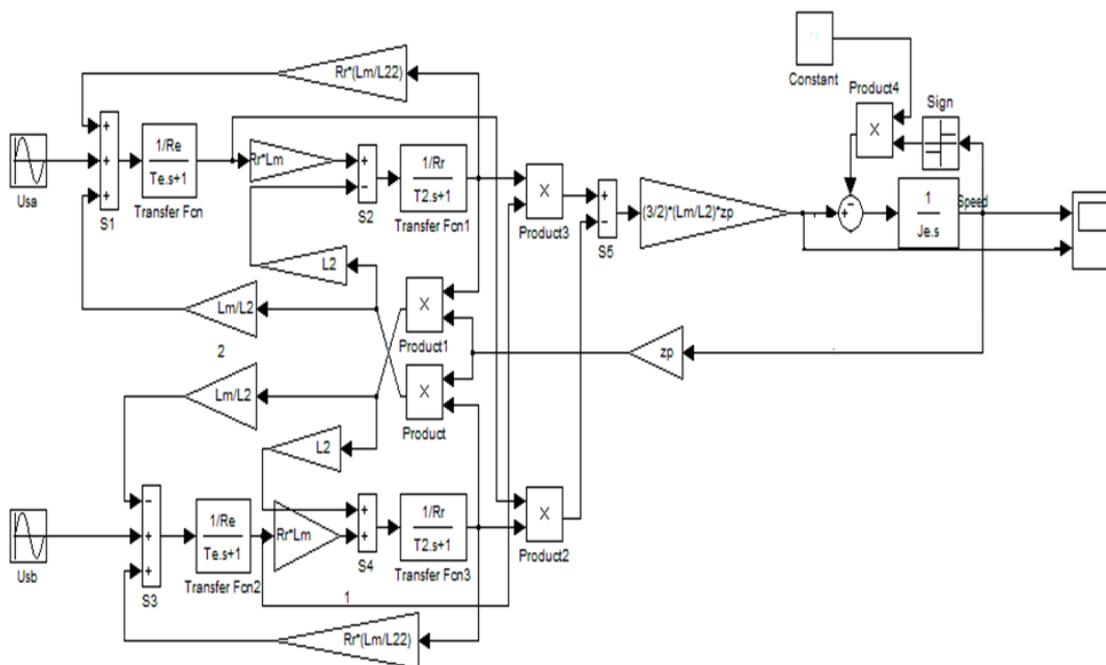


Рис.10 – Имитационная модель силового канала системы ПЧ-АД

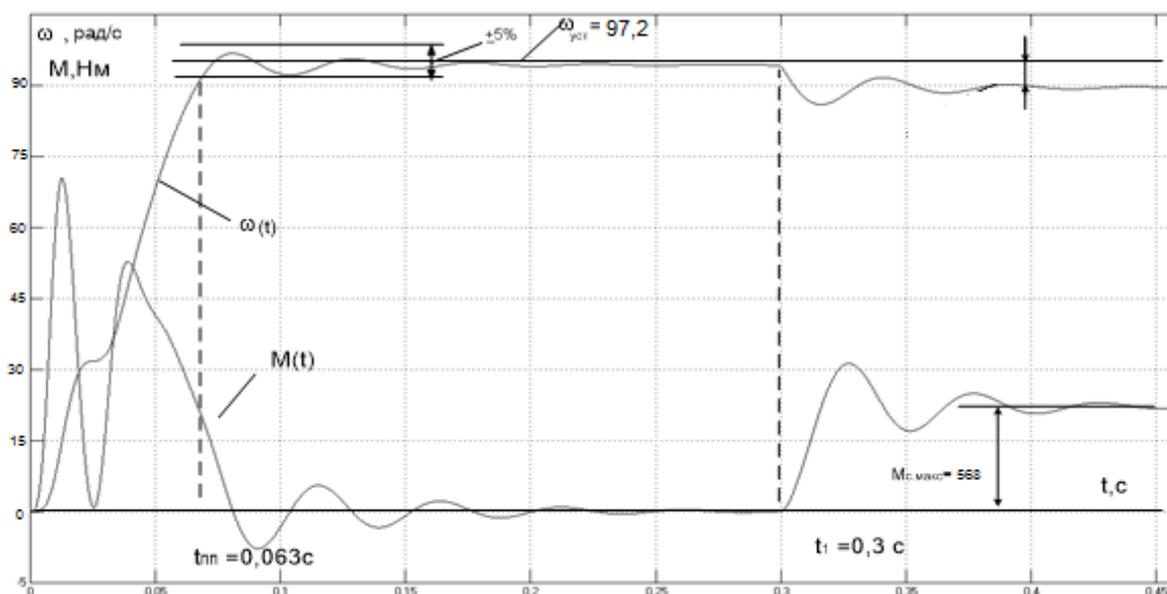


Рис.11 – Переходные характеристики (скорость, электромагнитный момент) в случае прямого пуска и наброса нагрузки  $M_H=568\text{Нм}$

Выполняя сравнение переходных процессов, исследуя имитационную модель силового канала ПЧ-АД, созданную при помощи Simulink, базируясь на дифференциальных уравнениях и имитационную модель, используя готовую модель электродвигателя, очевидно сходство переходных процессов в том и

другом случае. Исходя из этого, возможно использование готовой модели, находящуюся в библиотеке программы.

### 3.2 Исследование разомкнутой системы ПЧ-АД

Рассматривая привод с длительным режимом работы при неменяющейся скорости, диапазон которой не превышает 1:10, и принимая, что отсутствуют какие-либо особые требования относительно динамики процесса, будет целесообразным применить простейшую структуру и законы, применяемы при частотном управлении.

Целесообразно, также, применение разомкнутой структуры для простейшего случая реализации частотно-регулируемого асинхронного электропривода. На рисунке 12 представлено применение разомкнутой структуры для реализации частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением в виде функциональной схемы. Рассматривается двухфазный асинхронный двигатель в статичной координатной системе  $\alpha$  и  $\beta$ , с обозначением сигналов, ответственных за задание и управление, знаком «\*», также с принятыми следующими обозначениями, а именно:

- $\omega$  – фактическим значением, которое имеет угловая скорость вращения электродвигателя;
- ЗИС – задатчиком интенсивности скорости, имеющей линейную характеристику;
- ФНУ 1 – формирователем напряжения, посредством которого управляется двухфазный асинхронный электродвигатель. Процесс происходит с формированием двух напряжений  $U_{\alpha}^* u U_{\beta}^*$  в рассматриваемой структурной схеме асинхронного электродвигателя в статичной координатной системе  $\alpha$  и  $\beta$ ;
- ФНУ 2 – преобразователем напряжения двухфазного двигателя в напряжение управления 3-х фазным электродвигателем.

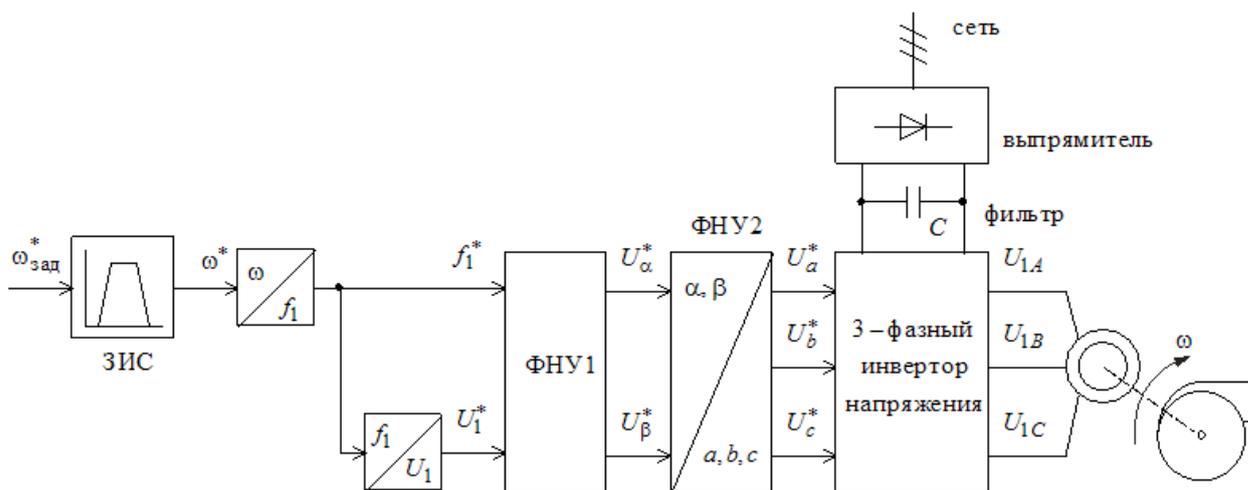


Рис.12 – Построение функциональной схемы- Частотно-регулируемый асинхронный электропривод (скалярное управление)

Рассматриваемая разомкнутая система скалярного управления определяется тем, что с уменьшением частоты происходит соответственное уменьшение максимального момента электродвигателя. Это происходит из-за того, что активное сопротивление статорных обмоток возрастает в процессе падения частоты, которое имеет питающее напряжение. Опираясь на рассмотренный выше закон регулирования  $U_1/f_1^2 = \text{const}$ , имея цель-обеспечить пусковой момент, когда скорости еще невелики, частотный преобразователь должен обладать функцией, которая будет корректировать (повышая начальное значение напряжения) вольт-частотную характеристику, описывающую диапазон малых частот выходного напряжения инвертора.

Возможно, также, применение IRкомпенсации [2] для области малых частот. В течении данного процесса, фазное напряжение инвертора повышается настолько же, насколько падает напряжение в статорных обмотках  $I_l \cdot R_l$ .

Рассмотрим функциональную схему системы со скалярным частотным управлением (рис.13).

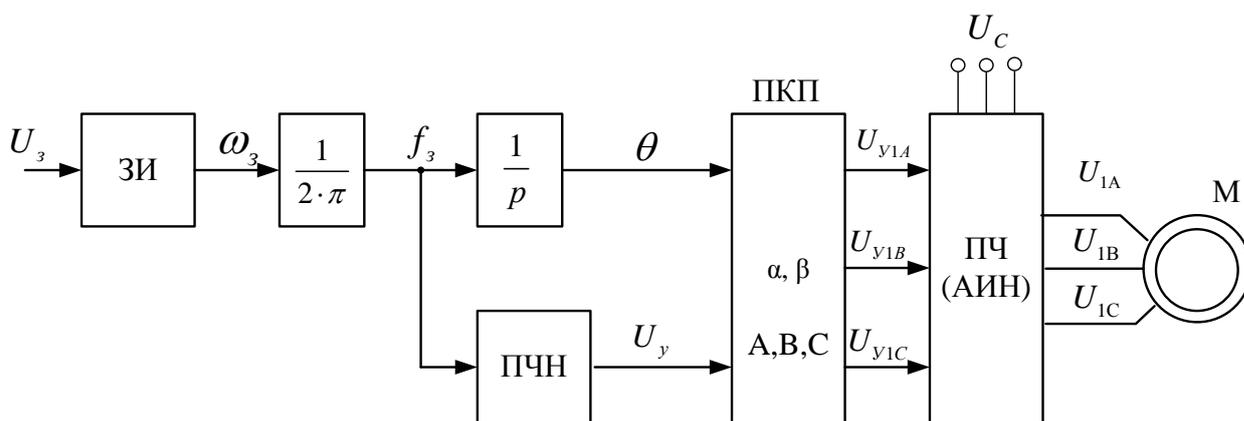


Рис. 13 – Построение функциональной схемы системы со скалярным частотным управлением

Задатчик интенсивности, имеющий линейную характеристику, монтируется на входном участке привода в канал, где происходит задание скорости. Тем самым органичивается момент электродвигателя в момент пуска и торможения электроприводов механизмов, и на которые в соответствии с технологическим процессом не должны влиять различные виды механических перегрузок (электропривод механизма подъема мостового карана в нашем случае).

Задатчиком интенсивности формируется кривая и определяется скоростной режим, в соответствии с которым разгоняется двигатель. Скорость задается по сигналу (задающему напряжению  $U_3$ , с соответствующей ему частотой  $f_3$ . За формирование требуемой зависимости, по которой происходит скалярное управление, соотносящее частоту и напряжение преобразователя, и которое выполняется в соответствии с принятым законом, описывающим частотное регулирование  $U_1/f_1^2 = \text{const}$ , отвечает узел ПЧН (преобразование частоты- напряжения). Формирование трехфазной системы управляющих напряжений, посредством которых управляется автономный инвертор напряжений АИН частотного преобразователя, выполняется блоком ПКП (Блок Прямого Координатного Преобразователя), с приемом силового трехфазного напряжения  $U_{1A}, U_{1B}, U_{1C}$  на выходе ПЧ и последующей передачей на АД.

Функциональная схема, представленная выше, буде использована для составления имитационной модели электропривода в программе Matlab (среда Simulink).

С целью этого необходимо определение передаточных функций составляющих ее узлов. На графике 14 представлена зависимость  $U_{1j} / f_{1j}^2 = const$ . Данная зависимость была получена в ходе математических вычислений и последующего аппроксимирования (ломаные линии на кривой).

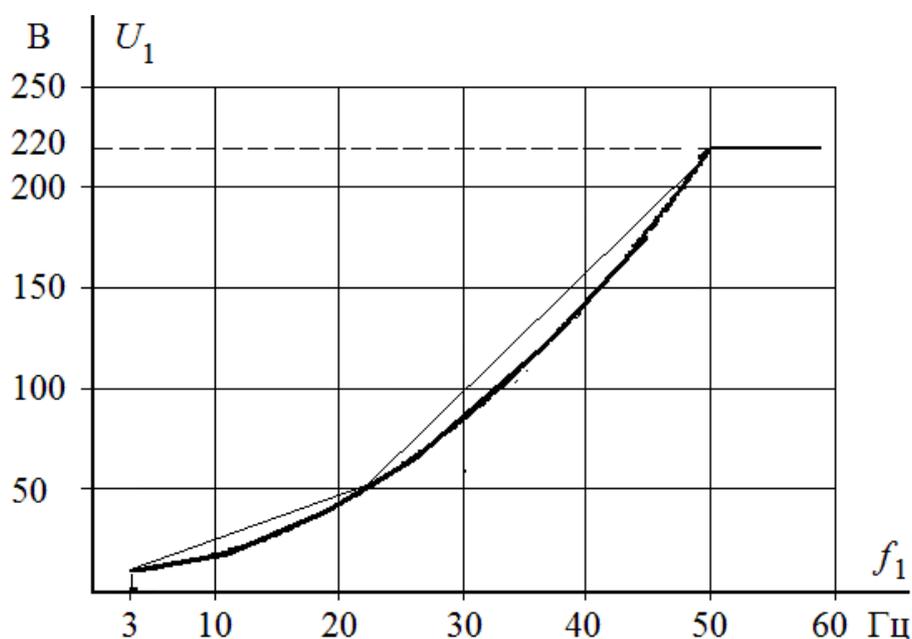


Рис.14 – Построение зависимости  $U_1 / f_1^2 = const$

В таблице 7 представлены точки блока ПЧН по которым строится зависимость, описанная выше.

Таблица 7 – Характеристики напряжение – частота преобразователя

$f_1$ , Гц	3	22	50
$U_1$ , В	8,78	50	220

Инвертор напряжения представляем аperiodическим звеном с передаточной функцией:

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

с  $k_{ин} = 1$  - коэффициентом передачи инвертора;

$$T_{ин} = \frac{1}{f_{нч}} = \frac{1}{5000} = 0,0002.$$

и с постоянной, описывающей время запаздывания автономного инвертора напряжения, с  $f_{нч} = 5000 Гц$  - несущей частотой инвертора [4].

На рисунках 15-18 представлено имитационное моделирование системы, с комплектующими ее функциональными блоками.

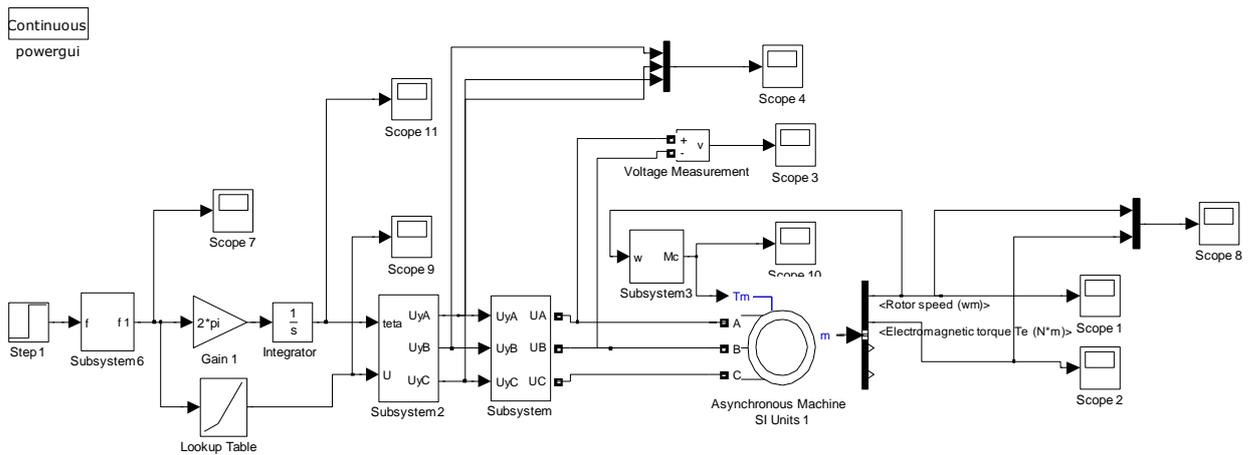


Рис.15 – Построение имитационной модели (разомкнутая система ПЧ-АД/ скалярное управление) в Simulink

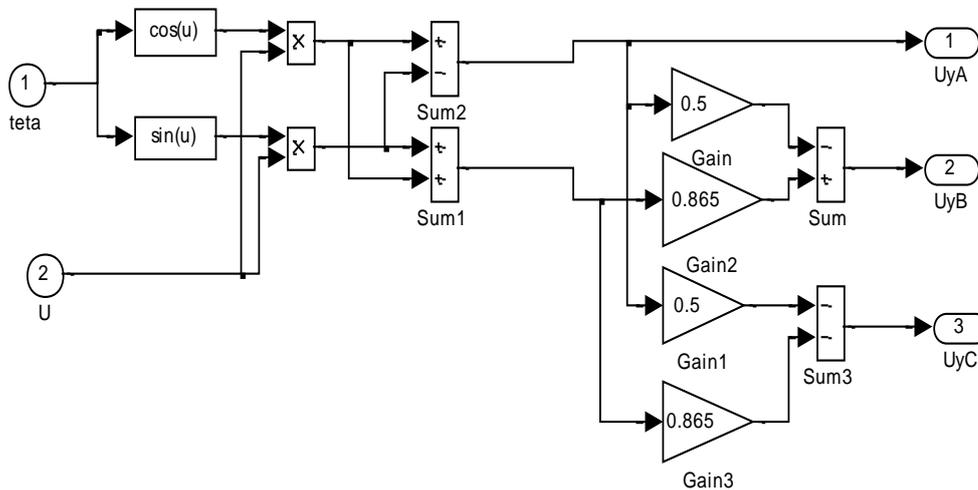


Рис.16 – Построение имитационной модели (прямой координатный преобразователь) в Simulink

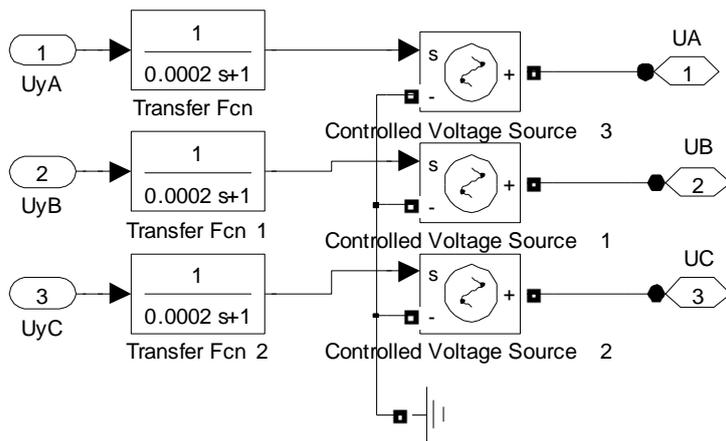


Рис.17 – Построение имитационной модели (преобразователь частоты) в Simulink

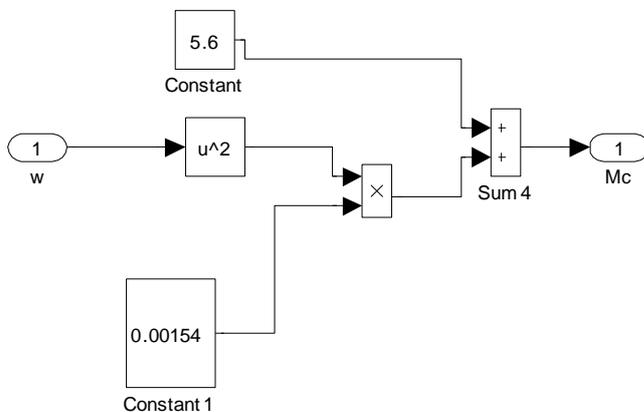


Рис.18 – Построение имитационной модели (нагрузка прилагаемая к главному подъему)

### 3.3 Исследование переходных процессов скорости и момента для режима пуска на валу двигателя системы ПЧ – АД

Если представить себе «идеальный» электропривод, то расположение его механических характеристик имело бы расположение как на рис.18 (во всех четырех квадрантах). Квадранты соответствуют фазам цикла, подъем-1 квадрант, 2-й квадрант характеризуется работой привода не в установившемся режиме (работа только как торможение при переходе с высшей на низшую скорость), 3-й квадрант – силовой спуск (невозможность преодоления создаваемого пустым крюком моментом, момента, создаваемого потерями в редукторе или полиспасте), 4-й – спуск.

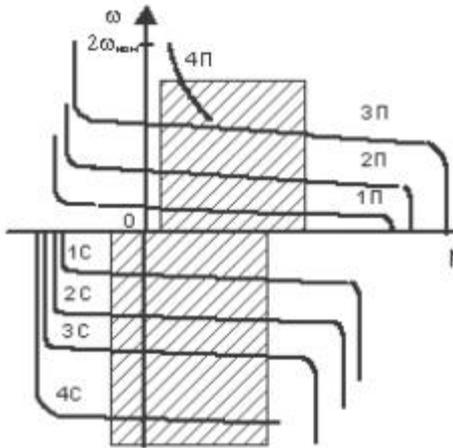


Рис.19 - «Идеальные» механические характеристики механизма подъема

Главная отличительная особенность присущая механизму подъема, это активный (потенциальный) характер, которым определяется момент нагрузки. При рассмотрении переходных процессов скорости и момента во время пуска становится очевидным, что вес груза создает момент, стремящийся к раскручиванию механизма в ту сторону, куда осуществляется спуск груза (этим определяется однозначность активного момента, развиваемого нагрузкой). В первом квадранте диаграммы, описывающей механические характеристики, отражается преодоление электроприводом вышеописанного момента во время пуска.

Примем, что процесс происходит с отработываемой во время пуска скоростью с пределами перерегулирования равными:

$$h_{\omega} = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\text{зад}}}{\omega_{\text{зад}}} \cdot 100\% = \frac{59 - 58}{58} \cdot 100\% = 1,7\%,$$

и регулирование задается временем  $t_p = 1.77$  с.

В процессе моделирования переходных процессов, описывающих процессы, в которых задействован главный подъем мостового крана, составляются графики (рис.20-23), отражающие переходные процессы.

Сокращение рабочего момента электродвигателя на 18% в процессе применения частотного преобразователя отражено на графике, что сократит усилия прилагаемые электроприводом при пуске с целью вращения редуктора и, следовательно, снизит затраты электроэнергии.

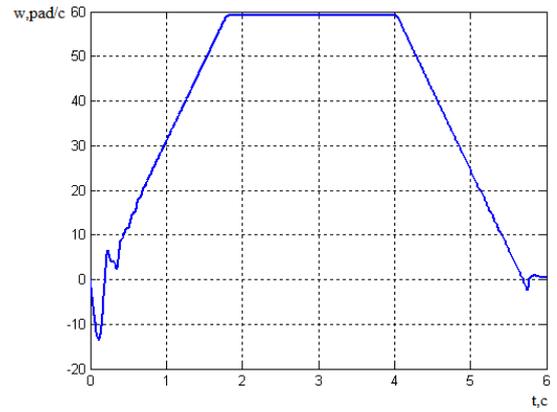
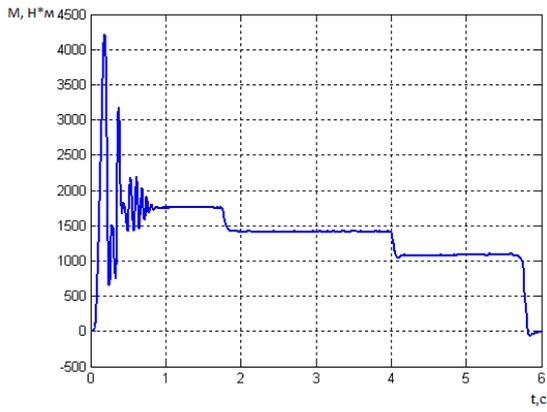


Рис.20 – Стадия подъема груза

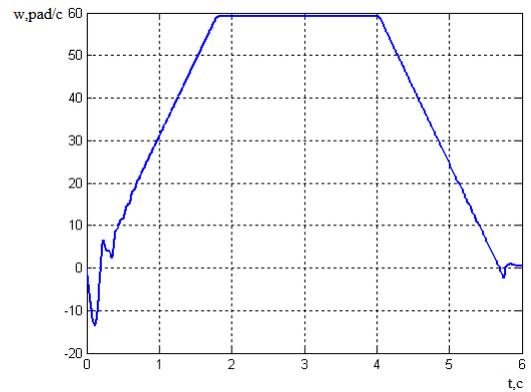
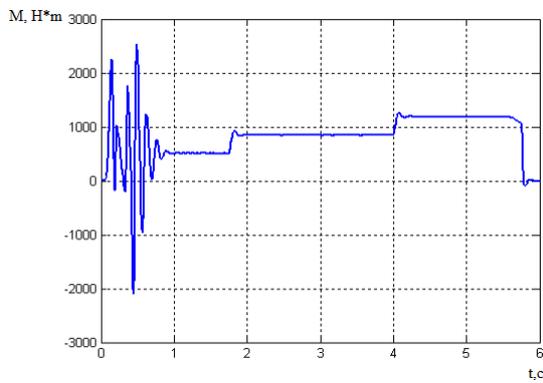


Рис.21 – Стадия опускания груза

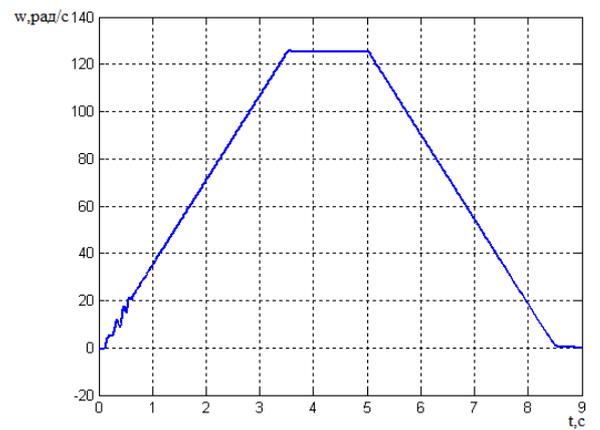
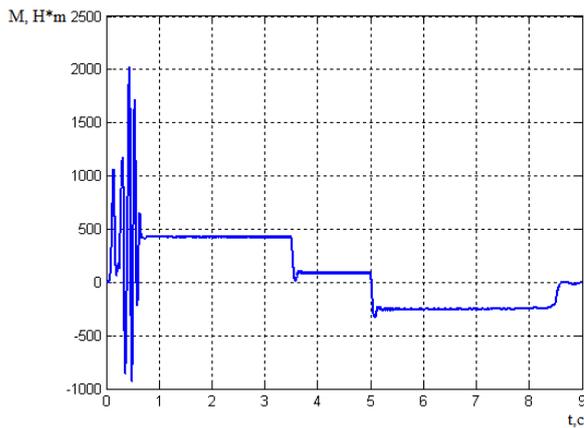


Рис.22 – Стадия подъема крюковой подвески

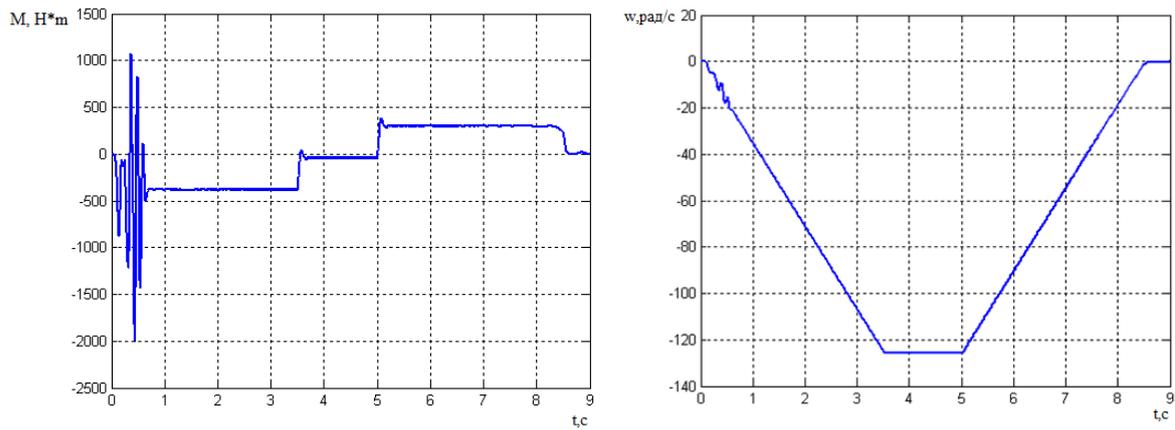


Рис. 23 – Стадии опускания крюковой подвески

Для построения естественной механической характеристики АД в 4-х квадрантах воспользуемся двумя формулами:

$$M = \frac{2M_k * (1 + a * S_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2 * a * S_k} \text{ - Формула Клосса,}$$

Данная формула целесообразна для области скольжения  $S < S_k$ .

$$M = \frac{M_k (2 + (S^2 - S_k^2) * K_s)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \text{ - Формула Чекунова}$$

Данная формула целесообразна для области скольжения  $1 \geq S > S_k$

где  $M_k = \lambda_m \cdot M_{ном} = 2 \cdot 880 = 1760 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;

$S_k = 0,095$

$a = R_1/R_2 = 0.069/0.067 = 1.03$ ;

$$K_s = \frac{\frac{\lambda_n}{\lambda_m} \left( \frac{1}{S_k} + S_k \right) - 2}{1 - S_k^2} = \frac{\frac{1}{0.1} + 0.1 - 2}{1 - 0.1^2} = 3.08$$

Рисунок 24 представляет статическую естественную характеристику.

Рис.24 – Естественная механическая характеристика

Используем эквивалентный момент с целью проверить электродвигатель окончательно по нагреву.

При  $w > w_{ном}$  асинхронный двигатель будет работать при  $f_1 = var$  и  $U_1 = const$ , значит электродвигатель работает с переменным магнитным потоком

и чтобы проверить двигатель по нагреву метод эквивалентного момента не годится. Можно воспользоваться или методом средних потерь или методом эквивалентного тока.

Работа привода происходит циклично- нагрузка переменная. Ниже представлен расчет по методу средних потерь:

$$U_1 = \text{const};$$

$$f_1 > f_{1\text{НОМ}}$$

$$1 \leq \alpha = \frac{f_1}{f_{1\text{НОМ}}} \leq \alpha_{\text{MAX}}$$

Принимаем  $R_1 = 0$

Механические характеристики:

$$s_{K.\text{НОМ}} = \frac{R_2'}{x_{K.\text{НОМ}}};$$

$$x_{K.\text{НОМ}} = x_{1.\text{НОМ}} + x_{2.\text{НОМ}}'$$

Линеаризованные механические характеристики асинхронного двигателя:

$$w = \alpha \cdot w_{0.\text{НОМ}} - \alpha^2 \cdot \frac{M}{\beta_e} \quad \text{где} \quad \beta_e = \frac{2 \cdot M_{K.\text{НОМ}}}{w_{0.\text{НОМ}} \cdot s_{K.\text{НОМ}}} \quad w_{0.\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1.\text{НОМ}}}{p_n}$$

с  $p_n$  - числом пар полюсов асинхронного двигателя

Механические переходные процессы – линеаризованные механические характеристики

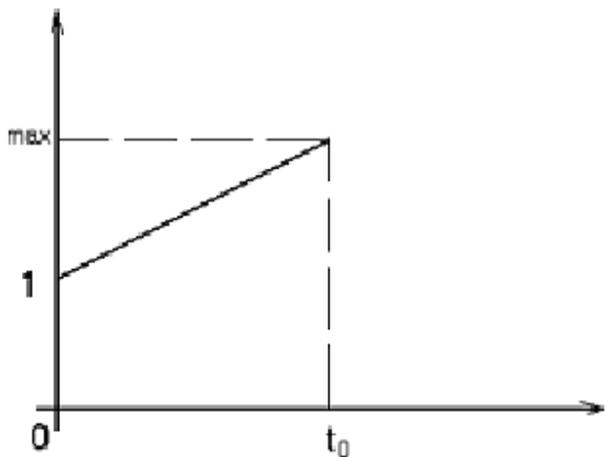


Рис.25 – Линеаризованная механическая характеристика

$$\varepsilon_0 = \frac{\alpha_{KOH} - 1}{t_0} \cdot \frac{1}{c}$$

Уравнение скорости:

$$w = w_{0.KOH} \cdot e^{-\frac{\tau_1 \cdot t}{1 + \varepsilon_0 \cdot t}} \cdot \left[ B_1 \cdot \ln(1 + \varepsilon_0 \cdot t) + \frac{B_2}{1 + \varepsilon_0 \cdot t} - \frac{B_3}{(1 + \varepsilon_0 \cdot t)^2} - B_4 \cdot t + B_5 \right],$$

$$c \quad \tau_1 = \frac{1}{T_{me}}, \quad T_{me} = \frac{J}{\beta_e}.$$

и с  $T_{me}$  - электромеханической постоянной времени привода на естественной механической характеристике.

$$B_1 = \frac{1}{2 \cdot \theta^3 \cdot (1 + \theta)} \cdot \left[ \frac{\theta^2 + (1 + \theta)^2}{1 + \theta} - 2 \cdot \Delta v_c \right]$$

$$\theta = \varepsilon_0 \cdot T_{me};$$

$$\Delta v_c = \frac{\Delta w_{ce}}{w_{0.HOM}}$$

с  $\Delta w_{ce}$  - статическим падением скорости на естественной характеристике

$$\Delta w_{ce} = \frac{M_c}{\beta_e}$$

$$B_3 = \frac{1}{4 \cdot \theta^3}$$

$$B_4 = \frac{\Delta v_c}{2 \cdot T_{me}} \cdot \frac{\theta^2 + (1 + \theta)^2}{\theta^2};$$

$$\Delta v_{HAЧ} = \frac{w_{HAЧ}}{w_{0.HOM}}$$

Уравняем электромагнитный момент:

Потери мощности в установившемся режиме при данных  $M_c$  и  $\alpha$ :

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР}$$

$$\Delta P_{ПОСТ} = \Delta P_{СТ.1.HOM} \cdot \alpha^{1.5} + \Delta P_{МХ.HOM} \cdot \alpha^2 + \frac{\Delta P_{\mu.HOM}}{\alpha^2}$$

$$\Delta P_{ПЕР} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \cdot \frac{M_c}{\beta_e} \cdot \alpha^2$$

Потери мощности в переходном процессе при линейном задании  $\alpha$  :

Средние потери мощности за время переходного процесса, где  $1 \leq \alpha \leq \alpha_{MAX}$  :

$$\Delta P_{MX.HOM} \approx 0.06 \cdot \Delta P_{HOM} = 0,06 \cdot 5,8 = 0,3кВт$$

$$\Delta P_{\mu.HOM} = 3 \cdot I_{\mu.HOM}^2 \cdot R_1 = 0,51кВт$$

$$I_{\mu.HOM}^2 \approx I_{1.HOM} \cdot \sqrt{1 - \cos \phi_{HOM}}$$

Потери мощности на интервале изменения частоты  $0 \leq \alpha \leq 1$  :

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР}$$

$$\Delta P_{ПОСТ} = \Delta P_{СТ} + \Delta P_{MX.} + \Delta P_{\mu.}$$

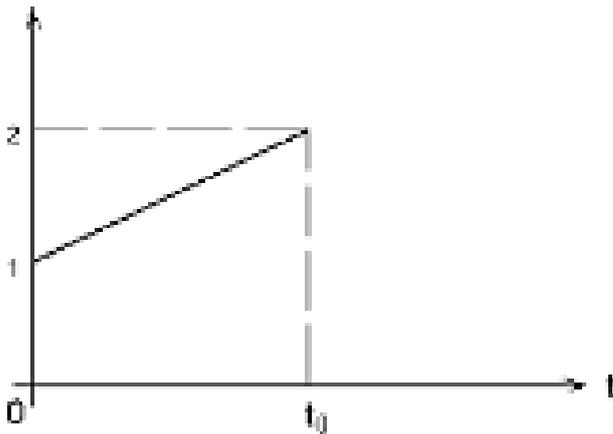


Рис.26 – Линеаризованная механическая характеристика на интервале изменения частоты  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

$$\text{где } \beta = \frac{2 \cdot M_K}{w_{0.HOM} \cdot s_{ка}} = \frac{1825 \cdot 2}{62,8 \cdot 0,12} = 484$$

Участок 1 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ):

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 0.48 + 0.1 + 0.51 + 13.47 = 14.56кВт$$

Участок 2 ( $\alpha = 1$ )

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 2 + 8,4 = 10,4кВт$$

$$\Delta P_{ПЕР} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \cdot \frac{M_c}{\beta_e} \cdot \alpha^2 = \left(1 + \frac{0,069}{0,067}\right) \frac{1415^2}{484} \cdot 1^2 = 8,4кВт$$

Участок 3 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$$\Delta P_{CT.CP} = \frac{\Delta P_{CT.HOM}}{t_0} \cdot \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \alpha^{1.5}(t) dt = 0.4 \cdot \Delta P_{CT.HOM} \cdot \frac{-\alpha_1^{\frac{5}{2}}}{-\alpha} = 0.48 \text{ кВт}$$

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 0.48 + 0.1 + 0.51 + 4.8 = 5.89 \text{ кВт}$$

Участок 4 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 0.48 + 0.1 + 0.51 + 1 = 2.09 \text{ кВт}$$

Участок 5 ( $\alpha = 1$ )

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 2 + 2.9 = 4.9 \text{ кВт}$$

Участок 6 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 0.48 + 0.1 + 0.51 + 4.8 = 6 \text{ кВт}$$

Участок 7 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 0.48 + 0.1 + 0.51 + 0.68 = 1.77 \text{ кВт}$$

Потери мощности в переходном процессе при линейном задании  $\alpha$  :

Участок 8 ( $\alpha = 2$ ). Потери мощности в установившемся режиме при данных  $M_c$  и  $\alpha$  :

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 4.7 + 0.56 = 5.26 \text{ кВт}$$

Участок 9 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 0.48 + 0.1 + 0.51 + 0.2 = 1.29 \text{ кВт}$$

При ( $1 \leq \alpha \leq 2$ ):

$$\Delta P_{CP.П.П} = \frac{1}{t_{П.П}} \cdot \left[ \int_0^{t_{П.П}} \Delta P_{ПОСТ}(t) dt + \int_0^{t_{П.П}} \Delta P_{ПЕР}(t) dt \right] = 3.7 \text{ кВт}$$

Участок 10 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 0.48 + 0.1 + 0.51 + 0.52 = 1.61 \text{ кВт}$$

при ( $1 \leq \alpha \leq 2$ )

$$\Delta P_{CP.П.П} = \frac{1}{t_{П.П}} \cdot \left[ \int_0^{t_{П.П}} \Delta P_{ПОСТ}(t) dt + \int_0^{t_{П.П}} \Delta P_{ПЕР}(t) dt \right] = 4.4 \text{ кВт}$$

Участок 11 ( $\alpha = 2$ )

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 4.7 + 0.04 = 4.74 \text{ кВт}$$

Участок 12 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$$\Delta P = \Delta P_{ПОСТ} + \Delta P_{ПЕР} = 0.48 + 0.1 + 0.51 + 0.32 = 1.41 \text{ кВт}$$

при ( $1 \leq \alpha \leq 2$ )

Воспользуемся методом средних потерь для проверки асинхронного двигателя по нагреву:

$c$ :  $\Delta P_{n,i}$  - средними суммарными потерями мощности на  $i$ -ого интервала разгона

$t_i$  - временем  $i$ -ого интервала, где  $\Delta P_{n,i} = const$

$\Delta P_{T,j}$  - средними суммарными потерями мощности на  $j$ -ого интервала торможения

$t_j$  - временем  $j$ -ого интервала, где  $\Delta P_{T,j} = const$

$\Delta P_k$  - потерями мощности в установившемся движении на  $k$ -ом интервале

$t_k$  - время  $k$ -ого интервала, где  $\Delta P_k = const$

$t_s$  - время паузы на  $s$ -ом интервале

$M$  - число пауз в цикле

Если двигатель защищен по IP44  $\beta_0 \approx 0.3$

Учитывая повторно-кратковременный режим эксплуатации электродвигателя приведем  $\Delta P_{НОМ}$  к  $PВ_{расч} = 100\%$ :

Итак, электродвигатель удовлетворяет условиям по нагреву, т.к.  
 $\Delta P_{CP} \leq \Delta P_{НОМ} (PВ = 100\%)$   $1,9 \leq 5,8$

## Заключение

В дипломной работе рассмотрена модернизация электропривода главного подъёма мостового крана грузоподъемностью 15 т.

Был выбран асинхронный двигатель и преобразователь частоты фирмы АВВ. Также, было выполнено исследование разомкнутой системы ПЧ-АД и переходных процессов скорости и момента для режима пуска электродвигателя.

Была рассмотрена безопасность и экологичность проекта, а также технико-экономическое обоснование проекта.

Электропривод крана и рабочее место проходят по всем нормам и отвечают требованиям безопасности.