

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 113 листов, 29 рисунка, 44 источника.

Ключевые слова: двухдвигательный, частотно-регулируемый, асинхронный электропривод, козловой кран, механизм передвижения, синхронное вращение.

Актуальность работы: разработка модели двухдвигательного электропривода механизма передвижения козлового крана, обеспечивающего синхронное вращение двух приводов при изменении нагрузки.

Объектом исследования является двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана

Цели и задачи работы заключаются в разработке и исследовании двухдвигательной системы управления с преобразователями частоты и с датчиками по обратной связи, обеспечивающей согласованное вращение, при котором будет осуществляться равномерное движение опор козлового крана.

Работа представлена введением, 6 разделами и заключением, приведен список использованных источников.

В процессе работы проводились исследования двухдвигательного частотно-регулируемого электропривода.

В результате исследования была доказана адекватность имитационных моделей, получены параметры настройки системы для обеспечения синхронизации скоростей вращения двух приводов при изменении нагрузки.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013. Были использованы: среда имитационного моделирования – Matlab R2012b, система компьютерной алгебры – MathCad 14.

## Введение

Подъемно-транспортные машины, представляют собой большой класс механизмов общепромышленного назначения, производящий всевозможные погрузочно-разгрузочные работы. Краны классифицируются на: мостовые, козловые, башенные, поворотные и т.д. Среди этих механизмов в наиболее тяжелых условиях и усиленных режимах работают козловые краны.

Козловые краны оснащены системами двухдвигательного электропривода. В их числе привода, обеспечивающие горизонтальное перемещение самого крана. Таковыми являются механизмы передвижения.

Привода устанавливаются у основания стоек, являющихся несущими элементами крана. Важным требованием к данному механизму является скоординированный ход стоек козлового крана при одинаковой скорости вращения электроприводов. В связи с этим условием требуется применение особой системы согласования приводов. Механизм горизонтального передвижения является единственным, где необходима система согласования или синхронизации. [1]

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Выбрать электродвигатель и преобразователь частоты, рассчитать параметры схемы замещения и получить механические и электромеханические характеристики электродвигателя.

2. Разработать модель в программной среде Simulink Matlab, позволяющую имитировать двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана, включая два преобразователя частоты, два двигателя, реактивную нагрузку, контура обратных связей.

3. Провести исследования имитационной модели двухдвигательного асинхронного частотно-регулируемого электропривода в различных режи-

мах работы: различной нагрузке и задании скорости. Подобрать коэффициенты для компенсаций момента и скольжения для выравнивания нагрузки для двигателей с различными параметрами.

4. Произвести расчет и анализ технико-экономических показателей, рассчитать годовой экономический эффект.

5. Определить и проанализировать опасные и вредные факторы сред. Рассмотреть негативные воздействия на окружающую среду, чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть при эксплуатации электропривода козлового крана.

## **1 Технологический процесс**

### **1.1 Назначение и технические характеристики козлового крана ЛТ-62**

В данное время, козловые краны представляют собой одно из важных методов механизации перегрузочных и складских работ в всевозможных отраслях народного хозяйства. Козловые краны приписывают к кранам мостового класса, входящих в группу подъемно-транспортных механизмов, отличающихся циклическими (кратковременным и повторно-кратковременным) режимами работы электроприводов.

Козловые краны по назначению подразделяют на: перегрузочные (общего назначения); строительно-монтажные; краны специального назначения (например, краны для гидротехнических сооружений).

Козловые краны используют для обслуживания открытых складов и погрузочных площадок, монтажа сборных строительных сооружений и оборудования, промышленных предприятия, обслуживания гидротехнических сооружений и выполнения погрузочно-разгрузочных работ на контейнерных площадках железнодорожных станций с температурой рабочей среды от -40 до + 40 градусов; грузоподъемность составляет 3...50 т.; пролеты кранов обычно 4...40 м; высота подъема груза в зависимости от условий загрузки-разгрузки 7..16 м. [1, 2, 3]

В семействе козловых подъемных устройств достойное место занимает уникальный по своему применению кран козловой ЛТ 62.

Козловой кран ЛТ-62 (рисунок 1) получил широкое применение на нижних лесных складах на разгрузке хлыстов с лесовозного транспорта и создании запасов. [2, 3]

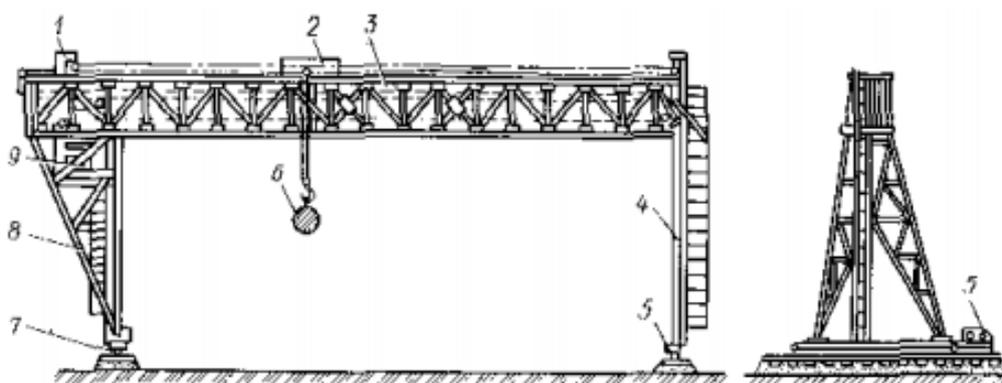


Рисунок 1 – Козловой кран ЛТ-62

Несущая ферма 3 козловых кранов расположена на высоких опорах – жесткой 8 и шарнирной 4, ноги которых опираются на ходовые тележки 5 и 7, передвигающиеся по крановым путям. Шарнирность присоединения верхнего конца опоры 4 к несущей ферме компенсирует забегание одной опоры по отношению к другой, а также некоторые неточности в прокладке пути. Грузовая тележка 2 при помощи лебедки 1 передвигается вдоль несущей фермы. У большинства подобных кранов для подъема и опускания груза служат две лебедки, расположенные по концам несущей фермы. Кабина крановщика 9 располагается в верхней части жесткой опоры.

Груз 6 можно перемещать по трем направлениям: по вертикали – при работе грузоподъемного механизма; в пределах пролета (расстояние между опорами) крана – при движении грузовой тележки и вдоль подкрановых путей – при передвижении крана. Штабеля размещают в пролете крана.

Вдоль несущей фермы прокладывают пути для перемещения грузовой тележки; пути располагают либо поверх несущей фермы, либо под ней. В первом случае путь является рельсовым, во втором путепроводом служит двутавровая балка, которая крепится к нижнему поясу фермы.

Механизм подъема и опускания груза у козловых кранов состоит из грузовой лебедки и канатоблочной системы, включающей полиспаст с крюковой обоймой. Грузовая лебедка размещается по двум вариантам: непо-

средственно на грузовой тележке или на несущей ферме. У некоторых моделей козловых кранов большой грузоподъемности устанавливаются две грузовые лебедки, располагаемые по концам несущей фермы.

Схема запасовки канатов грузоподъемного механизма, имеющего две грузовые лебедки, состоит из двух одинаковых канатоблочных систем с приводом от однобарабанных лебедок.

Грузовая тележка представляет собой раму, имеющую ходовые колеса. На тележке расположены неподвижные блоки полиспаста и у некоторых моделей кранов грузовая лебедка. В зависимости от расположения пути грузовой тележки (поверх несущей фермы или под ней) она или опирается на ходовые колеса, или подвешивается к ним. В первом случае тележка имеет два полиспаста, ветви которых свешиваются по обе стороны несущей фермы.

Для передвижения грузовой тележки служит однобарабанная реверсивная лебедка, устанавливаемая в конце несущей фермы, обычно над жесткой опорой. На барабане лебедки закреплены концы обеих ветвей тягового каната. Одна ветвь закреплена с одной стороны грузовой тележки, вторая – огибает направляющий блок и крепится к тележке, с другой стороны. Благодаря тому, что направление намотки на барабан ветвей тягового каната различно, одна из ветвей при включении барабана наматывается, а другая – разматывается, в результате чего грузовая тележка перемещается по несущей ферме. Изменить направление движения тележки можно путем реверсирования электродвигателя лебедки. Для точной остановки грузовой тележки тяговая лебедка оборудована электромагнитным тормозом. По концам пути тележки установлены тупиковые упоры. На грузовой тележке козловых кранов размещены механизмы подъема груза и передвижения тележки, имеющие индивидуальные приводы. Оба механизма снабжены ограничителями грузоподъемности и крайнего верхнего положения траверсы подъема груза.

Механизм передвижения служит для горизонтального перемещения моста или всего крана. Козловые краны передвигаются по двум рельсам, опираясь на них четырьмя ходовыми тележками. На каждом рельсе (под одной опорой) располагается по две тележки (ведущая и ведомая). Ведущая тележка состоит из рамы, на которой размещены привод, ходовые колеса и противоугонный захват. Привод тележки состоит из электродвигателя, редуктора и расположенного между ними электромагнитного тормоза. На одной из ведущих тележек имеется конечный выключатель, ограничивающий передвижение крана. Противоугонный захват клещевого типа связывает тележку с рельсом в тех случаях, когда возникает опасность самопередвижения крана под действием ветровой нагрузки. К опоре крепятся нога крана.

Управление механизмами крана сосредоточено в кабине крановщика. Ее расположение должно обеспечить благоприятные условия для наблюдения за процессом работы. У козловых и некоторых моделей консольно-козловых кранов кабина расположена в верхней части жесткой опоры. Консольно-козловые краны чаще оборудованы передвижной кабиной, которая связана тягой с грузовой тележкой и передвигается вместе с ней по ездовой балке.

Для предупреждения аварий в системе управления крана имеется ряд блокировок, автоматически ограничивающих высоту подъема грузовой траверсы, а также выход грузовой тележки и самого крана за пределы рабочих участков. Блокировка двери кабины крановщика не допускает включения механизмов крана, если дверь кабины открыта. Козловые краны оборудованы устройством, регистрирующим ветровую нагрузку на конструкцию крана.

При ветре, сила которого становится опасной, т.к. может вызвать самопередвижение крана, включаются световой и звуковой сигналы. При этом работа на кране должна быть прекращена и включены противоугонные захваты.

Подача электроэнергии к козловым кранам обычно осуществляется по гибкому четырехжильному кабелю. Многие модели кранов оборудуются кабельным барабаном, механизмирующим наматывание и разматывание электрического кабеля при передвижении крана.

Электродвигатели козловых кранов получают питание от троллейных проводов, проложенных вдоль эстакады. Электроэнергия, поступающая к двигателям грузовой тележки, снимается с троллейных проводов, протянутых вдоль моста.

Козловые краны, у которых концы несущей фермы выступают за опоры в виде консолей, называются консольно-козловыми. У таких кранов штабеля можно дополнительно размещать под консолями, что увеличивает площадь, занятую штабелями, и позволяет при той же протяженности крановых путей создавать большой запас лесоматериалов. [2, 3]

Основные параметры и характеристики приведены в таблице 1. [2, 3]

Таблица 1 - Основные параметры и характеристики крана ЛТ-62

Наименование показателей	Норма
Грузоподъёмность номинальная, т	32
Наибольшая высота подъёма груза, м	11,8
Скорость подъёма груза, м/мин	$13,4 \pm 1,0$
Скорость передвижения тележки, м/мин	$32,6 \pm 1,0$
Скорость плавной посадки груза, м/мин	$12,0 \pm 1,0$
Скорость передвижения перегрузчика, м/мин	$51,0 \pm 2,0$
Установленная мощность, кВт, не более	129
Режим работы двигателей, ПВ %	средний 25
Длина пролёта, м:	40 – 0,04
Масса конструктивная, т	95,6

Технические данные канатов, установленных на перегрузчике, приведены в таблицу 2. [2, 3]

Таблица 2 - Технические данные канатов, установленных на перегрузчике

Наименование	Диаметр, мм	Длина пролёта 40 м	Обозначение
Канат грузовой (2 конца)	21,5	203	21,5-Г-В-Н-180 ГОСТ 3079-69
Тяговой канат передвижения тележки	15,0	126	15-Г-1-Н-170 ГОСТ 3081-69

Технические данные лебёдки грузовой, приведены в таблице 3. [2, 3]

Таблица 3 - Технические данные лебёдки грузовой

Наименование показателей	Норма
Тяговое усилие номинальное	Н – 3899
Тяговое усилие максимальное	Н – 4506
Диаметр каната	мм – 21,5
Диаметр барабана	мм – 571,5
Передаточное число редуктора	У2У-400Н-25-22М – 25

Технические данные механизма передвижения перегрузчика, представлены в таблице 4. [2, 3]

Таблица 4 - Технические данные механизма передвижения

Наименование показателей	Норма
Передаточное число редуктора	У2У-200-12,5-22 – 12,5
Передаточное число открытой зубчатой зубной пары	2,82
Общее передаточное число	35,4
Диаметр ходового колеса	мм – 600

## 1.2 Кинематические особенности козловых кранов

В механизмах передвижения кранов наибольшее распространение получил многодвигательный привод, при котором каждая концевая балка моста приводится в движение своим самостоятельным приводом, причем между приводами, расположенными на различных концевых балках, существуют связь, осуществляемой с помощью внешней системы согласования, кроме самой металлоконструкции. В итоге обеспечивается одно назначение – горизонтальное перемещение крана по рельсам. [1, 4]

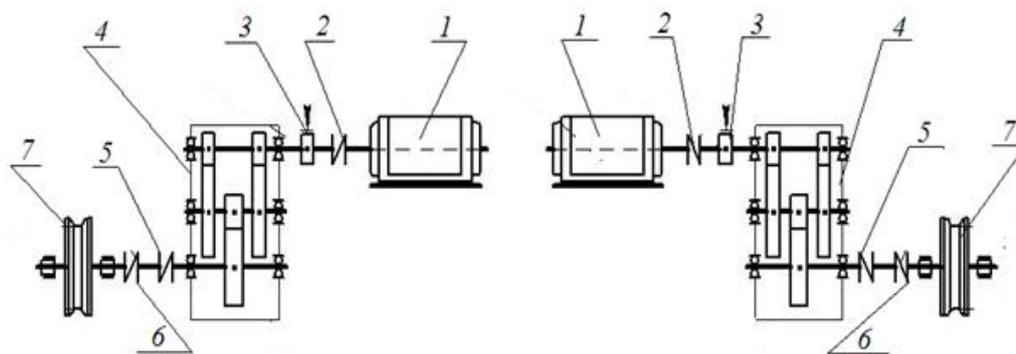


Рисунок 2 - Кинематическая схема механизма передвижения крана

Механизм передвижения выполняется в виде одноколёсных или балансирных тележек, соединяемых с основанием стоек опор или ходовых балок, на которые попарно опираются две стойки. На рисунке 2 имеются два когерентно работающих механизма передвижения козлового крана. Каждый из механизмов включает в себя электродвигатель 1, соединенного муфтой 2 с редуктором 4, передает движения на ведущие колеса 7. Вал приводного колеса соединен с тихоходным валом редуктора промежуточным валом 6 и зубчатыми муфтами 5. На полумуфте быстроходного вала редуктора установлен тормоз 3. [4]

Преимущества индивидуального привода заключаются в компактности всего механизма передвижения, меньших маховых моментах электродвигателей, в сокращении времени пуска.

Обычно для кранового электропривода используются двигатели переменного и постоянного тока специального назначения. Но с усовершенствованием электроприводов, применение двигателей на постоянном токе осталось позади. Сегодня массовое распространение получили асинхронные электродвигатели с фазным и короткозамкнутым роторами. [6, 7]

Крановые электродвигатели проектируют для эксплуатации в повторно-кратковременном режиме, который характеризуется продолжительностью включения 15, 25, 40 и 60% при продолжительности цикла не более 10 мин. Основным номинальным режимом крановых двигателей перемен-

ного тока является  $PВ=40\%$ . Следовательно, для выбора системы электроприводов стоит обращать внимание на группы классификации механизмов и параметрические требования тоннажности. [1, 7, 8]

### 1.3 Требования, предъявляемые к электроприводу механизма горизонтального передвижения

В козловых кранах механизмы передвижения устанавливают на мосту (для перемещения моста по ходовым путям) и на тележке (для перемещения тележки вдоль пролета крана). Механизмы передвижения имеют не зависящий от направления движения момент нагрузки, то есть реактивный момент нагрузки. [1, 4, 8]

Основным требованием к совершенному электроприводу механизма горизонтального перемещения является возможность обеспечения жестких механических характеристики (рисунок 3) в двигательном и тормозном режимах. В противоположность от механизма подъема режим торможения механизма горизонтального перемещения занимает короткий промежуток времени всего цикла и возникает, обычно, при переходе с высших скоростей на низшие. [1, 4, 8]

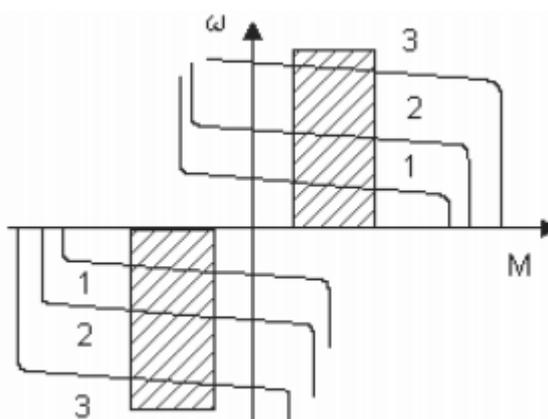


Рисунок 3 - Желаемые механические характеристики электропривода механизма горизонтального перемещения

В режиме торможения электропривод механизма горизонтального перемещения может работать при ходе под уклон (что бывает при дефекте рельс) или при ходе по ветру. [8]

Специфичность механизма передвижения заключается в большой механической инерции, действие которой будет больше тогда, когда движущаяся металлоконструкция будет тяжелее, и скорость движения выше, поэтому, для избежание повышенных динамических нагрузок на металлоконструкции и механизмы электропривод обязан ограничивать ускорения при пуске и торможении. Приведенный к валу двигателя момент инерции движущихся масс установки для механизмов передвижения кранов в 2 - 20 раз больше собственного момента инерции двигателя. [1, 8]

Масса перемещаемого груза, как правило, оказывает небольшое влияние на статический момент электропривода механизма передвижения, так как масса металлоконструкции крана чаще больше массы груза. [1, 4]

Алгоритм стопорения в электроприводах механизмов горизонтального перемещения проще, чем в электроприводах механизмов подъема. Из-за реактивного момента нагрузки убирание тормоза в основном можно выполнять, не дожидаясь, пока момент электродвигателя увеличится до значения статического момента. Главным условием является налегание тормоза при скорости, близкой к нулевой, для понижения динамических нагрузок и уменьшения истирания тормозных накладок. [1, 4]

Но использование козловых кранов под открытым небом, подвергается ветровой нагрузке, что в случае большой парусности может повлечь за собой существенное увеличение пределов изменения статического момента сопротивления, а также и изменение знака момента. Предел регулирования скорости механизма, при заданной номинальной, устанавливается требуемой пониженной скоростью. Наличие такой пониженной скорости, на которую переводится механизм перед остановкой, упрощает работу оператора, создает удобство контроля и повышает точность остановки. [1, 4]

## **1.4 Обзор существующих систем управления электроприводами механизмов передвижения козловых кранов**

В механизмах передвижения козловых кранов используются следующие способы управления: релейно-контакторные, дроссельные и частотно-регулируемые. [1, 4]

В настоящее время широко эксплуатируемым типом электропривода для козловых кранов оказывается электропривод на базе асинхронного двигателя с фазным ротором при реостатном управлении с помощью силовых кулачковых контроллеров, кнопочных постов, комплектных устройств. Это связано с тем, что сроки службы кранов составляют десятки лет, а большая часть кранов была выпущена в советское время. В данную систему также входит функция согласования механизмов передвижения. Использование релейно-контакторного способа управления, определено условиями работы козловых кранов: троллейная система питания, высокое содержание электропроводящей пыли, влажность, загазованность, высокая температура и ее резкие колебания по длине пролета, высокая интенсивность работы крана, характеризующаяся большой продолжительностью и частотой включений. Главным преимуществом таких электроприводов является несложность их эксплуатации, небольшая стоимость и ремонтпригодность. Однако, несмотря на ее широкое применение (за счет электрического согласования роторов), она является недействительной. [1]

Эти электроприводы имеют ряд существенных недостатков: большие потери энергии, обусловленные низким коэффициентом мощности и коэффициентом полезного действия; перекосы в роторный цепях, вызванные потерей контактов в цепях сопротивлений или контакторах ускорений, приводят к выходу из строя электродвигателей; ударное изменение момента двигателей и динамические перегрузки узлов крана, обусловленные ступенчатым выведением сопротивлений из цепи ротора; отсутствие электрического торможения в электроприводах механизмов передвижения; низкая износостойкость релейно-контакторной аппаратуры. [1, 7, 8]

Это может явиться причиной возникновения упругих механических колебаний и нарушить плавность протекания переходных процессов, вызывать прибавочные динамические нагрузки в механизмах и металлоконструкции крана, и, в итоге, к снижению производительности и досрочному выходу из строя составляющих крана. [1, 8]

Наряду с релейно-контакторной системой в крановых механизмах используется дроссельный способ управления. Основное применение дросселя находят в электроприводах крановых механизмов, как на передвижение мостов и тележек, так и на механизмах подъема. [1, 4]

При эксплуатации крановых пусковых дросселей схема управления статорной цепью электродвигателя остается неизменной, а в роторную цепь включается дроссель. При включении дросселя может гарантироваться значение пускового момента больше чем на естественной характеристике при существенном снижении пускового тока. [9]

Дроссели обеспечивают пуск и торможение электродвигателя плавно без ударов в механизме, с ограничением пусковых токов при отсутствии системы управления ротором двигателя, сохраняя примерное постоянство момента до скорости 0,5-0,6 от синхронной. [9]

При управлении механизмом электроприводов крана прямоточным контроллером допускается полный произвол машиниста крана. Применение дросселя лишает машиниста возможности работать на максимально-пределных контррежимах.

Применение пусковых дросселей в многодвигательных электроприводах способно решить главную задачу - синхронизировать скорости двигателей.

За счет обеспечения плавного разгона механизмов и особенно, плавного, но интенсивного торможения, резко увеличивается срок службы механических узлов (редукторов, муфт, валов, и т.д.). [10]

Но все же применение асинхронного двигателя с фазным ротором в настоящее время является неактуальным, что связано с дороговизной. [1]

В следствие этого для снижения динамических нагрузок и надежности, стабильности работы механизма требуется оптимальная система регулирования электроприводами механизмов передвижения козлового крана либо за счет усовершенствования существующих систем управления, либо за счет создания новых. В следствие должна повыситься надежность, долговечность и точность работы механизмов козлового крана с учетом всех предъявляемых к нему требований.

В нынешнее время существует устойчивая направленность перехода от нерегулируемых электроприводов козловых кранов, с релейно-контакторными, на регулируемые и эффективные по надежности электропривода. Это связано с действующим применением в крановых механизмах асинхронных короткозамкнутых электродвигателей с преобразователями частоты. [1, 8]

Частотное управление является наиболее действенным способом регулирования скорости двигателя на переменном токе, которое позволяет снять качественные механические характеристики асинхронных двигателей.

Использование частотно-регулируемых электроприводов обеспечивает следующие преимущества:

- абсолютный контроль и безударное регулирование скорости, ускорения и момента при любой массе груза (в пределах допускаемой);
- плавный разгон и торможение всех механизмов крана с заданным ускорением, что обеспечивает плавное нарастание моментов и усилий во всех узлах и механизмах крана;
- использование асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, более надежных, и требующих меньших эксплуатационных затрат;
- регулирование скорости асинхронного двигателя с помощью преобразователей частоты дает экономию электроэнергии до 20%;

- программируемый контроллер, имеющий связь по сети с преобразователем, позволяет решить задачи диагностики, статистического сбора и обработки всех сигналов и нагрузок;

- тормозные колодки не требуют частой замены, а тормоза - постоянной регулировки, поскольку управляемое торможение осуществляют преобразователи частоты, а тормоза служат лишь для удержания после полной остановки механизма;

- ограничение моментов как статических, так и динамических;

- устранение перекосов и раскачивания грузов;

- защита электродвигателей (максимально-токовая, время-токовая, тепловая и др.);

- улучшение условий работы оператора крана за счет применения современной аппаратуры управления;

- сокращение количества релейно-контакторной аппаратуры позволяет повысить надежность работы электрооборудования и уменьшить трудозатраты на профилактическое обслуживание;

- уменьшение динамических нагрузок на механизмы крана и увеличение сроков службы оборудования. [4, 10]

С использованием частотно-регулируемых электроприводов в козловых кранах не созданы математические модели двухдвигательного электропривода применительно к автоматизированному электроприводу механизма передвижения козлового крана при регулировании и синхронизации скоростей вращения двигателей с помощью полупроводниковых преобразователей по системе «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором», не произведен анализ и выбор оптимального способа управления механизмом передвижения крана с помощью частотного регулирования. [1, 2]

Особенностью электроприводов горизонтального перемещения является то, что большинство из них реализуются как многодвигательные при-

воды. В этом случае электродвигатели могут питаться как от одного преобразователя частоты, что является наиболее экономичным вариантом, так и от индивидуальных преобразователей, обеспечивающих более гибкое управление крановыми механизмами. [2]

Питание двигателей от индивидуальных преобразователей представляется целесообразным для приводов механизмов передвижения козловых кранов с большими пролетами. В этом случае благодаря большей гибкости управления возможно обеспечение выравнивания нагрузки между двигателями по схеме «ведущий-ведомый» (рисунок 4), синхронизации движения приводов с целью устранения перекоса моста крана и т.д.

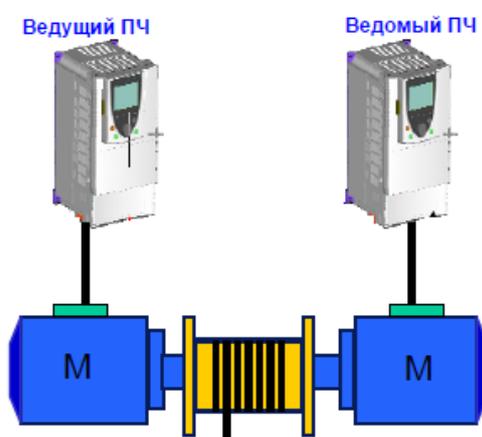


Рисунок 4 - Конфигурация «ведущий-ведомый»

### 1.5 Особенности двухдвигательного электропривода

Основное отличие многодвигательного электропривода от однодвигательного заключается в том, что силовой поток к ведомому звену передается не от одного, а от нескольких источников энергии (двигателей). Известно, что многодвигательный привод имеет ряд преимуществ перед однодвигательным, особенно в тяжелых технологических агрегатах. В теории электропривода отмечается, что многодвигательные электроприводы характеризуются большими возможностями в отношении регулирования скорости и момента, взаимным резервированием мощности, снижением суммарного момента инерции системы по сравнению с системой однодвигатель-

ного электропривода, возможностью создания мощных установок при использовании серийных электрических машин относительно небольшой мощности, упрощением механического оборудования, лучшим конструктивным размещением электродвигателей.

Между тем практика эксплуатации многодвигательных электроприводов свидетельствует о том, что в некоторых механизмах возбуждаются интенсивные колебательные процессы в трансмиссиях, что в значительной степени перегружает, а в ряде случаев вызывает разрушение деталей привода.

Известно, что даже в однотипных двигателях их механические характеристики могут отличаться друг от друга вследствие различия сопротивления обмоток, магнитных потоков и др. Все это в значительной степени обуславливает возбуждение сложных колебательных процессов, которые являются причиной неравномерности угловых скоростей двигателей и неизбежного перераспределения нагрузок на каждый двигатель. Неравномерное распределение моментов между электродвигателями, приводит к перегрузке одного из них, а также к неравномерному износу элементов кинематической передачи – шестерен редукторов, шпинделей и пр. Таким образом одной из важных проблем двухдвигательных систем машинных агрегатов является обеспечение равномерного распределения нагрузок между двигателями как в статических, так и в динамических режимах.

В этой связи изучим вопрос о распределении нагрузок в статике, рассмотрев простейшую модель двухдвигательного электропривода. На рисунке 5 показано распределение нагрузок между двумя асинхронными электродвигателями, механические характеристики которых различаются по жесткости. Двигатель Д2 с более мягкой характеристикой оказывается менее загруженным. Если двигатели имеют одинаковый номинальный момент, равный половине момента сопротивления, то один двигатель окажется

недогруженным (Д2), а другой (Д1) перегруженным, что приведет при продолжительной работе к перегреву двигателя (Д1), вследствие чего он может выйти из строя. [11]

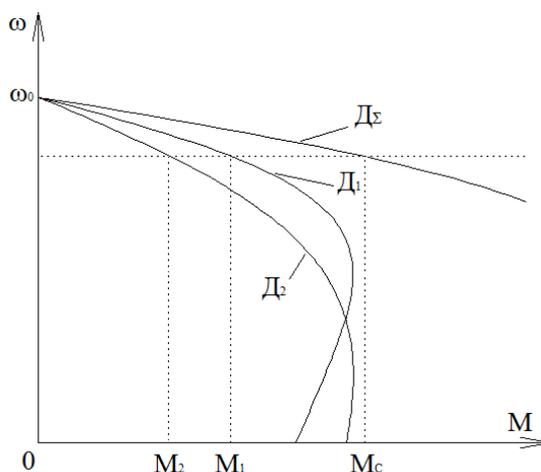


Рисунок 5 – Распределение нагрузок в приводе с двумя асинхронными электродвигателями.

Выводы по разделу:

На основании выше изложенного, в работе будет рассмотрен двухдвигательный частотно-регулируемый асинхронный электропривод согласованного вращения механизмов передвижения козлового крана. Управление данными многодвигательными электроприводами будет осуществляться от индивидуальных преобразователей частоты.

Принимая в расчет, требования и особенности, предъявляемых к механизмам передвижения козловых кранов, следует добиться полной синхронизации скоростей электроприводов и обеспечить оптимальные критерии разгона, торможения, связанных с неравномерностью распределения нагрузок.

## 4 Разработка имитационной модели электропривода

### 4.1 Математическая модель асинхронного двигателя

Для исследования в среде Matlab воспользуемся двухфазной моделью реальной трёхфазной машины в системе координат d, q. [15]

Если во вращающейся синхронно с полем статора ( $\omega_{\text{кв}} = \omega_{\text{эл1}}$ ) системе координат x, y ось x совместить с вектором потокосцепления ротора  $\Psi_2$ , то с учетом соотношения, характерных для СК d, q,

$$\begin{aligned}\Psi_{2d} &= |\vec{\Psi}_2|, \\ \Psi_{2q} &= 0,\end{aligned}\tag{79}$$

получим

$$\begin{aligned}|\vec{\Psi}_2| - \vec{\Psi}_{2x} &= \Psi_{2d}, \\ \Psi_{2y} = \Psi_{2q} &= 0\end{aligned}\tag{80}$$

и тогда система уравнений будет иметь вид

$$\left\{\begin{aligned}\frac{dI_{1d}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1d} - \frac{R_2}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1d} + \frac{R_2' \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2d} + \omega_{\text{кв}} \cdot I_{1q}; \\ \frac{dI_{1q}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1q} - \frac{R_2}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1q} - \omega_{\text{кв}} \cdot I_{1d} - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}; \\ \frac{d\Psi_{2d}}{dt} &= -\frac{R_2'}{L_2} \cdot \Psi_{2d} + \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1d}; \\ 0 &= \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1q} - (\omega_{\text{кв}} - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2d}; \\ M_{\text{эм}} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M_{\text{эм}} - M_c),\end{aligned}\right.\tag{81}$$

где  $U_{1d} = U_{1q} = U_1$  – постоянные по форме составляющие напряжения статора в ориентированной по вектору потокосцепления ротора  $\vec{\Psi}_2$ , вращающейся синхронно с полем статора системе координат d, q;

$I_{1d}, I_{1q}$  – составляющие тока статора в системе координат d, q, А;

$\Psi_{2d} = |\vec{\Psi}_2|$  – потокосцепление ротора в системе координат d, q, Вб.



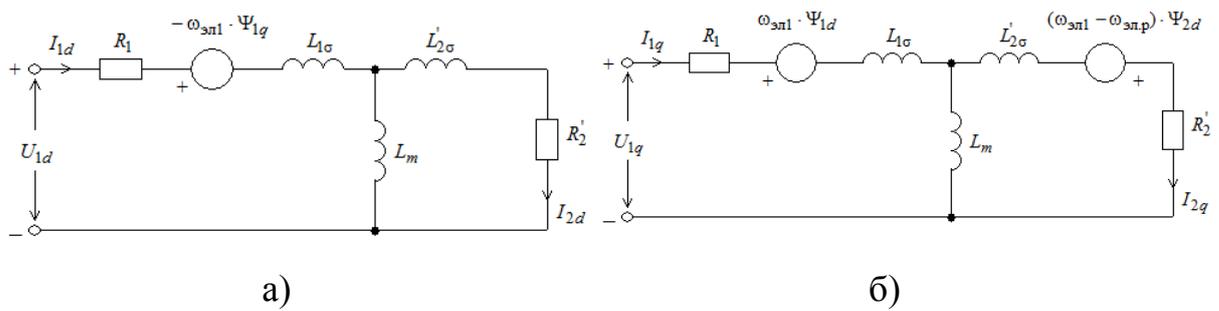


Рисунок 17 - Схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся со скоростью  $\omega_{эл1}$  ориентированной по вектору потокосцепления ротора  $\vec{x}_2$  роторной системе координат d, q:

а – по оси d;

б – по оси q

$$U_{1d} = R_s \cdot (T_s \cdot p + 1) \cdot I_{1d} - e_d; U_{1q} = R_s \cdot (T_s \cdot p + 1) \cdot I_{1q} + e_q, \quad (83)$$

где  $e_d, e_q$  - составляющие внутренней ЭДС двигателя, наводимые в статоре;

$$\begin{aligned} e_d &= \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2d} + \omega_{кc} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}, \\ e_q &= \omega_{кc} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}. \end{aligned} \quad (84)$$

$\frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2d}$  - падение напряжения в роторной цепи;

$$\frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2d} = \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot (L_2 \cdot I_{2d} + L_m \cdot I_{1d}) = R_2' \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{2d} + \frac{L_m^2}{L_2^2} \cdot I_{1d} \right). \quad (85)$$

$\omega_{кc} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}, \omega_{кc} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d}$  - составляющие ЭДС самоиндукции (падения напряжения на индуктивном сопротивлении статора);

$\frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}$  - ЭДС вращения, наводимая в статоре потокосцеплением ротора.

Данной системе уравнений соответствует модель в Matlab Simulink, представленная на рисунке 18.

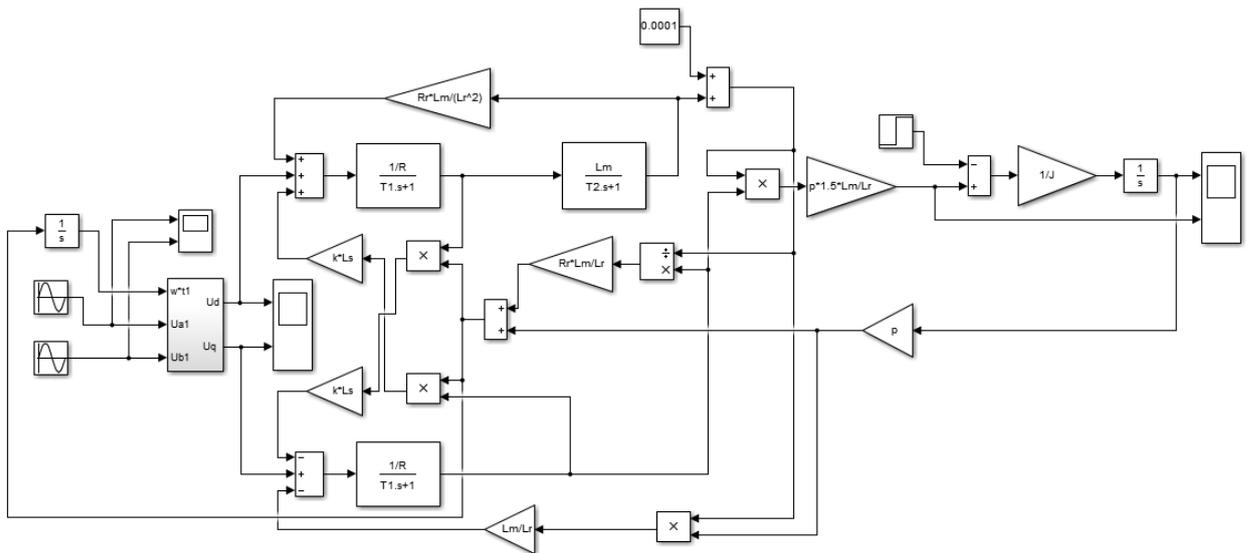


Рисунок 18 - Имитационная модель асинхронного двигателя с активной нагрузкой в Matlab Simulink

## 4.2 Механическая часть электропривода механизма передвижения козлового крана

Модель на рисунке 18 имеет активную нагрузку, так как в реальности нагрузка имеет реактивный характер, в модель необходимо дополнительно включить систему блоков имитирующую реактивную нагрузку. Для это используем блок S-Function Bilder.

Компонент, реализующий реактивный момент сопротивления:

if (w[0]>0) M[0]=Minput[0];

if (w[0]<0) M[0]= - Minput [0];

if (w[0]==0) Mc[0]=0;

Алгоритм функционирования будет следующий:

1. Если скорость положительная, то момент сопротивления равен заданному.
2. Если скорость отрицательная, то момент сопротивления равен заданному с обратным знаком.
3. Если скорость равна «0», то момент сопротивления равен 0.

Отключение двигателя от сети достигается за счет срабатывания блока «Switch» в 0,5 с.

Для удобства электромеханический преобразователь и механическую часть объединим в отдельные системы, результат представлен на рисунке 19.

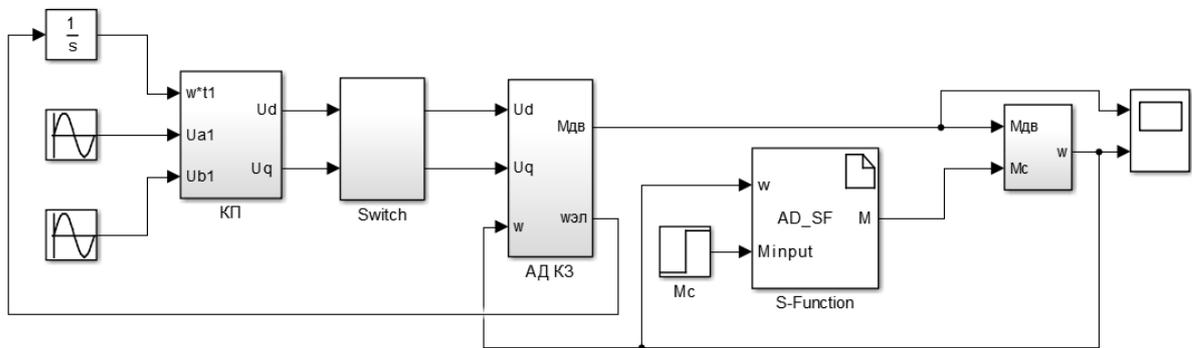


Рисунок 19 – Имитационная модель асинхронного двигателя с реактивной нагрузкой

Для проверки работоспособности имитационной модели реактивной нагрузки, произведем пуск двигателя на малой нагрузке  $10\% \cdot M_n$  Н·м, увеличим нагрузку до номинальной 82,502 Н·м в момент времени 0,25 с. и отключим двигатель от сети в момент времени 0,5 с. Так как нагрузка реактивная двигатель должен затормозить выбегом. На рисунке 20 показаны полученные графики. Полученные графики соответствуют ожиданиям, следовательно, модель реактивной нагрузки работает правильно.

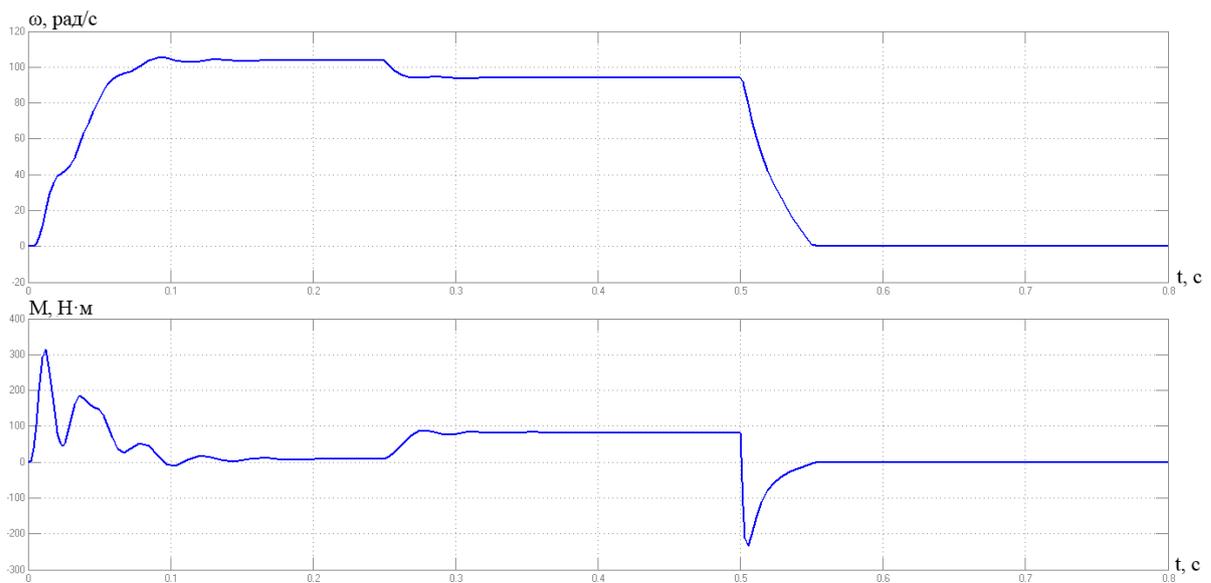


Рисунок 20 - Графики зависимостей  $\omega = f(t)$  и  $M = f(t)$

### 4.3 Проверка адекватности разработанной модели

#### асинхронного двигателя

Для проверки адекватности разработанной математической модели на основе модулей библиотеки SimPowerSystem Simulink Matlab соберем имитационную модель асинхронного двигателя изображенную на рисунке 21.

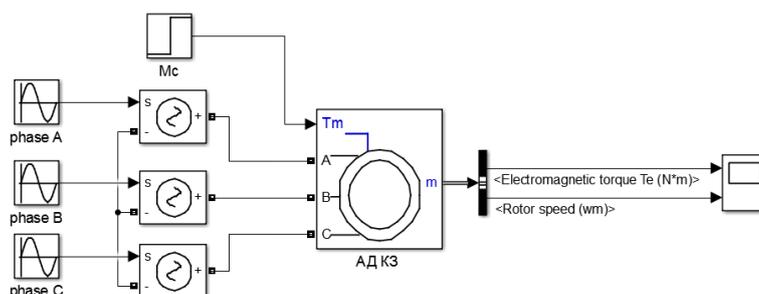


Рисунок 21 – Имитационная модель асинхронного двигателя на основе модулей библиотеки SimPowerSystem.

Динамические характеристики полученные с помощью этой модели представлены на рисунке 22. Характеристики полученные с помощью математической модели представлены на рисунке 23. Двигатель разгоняется без нагрузки, в момент времени 0,25 с. происходит подключение номинальной нагрузки  $M_H=82,502$  Нм.

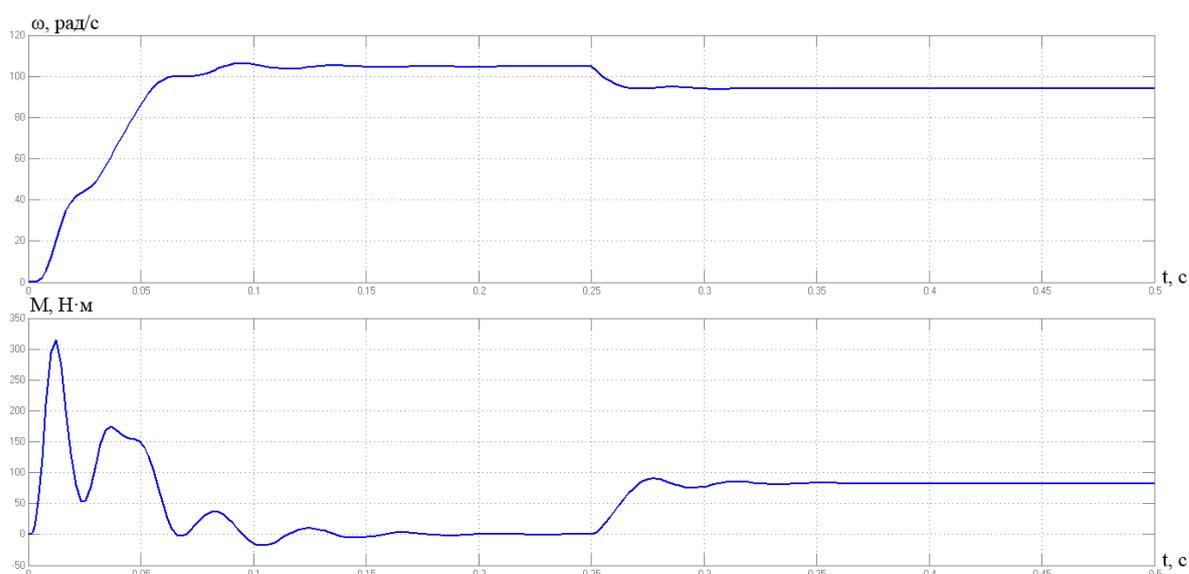


Рисунок 22 – Графики зависимостей  $\omega = f(t)$  и  $M = f(t)$  полученные с помощью библиотечной модели двигателя.

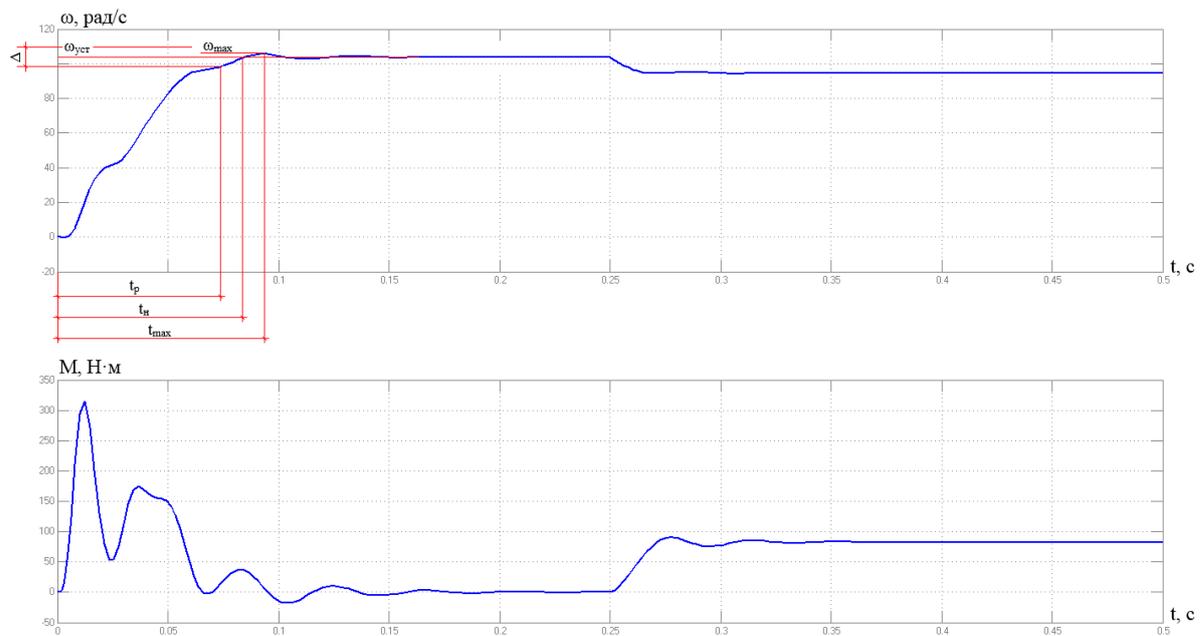


Рисунок 23 – Графики зависимостей  $\omega = f(t)$  и  $M = f(t)$ , полученные с помощью математической модели двигателя в системе координат  $d, q$

Прямые показатели качества переходного процесса:

- $t_p$  – минимальное время, по истечении которого регулируемая величина будет оставаться близкой к установившемуся значению с заданной точностью,  $t_p=0,075$  с;
- $\omega_{уст}$  – установившееся значение скорости,  $\omega_{уст}=104,72$  рад/с;
- $\Delta$  – предварительно задается в процентах от установившегося значения  $\omega_{уст}$ ,  $\Delta=\pm 5\%$ ;
- $t_{max}$  – время достижения первого максимума,  $t_{max}=0,098$  с;
- $\omega_{max}$  – первый максимум скорости,  $\omega_{max}=106,83$  рад/с;
- $t_n$  – время нарастания переходного процесса, время от начала переходного процесса до момента первого пересечения графиком линии установившегося значения,  $t_n=0,084$  с;
- $\sigma$  – перерегулирование – максимальное отклонение от установившегося значение, выраженное в процентах,

$$\sigma = \frac{\omega_{max} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\% = \frac{106,83 - 104,72}{104,72} \cdot 100\% = 2,02\%. \quad (86)$$

Анализ двух расчётов – с моделью SimPowerSystems и с разработанной по математическому описанию – показывает их полное схождение, что позволяет утверждать о возможности использования разработанной модели в исследованиях электропривода переменного тока.

#### **4.4 Исследование способов управления для электропривода системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»**

На основании режимов работы и выбора частотного управления асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями механизмов передвижения, рассматривается выборка оптимальных способов их управления.

В частотно-регулируемом электроприводе существуют несколько общеизвестных способов управления: скалярный ( $U/f$  регулирование), векторный с обратной связью по скорости одного двигателя и с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя.

При изготовлении двигателей неизбежны отклонения параметров обмоток, а при эксплуатации механизма передвижения один двигатель может быть нагружен больше чем другой, что приводит к различию жесткости механических характеристик двигателей. Для имитации такого случая принудительно нагрузим дополнительно один из асинхронных двигателей (АД КЗ 2).

##### **4.4.1 Скалярное управление**

Модель двухдвигательного электропривода при скалярном управлении, состоящая из формирователя напряжения ( $U/f$  control), электромеханических преобразователей (АД КЗ 1 и АД КЗ 2) и механической части представлена на рисунке 24.

Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при скалярном управлении приведены на рисунке 25.

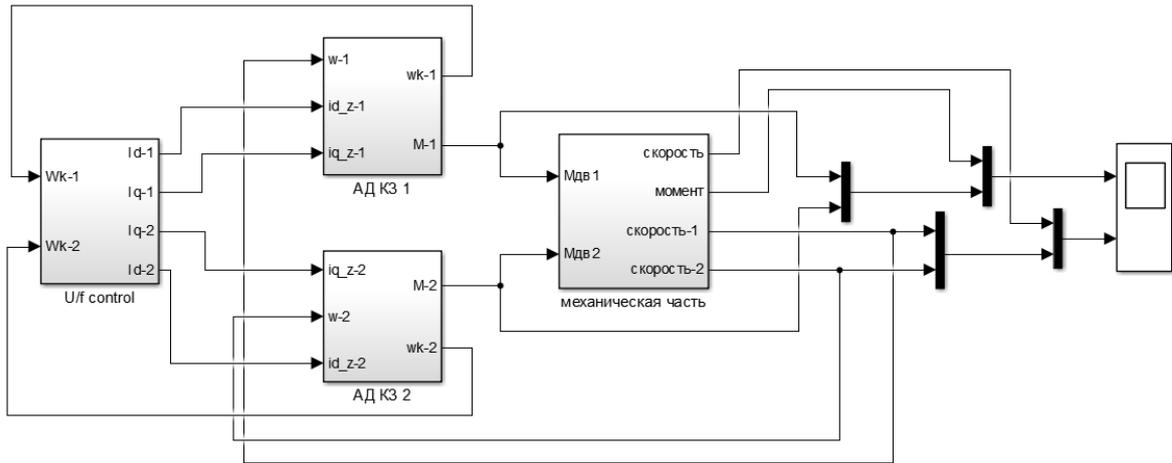


Рисунок 24 – Имитационная модель двухдвигательного электропривода при скалярном управлении

Определим относительную величину неравномерности синхронизации скоростей двигателей:

$$\Delta_{c_{cy}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{cy}} \cdot 100\% = \frac{0,75}{25} \cdot 100\% = 3\%. \quad (87)$$

По полученному переходному процессу определим расстояния на которое одна опора опережает другую за 1 секунду.

Для этого найдем расстояние, которое проходит каждая опора за 1 секунду по формуле

$$S_i = \frac{v_i \cdot 1}{60}. \quad (88)$$

Поставляя численные значения в формулу (87) получим

$$S_1 = \frac{v_{\partial\theta 1} \cdot 1}{60} = \frac{25,5 \cdot 0,3 \cdot 1}{60} = 0,1275 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\partial\theta 2} \cdot 1}{60} = \frac{26,25 \cdot 0,3 \cdot 1}{60} = 0,1313 \text{ м};$$

Найдем разницу расстояния между опорами

$$S = S_1 - S_2 \quad (89)$$

$$S = 0,1275 - 0,1313 = 0,00375 \text{ м}.$$

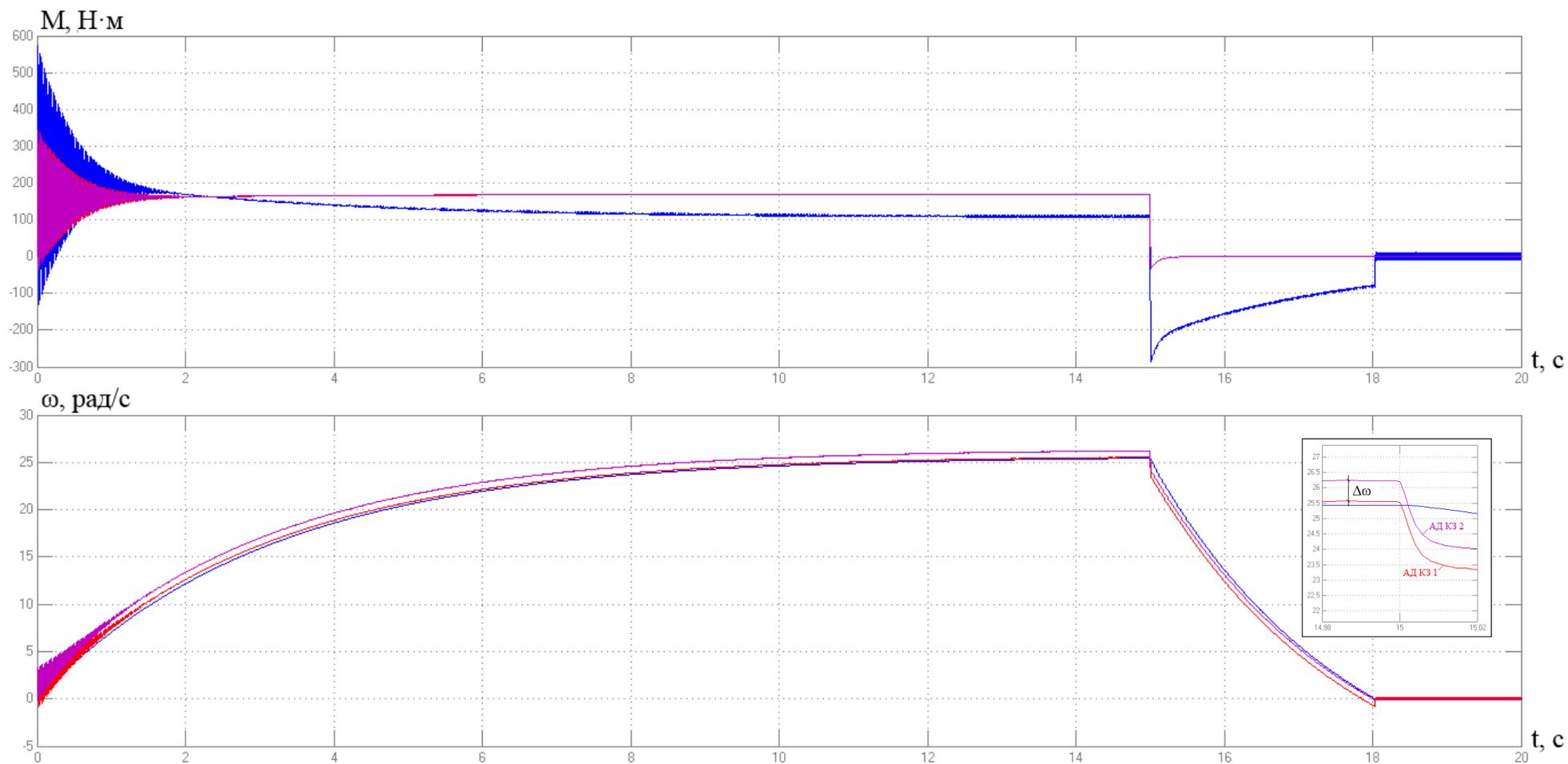


Рисунок 25 - Динамические характеристики  $M = f(t)$  и  $\omega = f(t)$  двухдвигательного электропривода при скалярном управлении

При данном способе управления наблюдается постоянное рассогласование скоростей на всем участке работы, а также не соответствие требования к режиму работы (рисунок 6).

#### 4.4.2 Векторное управление с обратной связью по скорости одного двигателя

Модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя, состоящая из S-задатчика скорости, общего контура скорости, контуров тока и потокосцепления (для каждого двигателя), электромеханических преобразователей (АД КЗ 1 и АД КЗ 2) и механической части представлена на рисунке 26.

Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя приведены на рисунке 27.

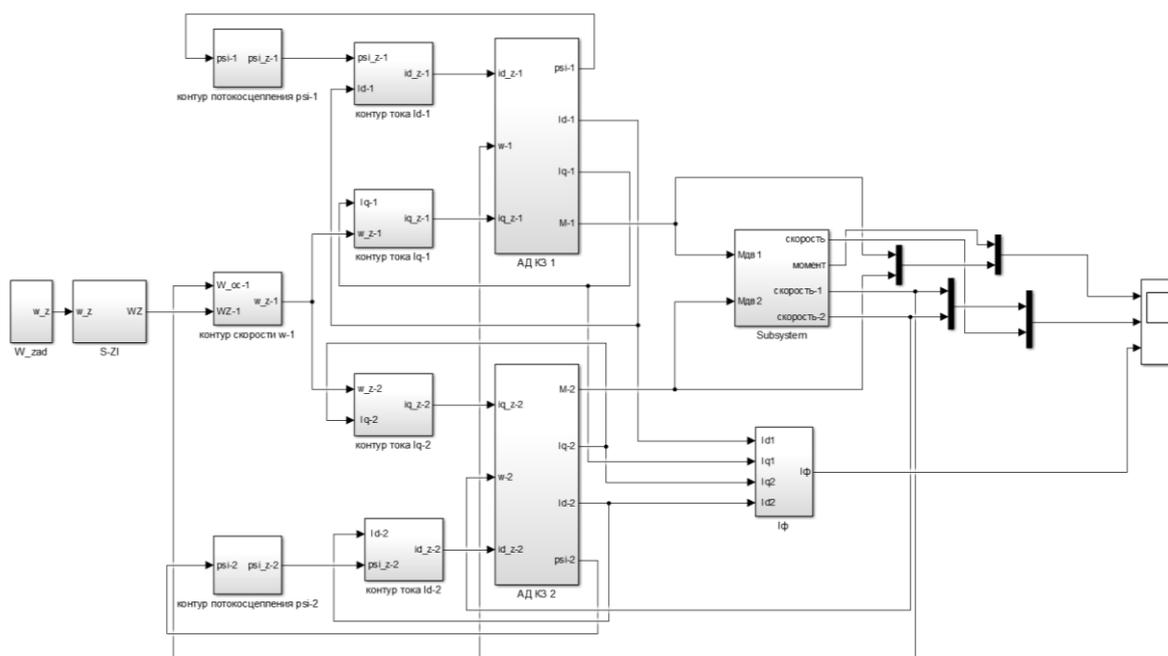


Рисунок 26 – Имитационная модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя

Определим относительную величину неравномерности синхронизации скоростей двигателей:

При разгоне

$$\Delta_{c_{\text{ев}}} = \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{\text{ев}}} \cdot 100\% = \frac{13,3}{61,0} \cdot 100\% = 21,80\%. \quad (90)$$

При равномерном движении

$$\Delta_{c_{\text{ев}}} = \frac{\Delta\omega_2}{\omega_{\text{ев}}} \cdot 100\% = \frac{0,95}{94,5} \cdot 100\% = 1,00\%. \quad (91)$$

При торможении

$$\Delta_{c_{\text{ев}}} = \frac{\Delta\omega_3}{\omega_{\text{ев}}} \cdot 100\% = \frac{13,3}{56,2} \cdot 100\% = 23,67\%. \quad (92)$$

По полученному переходному процессу определим расстояния на которое одна опора опережает другую за 1 секунду.

Для этого найдем расстояние, которое проходит каждая опора за 1 секунду по формуле (87), и расстояние между опорами по выражению (88)

При разгоне

$$S_1 = \frac{v_{\text{ов1}} \cdot 1}{60} = \frac{46,9 \cdot 0,3 \cdot 1}{60} = 0,2345 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\text{ов2}} \cdot 1}{60} = \frac{60,2 \cdot 0,3 \cdot 1}{60} = 0,301 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 0,2345 - 0,301 = 0,0665 \text{ м}.$$

При равномерном движении

$$S_1 = \frac{v_{\text{ов1}} \cdot 1}{60} = \frac{91,05 \cdot 0,3 \cdot 1}{60} = 0,4575 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\text{ов2}} \cdot 1}{60} = \frac{92 \cdot 0,3 \cdot 1}{60} = 0,46 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 0,4575 - 0,46 = 0,0025 \text{ м}.$$

При торможении

$$S_1 = \frac{v_{\text{ов1}} \cdot 1}{60} = \frac{55,5 \cdot 0,3 \cdot 1}{60} = 0,2775 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\text{ов2}} \cdot 1}{60} = \frac{68,5 \cdot 0,3 \cdot 1}{60} = 0,3425 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 0,2775 - 0,3425 = 0,065 \text{ м}.$$

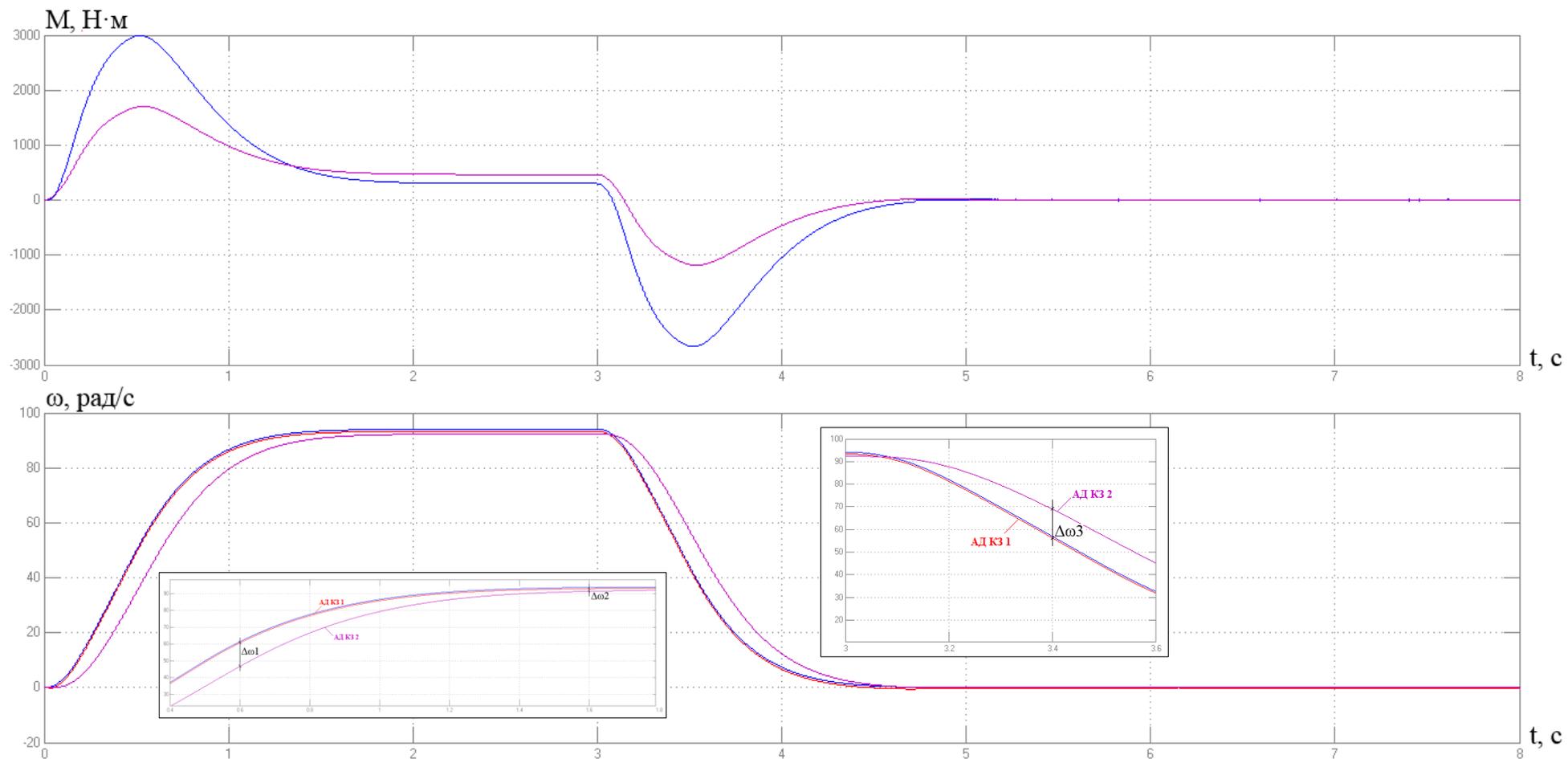


Рисунок 27 - Динамические характеристики  $M = f(t)$  и  $\omega = f(t)$  двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя

Для данного способа управления характерно существенное рассогласование скоростей вращения двигателей, а значит, движение опор, при разгоне и торможении. Режим работы при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя соответствует нагрузочной диаграмме (рисунок 6).

#### 4.4.3 Векторное управление с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя

Модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя, состоящая из S-здатчика скорости, контуров скорости, тока и потокосцепления ( для каждого двигателя), электромеханических преобразователей (АД КЗ 1 и АД КЗ 2) и механической части представлена на рисунке 28.

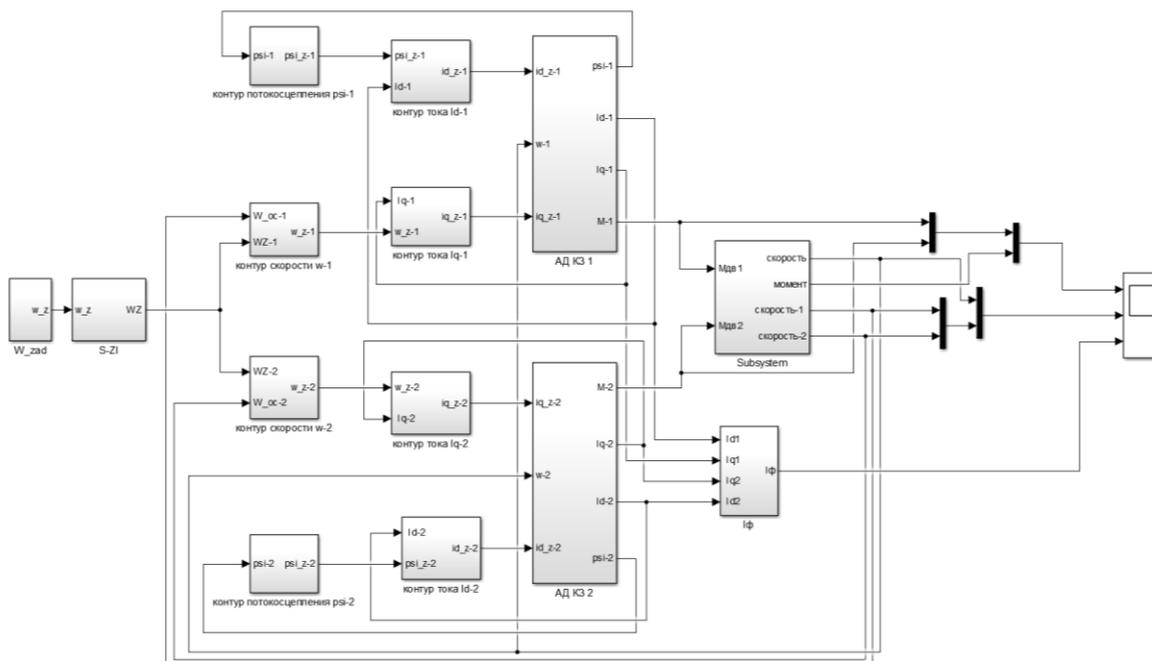


Рисунок 28 - Модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя

Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости для каждого двигателя приведены на рисунке 28.

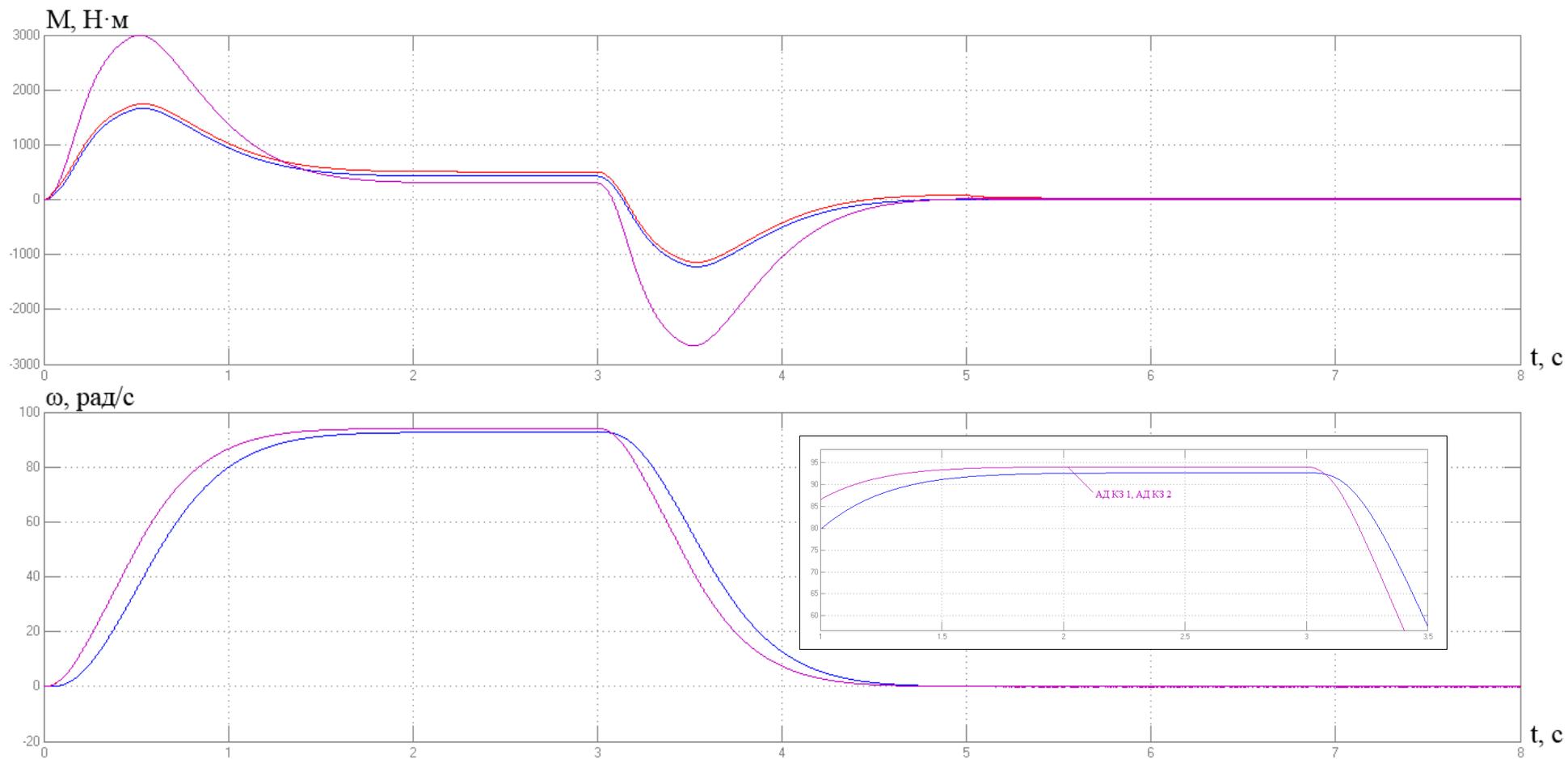


Рисунок 29 - Динамические характеристики  $M = f(t)$  и  $\omega = f(t)$  двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя

Из рисунка 29 видно, что при загрузке одного двигателя больше чем другого, скорость вращения электроприводов остается одинаковой, а значит исключается возможность повреждения конструкции крана.

Выводы по разделу:

1. Разработана на основе системы математических уравнений структурная модель асинхронного двигателя во вращающейся системе координат  $d,q$ .

2. Произведено исследование полученных в программе MATLAB переходных процессов момента и скорости асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт, согласно структурной библиотечной модели. В результате наблюдается устойчивость в режиме пуска и наброса нагрузки через 0,25 секунд до номинальной скорости.

3. Произведено исследование полученных в программе MATLAB переходных процессов момента и скорости асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт, согласно структурной модели во вращающейся системе координат  $d,q$ . В результате наблюдается устойчивость в режиме пуска и наброса нагрузки через 0,25 секунд до номинальной скорости.

4. Произведен сравнительный анализ трех систем управления двухдвигательным электроприводом: скалярное ( $U/f$  регулирование), векторное с обратной связью по скорости одного двигателя и с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя. Следует отметить, что при векторном управлении режим работы двухдвигательного электропривода механизма перемещения козлового крана будет соответствовать рисунку 6, а при скалярном управлении – нет.

5. Заданным требованиям – синхронизация скорости вращения двигателей с целью исключения повреждений конструкции крана – отвечает модель привода векторного управления с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Работа посвящена изучению «Двухдвигательного частотно-регулируемого электропривода механизма козлового крана». Данный проект подходит для козловых кранов, где механизм горизонтального передвижения козлового крана выполняется на основе двухдвигательного электропривода электропривода для обеспечения заданных эксплуатационных показателей выполняет все предъявляемые к нему требования и обеспечивать высокую надежность работы оборудования.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности проекта, оценка его эффективности, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации. Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи: оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки проекта; осуществить планирование этапов выполнения исследования; рассчитать бюджет проекта; произвести оценку социальной и экономической эффективности исследования.

В связи с этим данный проект решает вопрос о модернизации системы управления и электропривода механизма передвижения козлового крана.

### **5.1 Инициализация проекта и его технико-экономическое обоснование**

В семействе козловых подъемных устройств достойное место занимает уникальный по своему применению кран козловой ЛТ 62. Козловой кран ЛТ-62 обеспечивает непрерывную погрузку и выгрузку в крупных складских терминах, складах, также находит применение на монтаже конструкций.

В связи с тем, что главную роль в создании условий высокой производительности подъемно-транспортного оборудования отводится электроприводу, то с учетом сложной специфики работы такого оборудования необходимо отдавать предпочтение простым и высоконадежным системам электроприводов.

### **5.1.1 Потенциальные потребители результатов научно-технического проекта**

Целевым рынком сбыта для разрабатываемого устройства являются лесопильно-деревообрабатывающие предприятия и склады леспромхозов. Вместе с тем, аналогичные схемные решения устройства можно использовать в различных отраслях промышленности: большие промышленные предприятия, деятельность которых включает уникальные виды работ.

### **5.1.2 Анализ конкурентных технических решений**

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

При разработке электропривода в отдающем устройстве разработчик руководствовался следующими соображениями: стоимость двигателя большей мощности больше чем у двух двигателей меньшей мощности, затраты на его эксплуатацию больше (в сравнении с двумя).

Рассматривалось три варианта исполнения:

1. Преобразователь частоты Schneider Electric Altivar 71, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором АМТКФ132L6 мощностью 7,5 кВт, 1000 об/мин, редуктор 1Ц2У-200-25-12.

2. Преобразователь частоты Веспер ЕЗ-9100, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором МТКФ312-6 мощностью 15 кВт, 1000 об/мин,

редуктор 1Ц2У-200-25-12. Для связи с контроллером линии необходим дополнительный модуль связи Device-NET.

3. Асинхронный двигатель с фазным ротором МТН312-6 мощностью 15 кВт, 1000 об/мин, редуктор 1Ц2У-200-25-12 с релейно-контакторным управлением.

Таблица 8 - Стоимость комплекта

Наименование комплектующих	Вариант исполнения					
	1		2		3	
	марка	стоимость	марка	стоимость	марка	стоимость
Двигатель	АМТКФ132L6	2×31216	МТКФ312-6	64208	МТН312-6	82024
Редуктор	1Ц2У-200-25-12	2×27600	1Ц2У-200-25-12	27600	1Ц2У-200-25-12	27600
Коммутационная аппаратура	комплект	2×15180	комплект	15180	-	-
Модуль связи	интегрирован	0	приобретается отдельно	41905	-	-
ПЧ	Schneider Electric Altivar 71	2×28598	Веспер ЕЗ-9100	57960	-	-
Релейно-контакторная система управления	-	-	-	-	комплект	107600
Сумма за комплект	205188		210853		227224	

Данные для оценки конкурентоспособности разрабатываемого новшества приведены в таблице 9.

Производим выбор варианта (комплекта) с использованием метода экспертных оценок.

Для проведения оценки выбраны следующие показатели: технические – мощность, управления, срок службы, и экономические – капитальные вложения, затраты на эксплуатацию, надежность.

По выбранным критериям с помощью экспертов необходимо присвоить коэффициент весомости, отражение их важности.

Таблица 9 – Оценка технического уровня проекта

Характеристики	Вес показателей	Двухдвигательный электропривод		Однодвигательный электропривод с двигателем МТКФ312-6		Однодвигательный электропривод с двигателем МТН312-6		Гипотетический объект	
		$P_i$	$q_i$	$P_i$	$q_i$	$P_i$	$q_i$	$P_{100}$	$q_{100}$
1 Полезный эффект новшества (интегральный показатель качества), Q		$Q_n=0,9414$		$Q_{к1}=0,9312$		$Q_{к2}=0,6389$		$Q_{100}=1$	
1.1 Мощность двигателя, кВт	0,175	$2 \times 7,5$	1	15	1	15	1	15	1
1.2 Капитальные затраты на электрооборудование	-								
1.2.1 Стоимость двигателя, руб	0,105	$2 \times 31216$	0,96	64208	0,93	82024	0,73	60000	1
1.2.2 Вес электрооборудования, кг	0,075	$2 \times 100$	0,75	175	0,86	250	0,6	150	1
1.3 Эксплуатационные данные	-								
1.3.1 Коэффициент полезного действия, %	0,105	87	0,87	82	0,82	84	0,84	100	1
1.3.2 Удобство эксплуатации	0,100	-	0,95	-	0,85	-	0,75	-	1
1.4 Управляемость привода	0,175	Преобразователь частоты	1	Преобразователь частоты	1	Релейно-контакторная система управления	0	Преобразователь частоты	1
1.5 Простота и надежность автоматизации	0,085	-	0,9	-	0,9	-	0,75	-	1
1.6 Простота проведения монтажных работ	0,085	-	0,9	-	0,9	-	0,75	-	1
1.7 Срок службы	0,095	20	1	20	1	10	0,5	20	1

Показатель конкурентоспособности двухдвигательного электропривода по отношению к однодвигательному  $k_{тп}$  будет равен [20, 21]

$$k_{тпi} = \frac{Q_n}{Q_{ki}}; \quad (92)$$

$$k_{тп1} = \frac{Q_n}{Q_{k1}} = \frac{0,9414}{0,9312} = 1,1;$$

$$k_{тп2} = \frac{Q_n}{Q_{k1}} = \frac{0,9414}{0,6349} = 1,48.$$

где  $k_{тпi}$  – показатель конкурентоспособности двухдвигательного электропривода по отношению к однодвигательному электроприводу по техническим параметрам;

$Q_n, Q_k$  – соответствующие групповые технические показатели двухдвигательного и однодвигательного электроприводов.

В результате сравнения и оценки критериев выбран первый вариант исполнения, т.к. у него оптимальные технические показатели при выгодной стоимости проекта. Далее расчеты производятся для двухдвигательного электропривода.

## 5.2 Планирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

Главной целью планирования является обеспечение оптимального ведения работ, уменьшение затрат, увеличение производительности труда. [22]

### 5.2.1 Планирование научно-исследовательских работ

Этапы и содержание научно-исследовательских работ представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Состав и структура основных этапов

№ этапов	Наименование этапов	Продолжительность этапов в %
Научно-теоретические исследования		
1.	Подготовительный этап	7
2.	Обработка теоретической части	10
3.	Выбор и расчет электродвигателя	20

Продолжение таблицы 10

4.	Математическая модель АД	20
5.	Разработка имитационной модели электропривода в Matlab	30
6.	Внесение корректив в разработки	9
7.	Выводы и предложения по теме	2
8.	Завершающий этап	2
	Всего	100

Трудоемкость характеризуется количеством живого труда, затраченного на изготовление какой-либо продукции. Все этапы работы и значения трудоемкости занесены в календарный план-график, таблица 11, 12.

Таблица 11 - Состав информации для построения календарного графика

№ п/п	Перечень работ	Трудоемкость работ, чел.-час.	Количество исполнителей	Длительность выполнения работ, чел.-час.	Длительность выполнения всех видов работ по проектам, чел.-час.
1	2	3	4	5	6
1	Подготовительный этап	48	2	24	48
2	Обработка теоретической части				72
2.1	Технологический процесс	24	1	24	
2.2	Кинематические особенности козлового крана ЛТ-62	24	1	24	
2.3	Особенности двухдвигательного электропривода	24	1	24	
3	Выбор оборудования				108
3.1	Выбор и расчет электродвигателя	24	1	24	
3.2	Расчет параметров схемы замещения АД	24	1	24	
3.3	Выбор преобразователя частоты	24	1	24	
3.4	Расчет статических характеристик электропривода	36	1	36	
4	Оптимизация контуров регулирования				144
4.1	Оптимизация контура тока	48	1	48	
4.2	Оптимизация контура потокосцепления	48	1	48	
4.3	Оптимизация контура скорости	48	1	48	
5	Разработка имитационной модели электропривода в Matlab				280
5.1	Математическая модель АД	40	1	40	
5.2	Механическая часть электропривода механизма передвижения козлового крана	64	1	64	
5.3	Проверка адекватности разработанной модели асинхронного двигателя	64	2	32	
5.4	Исследование способов управления для электропривода системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»	112	2	56	
6	Внесение корректив в разработки	80	2	40	80
7	Выводы и предложения по теме	32	2	16	32
8	Завершающий этап	16	1	16	16



## 5.2.2 Планирование пуско-наладочных работ

Пуско-наладочные работы являются завершающим звеном производства линии, обеспечивающие ввод в эксплуатацию объект. Ниже рассмотрены основные этапы проведения пуско-наладочных работ. Работы выполняются высококвалифицированными специалистами и рабочими по заранее разработанным и согласованным программам. Электротехнические пуско-наладочные работы должны обеспечивать проверку и испытание электрооборудования в соответствии с действующими правилами устройства электроустановок, технической документацией предприятия-изготовителя оборудования и другими нормативными документами, а также получение заданных проектом электромеханических параметров работы оборудования. [22]

Результат проверок, снятие характеристик аппаратуры, испытания и других работ, входящих в комплекс наладки электроустановок, оформляются в виде протоколов установленной формы, которые прикладываются к акту сдачи объекта в эксплуатацию.

Проведению пуско-наладочных работ в короткие сроки и с высоким качеством в значительной степени способствуют подготовительные мероприятия:

- заблаговременное ознакомление с проектом электроустановки, выявление неточностей, пробелов и других дефектов проекта;
- выявление и подсчёт объёма пуско-наладочных работ, определение необходимого количества наладочного персонала;
- подготовка комплектов наладочной аппаратуры и инструмента;
- составление рабочего графика проведения пуско-наладочных работ и согласование его с монтажной организацией и заказчиком;
- внешний осмотр электрооборудования и установка количества электромонтажных работ;
- определения технических характеристик электрооборудования;

- составление рабочей программы испытаний и наладки электрооборудования с учётом особенностей налаживаемого объекта.

Для того чтобы качественно и в короткие сроки произвести наладку электрооборудования и электрических схем, необходимо хорошее знание данного оборудования, проектные схемы и расчёты электрических параметров. Поэтому наладочный персонал комплектуется из опытных и квалифицированных специалистов.

Цены на проведение пуско-наладочных работ определены, исходя из сложности серийно выпускаемых, освоенных промышленностью электрических устройств, в соответствии с требованиями 3 части СНиП "Организация, производство и приём работ и технических условий на изготовление и поставку электротехнических устройств.

При составлении смет или расчёте на выполнение работ, когда договором предусматривается промежуточная оплата, следует руководствоваться структурой пуско-наладочных работ, приведённой в таблице 13.

Таблица 13 - Структура ПНР

№	Состав работы	Стоимость ПНР (%) от общей сметной стоимости
1	Подготовительные работы	10
2	Наладочные работы, проводимые до индивидуальных испытаний технологического оборудования	40
3	Наладочные работы в период индивидуальных испытаний технологического оборудования	30
4	Комплексное опробование	15
5	Оформление отчётной и приемно-сдаточной документации	5

Ценами учтены затраты на следующие работы:

1. Подготовительные работы - организаторскую и инженерную подготовку работ; изучение электротехнической части проекта и ознакомление с технической документацией; получение от заказчика согласованных установок устройств защиты и автоматики; подготовку парка приборов, а также программ наладки и комплекта протоколов.

2. Внешний осмотр электрооборудования на соответствие проекту; проверку и настройку отдельных элементов и функциональных групп; сборку испытательных схем; проверку параметров и снятие характеристик отдельных устройств; измерение сопротивления изоляции; проверку соединения обмоток; регулировку релейной аппаратуры.

3. Наладку электрооборудования под напряжением, включая силовые цепи; снятие и получение необходимых характеристик, сопоставление их с расчётными данными проекта; испытание и наладку оборудования в холостую и под нагрузкой совместно с технологическим оборудованием.

4. Обеспечение взаимных связей устройств в составе электроустановки и механизмов в составе агрегата; согласование входных и выходных параметров и характеристик отдельных механизмов в составе агрегата; обеспечение на агрегатах электрических и электромеханических параметров и режимов, предусмотренных проектом.

Составление в одном экземпляре протоколов пуско-наладочных работ и испытаний; внесение в протокол схем, которые были изменены в процессе работы.

Таблица 14 - Этапы и содержание пуско-наладочных работ

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
1 Подготовительный этап	1.1	Ознакомление с проектом, выявление неточностей. Составление рабочего графика проведения пуско-наладочных работ.	Руководитель, представитель заказчика, бригада наладчиков
	1.2	Подготовка аппаратуры и инструмента.	Бригада наладчиков
	1.3	Внешний осмотр электрооборудования и проверка готовности.	Бригада наладчиков
	1.4	Определение соответствия техническим характеристикам.	Бригада наладчиков
	1.5	Составление рабочей программы испытаний и наладки с учетом особенностей объекта.	Бригада наладчиков

Продолжение таблицы 14

2 Проверочные работы	2.1	Проверка количества электромонтажных работ и их соответствие к рабочим чертежам проекта.	Бригада наладчиков
	2.2	Проверка установленной аппаратуры, градуировка и снятие в необходимых случаях характеристик.	Бригада наладчиков
	2.3	Проверка правильности выполнения схем.	Бригада наладчиков
	2.4	Проверка работы электрических систем, блокировок и автоматики.	Бригада наладчиков
3 Наладочные работы	3.1	Ввод параметров двигателя в преобразователь частоты, проверка работы системы.	Бригада наладчиков
	3.2	Проверка работы и функционирования блоков сигнализации и защиты.	Бригада наладчиков
	3.3	Ввод параметров системы в преобразователь частоты.	Бригада наладчиков
	3.4	Проверка диапазона изменения напряжения преобразователя, настройка устройства задания скорости.	Бригада наладчиков
	3.5	Итоговая проверка защиты.	Бригада наладчиков
	3.6	Настройка и снятие необходимых характеристик элементов автоматического управления в соответствии с требованиями технологического процесса, испытание оборудования в холостую.	Бригада наладчиков
4 Комплексное опробование	4.1	Обеспечение взаимных связей устройств в составе электрической установки.	Бригада наладчиков
	4.2	Согласование входных и выходных параметров на входе и выходе характеристик отдельных механизмов.	Бригада наладчиков
	4.3	Проверка режимов работы системы при управлении с пульта управления.	Бригада наладчиков
5 Оформление документации	5.1	Составление протоколов пуско-наладочных работ.	Бригада наладчиков
	5.2	Приемка крана. Внесение в один экземпляр принципиальных схем проекта и изменений, внесенных во время пуско-наладочных работ.	Руководитель, представитель заказчика, бригада наладчиков

### 5.2.3 Состав бригады для проведения пуско-наладочных работ

Число членов бригады и распределение объёмов пуско-наладочных работ между членами бригады зависит от профессиональной подготовки

наладчиков и их практического опыта, а также диктуется рядом требований к пуско-наладочным работам:

1. Работы характеризуются узкой специализацией, сложностью.
2. По правилам и нормам эксплуатации и настройки электрооборудования напряжением до 1000 В запрещаются работы на оборудовании, находящемся под напряжением, менее чем двум членам бригады.

Распределение объёма работ между членами выполняет бригадир, как опытный специалист, знающий каждого члена бригады. Продолжительность выполнения любой операции на каждом этапе зависит от технической сложности. Состав бригады, выполняющей пуско-наладочные работы приведён в таблице 15.

Таблица 15 - Состав бригады, выполняющей пуско-наладочные работы

	Состав бригады	Категория
1	Инженер-наладчик (бригадир)	I
2	Инженер-наладчик	II
3	Инженер-наладчик	III

С бригадой наладчиков, производящих пуско-наладочные работы, заключено трудовое соглашение, в котором оговорён срок поведения работ и сумма, на которые заключается соглашение. Срок проведения пуско-наладочные работы составляет 22 рабочих дня продолжительностью 8 часов.

Распределение объёма и времени выполнения пуско-наладочных работ по этапам отражено в таблице 16.

Таблица 16 - Распределение времени выполнения пуско-наладочных работ

№	Члены бригады	Время выполнения работ по этапам, раб. дни				
		1	2	3	4	5
1	Инженер-наладчик (бригадир)	3	7	6	4	2
2	Инженер-наладчик	3	7	6	4	2
3	Инженер-наладчик	3	7	6	4	2

По таблице 16 строим календарный график проведения пуско-наладочных работ, представленный в таблице 17.

Таблица 17 - Календарный план-график пуско-наладочных работ

Этап	Исполнитель	Дни		Выполнение пуско-наладочных работ																														
		Рабочие	Календарные	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Подготовительный этап	Инженер-наладчик I	3	3	■	■	■																												
	Инженер-наладчик II	3	3	■	■	■																												
	Инженер-наладчик III	3	3	■	■	■																												
Проверочные работы	Инженер-наладчик I	7	9				■	■	■	■	■	■	■	■	■																			
	Инженер-наладчик II	7	9				■	■	■	■	■	■	■	■	■																			
	Инженер-наладчик III	7	9				■	■	■	■	■	■	■	■	■																			
Наладочные работы	Инженер-наладчик I	6	10													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
	Инженер-наладчик II	6	10													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
	Инженер-наладчик III	6	10													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Комплексное опробование	Инженер-наладчик I	4	6																							■	■	■	■					
	Инженер-наладчик II	4	6																							■	■	■	■					
	Инженер-наладчик III	4	6																							■	■	■	■					
Оформление документации	Инженер-наладчик I	2	2																													■	■	
	Инженер-наладчик II	2	2																													■	■	
	Инженер-наладчик III	2	2																													■	■	

### 5.3 Расчет бюджета проекта по внедрению двухдвигательного электропривода

#### 5.3.1 Смета затрат на пуско-наладочные работы

Между заказчиком и пусконаладочной бригадой составляется договор на проведение ПНР с выплатой после завершения работ договорной цены, согласно ценнику, в общем размере 105,118 тыс.руб. В договоре оговорено, что инженер-наладчик бригадир (I категория) получает 40% (42,047 тыс.руб.), инженер-наладчик (II категория) 32% (33,638 тыс.руб.), инженер-наладчик (III категория) 28% (29,433 тыс.руб.) от фонда оплаты труда.

Дополнительные затраты по заработной плате приведены в таблице 18.

Таблица 18 - Дополнительные затраты по заработной плате

№	Наименование статей	Плановые, тыс.руб	Примечание
1	Стоимость работ	58,797	-
2	Районный коэффициент	17,639	30% от п.1
3	Коэффициент, действующий при проведении ПНР в зоне работы действующего оборудования	5,879	10% от п.1
4	Коэффициент, учитывающий работы на установке, находящейся под напряжением	17,797	30% от п.1
5	Основная заработная плата, включая доплаты	100,112	п.1+п.2+п.3+п.4
6	Дополнительна заработная плата	5,006	10%отп.5
7	Итого	105,118	п.5+п.6

Затраты предприятия на проведение пуско-наладочных работ приведены в таблице 19.

Таблица 19 - Общая стоимость затрат на проведение пуско-наладочных работ

№	Наименование статей	Плановые, тыс. руб.	Примечание
1	Заработная плата	105,118	-
2	Отчисления в внебюджетные фонды	31,535	30% от п.1
3	Накладные расходы	16,824	16% от п.1
4	Себестоимость работ	153,477	п.1+ п.2+п.3
5	Прибыль	12,278	8% от п.4
6	Цена ПНР	165,755	п.4+п.5
7	НДС	29,836	18% от п.6
8	Итого	195,591	п.6 + п.7

Цены всех комплектующих представлены в таблице 8.

Таким образом, на проведение пуско-наладочных работ заказчик затратил 195,591 тыс.руб, на приобретение оборудования 205,188 тыс.руб. Работы были проведены за 22 рабочих дня.

### 5.3.2 Расчет расходов при эксплуатации электропривода

Эксплуатационные расходы включают следующие статьи затрат:

- Расходы на электроэнергию;
- Заработная плата обслуживающего персонала;
- Амортизационные отчисления;
- Затраты на ремонт;
- Расходы на материалы, связанные с эксплуатацией.

Силовая электроэнергия используется для питания приводов рабочих механизмов и рассчитывается по формуле [22]:

$$W_{\text{сил.ЭН}} = \frac{P_{\text{уст}} \cdot F_{\text{д}} \cdot k_{\text{м}} \cdot k_{\text{в}} \cdot k_{\text{з}}}{k_{\text{дв}} \cdot k_{\text{с}}} = \frac{7,5 \cdot 4000 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,7}{0,92 \cdot 0,9} = 9130,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (93)$$

где  $P_{\text{уст}}$  – мощность установленного оборудования,

$$P_{\text{уст}} = 2 \times 7,5 \text{ кВт};$$

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд времени работы оборудования,  
принимаяем  $F_{\text{д}} = 4000$  часов;

$k_{\text{м}}$  – коэффициент одновременного использования электродвигателей,  
принимаяем  $k_{\text{м}} = 0,6$ ;

$k_{\text{в}}$  – коэффициент использования оборудования по машинному времени,  
принимаяем  $k_{\text{в}} = 0,6$ ;

$k_{\text{з}}$  – средний коэффициент загрузки оборудования (0,7-0,8);  
принимаяем  $k_{\text{з}} = 0,7$ ;

$k_{\text{с}}$  – коэффициент, учитывающий потери в сети (0,92-0,95);  
принимаяем  $k_{\text{с}} = 0,92$ ;

$k_{дв}$  – коэффициент, учитывающий потери в двигателях (0,9-0,93),  
принимается  $k_{дв}=0,9$ .

Затраты на силовую энергию в денежном выражении рассчитывается [22]:

$$C_{эл} = W_{сил.эн} \cdot C_{э} = 9130,4 \cdot 3,52 = 32,139 \text{ тыс.руб/г.} \quad (94)$$

где  $C_{э}$  – стоимость одного кВт-часа электроэнергии для промышленных предприятий,  
принимается  $C_{э}=3,52$  руб.

### 5.3.3 Расчет амортизационных отчислений

Годовые амортизационные отчисления рассчитываются на основе норм амортизации [22]

$$A_{год} = K \cdot \frac{H_A}{100} = 176,828 \cdot \frac{9,6}{100} + 15,180 \cdot \frac{3,5}{100} = 5,993 + 4,465 = 10,458 \text{ тыс.руб.} \quad (95)$$

где  $K$  – капитальные вложения в электрооборудование;

$H_A$  – проценты отчислений на амортизацию,

принимается на электродвигатели –  $H_{Адв}=9,6\%$ ; на преобразователи, выключатели, трансформаторы и т.д. -  $H_{Адв}=3,5\%$ .

### 5.3.4 Заработная плата обслуживающего персонала

Обслуживание частотного электропривода, двигателя и редуктора входит в обязанности оперативно-ремонтного персонала ремонтной службы предприятия.

При выполнении работы наладчик имеет повременную оплату труда. Оплата труда включает в себя основную и дополнительную заработную плату. К основной относится оплата, начисленная за проработанное время на предприятии и различные доплаты (сверхурочная работа, работа в выходные дни, региональные надбавки, премии, районный коэффициент). [22]

Дневная заработная плата

$$Z_{\text{нал}} = \frac{(P_{\text{д}} \cdot Z_{\text{т}} + N_{\text{надб}}) \cdot P_{\text{к}}}{F_{\text{д}}} = \frac{(1,3 \cdot 9600 + 3000) \cdot 1,4}{22} = 985,09 \text{ руб / д;} \quad (96)$$

где  $Z_{\text{т}}$  - оклад в месяц,

принимаем оклад наладчика по 6 разряду  $Z_{\text{т}}=9100$  руб.;

$N_{\text{надб}}$  – надбавка за сложность,

принимаем  $N_{\text{надб}}=3000$  руб.;

$P_{\text{д}}$  – коэффициент доплаты за должность,

принимаем  $P_{\text{д}}=1,4$ ;

$P_{\text{к}}$  – коэффициент, учитывающий районное регулирование,

принимаем  $P_{\text{к}}=1,3$ ;

$F_{\text{д}}$  – количество рабочих дней в месяц,

принимаем  $F_{\text{д}}=22$  дня.

Основная заработная плата за период работы

$$Z_{\text{осн}} = Z \cdot \tau_{\text{р}} = 985,09 \cdot 247 = 243,317 \text{ тыс.руб.} \quad (97)$$

где  $\tau_{\text{р}}$  – период рабочего времени,

принимаем  $\tau_{\text{р}} = 247$  дней – 1 год;

Дополнительная заработная плата – это выплаты за неотработанное время (оплата отпусков и т. д.).

Дополнительная заработная плата рассчитывается:

$$Z_{\text{д}} = 0,15 \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 243,317 = 36,497 \text{ тыс / руб.} \quad (98)$$

Суммарная зарплата:

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{д}} + Z_{\text{осн}} = 243,317 + 36,497 = 279,815 \text{ тыс.руб.} \quad (99)$$

Расчет затрат на оплату труда сведем в таблицу 20.

Таблица 20 - Затраты на оплату труда

	Исполнитель
Основная заработная плата, тыс.руб.	243,317
Дополнительная заработная плата, тыс.руб.	36,497
Итого	279,815

### 5.3.5 Отчисления на социальное страхование

Страховые отчисления на сегодняшний день по существующему законодательству составляет 30%

$$ЕСН = 30\% \cdot Z_{\Sigma} = 30\% \cdot 279,815 = 83,945 \text{ тыс.руб.} \quad (100)$$

Обязанности по обслуживанию крана занимают 10% рабочего времени наладчика. Зарплата обслуживающему персоналу в год составит:

$$Z_{\text{пер}} = 10\% \cdot Z_{\Sigma} = 10\% \cdot 279,815 = 27,982 \text{ тыс.руб.} \quad (101)$$

### 5.3.6 Общая сумма эксплуатационных расходов

Общая сумма эксплуатационных расходов складывается из затраты на силовую энергию  $C_{\Sigma}$ , годовых амортизационных отчислений  $A_{\text{год}}$  и зарплаты обслуживающего персонала  $Z_{\text{пер}}$ .

$$P_{\Sigma} = C_{\text{эл}} + A_{\text{год}} + Z_{\text{пер}} = 32,139 + 10,458 + 27,982 = 70,579 \text{ тыс.руб / г.} \quad (102)$$

При расчетах общих затрат на эксплуатацию расходы на электроэнергию составили 32139 (руб/год), заработная плата обслуживающего персонала 27982 (руб/год), амортизационные отчисления 10458 (руб/год). Общая сумма эксплуатационных расходов составила 70579 (руб/год).

## 5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. [22, 23]

### 5.4.1 Интегральный финансовый показатель

Определяется по формуле [22, 23]

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{р.}i}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (103)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость всего проекта;

$\Phi_{\text{р}i}$  – стоимость  $i$ -го варианта (таблица 1) исполнения включая ПНР (таблица 12);

$$\Phi_{\text{р}1} = 205,188 + 195,591 = 400,779 \text{ тыс.руб.};$$

$$\Phi_{\text{р}2} = 210,853 + 195,591 = 406,444 \text{ тыс.руб.};$$

$$\Phi_{\text{р}3} = 227,224 + 195,591 = 422,743 \text{ тыс.руб.}$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{\Phi_{\text{р}1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{400,779}{422,743} = 0,94;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{\Phi_{\text{р}2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{406,444}{422,743} = 0,95;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}3} = \frac{\Phi_{\text{р}3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{422,743}{422,743} = 1.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы.

#### 5.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

Определяется следующим образом по формуле [22, 23]

$$I_{\text{р}i} = \sum a_i \cdot b_i \quad (104)$$

где  $I_{\text{р}i}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 21).

Таблица 21 - Сравнительная оценка вариантов исполнения

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Модель №1	Модель №2	Модель №3
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,13	4	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,17	4	3	3
3. Энергосбережение	0,23	5	5	4
4. Надежность	0,27	5	4	4
5. Материалоемкость	0,20	5	5	4
Итого	1	4,6	4,2	3,6

$$I_{p-исп1} = 0,13 \cdot 4 + 0,17 \cdot 4 + 0,23 \cdot 5 + 0,27 \cdot 5 + 0,20 \cdot 5 = 4,7;$$

$$I_{p-исп2} = 0,13 \cdot 4 + 0,17 \cdot 3 + 0,23 \cdot 5 + 0,27 \cdot 4 + 0,20 \cdot 5 = 4,26;$$

$$I_{p-исп3} = 0,13 \cdot 3 + 0,17 \cdot 3 + 0,23 \cdot 4 + 0,27 \cdot 4 + 0,20 \cdot 4 = 3,7.$$

### 5.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов

#### исполнения разработки

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле [22, 23]

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр.i}} \quad (105)$$

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}} = \frac{4,7}{0,94} = 5;$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{I_{\text{р-исп2}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}}} = \frac{4,26}{0,95} = 4,42;$$

$$I_{\text{исп3}} = \frac{I_{\text{р-исп3}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}}} = \frac{3,7}{1,0} = 3,7.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 22) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ ):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}i} = \frac{I_{\text{исп.}i}}{I_{\text{исп.1}i}}; \quad (106)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср1}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.1}}} = \frac{5,0}{5,0} = 1;$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср2}} = \frac{I_{\text{исп.2}}}{I_{\text{исп.1}}} = \frac{4,42}{5,0} = 0,88;$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср3}} = \frac{I_{\text{исп.3}}}{I_{\text{исп.1}}} = \frac{3,7}{5,0} = 0,74.$$

Таблица 22 - Сравнительная эффективность разработки

№п/п	Показатель	Модель №1	Модель №2	Модель №3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,94	0,95	1,0
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,7	4,26	3,7
3	Интегральный показатель эффективности	5,0	4,42	3,7
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,00	0,88	0,74

Сравнение значений с позиции финансовой и ресурсной эффективности указывает на первый вариант исполнения, как наиболее эффективный.

Выводы по разделу:

В результате сравнения и оценки критериев комплектов электроприводов модель двухдвигательного электропривода, в состав которого входит следующее оборудование: два преобразователя частоты Schneider Electric Altivar 71, два двигателя АМТКФ132L6 мощностью 7,5 кВт, 1000 об/мин, два редуктора 1Ц2У-200-25-12, т.к. у данного комплекта оптимальные технические показатели при выгодной стоимости проекта (проведение пуско-наладочных работ заказчик затратил 195,591 тыс.руб, приобретение оборудования 205,188 тыс.руб.).

Были составлены графики проведения научно-исследовательских и пуско-наладочных работ, определено количество работников, рассчитаны суммарные затраты на оплату труда - 279,815 тыс.руб. Общая сумма эксплуатационных расходов составила 70579 руб/год.

На основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования, а также по итогам сравнения финансовой и ресурсной эффективности наиболее эффективным получается первая модель электропривода.

Таким образом, использование двухдвигательного электропривода дает положительный экономический эффект: сократятся затраты на электроэнергию, сократится число обслуживающего персонала, а значит, сократятся затраты на оплату труда.

## **6 Социальная ответственность**

Безопасность жизнедеятельности представляет собой область научных знаний, охватывающих теорию и практику защиты человека от опасных и вредных факторов в среде обитания, во всех сферах человеческой деятельности, в том числе и на производстве.

С этой точки зрения безопасность жизнедеятельности можно назвать социальной (общественной) безопасностью, т.е. ответственность перед людьми и данными им обещаниями, когда организация учитывает интересы коллектива и общества, возлагая на себя ответственность за влияние их деятельности на заказчиков, поставщиков, работников, акционеров.

Безопасность жизнедеятельности человека определяется характером труда, организацией, организацией рабочего места, наличием опасных и вредных факторов в среде обитания. [24, 25]

В данном разделе рассматриваются опасности при эксплуатации электропривода механизма перемещения грузоподъемных машин ЛТ-62.

### **6.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды**

Вредные факторы при эксплуатации электропривода грузоподъемных машин, в основном, связаны:

- с повышением уровня шума,
- с повышением уровня вибрации,
- с превышением электромагнитных излучений,
- с отклонением показателей климата на открытом воздухе.

В дипломной работе рассматривается электропривод механизма перемещения козлового крана ЛТ-62, установленного на открытой территории.

В рабочей зоне осуществляется естественная вентиляция. Основным недостатком - воздух не подвержен предварительной очистке и нагреванию.

Влияние климата на самочувствие человека значимо и существенно, а переносимость температуры во многом зависит от скорости движения и влажности окружающего воздуха.

При длительном пребывании человека в условиях высокой температуры повышаются температура тела, частота сердечных сокращений изменяется, повышается или снижается артериальное давление, нарушаются обменные процессы, особенно водно-солевой, функциональное состояние органов желудочно-кишечного тракта. Одновременно значительно снижается умственная и физическая работоспособность.

Длительное воздействие относительно низких температур воздуха или кратковременные воздействия особенно низких температур вызывают значительные нарушения функционального состояния. Физические нагрузки при пониженных температурах вызывают ухудшение эластичности и сократительной способности мышц и связок, что является одной из причин травматических повреждений опорно-двигательного аппарата.

Человек будет чувствовать себя абсолютно комфортно, если влажность окружающего его воздуха будет колебаться в пределах от 40 до 60%. Это и есть нормальная влажность воздуха. В случаях снижения влажности ниже 40%, практически все здоровые люди начинают испытывать сонливость, рассеянность, ощущать чувство сухости кожи и раздражение слизистых оболочек.

Из наиболее распространенных в производстве вредных факторов являются шум и вибрации. В данной работе следует выделить следующие группы источников:

- шум механического происхождения, возникающий при вибрации поверхностей оборудования, а также при одинарных или периодических ударах в соединениях деталей и или конструкциях;

- шум электромагнитного происхождения, возникающий вследствие колебаний электрических устройств (ротора, статора) под действием переменных магнитных полей.

Шум и вибрация вызывают головную боль, быструю утомляемость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, ухудшается память, снижается реакция. По [34, 43] при выполнении основной работы уровень звука на рабочем месте не должен превышать 85дБА. Источником вибрации является работающий электромашинный агрегат. По [34, 44] уровень вибрации не должен превышать 88 дБ.

Источником электромагнитных излучений являются системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии постоянного и переменного тока (0-3 кГц): кабели электропитания, электропроводка, выпрямители и преобразователи тока. Согласно [36] напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей не должна превышать 25В/м в диапазоне от 5Гц до 2кГц. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В. [42]

Меры защиты от вредных факторов производства:

1 Защита от вибраций:

- Ограничение контакта работника с вибрацией.

2 Защита от шума:

- Применение ушных пробок.

3 Защита от внешнего облучения:

- регламентированные перерывы.

## **6.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды**

Опасности при эксплуатации грузоподъемных машин, в основном, связаны:

- с электрическим током,
- с непреднамеренным контактом человека с движущимися частями оборудования,
- с возможными ударами от падающих предметов при обрыве поднимаемого груза,
- с высыпанием части груза,
- с падением грузоподъемных машин,
- с наездом и ударами при столкновении с передвижными грузоподъемными машинами. [24, 31, 32, 36, 38]

К опасным факторам можно отнести наличие большого количества аппаратуры, использующей электрический ток напряжением 220 В и частотой 50Гц. По опасности электропоражения рабочее место с повышенной опасностью, характеризующиеся наличием следующих условий: возможности одновременного прикосновения человека к соединенным с землей металлическим частям зданий, технологических аппаратов, механизмов, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования — с другой. [24, 27, 36]

Во время нормального режима работы оборудования опасность электропоражения крайне мала, однако, возможны аварийные режимы работы, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящегося под напряжением с заземленными конструкциями.

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- прикосновение к токоведущим частям, оголенным проводам, контактам электроприборов, рубильников, предохранителей, находящихся под напряжением;
- прикосновение к частям электрооборудования, металлическим конструкциям сооружений и т.п., в обычном состоянии не находящихся, но в результате повреждения (пробоя) изоляции оказавшихся под напряжением;
- нахождение вблизи места соединения с землей оборванного провода электросети;
- несогласованные и ошибочные действия персонала (подача напряжения на установку, где работают люди; оставление установки под напряжением без надзора; допуск к работам на отключенном электрооборудовании без проверки отсутствия напряжения и т.д.).

Основными мероприятиями по обеспечению электробезопасности являются:

- изолирование (ограждение) токоведущих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;
- установки защитного заземления;
- наличие общего рубильника;
- своевременный осмотр технического оборудования, изоляции. [24, 26, 27, 28, 36]

К опасным факторам также относятся движущиеся части машин и механизмов. В качестве механических опасностей обозначаются все физические факторы, которые могут привести к травмам от механического движения деталей машины. Основными видами механических опасностей являются: прижатие или раздавливание; порезы; разрезание или разрубание; защемление или наматывание; втягивание; попадание под удар; поверхностное повреждение или существенное сдирание наружных тканей под действием трения.

Средствами защиты могут служить:

1. Обеспечение недоступности опасной зоны;

2. Уменьшение опасности при помощи специальных приспособлений к которым относятся:

- ограждения (кожухи, козырьки, дверцы, экраны, щиты, барьеры и т. д.);
- предохранительные – блокировочные устройства (механические, электрические, электронные, пневматические, гидравлические и т. д.);
- тормозные устройства (рабочие, стояночные, экстренного торможения);
- сигнальные устройства (звуковые, световые), которые могут встраиваться в оборудование или быть составными элементами. [24? 32]

Опасными факторами также являются:

- опасность опрокидывания крана – возникает при потери краном равновесия, что может повлечь за собой человеческие жертвы, разрушение сооружений и технических устройств. На устойчивость крана влияет также устройство площадок выполнения грузоподъёмных работ. Строгое соблюдение всех норм, определённых в регламенте проведения погрузочно-разгрузочных работ позволяет обеспечивать безопасность опрокидывания крана.

- опасность падения груза - является одной из самых распространённых опасностей при эксплуатации грузоподъёмных машин. Чаще всего эта опасность связана с неправильной строповкой груза, разрывом канатов и неисправности грузозахватных механизмов. Для обеспечения безопасности следует проводить обследование крана и устройств для проведения работ, соблюдать правила строповки и эксплуатации кранов, соблюдать технику безопасности.

### **6.3 Охрана окружающей среды**

Рабочий механизм содержит огромное количество компонентов, которые содержат вредные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу). [24, 25]

Поэтому электродвигатель требует специальных комплексных методов утилизации. В этот комплекс мероприятий входят:

- отделение металлических частей от неметаллических;
- металлические части переплавляются для последующего производства;
- неметаллические части подвергаются специально переработке.

В настоящее время ведется создания и внедрения безотходной технологии в ряде отраслей промышленности, однако полный перевод ведущих отраслей промышленности на безотходную технологию потребует решения большого комплекса весьма сложных технологических, конструкторских и организационных задач. [24, 25]

### **6.4 Расчет устройства защитного заземления**

Все передвижные грузоподъемные краны с электроприводом механизмов должны быть заземлены. Заземление выполняют для предупреждения возможного поражения людей электрическим током в случае прикосновения к металлическим частям крана, не являющимися деталями электрооборудования, но случайно оказавшимися под напряжением в результате повреждения изоляции электроцепей.

Заземление — специальная система электрического соединения деталей крана с землей через различные заземляющие устройства. Обязательному заземлению подлежат крановые металлоконструкции, корпуса электроаппаратов, металлические оболочки и защитные трубы электропроводки и кабелей. В зависимости от напряжения и системы энергоснабжения питающей сети применяют различные схемы заземления.

Заземление корпусов крановой электроаппаратуры и двигателей осуществляют надежным электрическим соединением (контакт) с металлоконструкцией крана; для этого на контактирующих поверхностях оставляют зачищенные и неокрашенные места. В свою очередь, металлоконструкции кранов заземляют через крановый путь, стыки рельсов которого надежно соединяют между собой сваркой, приваркой соединительных перемычек или приваркой к стальным подкрановым балкам для обеспечения надежной непрерывной электрической цепи. Крановые пути, расположенные на открытом воздухе, заземляют соединением их со специальными заземлителями. Величина сопротивления цепи заземления растеканию тока, измеряемая любым прибором, не должна превышать 10 Ом.

Контроль состояния цепи заземления производят одновременно с выполнением работ по ремонту кранового электрооборудования, но не реже одного раза в год.

Исходными данными для расчета защитного заземления служат: напряжение питания электродвигателя 380 В; вертикальные (стержневые) электроды, забиваемые вертикально в землю, выполнены из стальных труб диаметром 6 см с толщиной стенки не менее 3,5 мм, длиной 3,0 м, расстояние между трубами в групповом заземлителе 3 м; горизонтальная соединяющая полоса стальная шириной 4 см; грунт в месте устройства защитного заземления глина.

Лесосклад, где эксплуатируется козловой кран, расположен в III климатической зоне. Естественных заземлителей нет.

Определяем сопротивление стержневого электрода [24]

$$R_{\text{э}} = \frac{\rho \cdot K_{\text{в}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{э}}} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot l_{\text{э}}}{d_{\text{э}}} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot h_{\text{э}} + l_{\text{э}}}{4 \cdot h_{\text{э}} - l_{\text{э}}} \right) = \frac{60 \cdot 1,5}{2 \cdot \pi \cdot 3} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 3}{0,06} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right) = 23,87 \text{ Ом} \quad (107)$$

где  $l_{\text{э}}$  – длина электрода;

$d_{\text{э}}$  – диаметр электрода;

$h_{\text{э}}$  – глубина заложения электрода;

$\rho$  – удельное сопротивление грунта;

$K_{\text{в}}$  – коэффициент сезонности.

Определяем предварительно количество электродов

$$n' = \frac{R_{\text{э}}}{R_{\text{доп}}} = \frac{23,87}{4} = 5,968 \quad (108)$$

Зная расположение электродов (в ряд), отношение расстояния между электродами к их длине

$$\frac{a}{l_{\text{э}}} = \frac{3}{3} = 1, \quad (109)$$

и предварительное количество электродов, определяем коэффициент использования электродов [24]  $\eta_{\text{э}} = 0,72$ .

Определяем окончательно потребное количество электродов

$$n = \frac{R_{\text{э}}}{R_{\text{доп}} \cdot \eta_{\text{э}}} = \frac{23,87}{4 \cdot 0,63} = 9,472 \quad (110)$$

Принимаем 10 электродов.

Длина соединительной полосы, при расположении электродов в ряд, определяется по формуле;

$$l_{\text{н}} = a \cdot (n-1) = 3 \cdot (10-1) = 27 \text{ м.} \quad (111)$$

Определяем сопротивление соединительной полосы:

$$R_{\Pi} = \frac{\rho \cdot K_{\text{В}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\Pi}} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_{\Pi}^2}{h_{\Pi} \cdot b} = \frac{60 \cdot 1,5}{2 \cdot \pi \cdot 21} \cdot \ln \frac{2 \cdot 27^2}{0,5 \cdot 0,04} = 53,461 \text{ Ом.} \quad (112)$$

Определяем общее сопротивление контура защитного заземления

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{\text{з}} \cdot R_{\Pi}}{R_{\text{з}} \cdot \eta_{\Pi} + R_{\Pi} \cdot \eta_{\text{з}} \cdot n} = \frac{23,87 \cdot 53,461}{23,87 \cdot 0,72 + 53,461 \cdot 0,63 \cdot 10} = 3,605 \text{ Ом.} \quad (113)$$

Производим проверку выполнения условия

$$R_{\Sigma} \leq R_{\Pi}$$

$$3,605 \leq 4$$

Так как сопротивление заземляющего устройства меньше допустимого значения, то данную конструкцию устройства заземления принимаем к установке.

## 6.5 Защита в чрезвычайных ситуациях

Рабочий механизм, который рассматривается в работе, имеет электропроводку напряжением 220 вольт, предназначенную для питания электродвигателя. При неправильной эксплуатации оборудования и коротком замыкании электрической цепи может произойти возгорание, которое грозит уничтожением техники, документов и другого имеющегося оборудования.

Данное рабочее место относится к категории Г (негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени, и (или) горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива). [24, 29]

Необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

- организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;

- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- технические и конструктивные, связанные с правильные размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

[24, 29]

Организационные мероприятия:

1. Противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;
2. Обучение персонала правилам техники безопасности;
3. Издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

1. Соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
2. Обеспечение свободного подхода к оборудованию;
3. Содержание в исправном состоянии изоляции токоведущих проводников.

К техническим мероприятиям относится соблюдение противопожарных требований при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения.

Если возгорание произошло в электроустановке, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2, или порошковые типа ОП-5. Кроме устранения самого очага пожара нужно, своевременно, организовать эвакуацию людей.

## **6.6 Законодательное регулирование проектных решений**

Обеспечение безопасности на рабочем месте подразумевает собой различные правовые и организационные решения.

Для осуществления практической деятельности в области обеспечения безопасности жизнедеятельности необходимо соблюдение нормативов и

правил ведения соответствующих работ, позволяющие их обеспечить. Соблюдение рабочего режима, правил ведения работ и т.д.

При решении организационных вопросов следует учитывать антрометрические данные работника.

В течение рабочего дня (смены) работникам в соответствии со ст. 108 [30] предоставляется перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Такой перерыв получил название "перерыв на обед", или "обеденный перерыв".

Выводы по разделу:

В ходе выполнения раздела «Социальная ответственность» выявлены вредные и опасные факторы при эксплуатации козлового крана ЛТ-62 и механизма передвижения, в частности. Представлены меры и средства защиты.

Произведен расчет искусственного заземления – сопротивление искусственного заземителя 3,605 Ом.

Рассмотрены мероприятия при чрезвычайных ситуациях, а также законодательные вопросы при эксплуатации крана.

## Заключение

В данной работе был разработан асинхронный частотно-регулируемый двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана, позволяющий синхронизировать скорость движения опор.

Для этого были изучены назначение, технические характеристики и кинематические особенности козлового крана ЛТ-62. Был выбран асинхронный двигатель АМТКФ132М6 мощностью 7,5 кВт и преобразователь частоты Schneider Electric Altivar 71. Рассчитаны параметры схемы замещения двигателя и получены его статические характеристики.

В программной среде Matlab на основе двухфазной математической модели в неподвижной системе координат  $d, q$  была разработана имитационная модель двухдвигательного частотно-регулируемого электропривода, включающая в себя S-образный задатчик, контуры скорости, тока и потокосцепления, два двигателя и механическую часть.

С помощью этой модели были проведены исследования двухдвигательного электропривода, с помощью которых было установлено, что синхронизацию скорости вращения двух двигателей обеспечивает векторное управление с обратными связями по скорости по каждому двигателю.

Был произведен расчет и анализ технико-экономических показателей, рассчитан годовое экономическое воздействие от использования двухдвигательного электропривода. Это дает положительный экономический эффект: сократится число обслуживающего персонала, а значит, сократятся затраты на оплату труда.

Так же были определены и проанализированы опасные и вредные факторы среды, негативные воздействия на окружающую среду, чрезвычайные ситуации при эксплуатации электропривода козлового крана.

## Список литературы

1. Байбутанов Б.К. Многодвигательный асинхронный электропривод согласованного вращения: Магистерская диссертация. – Алматы; 2013.
2. Лой В.Н., Протас П.А., Завойских Г.И. Лесоскладское грузоподъемное оборудование: учеб.метод. пособие для студентов. – Мн.: БГТУ, 2005. – 102 с.
3. Коломинова М. В. Грузоподъемное оборудование для нижнескладских работ: МУ к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Технологические процессы и оборудование лесозаготовительного производства» /М. В. Коломинова. – У.: УГТУ, 2013. – 54 с.
4. Проектирование электроприводов крановых механизмов. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск № 12, февраль 2009.
5. Расчет механизма передвижения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mylektsii.ru/1-62879.html>. – Загл. с экрана.
6. Электропривод передвижения тележки крана по системе ПЧ-АД [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vunivere.ru/work47817> – Загл. с экрана.
7. Казак С.А., Дусье В.Е., Кузнецов и др./Курсовое проектирование грузоподъемных машин. Учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов; Под ред. Казака С.А. – М.: Высшая школа, 1989. - 319 с.: ил.
8. Кояин Н.В.. Электропривод общепромышленных механизмов. Лекции – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
9. Дроссели пусковые крановые [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://dimalmag.ru/production/reactor-electricdrive/rane-current-limiting-reactors.html/>– Загл. с экрана.
10. Системы кранового электропривода [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.momentum.ru/ru/products-pt/skep/>– Загл. с экрана.

11. Иванченко Ф. К., Красношапка В. А. Динамика металлургических машин. – М.: Металлургия, 1983. – 295 с.
12. Крановые электродвигатели серии ДМТ и АМТ [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.esco-motors.ru/sites/default/files/kr\\_eldv.pdf](http://www.esco-motors.ru/sites/default/files/kr_eldv.pdf). – Загл. с экрана.
13. Электрический привод: учебно-методическое пособие / Качин С.И., Чернышев А.Ю., Качин О.С.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 157 с.
14. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.kadrovik.ru/docs/pgosgortehndadorsora31.12.99n98.htm>. – Загл. с экрана.
15. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 164 с.
16. Преобразователи частоты Altivar 71. Каталог 09 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tesli.com/file/catalogue/schneider-electric/schneider-electric-altivar-71.pdf> – Загл. с экрана.
17. Системы управления электроприводов.: учебное пособие / Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В.. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 82 с.
18. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.
19. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Механическая система электропривода: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.

20. Коршунова Л. А., Кузьмина Н. Г. Техничко-экономическое обоснование инновационного проекта. Методические указания по выполнению экономического раздела ВКР для студентов энергетических специальностей всех форм обучения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
21. Непомнящий Е.Г. Инвестиционное проектирование: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003.
22. Коршунова Л.А., Кузьмина Н.Г. Экономика предприятия и отрасли (в электроэнергетике): учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010.
23. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция), утверждено Министерство экономики РФ, Министерство финансов РФ № ВК 477 от 21.06.1999 г. [Электронный ресурс]. - Режим доступа. - <http://www.cfin.ru/>
24. Безопасность жизнедеятельности. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 2002. – 357с.
25. Охрана окружающей среды. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 1991.
26. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб.: ДЕАН, 1999. – 320 с.
27. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. с изм. и дополн. – СПб, 2002. – 123 с.
28. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. 2014г.
29. Основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.
30. Трудовой кодекс. – М.: Проспект, 2014. – 112 с.
31. ГОСТ 12.2.003-91 – 92. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

32. ГОСТ 12.3.009-76 – 77 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования.
33. ГОСТ 12.4.026-76 – 78. Света сигнальные и знаки безопасности. Общие требования безопасности.
34. ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
35. ГОСТ 12.1.012 –90 ССБТ Вибрационная болезнь. Общие требования.
36. ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
37. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
38. Р 2.2.2006 – 05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М.: Минздрав России, 2006.
39. СНиП 3.05.06-85 – 88. Электротехнические устройства.
40. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 2003.
41. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997.
42. СанПиН 2.2.4.1191 – 03. Электромагнитные поля в производственных условиях. М.: Минздрав России, 2003.
43. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
44. СН 2.2.4/2.1.8.566. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 1997.