



## Аннотация

Работа посвящена модернизации привода перемещения портала балансирующего станка. Дан анализ состояния электропривода и перспективы применения электроприводов частотным векторным управлением для обеспечения движения портала балансирующего станка, а также синтез преобразователя частоты широтно- импульсной модуляцией. Выполнен расчет и выбор исполнительного двигателя, элементов силовой структуры преобразователя частоты. Проведено структурное математическое моделирование режимов работы асинхронного электропривода с векторным управлением в соответствии с техническими требованиями и технологическим циклом. Полученные структуры построения электропривода и коэффициенты регуляторов частотно-векторного управления дают возможность повысить надежность и снизить эксплуатационные расходы при работе привода движения загрузочного портала балансирующей станка для центровки коленчатых валов. В технологической части проекта рассмотрена конструкция соединительной муфты для компенсации неточностей соединения двигателя с редуктором. Произведены расчеты защитного заземления и искусственного освещения рабочего участка. Дано экономическое обоснование модернизации привода движения портала

## Abstract

The work is devoted to the modernization of the movement drive of the portal of the balancing machine. The analysis of the state of the electric drive and the prospects for the use of electric drives by frequency vector control are provided to ensure the movement of the portal of the balancing machine, as well as the synthesis of the frequency converter by pulse width modulation. Calculation and selection of the executive motor, elements of the power structure of the frequency converter are performed. Structural mathematical modeling of the modes of operation of an asynchronous electric drive with vector control is carried out in accordance with technical requirements and the technological cycle. The obtained structures of the electric drive construction and the coefficients of the frequency-vector control regulators make it possible to increase the reliability and reduce the operating costs when the drive of the loading portal of the balancing machine is used to center the crankshafts. In the technological part of the project, the design of the coupling is considered to compensate for inaccuracies in the connection between the motor and the reducer. Calculations of protective earthing and artificial illumination of the working area have been made. The economic justification for the modernization of the portal traffic drive is given

## Содержание

Введение.....	5
1 Анализ состояния электроприводов и перспективы их применения в загрузочных порталах.....	7
2 Система электропривода портала.....	12
2.1 Структура построения электропривода движения портала.....	12
2.2 Синтез преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией.....	13
3 Кинематическая схема привода портала.....	20
4 Расчет мощности и выбор типа двигателя движения портала.....	21
4.1 Расчёт усилия горизонтального перемещения портала.....	21
4.2 Расчёт статического момента на валу двигателя.....	22
4.3 Расчёт динамических моментов при пуске и торможении.....	22
4.4 Выбор типа двигателя движения портала.....	24
4.5 Проверка выбранного двигателя по перегрузочной способности.....	24
4.6 Проверка выбранного двигателя по нагреву.....	24
4.7 Расчёт параметров асинхронного двигателя.....	25
5 Расчет и выбор преобразователя частоты.....	29
5.1 Основные элементы силового канала электропривода.....	29
5.2 Расчет элементов преобразователя частоты.....	30
6 Расчет контуров регулирования электропривода.....	36
7 Статические и динамические характеристики электропривода портала.....	39
8 Разработка соединительной муфты.....	47
9 Расчеты защитного заземления и искусственного освещения.....	49
10 Экономическое обоснование модернизации привода портала.....	53
Заключение.....	56
Список использованных источников.....	57

## Введение

Загрузочный портал (манипулятор) в своей составляющей имеют конструкцию, которая позволяет производить перемещение деталей и готовой продукции в пространстве с различными степенями свободы. Манипуляторы позволяют автоматизировать проводимые работы как на производстве, так и в средах, недостижимых или угрожающих жизни человека (водная, химическая и другие среды), вспомогательные работы в промышленном производстве. Порталы подразделяются на ручные (управляемые человеком) и автоматические манипуляторы. Последние являются разновидностью роботов.

Загрузочный портал балансировочного станка представляет собой манипулятор, предназначенный для автоматической загрузки и загрузки обрабатываемых деталей (коленчатых валов) на портал, а также их транспортирования от загрузочного конвейера на балансировочный станок и обратно на разгрузочный конвейер. Загрузочный портал состоит из каретки, на которой смонтированы две руки, для зажима и удержания деталей при их перемещении. Загрузочный портал обеспечивает циклический режим работы, который состоит из трех стадий: загрузка детали на портал, движение портала к балансировочному станку, снятие готовой детали (коленчатого вала) и движение портала разгрузочному конвейеру.

Естественно для осуществления управления таким сложным механизмом как манипулятор необходим промышленный привод. В качестве приводов используются гидравлические приводы и электроприводы на основе вентильных двигателей. Гидравлический привод используется в загрузочном портале балансировочного станка, в механо – сборочном производстве ОАО «АвтоВАЗ». Здесь гидравлический привод осуществляет горизонтальное перемещение портала.

Для размещения гидравлический привод требует большой площади, трубопроводы привода идут по всей рабочей поверхности промышленной машины, что требует специального проектирования и выделения места. Дополни-

тельно требуется разместить насосы. Создается сильный шум, так как лопастные насосы приводятся в движение от асинхронного двигателя. Использование гидропривода нарушает экологию по отношению к окружающей среде, так как возможна течь масла от клапанов и маслопроводов. Кроме того, в гидроприводе неэкономично используется энергии, требуется более частое техническое обслуживание элементов гидравлики и кинематических устройств, а также возникают ситуации с нехваткой гидравлических и механических частей для замены при ремонте, что в конечном итоге проявляется в простое автоматической линии.

В большинстве случаев гидравлический привод применяется там, где требуется большая мощность или обеспечение громадного возвратно- поступательного усилия для рабочего органа. В данном случае, для обеспечения движения портала требуется небольшая мощность, которая может быть получена при применении электрического привода. Отсюда возникает потребность в замене гидравлического привода загрузочного портала на электропривод с асинхронным двигателем.

Среди электроприводов наибольшее применение в порталных манипуляторах нашли электроприводы с вентильным двигателем. Ротор вентильных двигателей состоит из постоянных магнитов, которые для обеспечения высоких значений магнитной индукции изготавливают из редкоземельных металлов. Это обстоятельство обуславливает значительно большую стоимость электропривода с вентильным двигателем в сравнении с электроприводом на базе асинхронной машины, а также более высокие эксплуатационные расходы в процессе обслуживания.

Целью выпускной квалификационной работы является повышение надежности и снижение эксплуатационных расходов при работе привода движения загрузочного портала балансировочной станка для центровки коленчатых валов, путем разработки и внедрения асинхронного электропривода с векторным и микропроцессорным управлением.

## 1 Анализ состояния электроприводов и перспективы их применения в грузозачерпывающих порталах

Электрический привод и его область применения на производстве, на бытовом уровне и в транспорте постоянно растет. Важно отметить то, что область применения электропривода довольно обширна, он может использоваться для осуществления экономии энергии при управлении производственными процессами.

Промышленные скачки в развитии зачастую и определяют все более растущее значение автоматизированного электропривода, как фундамент энергетической автоматизации процессов на производстве. Одним из основных потребителей электрической энергии в настоящее время является электрический привод. В наши дни, подавляющее количество вырабатываемой электроэнергии, потребляют именно электрические двигатели. Из этого следует, что продуктивность технологий направленных на энергосбережение в подавляющей мере зависит от продуктивности электропривода.

Проблема целесообразного расхода электроэнергии, одна из приоритетных и важных проблем современного общества. Производство высоковырабатывающих, малогабаритных, к тому же экономичных систем привода, в данный момент является сугубо важным вектором развития техники нашего времени. Данная проблематика требует к себе особого внимания и проведения более подробных исследований и мероприятий, направленных на повышение коэффициента полезного действия электроприводов, а так же на осуществления контроля над технологическими машинами которые значительно уменьшают трату электроэнергии.

Сейчас же следует указать на такие перспективы развития электропривода: все более и более понижается доля систем привода с двигателями постоянного тока и неуклонно возрастает часть системных приводов с двигателями переменного тока. С чем это связано? Конечно же с более низкой надежностью и дороговизной коллекторных двигателей постоянного тока, если их сравнивать с

двигателями переменного тока. В данное время электропривод с двигателем переменного тока стремительно занимает доминирующие позиции в промышленности, ранее принадлежавшие электроприводу постоянного тока. Для многих способов применения приводов (компрессоры, вентиляторы, насосы и так далее) нужна совсем не большая амплитуда регулирования скорости (до 1:10, 1:20) и относительно более низкое быстродействие.

Ко всему прочему необходимо использовать традиционные структуры постоянного регулирования. Широкодиапазонные (до 1:0000) быстродействующие привода станков, транспортных средств и роботов, к которым был осуществлен переход обуславливается применением сложных структур переменного управления в более высшей степени. Часть таких приборов составляет порядка 5% от всего числа, и она неуклонно растет.

Сейчас на основе систем векторного управления разработана линия приводов с прямым цифровым управлением, с помощью которого можно управлять моментом. Предельно высокое быстродействие контуров тока, будет важной обособленной частью всех этих решений, реализованных как правильно на основе на основе принципов нечетной логики (фаззи-логики) на основе которых работают цифровые релейные регуляторы.

Системы прямого цифрового управления моментом направлены прежде всего на транспорт, а также на применение в кранах, лифтах, манипуляторах и роботизированной технике.

К коренной инверсии и к коренному упрощению конструкций механизмов, а так же рабочих машин привело обширное использование быстродействующих управляемых комплектных систем. Перспектива развития электроприводов подразумевает следующее:

- непосредственная близость источника движения к рабочему механизму, которая приводит к упрощенству конструкции механических частей привода, повышает ее жесткость, усовершенствовать динамические показатели;
- применение более дешевых асинхронных двигателей, благодаря чему снижаются траты на электрооборудование;



- улучшение силовых преобразователей электроприводов делает возможным получение перспективных характеристик, увеличивает надежность его работоспособности, минимизирует его размеры и облегчает его установку;

- увеличение свойственных функций электроприводов.

В качестве составной части автоматизированного электропривода, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором доминирует по всем сопоставительным критериям

Модернизацию оборудования следует получать путем замены частей электрооборудования машины, только устаревших его частей. Поэтому, основной тенденцией в развитии модернизации является блочно-модульный принцип и его применение. Данный принцип в большей степени удовлетворяет запросы потребителя и уменьшает производственные издержки за счет роста серийности.

Целесообразно производить электроприводы с применением типовых транзисторных преобразователей, в частности транзисторных преобразователей частоты. Использование такого модуля способствует обеспечению плавного пуска и торможения, обеспечивает длительные режимы эксплуатации в конкретном диапазоне изменения скорости вращения и ввод момента, двигателя получения устойчивых скоростей в приводах движения.

К тому же формирования данных диаграмм скорости вращения и момента двигателя в динамических режимах основано на применении законов управления, в частности скалярного, который отличается наибольшей простотой и не требует установки датчиков при управлении асинхронным частотным электроприводом.

Важной уникальностью электропривода в процессе его эволюции является распространение области использования управляемого электропривода, прежде всего за счет количественного и добротного роста частотно-регулируемых электроприводов переменного тока. Повышение уровня внедрения в микропроцессорной технике и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам с внедренным набором специальных периферийных устройств,

сделали бесповоротным развитие массивной замены похожих систем управления приводами на системы прямого цифрового управления.

В настоящее время преимущественно применяются привода с короткозамкнутыми асинхронными двигателями. Однако подавляющее количество данных приводов (около 80%) – нерегулируемые. Поэтому с резким удешевлением статических преобразователей частоты доля частотно – регулируемых асинхронных электроприводов стремительно растет.

Ещё одна отличительная черта современного электропривода это увеличение требований к динамическим и статическим данным электропривода, эскалация и фигурация его назначений, согласованных с управлением технологическими установками и процессами. Эволюция электропривода идёт по дороге формирования систем числового программного управления и эскалации использования ресурсов современной микро - процессорной техники.

Исследуя современные электропривода нужно понимать, что объективной составляющей развития совершенствования электротехнического оборудования является его complication, детерминированное увеличением требований технологических процессов и увеличением потребительских свойств электротехнической продукции. В таких условиях главной целью развития электропривода и его средств управления это более обширное удовлетворение целей по автоматизации рабочих машин, механизмов и технологических линий.

Стоит заметить, что наиболее обширно данные возможности становятся реализуемы при применении современных регулируемых электроприводов с микропроцессорным управлением. Сейчас основной целью является увеличение области использования регулируемых электроприводов переменного тока.

Удачное решение данной задачи допускает увеличить электровооруженность труда, автоматизировать и механизировать различные процессы и технологические установки, и это довольно сильно поднимет производительность труда. В связи с этим требуется решать ряд производственных и научно-технических проблем в сфере электротехники, ведь для развития систем электроприводов нужно усовершенствование составляющих механических передач,

полупроводниковых силовых преобразователей и микроконтроллеров, электрических двигателей.

Совокупное разрешение вопросов улучшения современных электроприводов и электромеханических объединений на данной требует высокой внимательности к созданию и реализации механических преобразователей движения. В наше время усиливается склонность к редукции механических устройств технологического оборудования и осложнения электротехнических компонентов. Именно поэтому приоритетным в наше время современным электроприводом является асинхронный привод с цифровым управлением, система регулирования данного привода выполнена на основе микропроцессора. Модернизация привода портала позволит значительно улучшить технические и экономические показатели всей работы балансировочной машины. Предлагаемый электропривод с АД компактнее по своим размерам, нежели гидравлический.

Асинхронный электропривод может работать фактически бесшумно. После замены гидропривода исключаются лопастные насосы и гидравлические цилиндры для перемещения тележки, поэтому ремонт новой системы управления становится довольно простым. Асинхронный электропривод не опасен для окружающей среды, он экономично использует энергию, так как рабочий цикл происходит с периодическими остановками, при установке электропривода в разы увеличивается КПД, после установки электропривода его настройка осуществляется с пульта оператора, что исключает необходимость настройки регулирования действия клапанов.

Поэтому задачи проекта сводится к следующему:

- 1) Расчёт мощности и выбор двигателя горизонтального движения портала;
- 2) Выбор принципа управления электроприводом, расчет и выбор преобразователя частоты для управления двигателем;
- 3) Определение статических и динамических показателей работы асинхронного электропривода;
- 4) Вопросы безопасности и экономическое обоснование модернизации.

## 2 Система электропривода портала

Электропривод портала балансировочного станка должен обеспечивать циклический режим работы с обеспечением минимального времени переноса заготовок вала в зону обработки и обратный перенос готовых валов. Общее время переноса равно 20 сек. Переходные характеристики перемещения портала должны соответствовать аperiодической кривой. Точность отработки перемещений должна находиться в 1 мм.

На основе анализа систем электропривода в качестве электропривода перемещения портала балансировочной машины выбираем асинхронный электропривод с частотно – векторным управлением.

### 2.1 Структура построения электропривода движения портала

Блок-схема электропривода движения портала (рис.2.1) построена на основе асинхронного двигателя с векторным управлением. Силовая часть схемы содержит преобразователь частоты ПЧ и трёхфазный двигатель с короткозамкнутым ротором М, который через кинематическую схему связан порталом.

Управление двигателем М производится с помощью системы частотно-векторного управления. Измерительная часть системы управления содержит трехфазный датчик статорных токов  $DT$  и наблюдатель состояния НС. Последний обеспечивает вычисление текущих переменных во вращающейся системе координат: токов статора  $i_{S1}$  и  $i_{S2}$ , модуля потокосцепления ротора  $\Psi_r$ , угловой скорости  $\omega$ .

Преобразователь поворота координат ПК служит для преобразования сигналов управления  $u_1$  и  $u_2$  вращающейся системы координат в сигналы управления  $u_{S\alpha}$  и  $u_{S\beta}$  системы координат  $(\alpha, \beta)$ , жестко связанной со статором. Преобразование выполняется по формулам:



номного инвертор напряжения АИ, на основе тиристоров или силовых транзисторов.

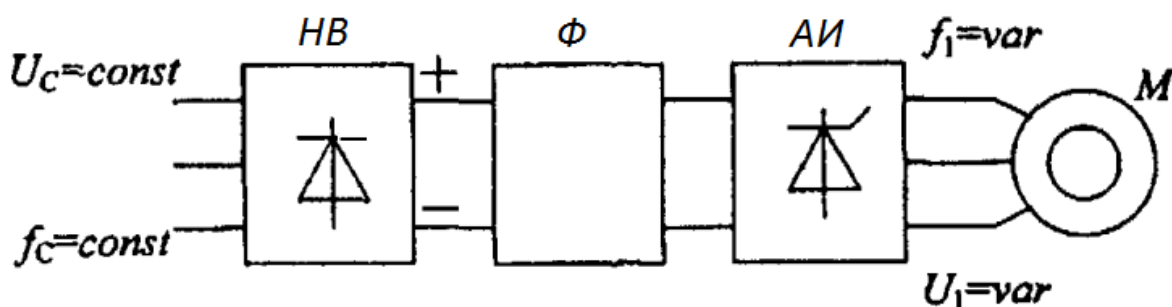


Рисунок 2.2 – Схема транзисторного преобразователя частоты

В преобразователях частоты с промежуточным контуром тока происходит двукратное преобразование энергии: сначала производится выпрямление трехфазного напряжения питающей сети, а затем сглаживание с помощью с помощью фильтра и далее сглаженное напряжение преобразуется инвертором в переменное напряжение заданной амплитуды и частоты. Двухкратное преобразование энергии снижает КПД преобразователя, однако обеспечивает регулирование частоты как в области ниже, так и выше скорости холостого хода. Это обстоятельство обеспечивает широкое применение с преобразователей частоты с промежуточным контуром постоянного тока в электроприводах металлорежущих станков, роботов и манипуляторов, в загрузочных порталах автоматических линий.

При торможении асинхронного двигателя энергия торможения через автономный инвертор напряжения поступает в цепь постоянного тока преобразователя частоты. Поскольку передача энергии в сеть через неуправляемый выпрямитель невозможна, то для предотвращения недопустимого повышения напряжения на емкости фильтра и его возможного пробоя необходимо предусмотреть цепь утилизации энергии или ее передачу в сеть с помощью инвертора, ведомого сетью.

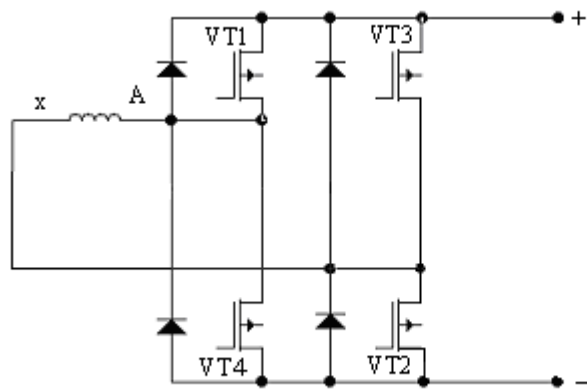


Рисунок 2.3 – Схема однофазного автономного инвертора

Процесс создания синусоидального тока с помощью ШИМ рассмотрим с помощью схемы автономного инвертора (рис. 2.3).

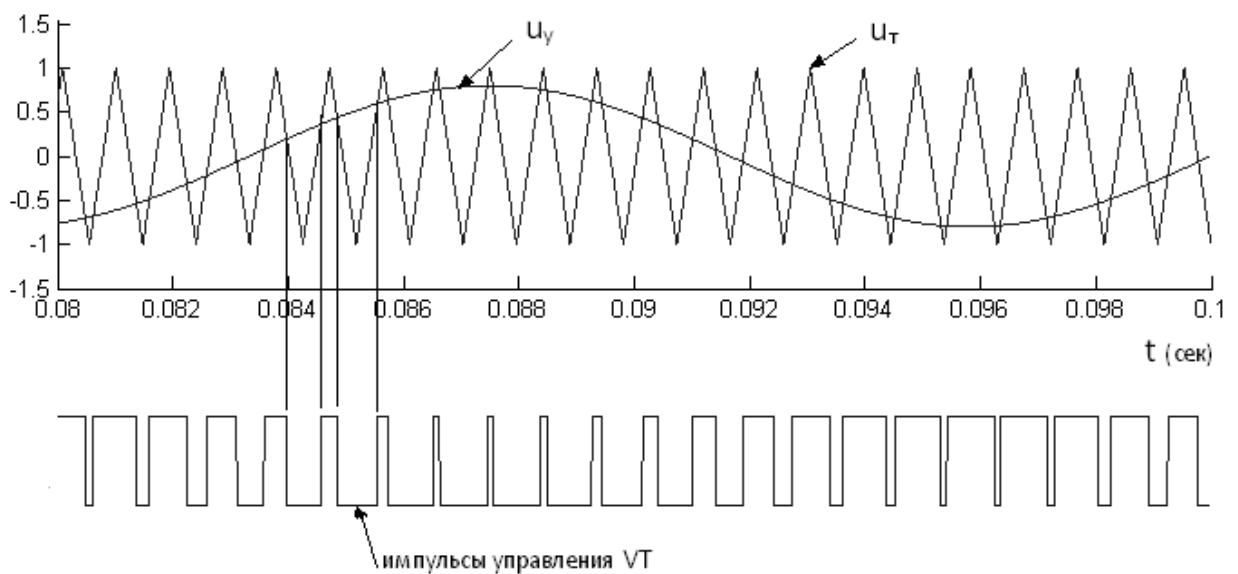


Рисунок 2.4 – Процесс создания импульсов управления транзисторами фазы инвертора при синусоидальной широтно-импульсной модуляции

Применение метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управление силовыми ключами (транзисторами) автономного трехфазного инвертора напряжения (АИН) обеспечивает регулирование величины и формирование ква-

зисинусоидальной кривой выходного напряжения при неизменном значении входного напряжения ( $U_d = const$ ). При этом обеспечивается заданное соотношение напряжение-частота ( $U/f$ ) во всем диапазоне регулирования.

Процесс создания импульсов для формирования кривой фазного напряжения на выходе автономного силового инвертора, нагруженного на обмотку асинхронного двигателя, поясняет диаграмма, приведенная на рис. 2.4. Для создания пакета прямоугольных импульсов, ширина которых изменяется по синусоидальному закону, схема управления вырабатывает высокочастотное напряжение  $u_T$  треугольной формы. В процессе сравнения этого напряжения с напряжением  $u_y$  управления синусоидальной формы заданной частоты вырабатываются импульсы, которые поступают на затворы силовых транзисторов VT1 – VT4. Так как выходные прямоугольные импульсы напряжения автономного инвертора имеют широтно-импульсную синусоидальную модуляцию, то при подключении фазной обмотки в ней протекает квазисинусоидальный ток.

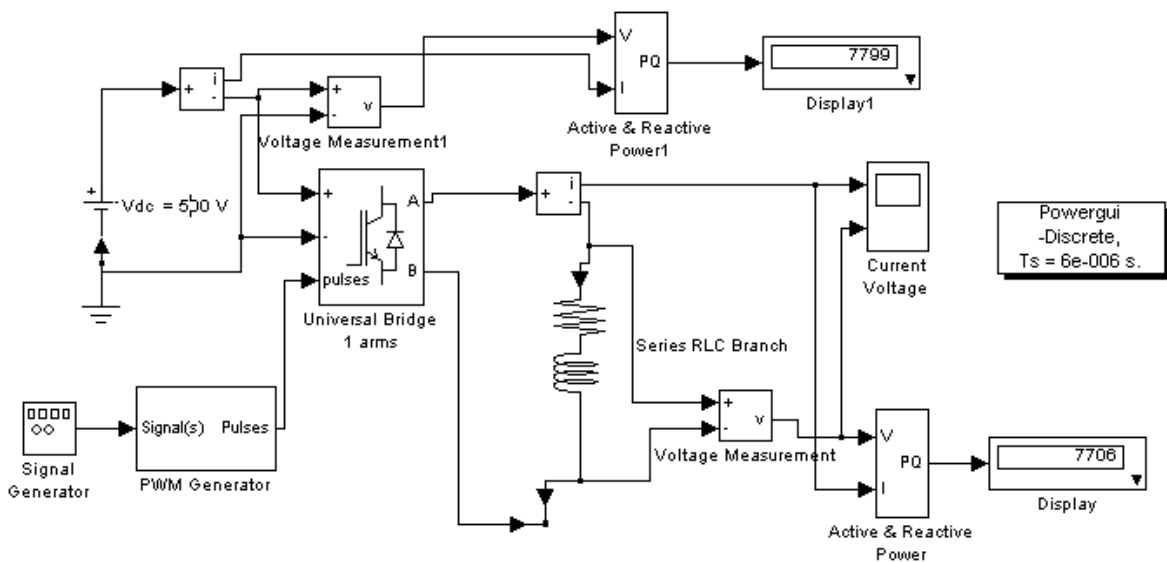


Рисунок 2.5 – Схема имитационной модели транзисторного инвертора и фазы двигателя



Количество прямоугольных импульсов в пакетах выходного напряжения инвертора определяется отношением частоты треугольного напряжения  $u_T$  к частоте напряжения  $u_y$  и может быть представлена как кратность при  $K = \frac{u_T}{u_y}$ .

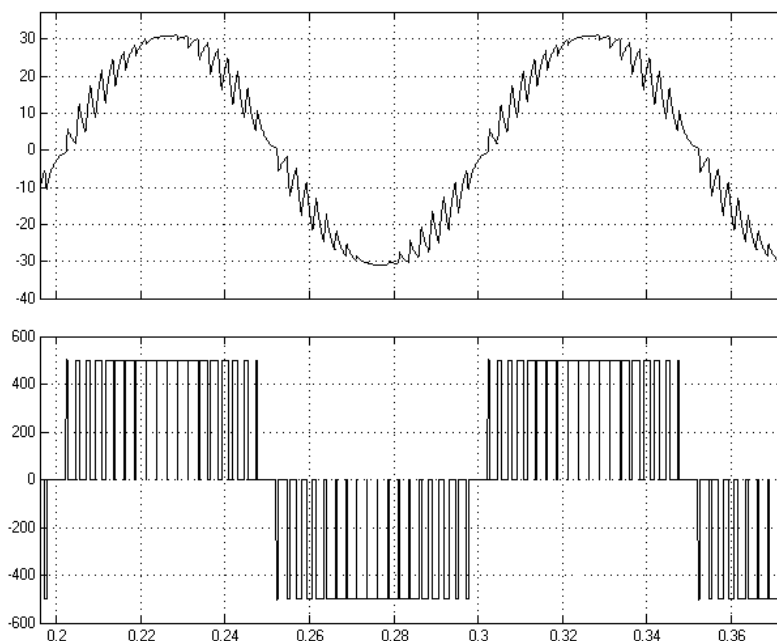


Рисунок 2.6 – Кривые фазного тока и напряжения инвертора при  $\frac{u_T}{u_y} = 20$

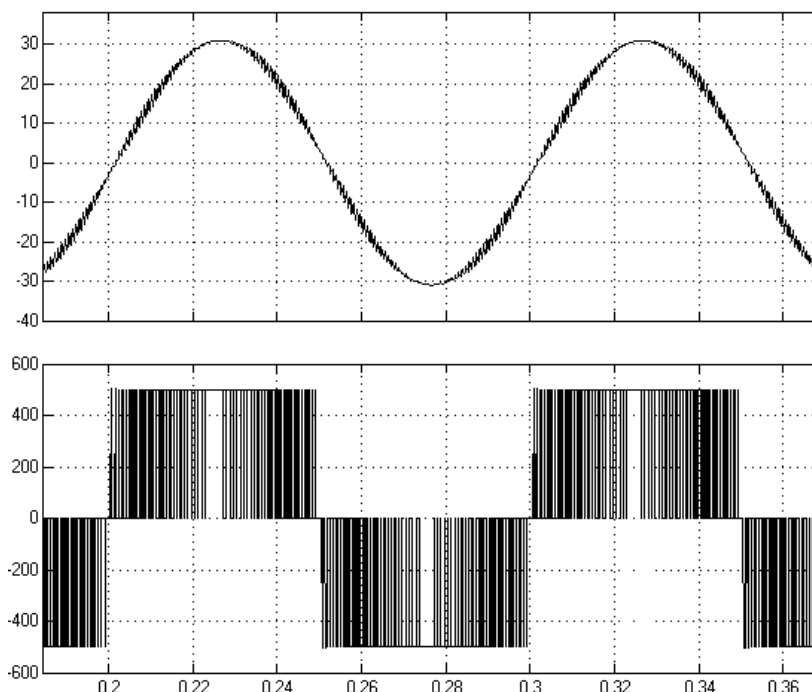


Рисунок 2.7 – Кривые фазного тока и напряжения инвертора при  $\frac{u_T}{u_y} = 60$

Проведем анализ влияния величины  $K$  на форму и спектральный состав тока в обмотках статора асинхронного двигателя. Для исследования применим метод имитационного моделирования в пакете MATLAB & Simulink. Схема имитационной модели транзисторного инвертора и фазы двигателя приведена на рис 2.5.

Схема включает в себя источник постоянного тока  $V_{dc}$ , транзисторный автономный инвертор (Universal Bridge), блок широтно- импульсной модуляции (PWM Generator), генератор для задания частоты (Signal Generator). Имитация обмотки двигателя представлена активно-индуктивной цепью (Series RLC Branch).

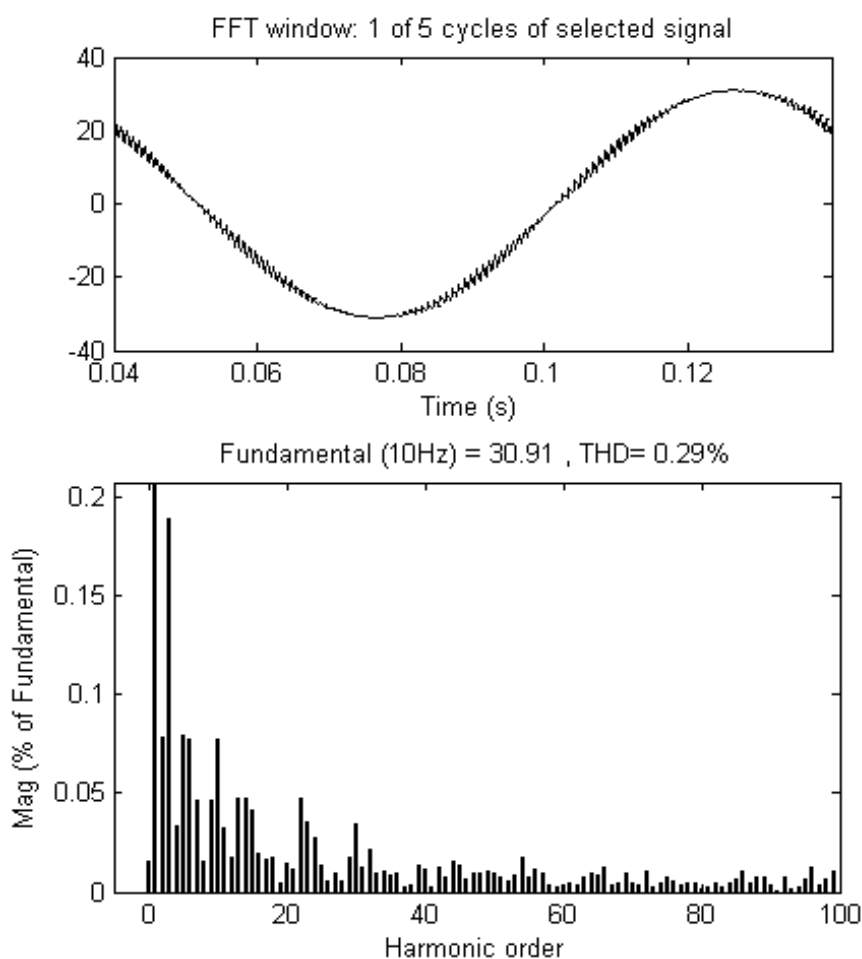


Рисунок 2.8 – Ток фазы (а) и гармонический состав (б) при  $\frac{u_T}{u_y} = 60$

Для снятия осциллограмм используется осциллограф (Curent, Voltage). Гармонический анализ проводится с помощью элемента Powergui. В процессе исследований генератором (Signal Generator) задается частота 10 Гц (сигнал  $u_y$ ), которая является фундаментальной гармоникой.

Кривые фазного тока и напряжения в нагрузке (рис. 2.6) получены с помощью блока (current, voltage). Кривая тока имеет зубчатый вид, поэтому для устранения этого явления нужно увеличить кратность  $K = \frac{u_T}{u_y}$ .

Сравнительный анализ приведенных кривых и графиков (рис. 2.8) показывает, что увеличение кратности  $K$  (с 20 до 60) существенно улучшает вид кривой тока в нагрузке, приближая его к синусоидальной кривой..

Гармонический анализ кривой тока в обмотке асинхронного двигателя свидетельствует, что первая гармоника спектра соответствует амплитуде фундаментальной частоте, а высшие гармоники имеют малый процент. Коэффициент THD соответствует 0,29%.

Посредством измерителей активной и реактивной мощностей Active & Reactive и Display проведены замеры активной мощности на входе инвертора 7799 ВА и на его выходе 7706 ВА. Разность мощностей 93 ВА позволяет вычислить потери мощности в инверторе, которые составляют 1,2%. Таким образом, увеличение частоты переключений, т.е. увеличение  $K$  ведет к увеличению потерь мощности в инверторе, но это увеличение незначительно.

Проведенные исследования свидетельствуют, что в качестве частотного преобразователя в электроприводе портала следует выбрать преобразователь частоты с промежуточным контуром тока и широтно- импульсной модуляцией.

### 3 Кинематическая схема привода портала

Кинематическая схема предназначена для обеспечения возвратно-поступательного движения загрузочного портала в рабочую зону балансировочного станка.

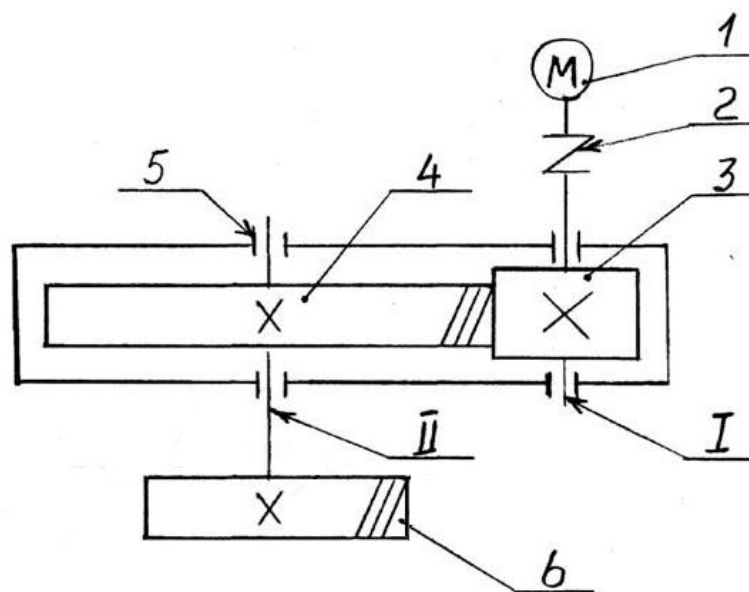


Рисунок 3.1 – Кинематическая схема привода портала

Кинематическая схема (рис . 3.1) содержит следующие элементы: 1 – исполнительный асинхронный двигатель (М); 2 - соединительная муфта вала электродвигателя и вала редуктора; 3 – ведущая шестерня редуктора; 4 – ведомая шестерня редуктора; 5 – подшипники скольжения редуктора и 6 – колесо реечной передачи.

В схеме в качестве соединительной муфты 2 целесообразно применить муфту, обладающую упругими компенсирующими свойствами. Это позволяет уменьшить нагрузки на вал асинхронного двигателя и ведущий вал I редуктора при передаче вращающего момента от двигателя из-за не точности соединения валов. Вращающий момент от ведомой шестерни редуктора передаётся колесу 6 реечной передачи, которое движется по рейке, расположенной неподвижно на балке портала, что обеспечивает горизонтальное движение портала.

#### 4 Расчет мощности и выбор типа двигателя движения портала

Таблица 4.1- Исходные данные для расчета мощности двигателя

№ п/п	Наименование параметра	Условные обозначения	Параметр
1	Масса портала, кг	$m$	420
2	Скорость движения, м/с	$v_{\text{ном}}$	2
3	Допустимое ускорение, м/с <sup>2</sup>	$a$	4
4	Ориентировочная частота вращения вала, об/мин.	$n$	3000
5	Диаметр колеса, мм		0,076
6	КПД механизма, %	$\eta$	80
7	Продолжительность цикла, с		20
8	Время разгона портала, с	$t_{\text{п}}$	0,5
9	Время торможения, с	$t_{\text{т}}$	0,5
10	Время отработки движения портала, с	$t_{\text{р}}$	2,5

#### 4.1 Расчёт усилия горизонтального перемещения портала

##### 4.1.1 Сила трения при движении портала, Н

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{р}} \cdot \frac{G_0 \cdot g \cdot f_{\text{к}}}{D_{\text{к}}}, \quad (4.1)$$

где  $f_{\text{к}} = 0,35 \cdot 10^{-3}$  – коэффициент трения движения колеса кинематической схемы;  $k_{\text{р}} = 2,5$  – коэффициент трения по рейки;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

$$F_{\text{тр}} = 2,5 \cdot \frac{420 \cdot 0,00035}{0,076} = 9,671 \text{ Н}$$

##### 4.1.2 Сила преодоления трения и обеспечения движения портала

$$F_{\text{с}} = F_{\text{тр}} = 9,671 \text{ Н} \quad (4.2)$$

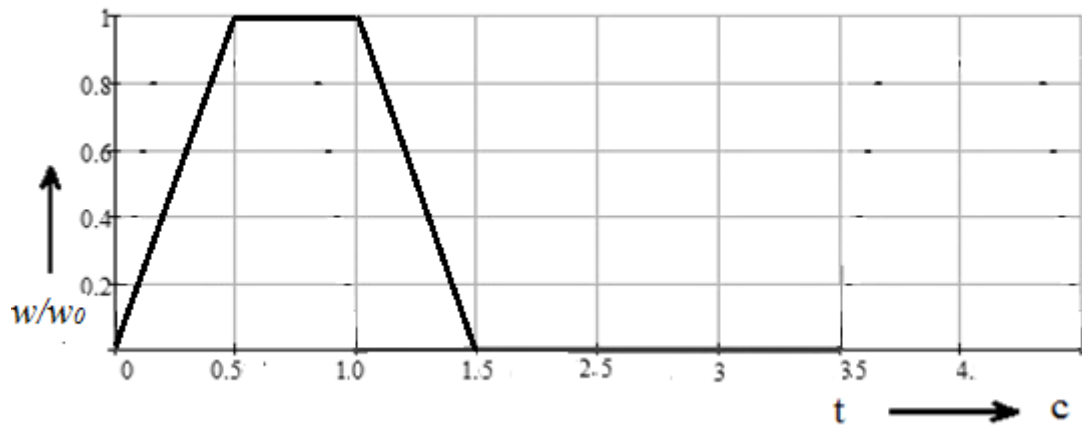


Рисунок 4.1 – Изменение скорости двигателя при обработке рабочего цикла

#### 4.2 Расчёт статического момента на валу двигателя

##### 4.2.1 Угловая скорость вращения асинхронного двигателя, рад/с

$$\omega_D = \frac{2\pi \cdot n}{60}, \quad \omega_D = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с} \quad (4.7)$$

##### 4.2.2 Для определения момента на валу найти радиус приведения, м

$$\rho = \frac{\vartheta}{\omega_D}, \quad (4.8)$$

где  $\vartheta = 2$  – скорость движения портала, м/с.

$$\rho = \frac{2}{314} = 0,00641 \text{ м}$$

##### 4.2.3 Статический момент на валу двигателя, Н·м

$$M_c = \frac{F_c \cdot \rho}{\eta}, \quad (4.9)$$

где  $\eta = 0,8$  – КПД редуктора.

$$M_c = \frac{9,671 \cdot 0,0064}{0,8} = 0,078 \text{ Н·м}$$

#### 4.3 Расчёт динамических моментов при пуске и торможении

##### 4.3.1 Допустимое угловое ускорение портала, $1/\text{с}^2$

$$\varepsilon_D = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{314}{0,5} = 628 \text{ с}^{-2}, \quad (4.10)$$

4.3.2 Момент инерции портала, приведенный к валу асинхронного двигателя, кг · м<sup>2</sup>

$$J_0 = m_0 \cdot \rho^2, \quad (4.11)$$

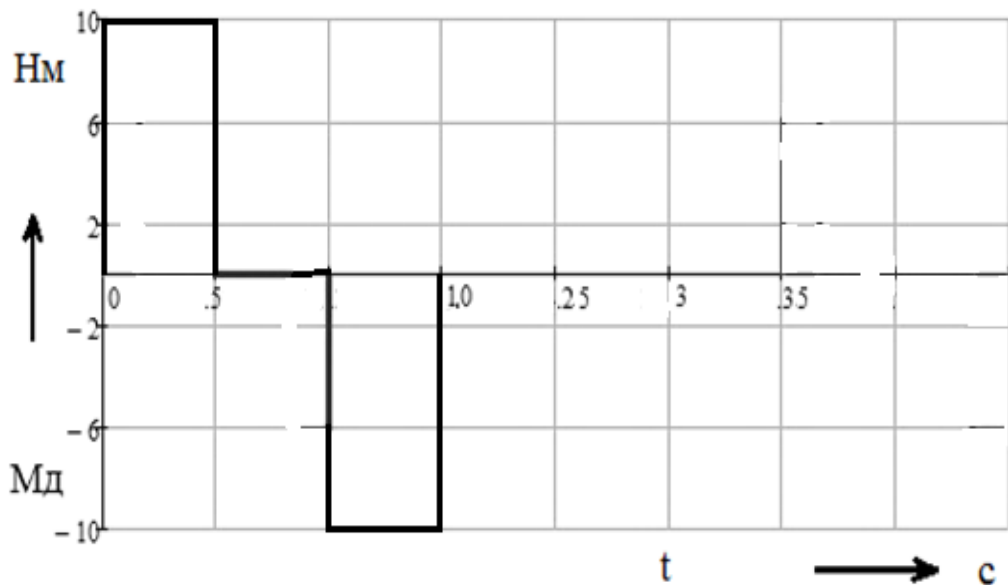


Рисунок 4.2 – Изменение динамических моментов на валу двигателя при пуске и торможении

$$J_0 = 420 \cdot 0,0064^2 = 17,204 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4.3.3 Момент при предельном ускорении (динамический момент), Н · м

$$M_d = \frac{J_0 \cdot \varepsilon_{\text{доп}}}{\eta}, \quad (4.12)$$

$$M_d = \frac{0,0172 \cdot 628}{0,8} = 13,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4.3.4 Момент при пуске портала, Н · м

$$M_{\text{п}} = M_c + M_d, \quad (4.13)$$

$$M_{\text{п}} = 0,078 + 13,5 = 13,58 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4.3.5 Момент при торможении портала, Н · м

$$M_{\text{т}} = M_c - M_d, \quad (4.14)$$

$$M_{\text{т}} = 0,078 - 13,5 = -13,42 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

#### 4.4 Выбор типа двигателя движения портала

Выбор типа двигателя производится, исходя требуемой мощности и обеспечения пускового и тормозного моментов при пуске и торможении. Выбран асинхронный двигатель типа 4А80В2У3: номинальная мощность  $P_{\text{ном}} = 2,2$  кВт; скорость поля  $n_{\text{ном}} = 3000$  об/мин;  $U_{\text{ном}\phi} = 220$  В А;  $\lambda = 2,2$ ;  $J_{\text{дв}} = 21,32 \cdot 10^{-4}$  кг · м<sup>2</sup>;  $M_{\text{max}} = 15,4$  Н· м;  $M_{\text{ном}} = 7$  Н· м;

4.4.1 Синхронная частота вращения поля статора двигателя, с<sup>-1</sup>.

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = 314$$

4.4.2 Число пар полюсов двигателя

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 * 50}{3000} = 1$$

4.4.3 Номинальный вращающий момент, Н· м

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\omega} = \frac{2200}{314} = 7$$

#### 4.5 Проверка выбранного двигателя по перегрузочной способности

4.5.1 Условия проверки

$$M_{\text{п}} < M_{\text{max}} \quad (4.18)$$

4.5.2 Момент двигателя при пуске, Н· м

$$M_{\text{п}} = M_{\text{с}} + M_{\text{д}} = 13,58 \quad (4.19)$$

Двигатель проходит проверку по условиям пуска и перегрузки

#### 4.6 Проверка выбранного двигателя по нагреву

Условие проверки двигателя по нагреву

$$M_{\text{э}} < M_{\text{н}}$$

4.6.1 Определяем эквивалентный момент при отработке цикла

$$M_{\text{э}} = \frac{M_{\text{п}}^2 \cdot t_{\text{п}} + M_{\text{с}}^2 \cdot t_{\text{y}} + M_{\text{т}}^2 \cdot t_{\text{т}}}{t_{\text{p}}}, \quad (4.20)$$



$$M_9 = \frac{13,58^2 \cdot 0,5 + 0,078^2 \cdot 1,5 + -13,42^2 \cdot 0,5}{20} = 3,02 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$3,02 < 7,006 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Условие проверки двигателя по нагреву выполняется. Это подтверждает, что двигатель выбран правильно.

#### 4.7 Расчёт параметров асинхронного двигателя

Таблица 4.1- Справочные данные двигателя типа 4А80В2У3

$P_H$ , кВт	$\omega_H$ , $\text{с}^{-1}$	$\eta$	$\cos \varphi_H$	$\lambda$	$x'_{\mu}$	$x'_1$	$r'_1$	$x''_2$	$r''_2$
2,2	314	0,83	0,87	2,2	2,81	0,0542	0,13	0,084	0,069

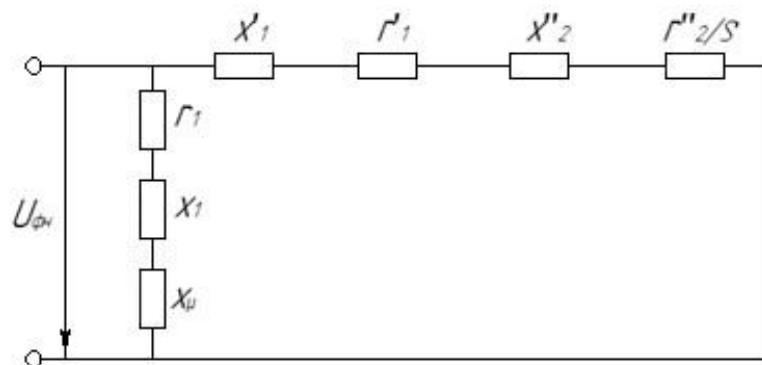


Рисунок 4.3 – Схема для расчета параметров двигателя

в относительных единицах

##### 4.7.1 Ток фазы статора, номинальный, А

$$I_H = \frac{P_2}{3 \cdot U_{\phi H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta} = \frac{2200}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,83} = 4,6161, \quad (4.21)$$

4.7.2 Уточнение индуктивного сопротивление схемы обмотки статора в о.е.

$$x_1 = \frac{2x'_1 \cdot x'_{\mu}}{x'_{\mu} + \frac{x'_{\mu}^2 + 4x'_1 \cdot x'_{\mu}}{x'_{\mu}}}, \quad (4.22)$$

$$x_1 = \frac{2,0,0542 \cdot 2,81}{2,81 + \frac{2,0,0542 \cdot 2,81}{2,81^2 + 4 \cdot 0,0542 \cdot 2,81}} = 0,0531 \text{ о.е.}$$

4.7.3 Уточнение активного сопротивления схемы обмотки статора в о.е.

$$r_1 = r'_1 \cdot \frac{x_1}{x'_1}, \quad (4.23)$$

$$r_1 = 0,13 \cdot \frac{0,0531}{0,0542} = 0,1282 \text{ о.е.}$$

4.7.4 Преобразование относительных единиц в физические по формуле

$$c = \frac{U_{\text{фн}}}{I_{\text{фн}}}, \quad (4.24)$$

$$c = \frac{220}{4,616} = 47,661$$

4.7.5 Определяем сопротивление обмотки статора, применяя выражение

$$R_S = r_1 \cdot c, \quad (4.25)$$

$$R_S = 0,1282 \cdot 47,661 = 6,1012 \text{ Ом}$$

4.7.6 Определяем индуктивность между статором и ротором, используя выражение

$$L_m = \frac{x'_\mu \cdot c}{2\pi f}, \quad (4.26)$$

$$L_m = \frac{2,81 \cdot 47,661}{314} = 0,4251 \text{ Гн}$$

4.7.7 Определяем индуктивность фазы статора, используя выражение

$$L_S = \frac{(x'_\mu + x'_1) \cdot c}{2\pi f}, \quad (4.27)$$

$$L_S = \frac{2,81 + 0,0542 \cdot 47,661}{314} = 0,4333 \text{ Гн}$$

4.7.8 Коэффициенты схемы замещения, с вынесенной ветвью намагничивания имеют вид

$$c_1 = \frac{x'_1}{x_1}, \quad (4.28)$$

$$c_1 = \frac{0,0542}{0,0531} = 1,0191$$

4.7.9 Вычисляем сопротивление обмотки ротора, используя выражение

$$R_r = \frac{r''_2 \cdot c}{c_1^2}, \quad (4.29)$$

$$R_r = \frac{0,069 \cdot 47,661}{1,0191^2} = 3,1673 \text{ Ом}$$

4.7.10 Определяем индуктивность фаз ротора по формуле

$$L_r = \frac{x'_{\mu} + \frac{x''_2}{c_1^2} \cdot c}{2\pi f} = 0,4372 \text{ Гн} \quad (4.30)$$

4.7.11 Вычисляем параметр связи статора по выражению

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}, \quad (4.31)$$

$$k_s = \frac{0,4251}{0,4333} = 0,9822.$$

4.7.12 Вычисляем параметр связи ротора по выражению

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad (5.12)$$

$$k_r = \frac{0,4251}{0,4372} = 0,9734.$$

4.7.13 Определяем переходное активное сопротивление статора по выражению

$$R'_s = R_s + k_r^2 \cdot R_r, \quad (5.13)$$

$$R'_s = 6,1012 + 0,9734^2 \cdot 3,1673 = 9,0992 \text{ Ом}$$

4.7.14 Цепь намагничивания, ее индуктивное сопротивление, Ом

$$x_{\mu} = 2\pi f \cdot L_m, \quad (5.14)$$

$$x_{\mu} = 314 \cdot 0,4251 = 133,452 \text{ Ом}$$

4.7.15 Определяем сопротивление индуктивное рассеяния статора, используя следующее выражение

$$x_{s\sigma} = 2\pi f \cdot L_s - L_m, \quad (4.32)$$

$$x_{s\sigma} = 314 \cdot 0,4333 - 0,4251 = 2,5122 \text{ Ом}$$

4.7.16 Определяем индуктивное сопротивление рассеяния ротора, приведенное к статору, используя следующее выражение

$$x'_{r\sigma} = 2\pi f \cdot L_r - L_m, \quad (5.16)$$

$$x'_{r\sigma} = 314 \cdot 0,4372 - 0,4251 = 3,7681 \text{ Ом}$$

4.7.17 Вычисляем постоянную времени ротора, с

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad (5.17)$$

$$T_r = \frac{0,4372}{3,1673} = 0,1381 \text{ с}$$

4.7.18 Вычисляем постоянную времени статора, с

$$T_S = \frac{L'_S}{R'_S}, \quad (5.18)$$

$$T_S = \frac{0,0201}{9,0992} = 0,002197 \text{ с}$$

## 5 Расчет и выбор преобразователя частоты

### 5.1 Основные элементы силового канала электропривода

Основные составные элементы преобразователя частоты изображены на рисунке 5.1. Состав преобразователя: неуправляемый выпрямитель  $UV$  (диоды VD1 - VD6); конденсатор фильтра  $C$ ; защитное устройство  $UV$ ; автономный инвертор  $UZ$  (транзисторы VT1 - VT6) и обратный выпрямительный диодный мост (VD7 - VD12).

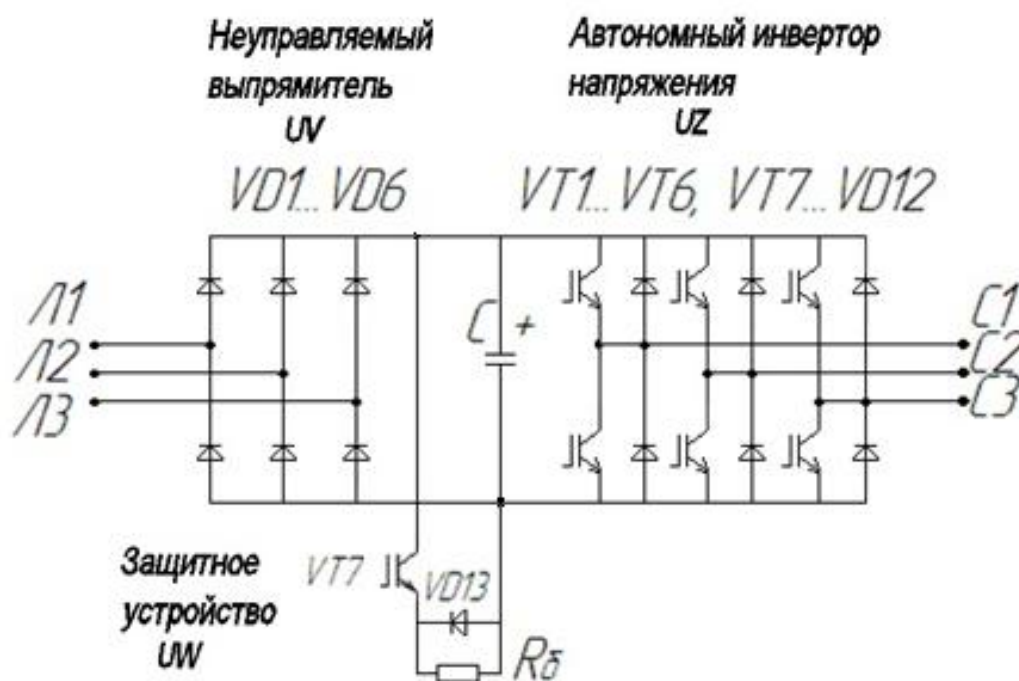


Рисунок 5.1 – Основные элементы преобразователя частоты

Автономный инвертор  $UZ$  содержит три модуля с транзисторными ключами типа IGBT. К средним точкам каждого модуля подключены статорные обмотки двигателя. Так как представленный преобразователь частоты не позволяет рекуперировать энергию при торможении двигателя в сеть, то в нем предусмотрено защитное устройство и двигателем, так как неуправляемый вы-

прямитель UV не дает возможность проводить ток в обратном направлении. При переходе двигателя на низкую скорость или при в процессе торможения асинхронного двигателя электрическая энергия рассеивается в резисторе R<sub>6</sub> защитного устройства, которое с помощью транзисторного ключа VT7 подключается на выход выпрямителя с конденсатором С.

Силовые транзисторы UZ (VT1 – VT6) осуществляют преобразование постоянного тока в переменный требуемой частоты и регулирование амплитуды с обеспечением синусоидальной формы тока в обмотках асинхронного двигателя посредством широтно-импульсной модуляции системы управления преобразователем частоты. Обратный диодный мост VD1 – VD6 защищает силовые транзисторы автономного инвертора от перенапряжений и обеспечивает прохождение тока с двигателя на выход неуправляемого выпрямителя.

Транзисторы автономного инвертора работают на высокой частоте (5 – 10 кГц), что дает возможность обеспечивать широтно – импульсную модуляцию напряжения на выходе преобразователя частоты. Это позволяет получить квазисинусоидальную форму кривой статорного тока в асинхронном двигателе. Приведенный анализ показывает, что рассматриваемый преобразователь частоты целесообразно применить в приводе перемещения портала балансировочного станка.

## 5.2 Расчет элементов преобразователя частоты

5.2.1 Произведем расчет и выбор силовых транзисторов автономного инвертора

### 5.2.1.1 Ток транзисторов автономного инвертора

$$I_{c \max} = \frac{P_H \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta \cdot \cos \varphi_H \cdot \sqrt{3} \cdot U_L}, \quad (5.1)$$

где  $k_1 = 1,2 - 1,3$  – коэффициент запаса по току, необходимый для обеспечения требуемого пуска и торможения электропривода;

$k_2 = 1,1 - 1,2$  – коэффициент, вызванный мгновенной пульсацией тока;

$U_{\text{л}}$  – линейное напряжения асинхронного двигателя, В

$$I_{\text{сmax}} = \frac{2200 \cdot 1,25 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,16}{0,83 \cdot 0,87 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 9,4 \text{ А}$$

5.2.1.2 Выбираем для автономного инвертора силовые транзисторы типа IGBT с номинальным током стока  $I_c \geq I_{\text{сmax}}$ , в виде модуля CM-50MX–12AMITSUBISHIELECTRIK, ток  $I_c = 50 \text{ А}$ , напряжение  $U_{\text{ce}} = 1200 \text{ В}$ .

Таблица 5.2- Основные данные модуля

$U_{\text{ce sat}}$ , В	$t_{\text{c on}}$ , мкс	$t_{\text{c off}}$ , мкс	$t_{\text{rr}}$ , мкс	$U_{\text{ee}}$ , В	$U_{\text{ces}}$	$R_{\text{th c-f}}$ , К/Вт	$R_{\text{th j-c q}}$ , К/Вт	$R_{\text{th j-c r}}$ , К/Вт
2,0 – 2,6	0,1	0,3	0,6	0,9	1200	0,015	0,42	0,69

5.2.2 Вычисляем потери в автономном инверторе по выражению

5.2.2.1 Потери в силовых транзисторах в проводящем состоянии

$$P_{\text{SS}} = I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ce}} \left( \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos \varphi \right), \quad (5.2)$$

где  $I_{\text{ср}} = I_{\text{сmax}} k_1 = 7,5 \text{ А}$  – максимальная амплитуда тока на входе автономного инвертора;

$D = t T = 0,95$  – максимальная скважность;

$U_{\text{ce}}$  – прямое падение напряжения на ключе при его насыщении

( $U_{\text{ce}} = 2,2 \text{ В}$  при  $T_{\text{ja}} = 125 \text{ °C}$ )

$$P_{\text{SS}} = 7,5 \cdot 2,2 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} \cdot 0,87 \right) = 3,52 \text{ Вт}$$

5.2.2.2 Вычисляем потери в транзисторах при переключении, используя выражение

$$P_{\text{sw}} = \frac{1}{\pi \sqrt{2}} \cdot \frac{I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{cc}} \cdot (t_{\text{c on}} + t_{\text{c off}}) \cdot f_{\text{sw}}}{2}, \quad (5.3)$$

где  $t_{\text{c on}}$ ,  $t_{\text{c off}}$  – время протекания переходных процессов по цепи коллектора при открывании и запирации;

$U_{\text{cc}}$  – напряжение на коллекторе транзистора, В;

$f_{sw}$  – частота коммутаций ШИМ равная 5 кГц;

$$P_{sw} = \frac{1}{3,14 \cdot 2} \cdot \frac{7,528 \cdot 540 \cdot 0,1 + 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3}{2} = 0,92 \text{ Вт}$$

5.2.2.3 Определяем суммарные потери в транзисторах инвертора, используя выражение

$$P_Q = P_{SS} + P_{sw}, \quad (5.4)$$

$$P_Q = 3,52 + 0,92 = 4,44 \text{ Вт}$$

5.3.2.4 Определяем потери на диодах обратного выпрямителя инвертора по выражению

$$P_{DS} = I_{ep} \cdot U_{ee} \cdot \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos \varphi, \quad (5.5)$$

где  $I_{ep} = I_{cp}$  – максимальная амплитуда тока через диод обратного выпрямителя инвертора, А;

$U_{ee}$  – падение напряжение на диоде в прямом направлении, В

$$P_{DS} = 7,528 \cdot 0,9 \cdot \frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} \cdot 0,87 = 1,44 \text{ Вт}$$

5.2.2.5 Определяем потери на диодах обратного выпрямителя инвертора при восстановлении запирающих свойств диодов, используя выражение

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot I_{rr} \cdot U_{cc} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw}, \quad (5.6)$$

где  $I_{rr}$  – амплитуда обратного тока через диод обратного моста, А;

$t_{rr}$  – время импульса обратного тока через диод, с

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot 7,528 \cdot 540 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3 = 1,5 \text{ Вт}$$

5.2..2.6 Определяем общие потери на диодах обратного выпрямителя инвертора модуля, используя выражение

$$P_D = P_{DS} + P_{DR}, \quad (5.7)$$

$$P_D = 1,44 + 1,52 = 2,96 \text{ Вт}$$

5.3.2.7 Находим суммарные потери в гибридном модуле по выражению

$$P_T = P_Q + P_D, \quad (5.8)$$

$$P_T = 4,44 + 2,96 = 7,4 \text{ Вт}$$

Произведем расчет и выбор диодов неуправляемого мостового выпрямителя



5.2.4.1 Определяем среднее выпрямленное напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя по выражению

$$U_d = K_{си} \cdot U_L, \quad (5.9)$$

где  $K_{си} = 1,35$  – коэффициента мостовой схемы выпрямления.

$$U_d = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В}$$

5.2.4.2 Вычисляем амплитудное значение среднего выпрямленного тока, используя выражение

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{I_{c \max}}{2} \cdot U_L \cdot \cos \varphi + n \cdot P_T}{U_d}, \quad (5.10)$$

где  $n$  – количество пар диодов в мостовом выпрямителе.

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{9,410}{2} \cdot 380 \cdot 0,87 + 3 \cdot 7,403}{513} = 7,48 \text{ А}$$

5.2.4.3 Определяем максимальное значение тока через диоды выпрямителя по выражению

$$I_{vm} = K_{cc} \cdot I_{dm}, \quad (5.11)$$

где  $K_{cc} = 1,045$  – коэффициент для мостовой трехфазной схемы с использованием LC – фильтра.

5.2.4.4. Определяем максимальное обратное напряжение на диодах моста по формуле

$$U_{vm} = K_{зн} \cdot \sqrt{2} \cdot U_L \cdot K_{сн} \cdot K_c + \Delta U_n, \quad (5.12)$$

где  $K_{зн} \geq 1,15$  – коэффициент требуемого запаса схемы по напряжению;

$K_{сн} = 1,35$  – коэффициент выпрямления для мостовой схемы выпрямителя;

$K_c \geq 1,1$  – коэффициент превышения сетевого напряжения;

$\Delta U_n = 100 - 150 \text{ В}$  – дополнительное напряжение компенсации на коммутационные выбросы напряжения;

$$U_{vm} = 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,35 \cdot 1,1 + 150 = 1,0682 \cdot 10^3 \text{ В}$$

В качестве трехфазной мостовой схемы подходит диодный мост в составе модуля CM50MX – 12A: средний ток выпрямления 50А, обратное напряжение 1200 В.

Произведем расчет потерь в неуправляемом выпрямителе

Определяем тепловые потери в мостовой диодной схеме неуправляемого выпрямителя

$$P_{DV} = m_V \cdot K_{CS} \cdot \Delta U_B \cdot \frac{I_{dm}}{k_1}, \quad (5.13)$$

где  $K_{CS} = 0,577$  – коэффициент выпрямительной схемы;

$m_V$  – количество диодов выпрямительной схемы;

$\Delta U_B \leq 1$  В – прямое падение напряжение на диоде выпрямителя.

$$P_{DV} = 6 \cdot 0,577 \cdot 1 \cdot \frac{7,470}{1,25} = 20,7 \text{ Вт}$$

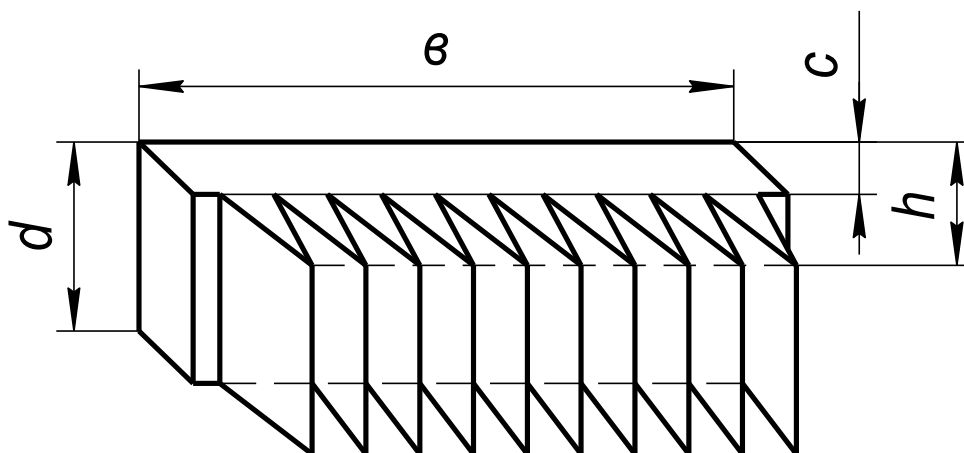


Рисунок 5.5 – Радиатор охлаждения гибридного модуля

Величина суммарных потерь в гибридном модуле указывает на необходимость применения стандартного радиатора для отведения тепла от модуля, путем закрепления модуля на зеркальной поверхности радиатора и создания требуемого усилия прижатия модуля.

Выбор преобразователя частоты

В качестве типового преобразователя частоты может быть выбран преобразователь частоты типа MICROMASTER (ф. SIEMENS), тип 6SE32 – 15 – 8DB40. Преобразователь имеет встроенный фильтр.

Для производства динамического торможения преобразователь содержит – модуль торможения.

Таблица 5.3- Технические параметры радиатора охлаждения

Наименование параметра	Ширина охладителя	Длина охладителя	Высота охладителя вместе с ребрами	Площадь охладителя	Число ребер охладителя
Величина	0,2 м	0,2 м	0,08 м	0,5 м <sup>2</sup>	15

Таблица 5.4- Технические характеристики преобразователя

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	параметр
1	Сетевое напряжение	В	(380 – 500) ±10 %
2	Мощность двигателя	кВт	2,2
3	Выходной ток (ном.)	А	– 5,2
6	Рекомендуемый предохранитель	А	16
7	Рекомендуемое входное сечение кабеля	мм <sup>2</sup>	1,5
10	Входная частота	Гц	47 – 63
12	КПД инвертора	%	97
14	Уровень защиты	-	IP 21

## 6 Расчет контуров регулирования электропривода

Силовая часть схемы содержит трёхфазный двигатель с короткозамкнутым ротором  $M$  и преобразователь  $UF$ , соединенный через трансформатор  $T$  с сетью 380 В, 50 Гц. Управление двигателем  $M$  производится с помощью системы частотно-векторного управления. Измерение статорного тока осуществляется через трехфазный датчик статорных токов  $UA_s$ . Наблюдатель состояния  $NS$  обеспечивает вычисление текущих переменных во вращающейся системе координат: токов статора  $i_{s1}$  и  $i_{s2}$ , модуля потокосцепления ротора  $\Psi_r$ , угловой скорости  $\omega$ .

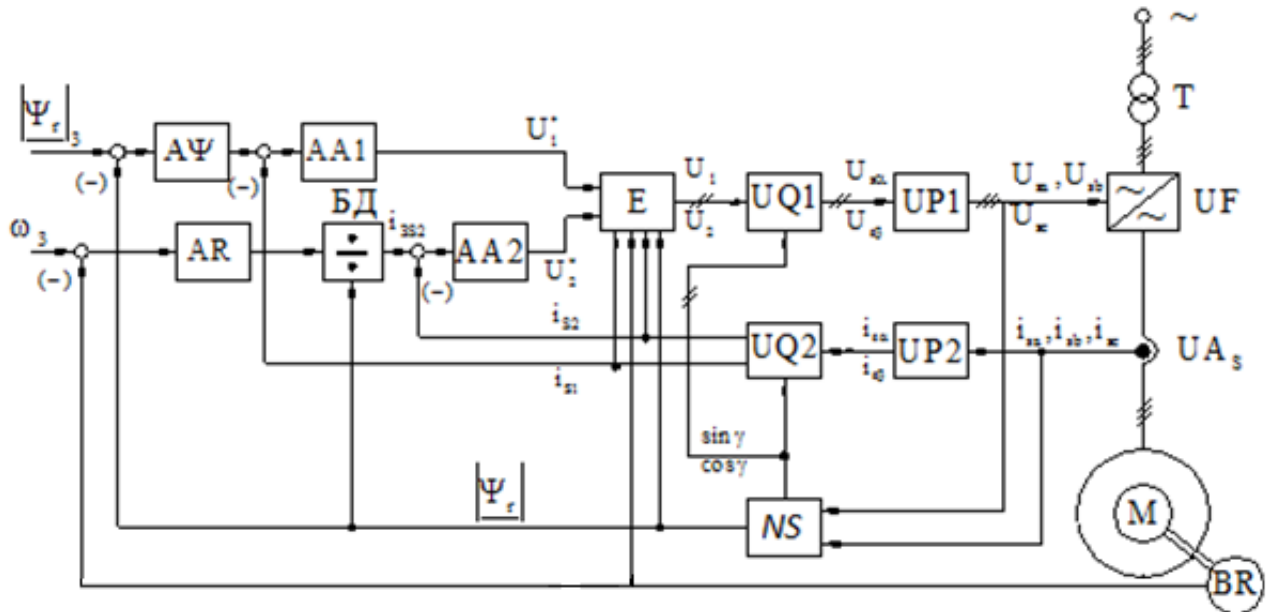


Рисунок 6.1- Блок-схема электропривода с асинхронным двигателем и векторным управлением

С помощью преобразователя  $UP1$  трехфазная система токов преобразуется в двухфазную. Преобразователь поворота координат  $UQ2$  служит для преобразования  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  сигналов управления  $u_1$  и  $u_2$  вращающейся системы координат в сигналы управления  $u_{S\alpha}$  и  $u_{S\beta}$  системы координат  $(\alpha, \beta)$ , жестко связанной со статором. Регулирующая часть системы управления представляет собой

аналог системы подчиненного регулирования. Внутренние контуры регулирования токов по прямой и квадратурным осям  $i_{s1}$  и  $i_{s2}$  с регуляторами токов АА1, АА2. Один из них работает в схеме регулирования модуля потокосцепления ротора через регулятор  $A\psi$ , другой регулятор - скорости  $AR$  работает в схеме регулирования скорости двигателя. Для развязки контуров регулирования в схему включен блок  $E$ .

Расчет контуров регулирования и параметров регуляторов производим при настройке регуляторов на «оптимум по модулю», обеспечивает максимальное быстродействие отработки токовой диаграммы и тахограммы скорости движения портала.

Расчёт коэффициентов передачи и постоянных времени контуров регулирования

Таблица 6.1- Расчет параметров системы регулирования

№ п/п	Параметр	Расчет параметра
1	Вектор тока статора $\bar{i}_s = I_{SH} \cos \phi + j I_{SH} \sin \phi$	$\underline{I}_s = 4,6161 \cdot 0,873 + j 4,6162 \cdot 0,493 =$ $= 4,0161 + j 2,2762$
2	Вектор тока холостого хода $\bar{i}_o = j \frac{U_{SH}}{\omega \cdot L_s}$ ,	$\underline{I}_0 = j \frac{220}{314 \cdot 0,433} = j 1,618 \text{ А}$ $\underline{\psi}_0 = 0,425 \cdot j 1,618 = j 0,688 \text{ Вб}$
3	Потокосцепление ротора $\underline{\psi}_r = \frac{1}{K_r} \cdot \underline{\psi}_0 - L_{\sigma r} \cdot \underline{i}_s$ ;	$\underline{\psi}_r = \frac{1}{0,973} \cdot j 0,688 - 0,012 \cdot$ $4,016 + j 2,276 = j 0,680 - 0,048$ <b>Вб</b>
4	Максимальное значение модуля потокосцепление ротора $\Psi_{rm} = \sqrt{2} \cdot \psi_r$	$\psi_{rm} =$ $\sqrt{2} \cdot \sqrt{0,680^2 - 0,048^2} = 0,959$ <b>Вб</b>

Продолжение таблицы 6.1

5	<p>Коэффициент передачи датчика потокосцепления <math>U\Psi</math></p> $k_{\Psi} = \frac{U_{\Psi m}}{\Psi_{rm}}$	$k_{\Psi} = \frac{5}{0,959} = 5,214$
6	<p>Коэффициент передачи датчика тока <math>UA</math></p> $k_T = \frac{U_{Tm}}{I_{Sm}}$	$k_T = \frac{5}{2,2 \cdot \bar{2} \cdot 4,616} = 0,348$
7	<p>Коэффициент усиления транзисторного инвертора</p> $k_{\Pi} = \frac{k_z \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\phi H}}{U_H}$	$k_{\Pi} = \frac{1,13 \cdot \bar{2} \cdot 220}{5} = 70,315$
8	<p>Параметры регулятора тока.</p> $T_S = \frac{L'_S}{R'_S} = \frac{\sigma \cdot L_S}{R_S + k_r^2 \cdot R_{\gamma}}$ $T_{ИТ} = \frac{2 \cdot T_{\mu} \cdot k_{\Pi} \cdot k_T}{R'_S}$	$\tau_T = T_S = 0,002198 \text{ сс}$ $, T_{ИТ} = \frac{2 \cdot 0,0005 \cdot 70,315 \cdot 0,348}{9,099} = 0,016$
9	<p>Параметры регулятора потокосцепления.</p> $T_r = \frac{L_r}{R_r} ; \varepsilon = \frac{R'_S}{R_S}$ $T_{И\Psi} = \frac{4T_{\mu} \cdot \varepsilon \cdot L_m \cdot k_{\Psi}}{k_T}$	$\tau_{\Psi} = T_r = 0,138 \text{ с,}$ $\varepsilon = \frac{9,099}{6,101} = 1,491 \text{ с,}$ $T_{И\Psi} = \frac{4 \cdot 0,0005 \cdot 1,491 \cdot 0,425 \cdot 5,214}{0,348} = 0,019 \text{ с}$
10	<p>Коэффициент передачи датчика скорости <math>k_c = \frac{U_{cm}}{\omega_0}</math></p>	$k_c = \frac{5}{314} = 0,0159 \frac{B}{\text{рад/с}}$
11	<p>Параметры регулятора скорости</p> $k_{pc} = \frac{J \cdot k_T}{6 \cdot k_r \cdot T_{\mu} \cdot k_c \cdot p_{\Pi} \cdot \Psi_r},$ $T_{ис} = \frac{12 \cdot T_T^2 \cdot p_{\Pi} \cdot k_r \cdot k_c \cdot \Psi_{rm}}{k_T \cdot J},$	$k_{pc} = \frac{0,017 \cdot 0,348}{6 \cdot 0,973 \cdot 0,0005 \cdot 0,0159 \cdot 1 \cdot 0,959} = 24,75 T_{ис} =$ $\frac{12 \cdot 0,001^2 \cdot 1 \cdot 0,973 \cdot 0,0159 \cdot 0,959}{0,348 \cdot 0,00213} = 0,0002402$

Математическая модель асинхронного электропривода

Определение статических и динамических характеристик произведем на основе моделирования системы электропривода.

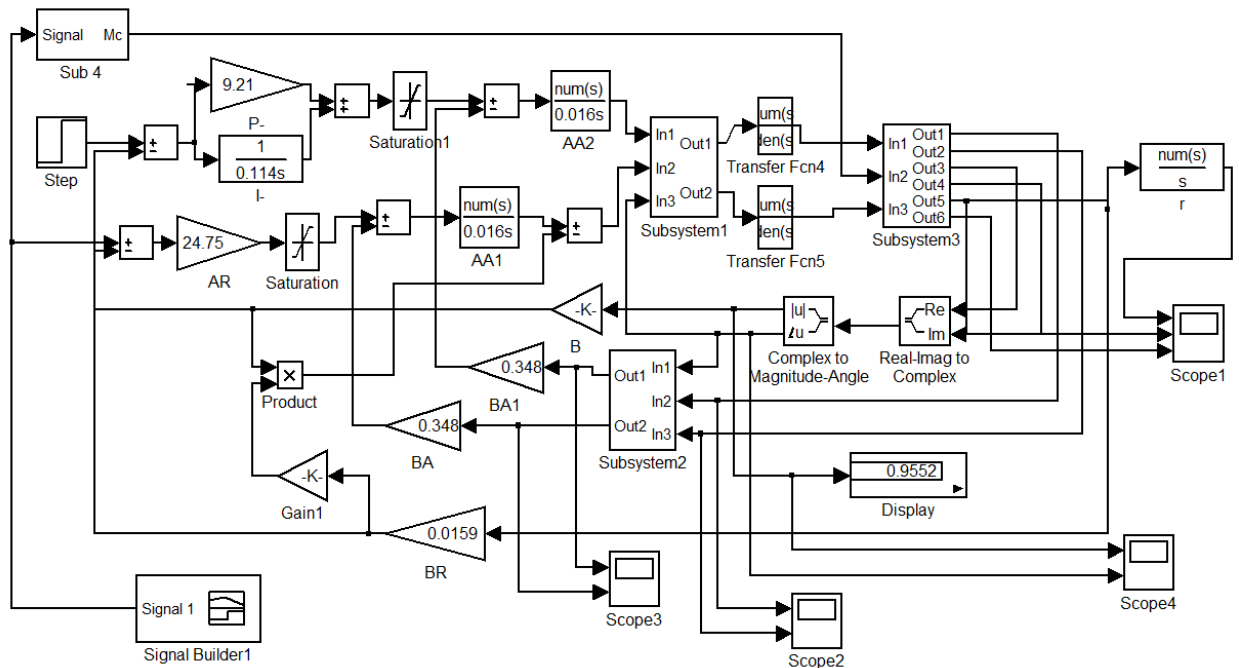


Рисунок 7.1 – Математическая модель электропривода с векторным управлением

Схема модели асинхронного электропривода с векторным управлением и преобразователями координат приведена на рис. 7.1. Схема содержит свернутую модель асинхронного двигателя (Subsystem 3), блоки прямого и обратного преобразования координат  $(\alpha, \beta)$  и  $(1, j2)$  (Subsystem 2 и Subsystem 1), модель наблюдателя переменных регулирования, канал потокосцепления ротора  $\psi_r$  и канал управления скоростью двигателя  $\omega$ . Координатный преобразователь (Subsystem 2) осуществляет преобразование статорных токов  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ . Наблюдатель переменных регулирования (блоки Real – Imag to Complex) преобразует  $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$  и вычисляет сигналы  $\psi_r$  и  $\gamma$ , которые определяют состояние вектора потокосцепления ротора.

Регулирование  $i_{s1}$  обеспечивает регулятор АА2, параметры которого настроены на «оптимум по модулю». Контроль тока производится через преобразователь ВА. Регулятор модуля потокосцепления в схеме модели состоит из двух регуляторов, соединенных параллельно:  $P - A\psi$  - пропорциональный регулятор и  $I - A\psi$  - интегральный регулятор.

Контур регулирования скорости асинхронного состоит из внутреннего контура регулирования квадратурной  $i_{s2}$  составляющая статорного тока и регулирования скорости вращения ротора. Регулирование производится с помощью регулятора АА1 и регулятора АR, параметры которых настроены на «оптимум по модулю». Для ограничения тока при пуске и торможении канал содержит блок токоограничения Saturation.

Модель преобразователя частоты создается, как и модель асинхронного двигателя, в неподвижной системе координат. Модель системы управления, включающая в себя регуляторы тока АА, регулятор модуля потокосцепления ротора и регулятор скорости, выполняется во вращающейся системе координат. Это дает возможность применить для расчетов принципы подчиненного регулирования и использовать в контурах стандартные настройки регуляторов на «оптимум по модулю», что дает возможность повысить быстродействие системы электропривода.

Модель асинхронного электродвигателя (Subsystem 3)

Система уравнений асинхронного двигателя в неподвижной системе координат ( $\alpha, \beta$ ) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{d\alpha} &= U_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha}; & \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\alpha} &= -R_r \cdot i_{r\alpha} - p_{II} \cdot \omega \cdot \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{d\alpha} &= U_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta}; & \frac{d\psi_{r\beta}}{d\alpha} &= -R_r \cdot i_{r\beta} + p_{II} \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Магнитные потокосцепления уравнения (7.1) определим через токи, что значительно упрощает построения модели двигателя при математическом моделировании



$$\left. \begin{aligned} i_{S\alpha} &= \frac{1}{L'_S} \cdot \psi_{S\alpha} - \frac{k_r}{L'_S} \cdot \psi_{r\alpha}; & i_{r\alpha} &= -\frac{k_S}{L'_r} \cdot \psi_{S\alpha} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\alpha}; \\ i_{S\beta} &= \frac{1}{L'_S} \cdot \psi_{S\beta} - \frac{k_r}{L'_S} \cdot \psi_{r\beta}; & i_{r\beta} &= -\frac{k_S}{L'_r} \cdot \psi_{S\beta} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

где  $L'_S = \sigma \cdot L_S$ ,  $L'_r = \sigma \cdot L_r$ ,  $k_S = \frac{L_m}{L_S}$  и  $k_r = \frac{L_m}{L_r}$  - соответственно коэффициенты связи статора и ротора;

$$\sigma = \left( 1 - \frac{L_m^2}{L_S \cdot L_r} \right) = (1 - k_S \cdot k_r) - \text{коэффициент рассеяния}$$

Выражение вращающего момента двигателя представляем через произведение потокосцеплений и токов статора в осях ( $\alpha$ ,  $\beta$ ). Такой подход обеспечивает существенное упрощение записи уравнения электромагнитного момента, что ведет к рациональному построению схемы математического моделирования асинхронного двигателя.

$$M_{\mathcal{D}} = \frac{3}{2} \cdot p_{II} \cdot (\psi_{S\alpha} \cdot i_{S\beta} - \psi_{S\beta} \cdot i_{S\alpha}), \quad (7.3)$$

Уравнение движения двигателя, когда инерционные элементы кинематической схемы портала приведены к валу двигателя, имеет вид:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot (M_{\mathcal{D}} - M_C), \quad (7.4)$$

где  $J_{\Sigma}$  - приведенный момент инерции двигателя и инерционных элементов кинематической схемы портала;

$M_C$  - статический момент нагрузки.

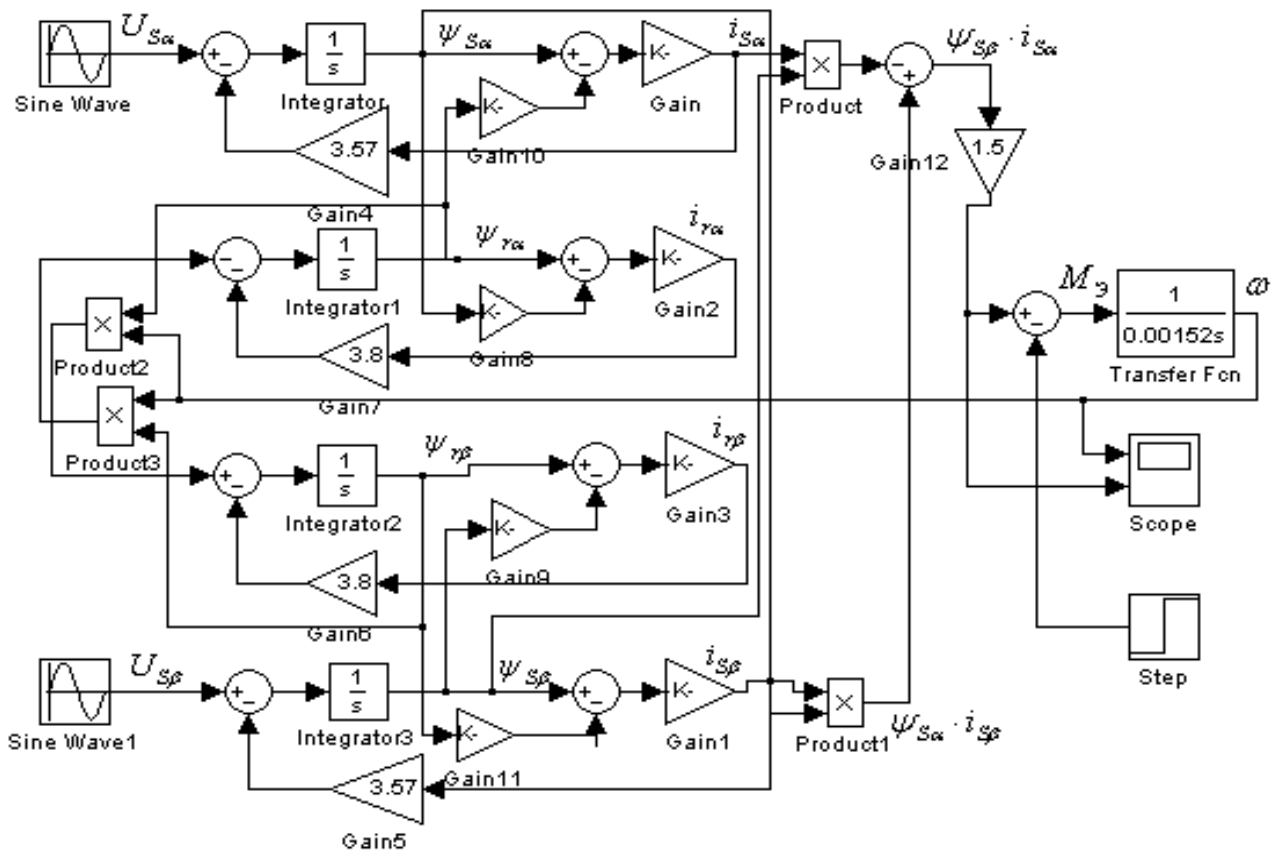


Рисунок 7.2 – Блок - схема модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в координатной системе  $(\alpha, \beta)$

Проверку показателей качества процессов и работоспособности разработанной модели (рис. 7.1) произведем при подаче на вход регулятора скорости AR ступенчатого напряжения через задатчик интенсивности SJ.

На рис. 7.3 изображены кривые скорости асинхронного двигателя  $\omega$  и его вращающего момента  $M$ . Процесс пуска электропривода осуществляется путем подачи напряжения  $U_{з\psi} = 5 В$ . Это значение соответствует значению потокосцепления  $\psi_{rm} = 0,959 Вб$ . Затем с задержкой времени  $t = 0,05$  сек, которая необходима для того, чтобы магнитный поток двигателя достиг номинального значения, подается напряжение для регулирования скорости двигателя  $U_{зс}$ . Время задержки устанавливается в блоке задатчика интенсивности SJ модели. При регулировании напряжение  $U_{зс}$  изменяется от нуля до  $U_{з0} = 5В$ , что соответствует скорости  $\omega = 314 рад/с$  установившегося режима.

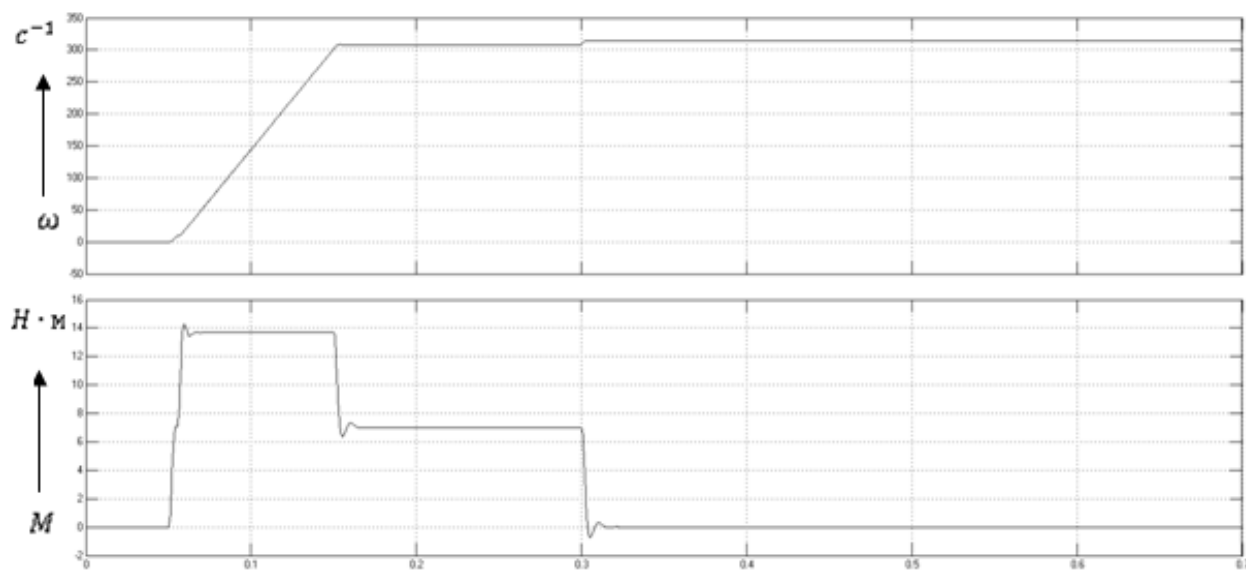


Рисунок 7.3 – Изменение скорости и вращающего момента электропривода

Процесс пуска осуществляется при максимальном токоограничении, поэтому вращающий момент двигателя  $M$  поддерживается постоянным. В результате этого происходит линейный рост скорости портала. Время переходного процесса равно 0,14 сек. При отсутствии перерегулирования. Отрезок времени 0,16 – 0,3 сек. соответствует установившемуся режиму работы. Здесь скорость вращения равна  $314 \text{ рад/с}$ , а момент двигателя равен номинальному, т.е.

$$M_n = 7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При сбросе, (момент времени  $t = 0,3$  сек) номинальной нагрузки до нуля скорость вращения вала возрастает до 320 рад/с., т.е соответствует режиму холостого хода. Жесткость механических характеристик получилась достаточная, так как изменение скорости составляет всего 6 рад/с.

#### Блок Signal Builder 1

Блок обеспечивает программный сигнал управления электроприводом. Временная характеристика сигнала показана на рис.7.4. Она состоит из отрезка пуска, равномерного движения, торможения до ползучей скорости, движение ползучей скорости и окончательного торможения.

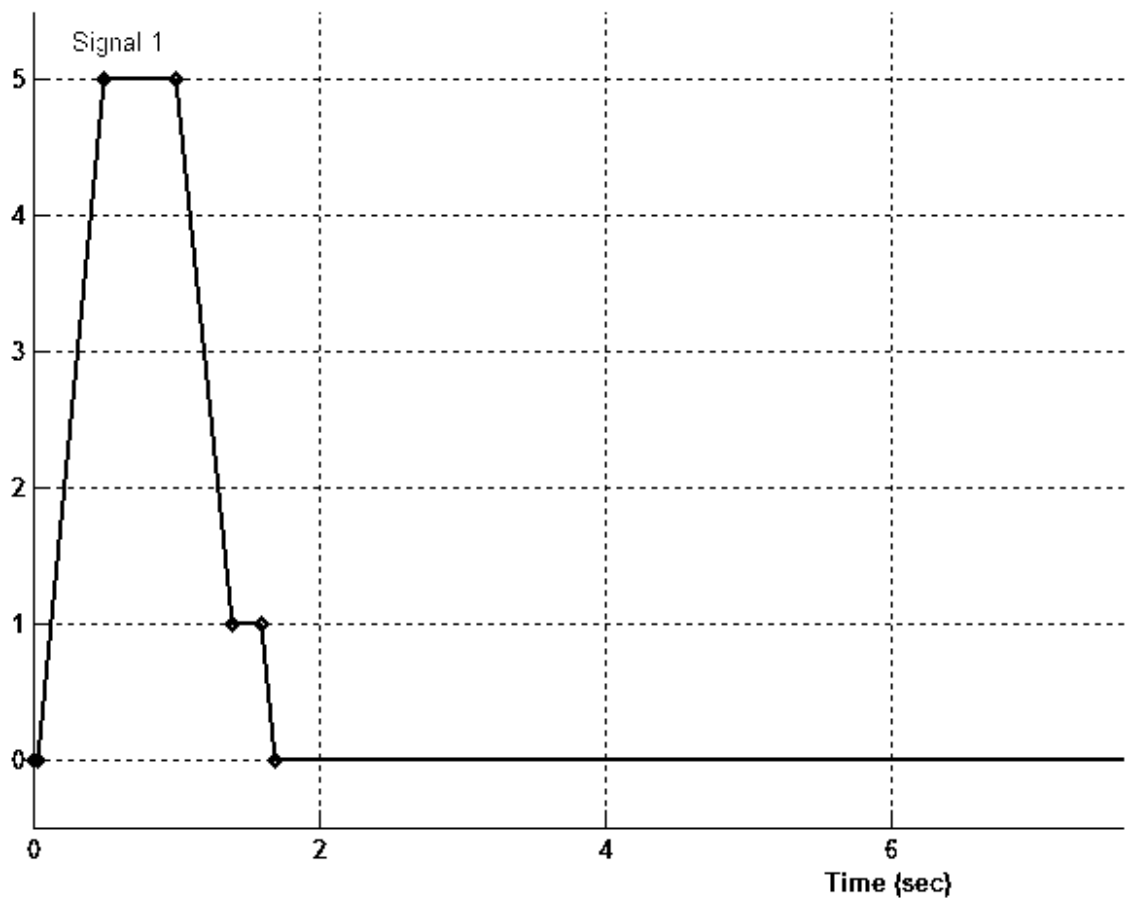


Рисунок 7.4 – Временная программная характеристика блока Signal Builder 1

Определение статических и динамических характеристик системы электропривода.

На рис. 7.5 представлены осциллограммы изменения положения портала  $x$ , скорости двигателя  $\omega$  и вращающего момента  $M$  асинхронного двигателя при обработке сигнала, поступающего с блока Signal Builder 1.

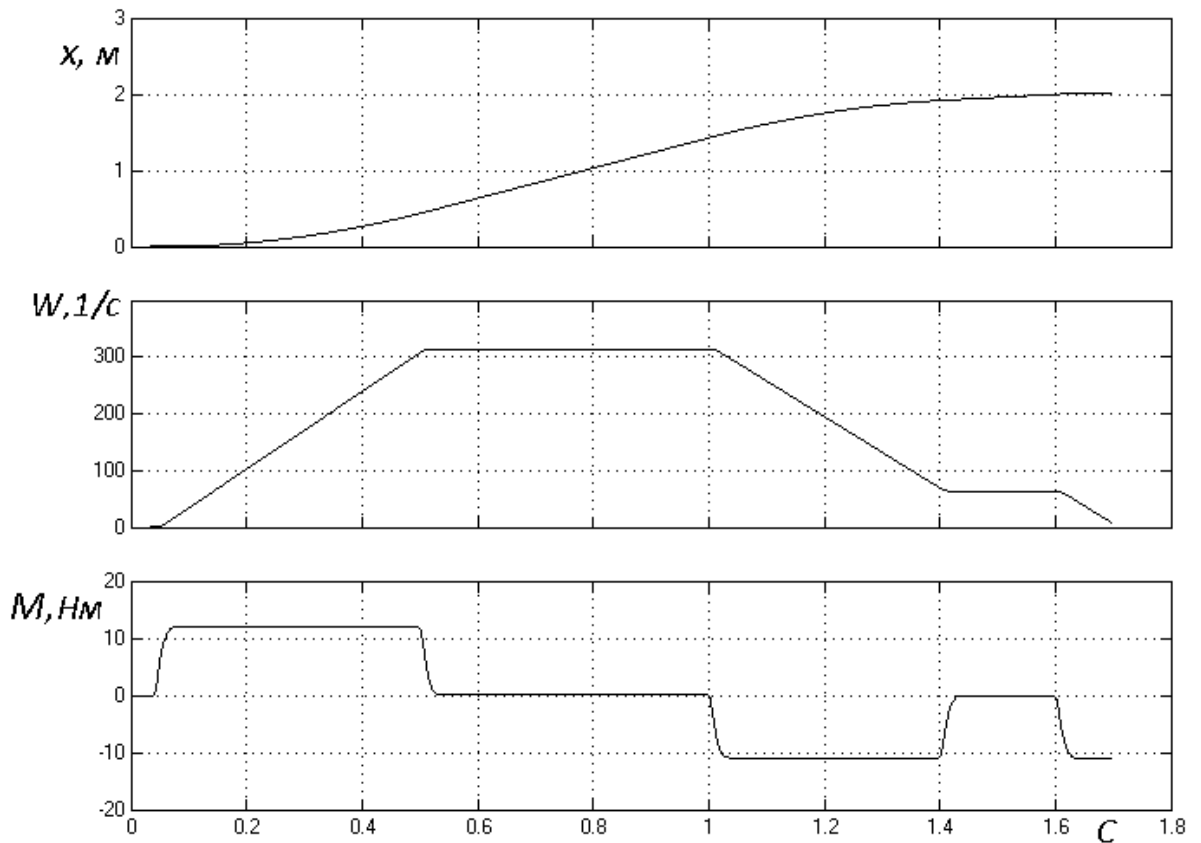


Рисунок 7.5 – Осциллограммы перемещения портала, скорости и электромагнитного момента электропривода при обработке сигнала блока Signal Builder 1

Напряжение с блока Signal Builder 1 подается на вход AR модели с задержкой равной времени  $t = 0,05$  сек, затем напряжение изменяется во времени согласно характеристике (см. рис. 7.4). Анализ осциллограмм показывает: скорость вращения ротора достигает значения  $\omega = 314 \text{ рад/с}$  за время  $t = 0,5$  сек., затем совершается равномерное движение и в момент времени  $t = 1,0$  сек. производится торможение до ползучей скорости  $\omega = 51 \text{ рад/с}$ . После чего осуществляется завершающее торможение и остановка при  $t = 1,7$  сек. Моменты на валу двигателя равны расчетным, обработка перемещения происходит без пере-регулирования.

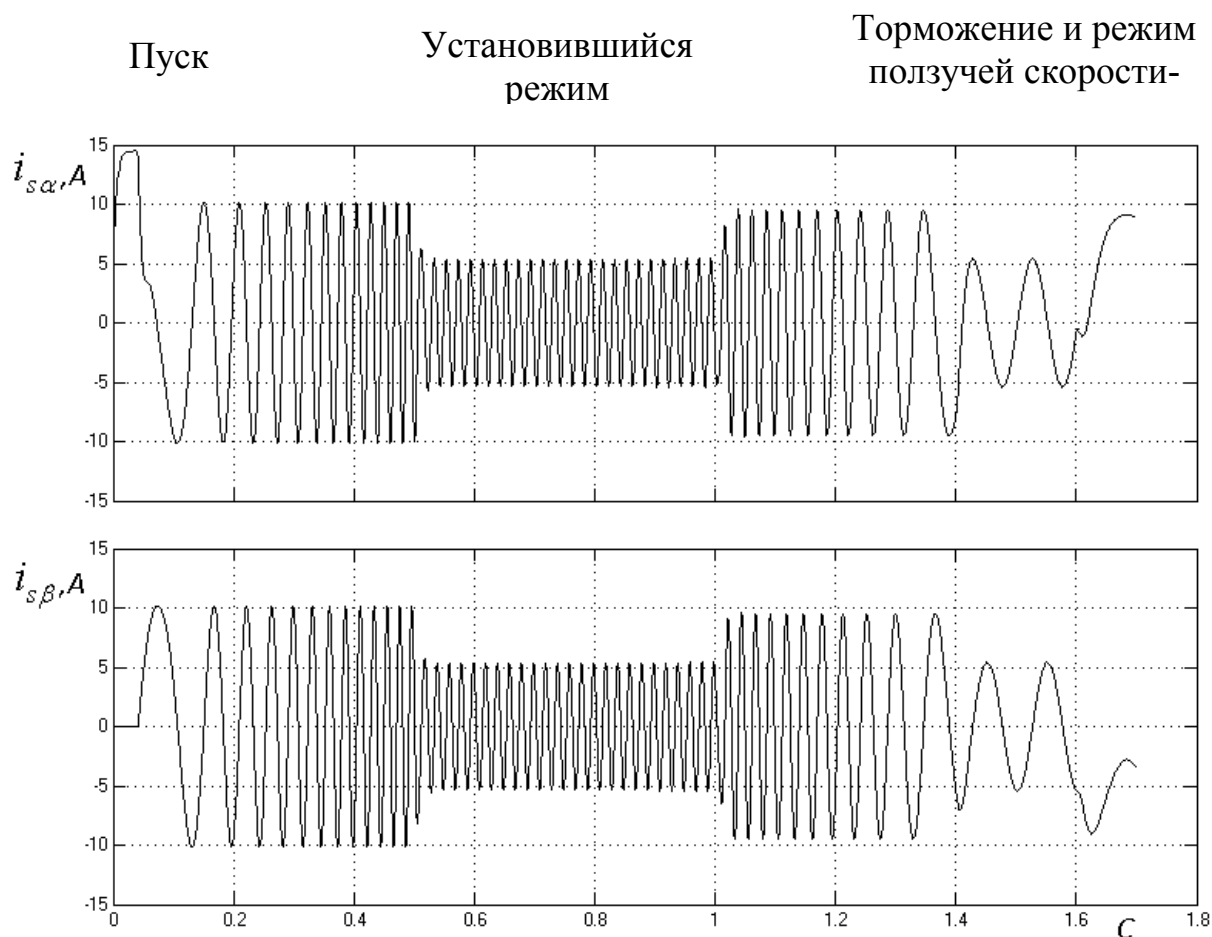


Рисунок 7.6 – Токи статора двигателя в координатной системе  $\alpha, j\beta$

На рис. 7.6 представлены осциллограммы токов  $i_{s\alpha}$  и  $i_{s\beta}$  в статоре координатной системы  $(\alpha, \beta)$ , полученные с помощью модели для пуска, при установившейся работе, при торможении и при ползучей скорости движения. Полученные значения соответствуют результатам, полученным в ходе расчета статических и динамических характеристик.

В процессе моделирования установлено, что система векторного управления асинхронным электроприводом обрабатывает временную программную характеристику блока Signal Builder 1. При отработке программы портал перемещается на 2 м за время 1,7 сек. При этом перемещение происходит без переуправления, что соответствует заданным требованиям.

## 8 Разработка соединительной муфты

Соединительные муфты применяют для соединения двух валов различных механизмов и устройств. В данном случае соединительная муфта предназначена для соединения вала асинхронного двигателя с ведущим валом редуктора кинематической схемы движения портала, чтобы обеспечить надежную передачу вращающего момента от двигателя на редуктор.

Существует большое число муфт, которые применяют в различных машинах, станках и механизмах. Они являются важными элементами сборочными конструкциями и в многом определяют надёжность и долговечность работы всего станка, машины и механизма. В большинстве случаев конструкция соединительной муфты состоит из двух частей, одна из них помещается на вал асинхронного двигателя, другая часть помещается на ведущий вал редуктора портала. Сравнительно небольшая несоосность порождает возникновение биений и вибраций, поэтому от соединительной муфты требуется наличие высоких компенсирующих свойств. Соединительная муфта, кроме обеспечения требуемого вращающего момента и компенсирующих свойств, должна иметь малый момент инерции и выдерживать требуемые динамические нагрузки. Указанным требованиям соответствует муфта с упругим элементом или резиновой звёздочкой.

Таким образом, целесообразно обеспечить соединение вала асинхронного двигателя с валом редуктора с помощью упругой компенсирующей муфты. Упругий вкладыш дает возможность компенсировать осевые смещения, полученные в процессе монтажа асинхронного двигателя и редуктора. Наличие в конструкции упругой компенсирующей муфты упругого вкладыша позволяет ей работать на сжатие, что дает возможность обеспечивать допустимые эксплуатационные нагрузки на узел в целом. Для эффективного гашения крутильных колебаний и компенсации незначительного смещения валов, возникающих при монтаже или тепловом расширении в процессе работы, вкладыш муфты имеет специальный профиль и изготавливается из материала, обладающего требуемой

упругостью. При передаче требуемого крутящего момента соединительная муфта должна обладать компактностью, малой массой и низким моментом инерции. Предлагаемая соединительная упругая, компенсационная муфта обладает свойствами передачи требуемого крутильного момента, обеспечивает гашение вибраций и динамических ударов, возникших в результате несоосности вала асинхронного двигателя и ведущего вала редуктора кинематической схемы портала.

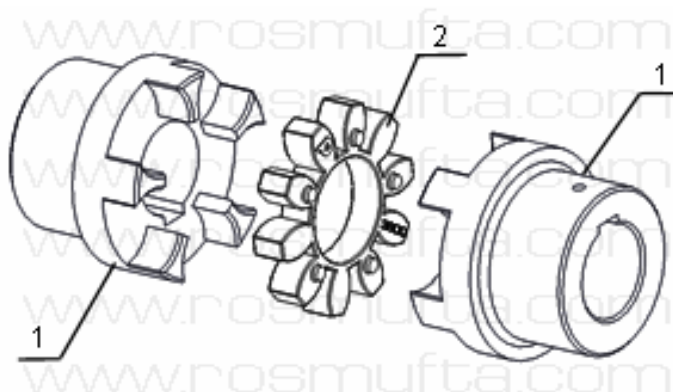


Рисунок 8.1 – Соединительная муфта

Соединительная муфта (рис. 8.1) состоит из ведущей и ведомой частей 1, с внутренних сторон, снабженных кулачками. Профиль кулачка имеет форму звездочки. Ведущая и ведомая части соединительной муфты контактируют через специальный вкладыш 2, посредством которого ведущая и ведомая части сцепляются при передаче крутящего момента.

Для изготовления соединительной муфты используют сталь Ст 3, с пределом прочности на разрыв не ниже  $220 \cdot 10^4$  Па.

Таблица 8.1 – Соединительная муфта

Тип муфты	Скорость	Диаметр	Вид	Момент	КПД
ГОСТ 14084 – 93	$n = 3000 \dots 6000$ об/мин	$d = 6 \dots 48$ мм	звездоч- ка	$3 \dots 400$ Н•м	$\eta = 0,98$



## 9 Расчеты защитного заземления и искусственного освещения

### Расчет защитного заземления

Требуется выполнить защитное заземление электропривода портала и электрошкафа управления посредством размещения заземлителей и заземляющих проводников.

1. Принимаем допустимое сопротивление заземляющего устройства равным  $R_d=4$  Ом.
2. Принимаем расчетное удельное сопротивление грунта, в котором размещаются электроды заземления  $\rho=100$  Ом · м (суглинок).
3. Выбираем предварительную конфигурацию заземлителя в ряд.
4. Выбираем тип заземлителя вертикальных электродов стержневым круглого сечения (трубчатым) в грунте, представленных на рисунок 3:

Принимаем: диаметр заземлителя  $d=0.02$  м;

- длину заземлителя  $l=3$  м;

- толщину верхнего слоя земли  $t=2$  м;

- глубину погружения электрода в землю  $t_0=0.5$  м.

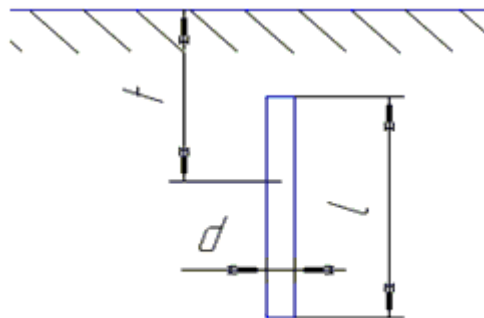


Рисунок 9.1 - Стержневой круглого сечения (трубчатый) в грунте тип заземлителя

5. Определяем сопротивление растекания тока с одного заземлителя  $R_B$ , Ом:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2l}{d} + 0,5ln \frac{4t+l}{4t-l} = \frac{100}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2 \cdot 3}{0,02} + 0,5ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \quad (9.1)$$

$$= 32,35$$

6. Определяем необходимое количество параллельно соединенных заземлителей  $n$  :

$$n = \frac{R_a}{R_d} = \frac{32,35}{4} = 8,09 \quad (9.2)$$

Принимаем  $n=10$

Так как  $n=10$ , то принимаем окончательную конфигурацию заземлителя в ряд.

7. Определяем длину соединительного электрода  $l_c$ , м :

$$l_c = 1.05 \cdot m \cdot (n-1) = 1.05 \cdot 5 \cdot (10-1) = 47.25 \text{ м} \quad (9.3)$$

где  $m$ -расстояние между заземлителями, м.

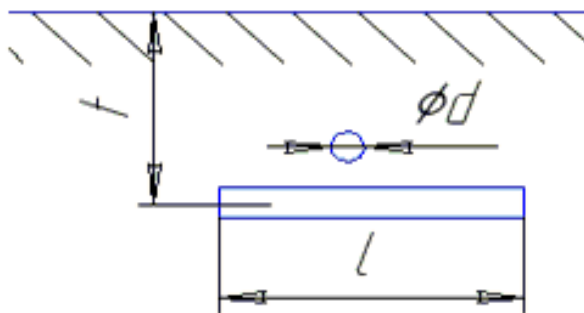


Рисунок 9.2 – Протяженный в грунте тип заземлителя

8. Определяем сопротивление растекания тока горизонтального электрода  $R_r$ , Ом:

Принимаем:

- диаметр заземлителя  $d=0.02$  м;
- длину заземлителя  $l=3$  м;
- толщину верхнего слоя земли  $t=0.51$  м;
- глубину погружения электрода в землю  $t_0=0.5$  м.

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho}{2\pi z} \ln \frac{l^2}{d \cdot t} = \frac{100}{2\pi z} \ln \frac{3^2}{0,02 \cdot 0,51} = 40 \quad (9.4)$$

9. Определяем сопротивление растеканию тока искусственных заземлителей  $R_{и}$ , Ом:

$$R_{и} = \frac{R_a \cdot R_{\Gamma}}{R_a \eta \varepsilon + R_{\Gamma} n \cdot \varepsilon} = \frac{32.35 \cdot 40}{32.35 \cdot 0.75 + 40 \cdot 10 \cdot 0.74} = 3.97 \quad (9.5)$$

$R_{и} \leq 4$  Ом.

Расчет общего искусственного освещения

1. Количество светильников

$$N = \frac{E \cdot S \cdot k \cdot z}{\Phi \cdot \eta}, \quad (9.6)$$

$E$  – минимальная нормированная освещенность, лк;

$S$  – площадь рабочего участка, м<sup>2</sup>;

$k$  – коэффициент запаса, учитывающий срок работы ламп, степень запыления и загрязнения светильника;

$z$  – отношение среднего освещения к минимальному ( $z = 1,1 \dots 1,5$ );

$N$  – число светильников;

$\eta$  – коэффициент используемого светового потока, зависящий от КПД светильников.

2. По СНиПу 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» определяем минимальную освещенность.

3. Определяем коэффициент запаса для светильника (по СНиПу):

$$k = 1,5,$$

$$E = 300 \text{ лк} - \text{минимальная освещенность}$$

4. Определяем значение неравномерной освещенности в пределах  $z = 1,1 \dots 1,5$ :

$$z = 1,3$$

5. Выбираем тип светильника и мощность светового потока лампы:

$$\text{ДРЛ} - 400; \Phi = 22000 \text{ мм}$$

6. Определяем индекс помещения:

$h' = 12\text{м}$  – высота потолка;  
 $e = 30\text{м}$  – ширина помещения;  
 $L = 40\text{м}$  – длина помещения;  
 $h = 5\text{м}$  – высота размещения светильника, относительно освещаемой поверхности.

$$i = \frac{e \cdot L}{[h \cdot (e + L)]} = \frac{30 \cdot 40}{[5 \cdot (30 + 40)]} = 3,4 \quad (9.7)$$

7. На рабочем участке возможно запыление, повышение и понижение температуры. Учитывая это выбираем светильники типа СДДРЛ

8. Выбираем коэффициент использования светового потока:

Для этого определим коэффициент отражения:

- 1) потолка  $\rho_{пот} = 70\%$  (белый);
- 2) стен  $\rho_{ст} = 50\%$  (светло-зеленый);
- 3) рабочей поверхности  $\rho_{р.п.} = 30\%$  (полутемный, зеленый).

$$\eta = 54\%$$

Считаем:

$$N = \frac{300 \cdot 1200 \cdot 1,5 \cdot 1,3}{22000 \cdot 0,54} = 59.$$

## 10 Экономическое обоснование модернизации привода портала

В результате модернизации привода движения портала разработан электропривод с асинхронным двигателем и системой векторного управления взамен гидравлического привода (базовый вариант). Конструкторские изменения и их влияние на технико-экономические показатели приведены в таблице 10.1.

Характеристика конструкторских изменений при модернизации привода портала

Таблица 10.1 –Изменения и технико-экономические показатели

П/п	Конструкторские изменения	Технико – экономические показатели	
		При внедрении	При эксплуатации
1.	Электропривод с асинхронным двигателем и системой векторного управления для замены гидравлического привода.	Предлагаемый вариант имеет большую стоимость	Повышается надежность, увеличивается срок службы, уменьшаются затраты на наладку и ремонт
2.	Применяется асинхронный трёхфазный двигатель с короткозамкнутым ротором	Снижаются стоимость и массогабаритные показатели	Повышается надежность и снижаются затраты на электроэнергию

### Капитальные вложения потребителя

Капитальные вложения потребителя содержат затраты (табл.10.2) на приобретение составляющих электропривода.

Таблица 10.2 – Капитальные затраты

Наименование	Варианты	
	Базовый, руб.	Проектный, руб.
1. Стоимость системы управления.	32000	93817
2. Стоимость электродвигателя.	33952	12000
Итого:	65952	105817

Эксплуатационные затраты потребителя

Проведем расчеты затрат на потребление электроэнергии, а остальные составляющие будем считать равными в рассматриваемых вариантах.

Таблица 10.3 – Расчетные коэффициенты

Наименование	$q_{\text{баз}}$	$D$	$S$	$K_{\text{загр}}$	$N_{\text{пр}}$	$N_{\text{баз}}$
Размерность	-	Раб.дни	Кол. смен	-	кВт	кВт
Величина	0,64	320	2	1	2,2	52

Количество потребляемой электроэнергии электропривода и базового варианта (гидропривода) можно определить, используя выражение

$$Q_{\text{эл}} = N \cdot K_{\text{и}} \cdot t_{\text{м}}, \quad (10.1)$$

где  $N$  – мощность оборудования;  $K_{\text{и}}$  – коэффициент использования оборудования;  $t_{\text{м}}$  – машинное время работы оборудования.

Машинное время работы оборудования

$$t_{\text{м}} = q \cdot D \cdot S \cdot K_{\text{з}}, \quad (10.2)$$

где  $q$  – продолжительность работы оборудования за смену, час;  $D$  – число дней работы оборудования;  $S$  – количество смен;

$K_{\text{з}}$  – коэффициент загрузки оборудования.

Вычисляем время работы оборудования базового варианта

$$t_{\text{маш.баз}} = q_{\text{баз}} \cdot D \cdot S \cdot K_{\text{загр}} = 0,64 \cdot 320 \cdot 2 \cdot 1 = 410 \text{ч} \quad (10.3)$$

Определяем время работы оборудования предлагаемого варианта

$$t_{\text{маш.пр}} = q_{\text{пр}} \cdot D \cdot S \cdot K_{\text{загр}}, \quad (10.4)$$

$$t_{\text{маш.пр}} = 0,69 \cdot 320 \cdot 2 \cdot 1 = 442 \text{ч.}$$

Определяем количество потребляемой электроэнергии при работе базового варианта

$$Q_{\text{эл.баз}} = N_{\text{баз}} \cdot K_{\text{исп}} \cdot t_{\text{маш.баз}} = 52 \cdot 0,7 \cdot 410 = 14924 \text{ кВт}, \quad (10.5)$$

Количество потребляемой электроэнергии при работе предлагаемого электропривода

$$Q_{\text{эл.пр}} = K_{\text{исп}} \cdot t_{\text{маш.пр}}, \quad (10.6)$$

$$Q_{\text{эл.пр}} = 2,2 \cdot 0,7 \cdot 442 = 680,7 \text{ кВт}$$

10.3.7 Затраты на электроэнергию, руб.

$$C_{\text{эл}} = Q_{\text{эл}} \cdot C_{\text{эл}}, \quad (10.7)$$

где  $Q_{\text{эл}}$  – затраченная электроэнергия, кВт;

Определяем затраты на потребляемую электроэнергию в базовом варианте по выражению

$$C_{\text{эл.баз}} = Q_{\text{эл.баз}} \cdot C_{\text{эл}} = 14924 \cdot 3 = 44770 \text{руб}, \quad (10.8)$$

где -  $C_{\text{эл}} = 3 \text{руб.}$  – цена 1 кВт·ч электроэнергии

Определяем затраты на потребляемую электроэнергию в предлагаемом варианте по выражению

$$C_{\text{эл.пр}} = Q_{\text{эл.пр}} \cdot C_{\text{эл}}, \quad (10.9)$$

$$C_{\text{эл.пр}} = 680,7 \cdot 3 = 2042,1 \text{руб}$$

Определяем экономия средств за год работы привода портала за счет снижения затрат на потребляемую электроэнергию

$$C_{\text{э}} = C_{\text{эл.баз}} - C_{\text{эл.пр}} = 44770 - 2040 = 42730, \text{руб.} \quad (10.10)$$

Таким образом годовая экономия от внедрения электропривода с асинхронным двигателем и векторной системой управления в результате уменьшения затрат на электроэнергию составила 42730 рублей. Полученные результаты подтверждают экономическую целесообразность модернизации привода портала.

## Заключение

В результате проведенной модернизации привода портала балансировочного станка разработан электропривод с асинхронным двигателем и системой векторного управления, позволяющий повысить надежность работы, снизить затраты на расход электроэнергии и обслуживание. Электропривод выполнен на основе типового преобразователя семейства MICROMASTER (тип 6SE32 – 15). Выполнен расчет элементов преобразователя частоты, в результате которого выбран силовой модуль CM-50MX– 12AMITSUBISHIELECTRIK, на ток  $I_c = 50 \text{ A}$ , и напряжение  $U_{ce} = 1200 \text{ В}$ .

Произведенные расчеты и моделирование в среде Simulink пакета MatLab режимов работы электропривода при типовых сигналах и при отработке циклограммы движения портала показали, что время отработки задания соответствует заданному значению ( $t_{пп} = 0,2 \text{ с}$ ). Отработка перемещения происходит без перерегулирования. Выбранная система векторного управления электроприводом обеспечивает отдельное регулирование скоростью вращения и магнитным потокосцеплением, что позволяет работать двигателю с номинальным магнитным потоком в рабочих режимах.

Для соединения вала асинхронного двигателя с ведущим валом редуктора кинематической схемы движения портала разработана соединительная муфта. Наличие в конструкции муфты упругого вкладыша обеспечивает компенсацию незначительного смещения валов, возникающего при монтаже или тепловом расширении.

Произведены расчеты защитного заземления и искусственного освещения рабочего участка. Выполненное экономическое обоснование модернизации привода движения портала подтверждает целесообразность использования проектного варианта.



## Список использованных источников

1. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. Заведений / В.М. Терехов. – М.: Издательский центр «Академия», 2015. – 304 с.
2. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – Москва: Высш. шк., 2012. – 326 с.
3. Беспалов, В.Я. Электрические машины / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – М.: Академия, 2014. – 320 с.
4. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов / А.С. Анучин. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. - 373 с.
5. Бекишев, Р.Ф. Электропривод: Учебное пособие для академического бакалавриата / Р.Ф. Бекишев, Ю.Н. Дементьев. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 301 с.
6. Денисов, В.А. Электроприводы переменного тока с частотным управлением : учебное пособие / В.А. Денисов. - Тольятти : ТГУ, 2014. –119 с.
7. Бесекерский, В. А., Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов– Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб., Профессия, 2016. – 752 с.
8. Денисов, В.А. Системы позиционного электропривода с переменной структурой управления / В.А. Денисов. – М.: Из-во Спутник+, 2013 – 119 с.
9. Москаленко, В.В. Электрический привод: учеб.для вузов/ В.В. Москаленко – Москва: ИНФРА-М, 2015. – 363 с.
10. Кисаримов, Р.А. Электропривод: справочник/ Р.А. Кисаримов– Москва: ИП РадиоСофт, 2014. – 350 с.
11. Мурадова, Е.О. Безопасность жизнедеятельности: Учеб.пособие/ Е.О. Мурадова – Москва: Научная книга, 2013. – 60 с.
12. Васильев, Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропровода: учеб.для вузов / Б.Ю. Васильев – Москва: Солон-Пресс, 2015. - 267 с.

13. Фролов, Ю. М. Проектирование электропривода промышленных механизмов: Учеб.пособие/ Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин – Москва: Лань, 2014. -446 с.
14. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 4: /Под общей ред. В.Г. Герасимова и др.- 8-е изд., испр. и доп. - М. : Изд-во МЭИ, 2012. - 696 с.
15. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская.- М. : Энергоиздат, 2012. – 504
16. Hunt B.R. A guide to Matlab for beginners and experienced users// Brian R. Hunt,Ronald L. Lipsman, Jonathan M. Rosenberg/ Cambridge University Press, 2016.- 311с.
17. Deepthi P., Padmaja Mrs.S.M. Adjustable speed system of induction motor using vector controlled// International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)/ Vol. 1 Issue 6. August – 2012. .- 275 с
18. Lovatt, H.C., Ramsden, V.S, Mecrow, B.C. “Desing of an In-Wheel Motor for a Solar Electric Mobile”/ [Electronic resource] URL <http://www.sze.hu/~szenasy/DESIGN%20OF%20AN%20IN-WHEEL%20MOTOR%20FOR%20A%20SOLAR-POWERED%20ELECTRIC%20VEHICLE.htm>  
Published Oxford University, January 2015.
19. Ara Nerses Knaian, “Electropermanent Magnetic Actuators: Devices and Their Application in Programmable Matter”/ [Electronic resource] URL <https://pdfs.semanticscholar.org/30d6/69156d10fdde217f83397d0dae0e9c2adb94.pdf> /Massachusetts Institute of TechnologyPublished June 2012
20. Statistical optimization of frequency regulated induction electric drives with scalar control/ [Electronic resource] URL <https://cyberleninka.ru/article/v/statistical-optimization-of-frequency-regulated-induction-electric-drives-with-scalar-control> Published2017.