

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование кафедры)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки)

Общая теория электромеханического преобразования энергии  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка и исследование нагрузочного устройства для стендовых испытаний и настройки электроприводов с вентильным двигателем»

Студент	<u>Р.Г. Мазитов</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Научный руководитель	<u>В.А. Денисов</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., профессор В.В. Ермаков \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Тольятти 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Современные нагрузочные устройства для проведения стендовых испытаний и настройки электроприводов.....	7
1.1 Обзор существующих нагрузочных устройств на основе электропривода...	7
1.2 Нагрузочное устройство для испытаний и настройки электроприводов переменного тока с вентильным двигателем.....	14
1.3 Выбор элементов силовой схемы нагрузочного устройства с обоснованием их мощности.....	19
1.4 Выводы.....	22
2 Разработка и исследование нагрузочного устройства для испытания систем электропривода с вентильными преобразователями.....	23
2.1 Разработка структуры и математической модели нагрузочного устройства.....	23
2.1.1 Структурная схема и параметры двигателя нагрузочного устройства.....	23
2.1.2 Расчет параметров силового канала нагрузочного устройства.....	27
2.2 Определение параметров системы регулирования и разработка математической модели нагрузочного устройства.....	31
2.3 Режимы работы нагрузочного устройства при исследовании электропривода руки портального манипулятора.....	35
2.4 Моделирование и исследование позиционной системы электропривода с нелинейной коррекцией.....	39
2.5 Исследование режимов работы частотного асинхронного электропривода с векторным управлением.....	45
2.6 Выводы.....	55
3 Экспериментальные исследования нагрузочного устройства	

на испытательном стенде.....	56
3.1 Работа нагрузочного устройства при исследовании асинхронного электропривода .....	56
3.1.1 Пуск программы управления MOVITOOLS MotionStudio и снятие характеристик пуска электропривода.....	58
3.1.2 Динамические характеристики при реверсе и торможении асинхронного электропривода .....	67
3.2 Исследование нагрузочного устройства при работе с вентильным электроприводом.....	69
3.2.1 Стенд для испытаний электроприводов с вентильным двигателем.....	69
3.2.2 Описание модуля сопряженияLCARDE440.....	74
3.2.3 Исследование режимов работы элетропривода на испытательном стенде.....	77
3.3 Выводы.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	81
Список используемых источников.....	83

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе разработки современных электроприводов требуется экспериментальная проверка их работоспособности и определения показателей качества процессов регулирования. Эффективность использования современных электроприводов зависит от параметрической настройки под определённые режимы работы, в соответствии с характеристиками, требуемыми для определенного электропривода. Для настройки параметров электроприводов можно использовать математическое моделирование, физическое моделирование и настройку параметров непосредственно на объекте (станке, рабочей машине и т.п.). Но в условиях производственной эксплуатации наиболее целесообразно применение испытательных стендов с нагрузочными устройствами [1,2].

Испытательные стенды позволяют создавать условия работы электропривода, приближенные к реальным, производственным – имитировать статическую и динамическую нагрузки, моделировать особенности объекта управления, вязкое и сухое трение, осуществлять наброс нагрузки, изменяющейся по различным законам, проводить различные виды измерений: момента, тока, частоты вращения и т.п. Применение испытательных стендов даёт возможность настраивать электропривод отдельно от объекта его применения, что приводит к значительному сокращению сроков ввода объекта в эксплуатацию. Кроме того испытательные стенды могут быть успешно применены в учебном процессе для изучения и исследования современных электроприводов с микропроцессорным управлением.

Испытательные стенды должны обеспечивать полный цикл настройки параметров системы управления электроприводом. Для этого они содержат в своем составе нагрузочное устройство, которое позволяет моделировать статические и динамические нагрузки на валу испытуемого электропривода с учетом особенностей механической передачи и объекта регулирования.

Актуальность выбранной темы заключается в том, что на сегодняшний день благодаря современным средствам преобразовательной и компьютерной техники, можно собирать стенды для испытаний, на которых можно испытать и создавать требуемые нагрузочные характеристики, тем самым создавая различные условия и обстоятельства работы электроприводов в производственной среде. В результате на стенде можно проверить не только заявленные количественные и качественные характеристики, но и предотвратить большинство внештатных ситуаций.

Целью квалификационной работы является обеспечение наиболее полного объема режимов испытаний и настройки современных электроприводов путем разработки нагрузочного устройства стенда, позволяющего моделировать статические и динамические нагрузки на валу испытуемого электропривода.

Задачи исследования:

1. Осуществить выбор структуры нагрузочного устройства и разработать систему управления, обеспечивающую моделирование комплекса нагрузок на валу испытуемого электропривода;
2. Разработать математическую модель нагрузочного устройства и провести исследования при работе с различными системами привода;
3. Экспериментально проверить работу нагрузочного устройства в составе испытательного стенда.

Методы исследования.

Теоретическая часть в совокупности методов представляет собой теорию электропривода, электрических машин, теории автоматического управления, , пакетов программ, математическое моделирование входящих в среде MATLAB и MATLAB–Simulink ,.

Новизна магистерской диссертации.

1. Разработано нагрузочное устройство для испытания современных электроприводов, структура и система управления которых отличаются от известных простотой построения.

2. Создана математическая модель нагрузочного устройства, позволяющая моделировать статические и динамические нагрузки на валу испытуемого электропривода.

#### Практическая значимость

Созданные математические модели нагрузочное устройство для испытания электроприводов могут применяться на лабораторных работах в на кафедре.

#### Публикации.

В процессе работы над диссертацией разработаны и опубликованы 3 научные статьи:

1. Ермаков В.В. Программа управления протезами / В.В. Ермаков, Р.Г. Мазитов // Интеллектуальный и научный потенциал XXI века. Волгоград, 22 мая 2017, С. 35-37.
2. Денисов В.А. Нагрузочное устройство для настройки электроприводов с вентильным двигателем / В.А. Денисов, Р.Г. Мазитов // Сб. тр. V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ-2017)», Тольятти, 1-2 ноября 2017, С. 486-492.
3. Губайдуллин Р.А. Математическое моделирование режимов работы электропривода каретки портального манипулятора / Р.А. Губайдуллин Р.Г. Мазитов А.М. Мазитова // Сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции, 30 апреля 2018 года, г. Смоленск С. 142-144.

#### Структура и объем магистерской диссертации.

Магистерская работа состоит из введения, трех основных глав, заключения и списка использованных источников, включающего 37 наименований. Основная часть работы представлена на 85 страницах машинописного текста. Работа содержит 47 рисунков и 9 таблиц.

# 1. Современные нагрузочные устройства для проведения стендовых испытаний и настройки электроприводов

## 1.1 Обзор существующих нагрузочных устройств на основе электропривода

В настоящее время известно достаточное количество нагрузочных устройств для стендовых испытаний современных электроприводов, которые позволяют производить испытания и настройку параметров электроприводов в условиях приближенных к производственной эксплуатации [3,4].

Для работы с электроприводами с серводвигателями, производители данной техники создают специализированные обучающие стенды для изучения и подготовки специалистов, позволяющие настраивать на оптимальные режимы работы и проверки исправности элементной базы, входящей в состав электропривода [6].

Например, для выпускаемых фирмой Siemens серводвигателей серии 1FT(FK)6 и 1FT(FK)7, оснащенных инкрементальными и абсолютными датчиками положения требуется проводить их юстировку для получения максимально возможных мощностных, скоростных и точностных показателей. Конструкция этих двигателей показана на рисунке 1.1.

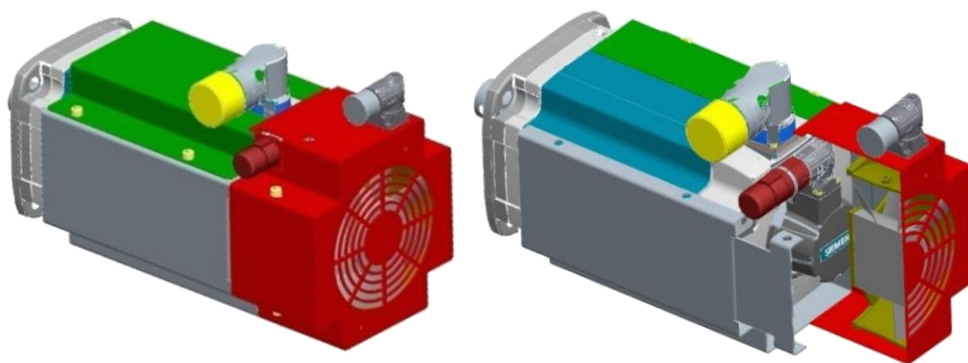


Рисунок 1.1– Электродвигатель серии 1 FT7 ф. Siemens

Производителями разработаны и выпускаются стенды для обучения методам эксплуатации и настройки приводных осей, оснащенных подобными двигателями, позволяющих имитировать режимы работы станка, как шпиндельных, так и прецизионных осей подачи с имитацией разной нагрузки. Но данные стенды громоздки, имеют большую стоимость, специальное программное обеспечение, написанное для определенного заказчика и жесткую компоновку. Система управления представлена на рисунке 1.2, а.

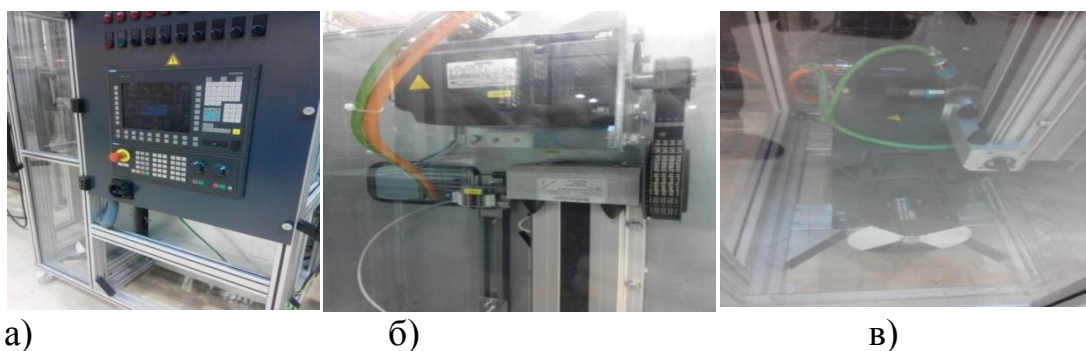


Рисунок 1.2 – Лабораторный стенд ф. Siemens: а) система управления; б) двигатель используемый для подачи в) двигатель шпиндельный

Другие производители электроприводов создают компактные варианты имеющие модульную компоновку, что положительно сказывается на возможности его транспортировки. Но при этом модули также имеют жесткую конструкцию, не позволяющую её изменять. Образец подобного стенда показан на рисунке 1.2.

При малых размерах данный тип стендов имеет ограниченное количество приводных осей и также часто требует покупки специализированного программного обеспечения или же при условии использования условно бесплатного программного обеспечения (shareware) будет иметь урезанный набор функций.

При поточном производстве и большого количества одинаковых систем электроприводов на предприятиях и в учебных заведениях, готовящих специалистов для этих предприятий целесообразно самостоятельно разрабатывать ла-



бораторные стенды для обучения студентов и повышения уровня квалификации действующих специалистов предприятий.



а)

б)

в)

Рисунок 1.3. – Лабораторный стенд ф. Bosch: а) внешний вид системы управления; б) нагрузочный и гонный двигатели в) имитационная панель

Такие стенды нужно разрабатывать с возможностью имитации работы оборудования близким к производственным. Зная описанные достоинства и недостатки, промышленных стендов, можно написать техническое задание для лабораторного стенда, самостоятельно разрабатываемого для обучения студентов и специалистов.

Для разработки и внедрения в учебном процессе лабораторного стенда он должны быть выполнен из общепромышленных компонентов, что позволит унифицировать его производство и снизить себестоимость, а также использовать “shareware” программные продукты. Стенд должен иметь небольшую мощность, возможность имитации различных режимов работы и возможность визуализации работы с выдачей графиков и характеристик.

Для испытания, проверки и регулировки серводвигателей, измерения их характеристик разработан испытательный стенд. Конструкции стенда представлена на рисунке 1.4, которая обеспечивает возможность его мобильности, иметь низкую по сравнению с аналогами стоимость и возможность расширения и дополнения другими компонентами для улучшения его функциональности.

Данный стенд оснащен двумя двигателями имитирующими работу осей подач и один двигатель, имитирующий шпиндельную ось. Двигатели осей по-

дач также могут быть механически связаны между собой для имитации различных режимов работы.



Рисунок 1.4. – Конструкция разработанного лабораторный стенда

На стенде можно продемонстрировать возможности электропривода с вентильным двигателем:

- 1) автоматически производить настройку параметров системы управления с учетом параметров силового канала привода;
- 2) адаптировать систему управления к изменению параметров вентильного двигателя  $R_r, R_s, L_m$  ;
- 3) производить энергосберегающие режимы работы электропривода;
- 4) осуществлять исследование современных видов датчиков скорости/положения: инкрементального, резольвера, синусно-косинусного датчика скорости, абсолютного датчика;
- 5) производить настройку и исследование замкнутой системы регулирования скорости и положения ;
- б) производить следящий режим работы сервопривода с начальным позиционированием.

На данном стенде также может быть изучена работа электропривода типовых механизмов и технологических процессов путем имитации их нагрузочных диаграмм и рабочих циклов.

Рассмотрим структуру испытательного стенда, созданного на кафедре «РАПС», в электротехническом университете (СПбГЭТУ) [4]. Нагрузочное устройство испытательного стенда собрано из двух асинхронных частотно-регулируемых электроприводов. Первый исследуемый, а второй является нагрузочным. Оба электропривода имеют по преобразователю частоты ( $UZ$ ), асинхронный двигатель ( $M$ ), инкрементный датчик обратной связи по скорости ( $PG$ ), а также для обоих двигателей один датчик момента ( $BT$ ). Валы обоих электрических двигателей через муфту жестко соединены между собой.

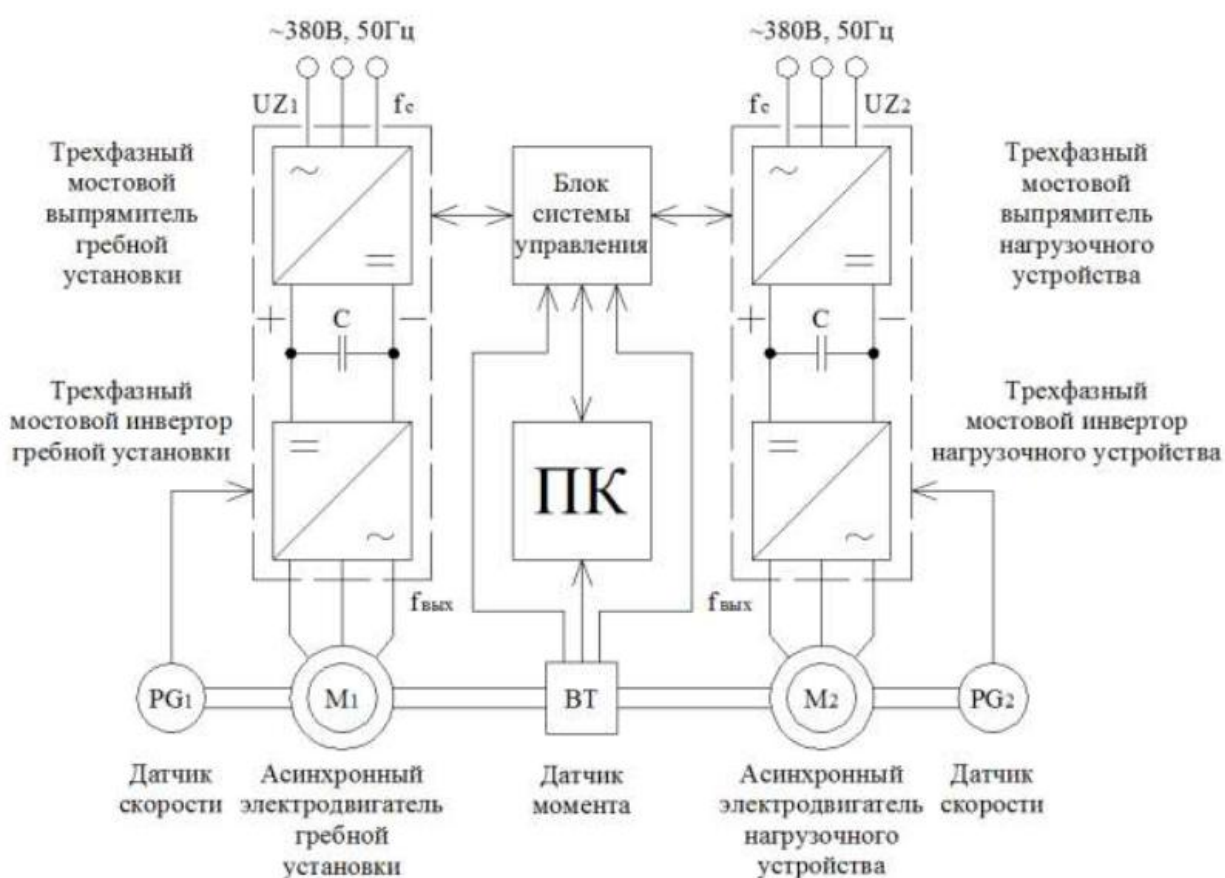


Рисунок 1.5 – Структура испытательного стенда электропривода

В режиме управления моментом, именно так работает нагрузочный привод. Он должен создать необходимый момент на валу исследуемого электропривода при определенной скорости вращения.

СУ – система управления другими словами это микропроцессорное устройство, у которого основной задачей является согласно рабочим и реверсивным характеристикам это формирование сигналов, Согласно структуре изображенной на(рисунке 1.5)выполнена разработка функциональной схемы испытательного стенда и электроприводов. Современные преобразователи частотыотображенные в Таблице 1.1имеют представленный метод управления, например вольт-частотное с датчиком скорости вольт частотное, векторное с разомкнутым и замкнутым контуром.

Таблица 1.1 – Метод управления

Характеристика	Вольт-частотное управление без датчика скорости	Вольт-частотное управление с датчиком скорости	Векторное управление с разомкнутым контуром	Векторное управление с замкнутым контуром
Диапазон регулирования скорости	1:40	1:40	1:100	1:1000
Пусковой момент	150%/3 Гц	150%/3 Гц	150%/1 Гц	150%/0 Гц
Точность поддержания скорости	±2–3%	±0,03%	±0,2%	±0,02%
Режим управления моментом	–	–	–	+

Рассмотрим таблицу1.1, где подробно представленныметоды управления.Здесь, один из основных принципвольт-частотного регулирования заключается в том,что по закону  $U / f = const$  происходит одновременноеизменение

амплитуды питающего напряжения частоты. Исходя из требований нагрузки определяется конкретный вид зависимости. Независимым воздействием является частота питания, а при данной частоте напряжение определяется из того, как должна выглядеть механическая характеристика. Благодаря вольт-частотному управлению обеспечивается постоянство перегрузочной способности привода, но не позволяет вращающим моментом электродвигателя управлять в полной мере.

«В основе векторного управления лежит представление о напряжениях, токах и потоках сцепления, как о пространственных векторах. За счет формирования гармонических токов и напряжений фаз, происходит управление магнитным потоком двигателя, который в свою очередь регулирует вращающий момент двигателя. Специальная структура системы управления обеспечивает независимое и практически безынерционное регулирование двух основных параметров – скорости вращения и момента на валу.

Точность регулирования скорости обеспечивает векторное управление, а также номинальный момент на нулевой скорости (при наличии датчика скорости) плавное вращение вала двигателя в области малых частот.

В данный момент существуют 2 класса систем векторного управления системы с обратными связями по току статорной обмотки, по скорости ротора и по магнитному потоку сцепления ротора (содержат датчики тока, скорости и магнитного потока сцепления) и бездатчиковые системы, в которых контролируемые величины обратных связей вычисляются с помощью наблюдателя состояния системы электропривода» [24].

## **1.2 Нагрузочное устройство для испытаний и настройки электроприводов переменного тока с вентильным двигателем**

На все распространенные автоматизированные системы, и выполняемые виды работ на данном объекте, в том числе испытания и исследование и, существует стандарт ГОСТ 34.603-92 «Виды испытаний автоматизированных систем». Стандарт определяет стадию «Ввода в действие испытательного стенда», с целью проверки соответствия системы электропривода требованиям технического задания, стадия проверка выполнения заданных функций системы и стадия определения и проверки соответствия требованиям технического задания количественных или качественных характеристик системы, устранение и выявление и недостатков в действиях системы, в разработанной документации. При стендовых испытаниях автоматизированных электроприводов технический персонал должен знать эксплуатационную документацию, иметь умения и навыки, необходимые для выполнения программы испытаний согласно ТЗ. Для автоматизированных электроприводов устанавливают следующие основные виды испытаний: 1) Испытания автоматизированной системы предварительно проводят для определения ее работоспособности, и решения вопроса о приемке опытную эксплуатацию автоматизированной системы; 2) Испытания, направленные на настройку системы регулирования для обеспечения заданных режимов работы. При этом настройка системы электроприводов зависит от многих факторов: параметров технологического процесса, соответствия данных требуемых характеристик приводов, а также параметров, связанных с конструкцией промышленной установки. С помощью точной оптимизации параметров электроприводов можно быстро и качественно повысить эффективность использования.

В настоящее время существует много способов настройки параметров электроприводов: математическое моделирование, физическое моделирование и экспериментальное моделирование (производится непосредственно на станке). Но в условиях производственной эксплуатации наиболее целесообразно-

применение физического метода с имитацией (моделированием) нагрузки электропривода станка. Для этого широко используются испытательные стенды.

Испытательные стенды должны обеспечивать полный цикл настройки параметров системы управления электроприводом. Для этого они содержат в своем составе нагрузочное устройство, которое позволяет моделировать статические и динамические нагрузки на валу испытуемого электропривода с учетом особенностей механической передачи и объекта регулирования.

Высокие технико-экономические требования предъявляются к исполнительным двигателям нагрузочных устройств, такие как возможность получения широкого диапазона регулирования скорости,  $\min$  момент инерции, высокий КПД и надежность, низкая цена и сверхмалая масса, «большая перегрузочная способность, высокая равномерность скорости вращения, низкий уровень шума и вибрации, предельная жесткость механических характеристик.

Перечисленным требованиям удовлетворяют машины постоянного тока, которые обеспечивают высокий диапазон регулирования скорости вращения порядка нескольких тысяч и хорошо работают с ТП и. На низких скоростях обеспечивается высокое значение момента, соответствующий рабочим подачам, а уменьшенное значение момента на высоких скоростях, соответствующих вспомогательным перемещениям. Их сравнительно низкие номинальные скорости вращения позволяют их устанавливать в механизмы и станки без редукторов, что существенно упрощает кинематическую цепь, и дает возможность снизить статические и динамические погрешности, а так же приблизить источник движения к рабочему механизму» [4]. Обычно с электромагнитным тормозом, а так же тахогенератором и датчиком положения выпускают высокомоментные двигатели. Тормоз естественно служит для обеспечения безопасности в случае отключения напряжения питания, а также для мгновенного торможения и для фиксации вала двигателя.

Датчиком скорости является тахогенератор, в системе регулирования вращения вала. Для обратной связи при регулировании и служит также датчик положения, выдающий сигнал, пропорциональный углу поворота вала дви-

гателя. Таким образом благодаря встроенной конструкции можно не только снизить габаритные размеры электропривода, но и повысить точность работы электропривода. В связи с, наличием постоянных магнитов есть возможность уменьшить габаритные размеры системы возбуждения, и самого двигателя, а так же его энергетические и динамические характеристики. В результате эффект от применения высокомоментных двигателей в электроприводах складывается из повышения производительности станка или работа упрощения его кинематической схемы. В результате из-за увеличения скорости быстрых перемещений, широкого диапазона регулирования и малой инерционности привода достигается за счет этого повышение производительности оборудования.

Пример современного испытательного стенда представлен в описании стенда с частотно – регулируемым приводом. Стенд был спроектирован в Белорусском государственном аграрном техническом университете на кафедре "Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий" (авторы: Дайнеко В.А., Ковалинский А.И., Шаукат И.Н., Цховребов А.А.), а так же можно найти описание стенда для испытания энергоэффективных режимов управления асинхронным двигателем в системе электропривода в книге посвященной двенадцатой международной конференции – Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» МКЭЭЭ – 2008 на 224 странице (авторы: Поляков В.Н., Бородин М.Ю., Сусенко О.С., г. Екатеринбург, ГОУ ВПО «УГТУ - УПИ»).

Испытательные стенды позволяют создавать условия работы электропривода, приближенные к производственным – имитировать статическую и динамическую нагрузки, моделировать упругие элементы, люфты механизмов, вязкое и сухое трение, осуществлять наброс нагрузки, изменяющейся по различным законам, проводить различные виды измерений: момента, тока, частоты вращения и т.п. Применение испытательных стендов даёт возможность настраивать электропривод отдельно от станка, что приводит к значительному сокращению времени настройки параметров системы управления. Кроме того испы-



тательные стенды могут быть успешно применены в учебном процессе для изучения и исследования современных электроприводов с частотным управлением.

Функциональная схема системы регулирования (рисунок. 1.6) включает в себя нагрузочный двигатель НМ постоянного тока(ПТ) от постоянных магнитов с возбуждением, преобразователь вентильный УМ питания якоря и систему регулирования тока якоря, содержащую контур регулирования тока  $i_{я}$ . В контур регулирования  $i_{я}$  входит датчик УА тока, объединяющий шунт  $R_s$  и согласующий усилитель А, а также регулятор АА тока.

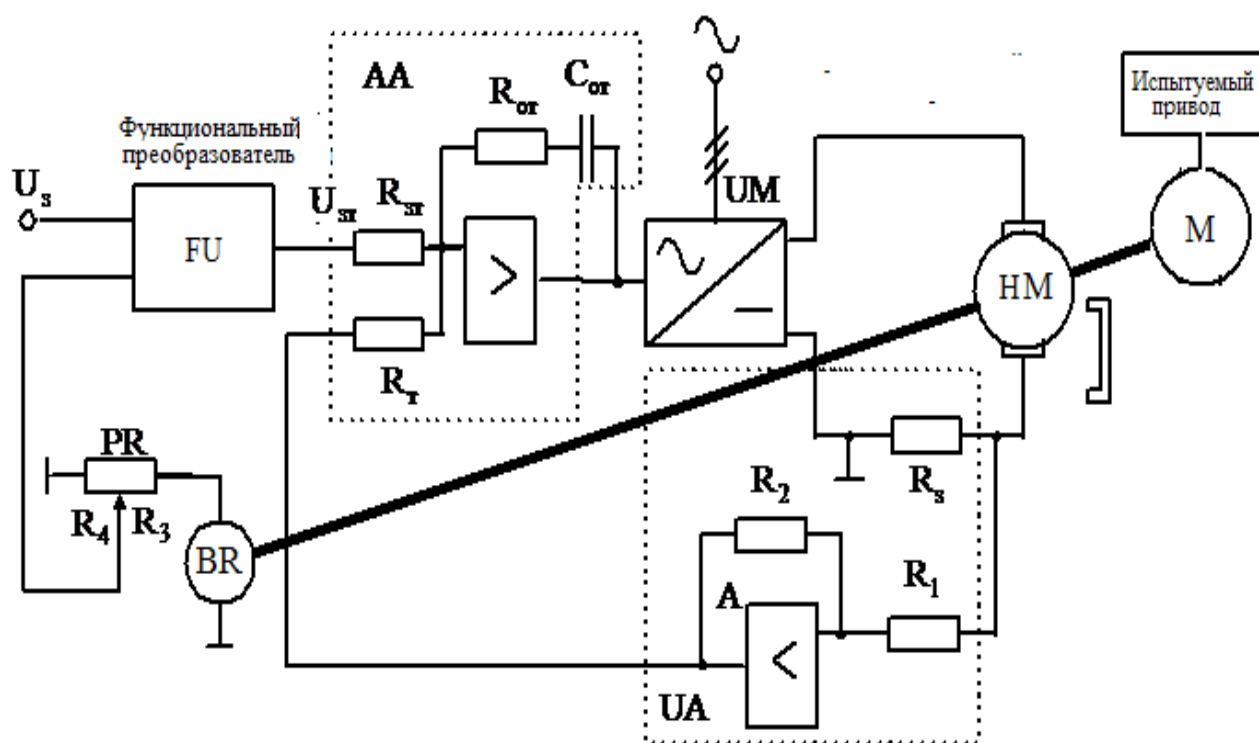


Рисунок 1.6 – Функциональная схемы нагрузочного устройства:

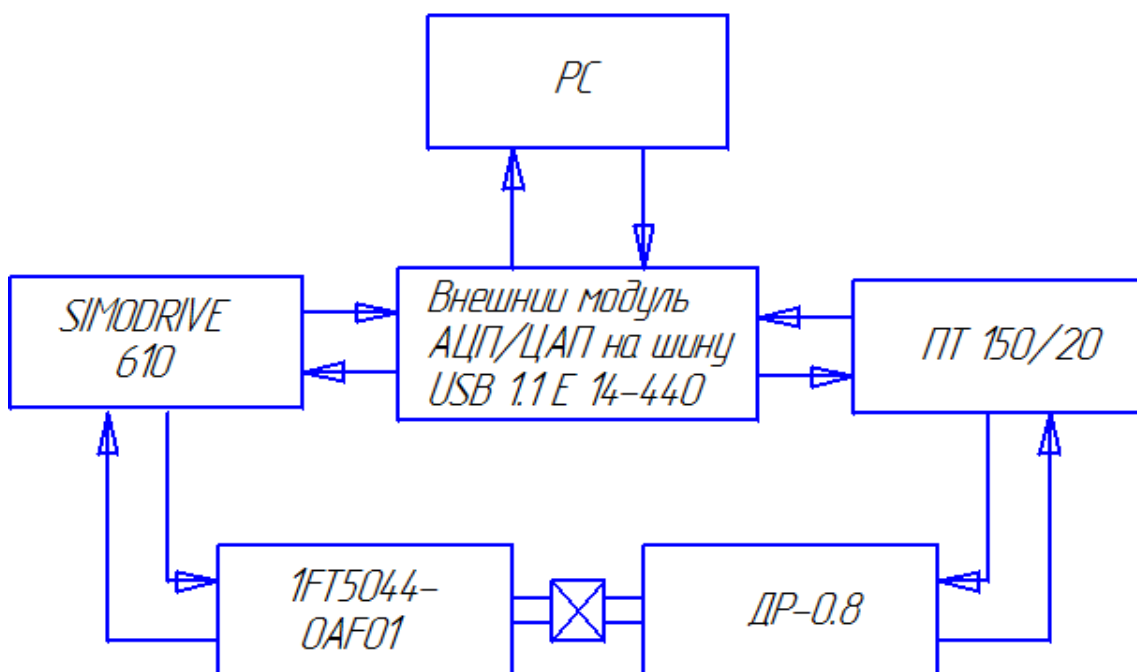


Рисунок 1.7 – Функциональная схема испытательного стенда с нагрузочным устройством постоянного тока

Для формирования нагрузочных моментов используется обратная связь по скорости  $\omega$ , которая содержит тахогенератор BR и функциональный преобразователь FU, который обеспечивает формирование вида нагрузочных моментов. В качестве регулятора тока для оптимизации переходных процессов выбирается ПИ – регулятор.

Функциональная схема лабораторного стенда с нагрузочным устройством приведена на рис. Схема включает в себя:

1) нагружающий электропривод постоянного тока, который состоит из ПТ 150/20, и блок питания БП 150/80, блока питания тормоза малоинерционного двигателя постоянного тока серии ДР-0,8;

2) испытуемый вентильный электропривод на базе SIMODRIVE 610 с двигателем 1FT5044-0AF01 и транзисторно-импульсным преобразователем серии 6SC61;

- 3) панель оператора, состоящей из панели управления и панели индикации (амперметр, фазовые вольтметры и световые индикаторы по одному на фазу);
- 4) внешний модуль E14-140 (или E-440) (АЦП/ЦАП) на шину USB 1.1, совместимый с персональным компьютером;
- 5) трансформаторы типа 4AP4409-6LB 380/220 и 4AP4403-7LB 380/165;
- 6) коммутационное оборудование.

### **1.3 Выбор элементов силовой схемы нагрузочного устройства с обоснованием их мощности**

Основным объектом стенда является вентильный электропривод, состоящий из транзисторно-импульсного преобразователя SIMODRIVE 6SC61 и испытуемого серводвигателя переменного тока серии 1FT5, согласующихся между собой.

Нагрузкой для испытуемого двигателя является малоинерционный двигатель постоянного тока серии ДР мощностью 0,8 кВт, при помощи передающего устройства подсоединяется к испытуемому мотору. Нагружающим двигателем управляет транзисторный преобразователь ПТ150/20, напряжение на который подаётся с блока питания БП150/80.

Преобразователи 6SC61 и ПТ150/20 управляются внешним модулем E14-440, который программируется совместимым компьютером, или с панели ручного управления на стенде. Внешний модуль E14-440 через шину USB 1.1 передается на клеммы входа электроприводов сигналы (задания) частоты вращения, сигналы деблокировки, а так же сигналы растормаживания электроприводов, имитируя различные режимы работы электропривода (в ручном режиме оператор с ПУ испытательного стенда (рис 1.7)) сигналы нагружающего момента и Уточненные моменты на валу двигателя:

$$\dot{M}_3 = \dot{M}_N - \dot{M}_{\text{АЭИ} 2} = 1,5 - 1,27 = 0,23 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (1.12)$$

Исходя из полученных данных можно построить диаграмму моментов на валу двигателя, изображенную на (рисунке. 1.8).

Если  $M_{\text{пуск}} = M_1 = 11,65 \text{ Н}\cdot\text{м} < M_{\text{max}} = 2 \cdot M_n = 28 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , получается выбранный нами двигатель условиям пуска и перегрузки соответствует.

### 1.3.1 Проверка выбранного нами электродвигателя по нагреву

момент двигателя (эквивалентный)(3.13):

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \Sigma M_i^2 \cdot t_i}{t_{\Sigma}}} = \sqrt{\frac{11,65^2 \cdot 0,25 + 1,5^2 \cdot 2,5 + (-8,65)^2 \cdot 0,25 + 1,5^2 \cdot 0,8 + 0,23^2 \cdot 0,2}{4}} = (1.13)$$

$$= 3,875 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

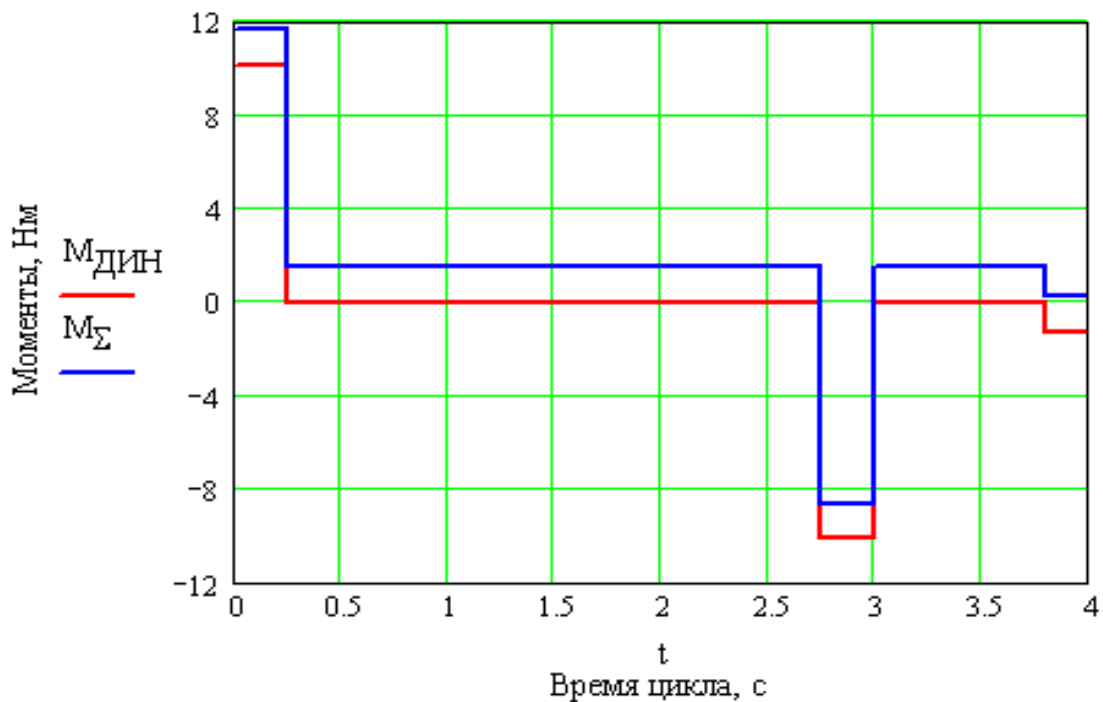


Рисунок 1.8. –График диаграммы моментов на валу электродвигателя

$M_{\text{э}} < M_n = 14 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , то выбранный электродвигатель подходит по характеристикам условиям нагрева.

### 1.3.2. Расчет силовой части преобразователя

#### 1.3.1 Токи электродвигателя на $i$ – интервалах:

$$I_1 = \frac{M_1}{C_A} = \frac{11,65}{0,44} = 26,48 \text{ A}; \quad (1.15)$$

$$I_2 = \frac{M_N}{C_A} = \frac{1,5}{0,44} = 3,41 \text{ A}; \quad (1.16)$$

$$I_3 = \frac{M_2}{C_A} = \frac{8,65}{0,44} = 19,66 \text{ A}; \quad (1.17)$$

$$I_4 = \frac{M_N}{C_A} = \frac{1,5}{0,44} = 3,41 \text{ A}; \quad (1.18)$$

$$I_5 = \frac{M_2}{C_A} = \frac{0,23}{0,44} = 0,52 \text{ A}; \quad (1.19)$$

#### 1.3.2 Эффективный ток по формуле на стр. 3-26 [2] (1.20):

$$I_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 I_i^2 \cdot t_i}{\sum t_i}} = \sqrt{\frac{26,48^2 \cdot 0,25 + 3,41^2 \cdot 2,5 + 19,66^2 \cdot 0,25 + 3,41^2 \cdot 0,8 + 0,52^2 \cdot 0,2}{4}} = 8,8 \text{ A}$$

#### 1.3.3. Ном.ток силовой части по формуле на стр. 3-26 [2]:

$$I_f = \frac{I_{\text{эфф}}}{1,03} = \frac{8,8}{1,03} = 8,55 \text{ A} \quad (1.21)$$

В соответствии с расчетными данными проверка производим по таблице [25] так же силовую часть А30 с номинальным током 30 А и max током 60 А с длительностью протекания не более 200 мс/сек.

#### 1.3.1 Расчет силовой части на перегрузку

$$\begin{aligned} \Delta U &= \sum_{i=1}^5 t_i \cdot \left\{ 2,2 - \left[ 2 \cdot \left( \frac{I_i}{I_f} \right)^2 \right] \right\} = 0,25 \cdot \left\{ 2,2 - \left[ 2 \cdot \left( \frac{26,48}{30} \right)^2 \right] \right\} + \\ &+ 2,5 \cdot \left\{ 2,2 - \left[ 2 \cdot \left( \frac{3,41}{30} \right)^2 \right] \right\} + 0,25 \cdot \left\{ 2,2 - \left[ 2 \cdot \left( \frac{19,66}{30} \right)^2 \right] \right\} + \\ &+ 0,8 \cdot \left\{ 2,2 - \left[ 2 \cdot \left( \frac{3,41}{30} \right)^2 \right] \right\} + 0,2 \cdot \left\{ 2,2 - \left[ 2 \cdot \left( \frac{0,52}{30} \right)^2 \right] \right\} = 7,25 \text{ A} \end{aligned} \quad (1.22)$$

где  $I_n = 30 \text{ A}$  – номинальный ток силовой части.

Лабораторные условия: в состоянии покоя без перегрузки находится интегратор, напряжение на интеграторе равно  $+14,2 \text{ В}$ . При возникновении перегрузки меняет свой выходной сигнал интегратор в соответствии с размахом  $\Delta U$ .

В итоге допустим, получается общее приращение  $-14,5 \text{ В}$ , то начинает работать время – токовая защита на выходе интегратора.

Из расчета видно  $\Delta U > -14,5 \text{ В}$ , значит выбранная силовая часть обеспечивает необходимый цикл включений

#### **1.4 Выводы**

На основе анализа известных конфигураций нагрузочных устройств испытательных стендов выявлено, в настоящее время для производства испытаний современных электроприводов широко применяются нагрузочные устройства на основе машин переменного и постоянного тока. При проведении испытаний электроприводов с небольшим диапазоном регулирования угловой скорости целесообразно использовать нагрузочные устройства на основе машин переменного тока, что обеспечивает высокую надежность, бесконтактность и низкую стоимость нагрузочного двигателя. В случае проведения испытаний электропривода с широким диапазоном регулирования угловой скорости необходимо применять нагрузочное устройство с двигателем постоянного тока. Это позволит создавать нагрузочные характеристики на валу испытуемого электропривода и обеспечит полный цикл настройки параметров системы управления электроприводом при ползучих скоростях вала. В качестве нагрузочной машины выбран двигатель ДР-0,8, а в качестве преобразователя ПТ 150/20 с широтно-импульсной модуляцией. Управление преобразователей Е14-440. Разработанное нагрузочное устройство по структуре и схеме управления отличается от известных нагрузочных устройств простотой построения.

## 2 Разработка и исследование нагрузочного устройства для испытания систем электропривода с вентильными преобразователями

### 2.1 Разработка структуры и математической модели нагрузочного устройства

#### 2.1.1 Структурная схема и параметры двигателя нагрузочного устройства

Согласно обобщённой теории электрических машин двигатель нагрузочного устройства тока является машиной переменного тока и уравнения, описывающие его состояние, являются частным случаем обобщенной теории. В процессе электромеханического преобразования энергии МДС обмотки ротора (якоря) должна быть неподвижна относительно МДС, создаваемой обмоткой статора. Поэтому для получения уравнений переходных процессов можно воспользоваться уравнениями обобщённой машины в координатных ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) осях. Примем следующие обозначения:  $u_{s\beta}=u_B$ ;  $i_{s\beta}=i_B$ ;  $u_{r\alpha}=u_A$ ;  $i_{r\alpha}=i_A$ ;  $L_s=L_B$ ;  $L_r=L_A$ ;  $u_{s\alpha}=u_{r\beta}=0$ ;  $i_{s\alpha}=i_{r\beta}=0$ . В результате получаем уравнения в виде:

$$\left. \begin{aligned} u_B &= R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}; \\ u_A &= R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + \omega_p L_m i_B; \\ M &= p_\Pi L_m i_B i_A. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Обмотка добавочных полюсов и компенсационная обмотка непосредственно в процессе электромеханического преобразования энергии участия не принимают. Исходя из этого (активное сопротивление и индуктивность) включают в общее сопротивление  $R_A$  и общую индуктивность рассеяния  $L_A$  якорной цепи машины.

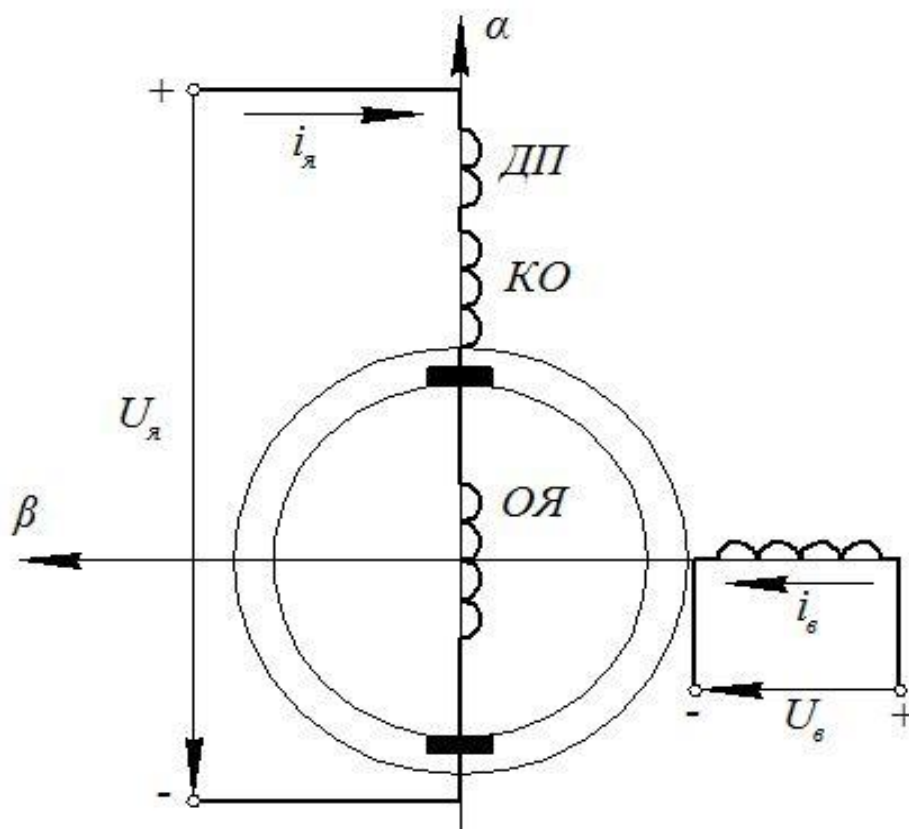


Рисунок 2.1 – Модель двигателя нагрузочного устройства

Схема модели машины постоянного тока (рисунок 2.1) содержит обмотку добавочных полюсов ДП и компенсационную обмотку КО, расположенные на статоре машины по оси  $\alpha$ . «Обмотка ДП обтекается током якоря в зоне, где осуществляется коммутация тока в проводниках обмотки якоря, и создает такое по значению и направлению магнитное поле, при котором процессы коммутации протекают наиболее благоприятно. Обмотка КО является распределенной обмоткой. Она закладывается в пазы главных полюсов. При протекании по ней якорного тока КО создаёт магнитное, компенсирующее поле реакции якоря по поперечной оси  $\alpha$ , которое искажает форму поля машины под главными полюсами и в связи с насыщением магнитной цепи вызывает размагничивающую составляющую. Благодаря действию компенсационной обмотки, влияние поперечной реакции якоря на поле главных полюсов практически исключается и условия электромеханического преобразования энергии максимально прибли-



жаются к тем, которым соответствуют уравнения (2.1). Таким образом, обмотки ДП и КО являются вспомогательными обмотками машины постоянного тока, поэтому в дальнейшем проведем упрощение записи уравнений» [5]. ЭДС машины определяется выражением

$$e = \omega_p L_m i_B = k\Phi\omega, \quad (2.2)$$

где  $k = \frac{p_{\Pi} N}{2\pi a}$ ;  $N$  – число активных проводников якоря;  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Уравнение для определения электромагнитного момента

$$M = p_{\Pi} L_m i_B i_{\text{я}} = k\Phi i_{\text{я}}. \quad (2.3)$$

С учётом уравнений (2.1 и 2.2), уравнения (2.1) можно записать

$$\left. \begin{aligned} u_B &= R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}; \\ u_{\text{я}} &= r_{\text{я}} i_{\text{я}} + L'_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + k\Phi\omega; \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$M = k\Phi i_{\text{я}},$$

где  $r_{\text{я}} = R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}$  – суммарное активное сопротивление якорной цепи;  $L'_{\text{я}} = L_{\text{я}} + L_{\text{дп}} + L_{\text{ко}}$  – суммарная индуктивность якорной цепи;  $R_{\text{дп}}, R_{\text{ко}}$  – соответственно активное сопротивление добавочных полюсов и компенсационной обмотки;  $L_{\text{дп}}, L_{\text{ко}}$  – соответственно индуктивность добавочных полюсов и компенсационной обмотки.

Система уравнений (2.4) является нелинейной, так как ЭДС якоря машины и электромагнитный момент пропорциональны произведениям потока соответственно на скорость вращения и на ток якоря.

Для построения структурной схемы машины постоянного тока запишем систему уравнений (2.4) в операторной форме

$$\left. \begin{aligned}
\Phi(s) &= \frac{k k_{\Phi} R_B}{1 + T_B s} * u_B(s); \\
i_{\text{я}}(s) &= \frac{1}{1 + T_3 s} * (u_{\text{я}}(s) - k \Phi(s) \omega(s); \\
M(s) &= k \Phi(s) i_{\text{я}}(s),
\end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где  $K_{\Phi} = \frac{\Phi}{I_B}$  – коэффициент намагничивания;  $T_B = \frac{L_B}{R_B}$  – постоянная времени обмотки возбуждения;  $T_3 = \frac{L'_{\text{я}}}{r_{\text{я}}}$  – электромагнитная постоянная времени якорной цепи;  $s = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования.

Из системы уравнений (2.5) видно, что процессы в обмотке возбуждения протекают независимо от процессов в якорной цепи. Обмотка возбуждения представляет собой апериодическое звено с коэффициентом передачи  $\frac{K_{\Phi}}{R_B}$  и постоянной времени  $T_B$ , которая для машин мощностью от 1 до 1000 кВт лежит в пределах 0,2...5 с., причем с увеличением мощности быстро возрастает [5].

Формирователь тока якоря является также апериодическим звеном с коэффициентом передачи  $\frac{1}{r_{\text{я}}}$  и электромагнитной постоянной времени  $T_3$ . Для расчетов  $T_3$  индуктивность рассеяния якорной цепи машины может быть определена по приближенной формуле Уманского-Линвилля:

$$L'_{\text{я}} = \frac{\gamma \square_{\text{ян}}}{p_{\text{п}} \omega_{\text{н}} I_{\text{ян}}}, \quad (2.6)$$

где  $\gamma=0,6$  для некомпенсированных и  $\gamma=0,25$  для компенсированных машин;  $U_{\text{ян}}$ ,  $I_{\text{ян}}$  – соответственно номинальное якорное напряжение и номинальный якорный ток машины. Электромагнитная постоянная времени якорной цепи находится в пределах  $T_3=0,02...0,1$  с., причём наибольшие значения соответствуют некомпенсированным машинам.

Для исследования машины постоянного тока в режиме двигателя необходимо систему уравнений (2.5) дополнить уравнением движения

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \text{ или } M(s) - M_c(s) = Js\omega(s), \quad (2.7)$$

где  $J$  – приведенный к валу двигателя момент инерции якоря двигателя и приводного механизма;  $M_c$  – статический момент нагрузки.

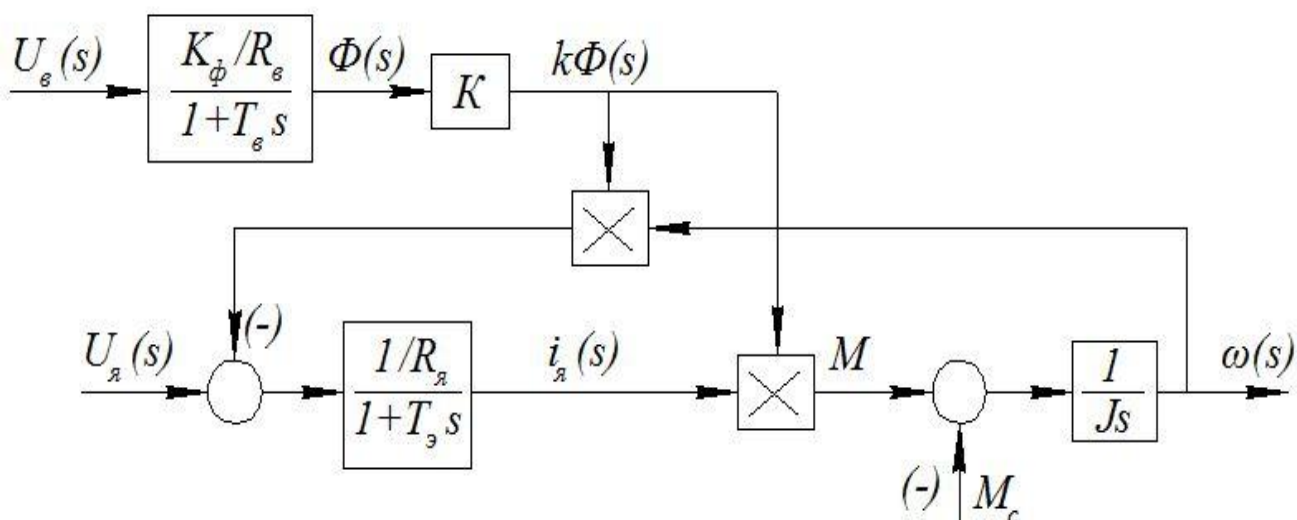


Рисунок 2.2 – Структурная схема двигателя нагрузочного устройства с обмоткой независимого возбуждения

Совокупность уравнений (2.5) и (2.7) позволяет составить структурную схему машины, работающей в двигательных режимах [8].

Схема (рис. 2.2) имеет два входа управления по изменению напряжений  $U_B$  и  $U_я$ , один вход для изменения величины момента нагрузки  $M_c$  и выходы измерения и передачи потока  $\Phi$ , тока якоря  $i_я$  и угловой скорости  $\omega$ , что позволяет использовать схему для исследования работы двигателя в переходных и установившихся режимах.

### 2.1.2 Расчет параметров силового канала нагрузочного устройства

Таблица 2.1 – Технические данные двигателя нагрузочного устройства

№ п/п	Наименование	Параметр
-------	--------------	----------

продолжение таблицы 2.1		
1	Номинальная мощность двигателя	$P_H = 800$ Вт
2	Номинальное напряжение	$U_H = 110$ В
3	Номинальная частота вращения двигателя	$n_H = 3000$ об/мин
4	Номинальный ток двигателя	$I_H = 8,7$ А
5	Число пар полюсов	$p = 1$
6	Сопротивление обмотки якоря	$R_{\text{я}} = 0,84$ Ом
7	Сопротивление преобразователя	$R_{\text{д}} = 0,264$ Ом
8	Маховый момент двигателя	$GD^2 = 0,012$ кгс·м <sup>2</sup>
9	Частота питающей сети	$f = 50$ Гц
10	Кратность максимального тока двигателя	$K_{\text{им}} = 2$

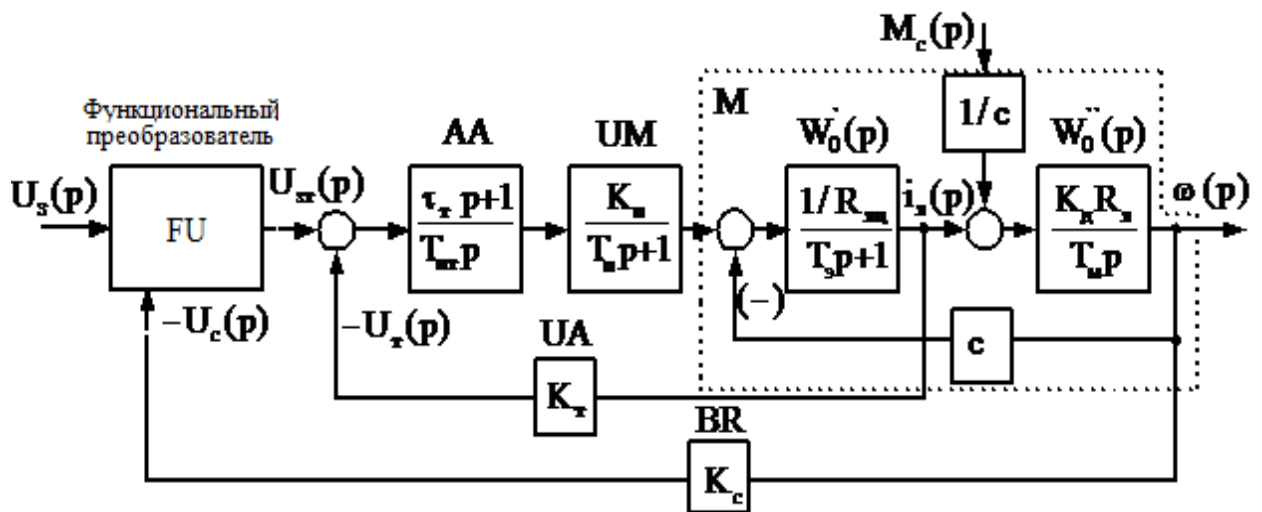


Рисунок 2.3 – Структурная схемы нагрузочного устройства на основе типовых звеньев

Структурная схема нагрузочного устройства приведена на рисунке. 2.3. «В схеме представлен исполнительный двигатель М, как объект регулирования, представлен последовательно соединенными апериодическим  $W_{01}(p)$  и интегрирующим  $W_{02}(p)$  звеньями, вентильный преобразователь УМ представлена периодическим звеном, а жесткие обратные связи, включающие UA и BR, – безынерционными звеньями с коэффициентами передачи  $k_T$  и  $k_C$ .

Расчет выполнен при следующих условиях: ток цепи якоря двигателя является непрерывным, и его пульсации находятся в допустимых пределах; внешняя и регулировочная характеристики линейны; поток реакции якоря и ЭДС якоря не оказывают существенного влияния на динамику электромагнитных процессов» [5,11].

Таблица 2.2 – Расчет параметров системы регулирования

№ п/п	Параметр	Расчет параметра
	Номинальная частота вращения двигателя $\omega_H = \frac{2\pi \cdot n_H}{60}$	$\omega_H = \frac{2\pi \cdot n_H}{60} = \frac{2\pi \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с}$
1	Номинальный момент $M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$	$M_n = \frac{800}{314} = 2,54 \text{ Нм}$
	Сопротивление якорной цепи двигателя, Ом $R_{яц} = R_я + R_д.$	$R_{яц} = 0,84 + 0,264 = 1,104 \text{ Ом}$
2	Конструктивные параметры двигателя, В*с $C_E \Phi = \frac{U_H - R_{яц} \cdot I_H}{\omega_H}$	$C_E \Phi = \frac{110 - 1,104 \cdot 8,7}{314} = 0,33 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$

продолжение таблицы 2.2		
3	<p>Расчетное значение индуктивности силовой цепи, Гн:</p> $L_{я} = \frac{K_{п} \cdot U_{н}}{I_{н} \cdot n_{н} \cdot 2p}$	$L_{я} = \frac{16 \cdot 110}{8,7 \cdot 3000 \cdot 2 \cdot 1} = 0,034 \text{ Гн}$
4	<p>Конструктивные параметры двигателя, Нм/А</p> $C_{M} \Phi = \frac{M_{н}}{I_{н}}$	$C_{M} \Phi = \frac{M_{н}}{I_{н}} = \frac{2,55}{8,7} = 0,29 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}$
5	<p>Электромагнитная постоянная двигателя, с</p> $T_{э} = \frac{L_{я}}{R_{яц}}$	$T_{э} = \frac{0,034}{1,104} = 0,03 \text{ с}$
	<p>Коэффициент передачи двигателя, <math>\frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}</math></p> $K_{д} = \frac{1}{C_{E} \Phi}$	$K_{д} = \frac{1}{0,33} = 3,03 \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}$
6	<p>Коэффициент передачи датчика тока UA</p> $k_{T} = \frac{U_{Tm}}{I_{Sm}}$	$k_{T} = \frac{5}{2,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,3} = 0,33 \text{ В/А}$
7	<p>Коэффициент усиления транзисторного инвертора</p> $k_{п} = \frac{k_{з} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{н}}{U_{y}}$	$K_{п} = \frac{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 110}{15} = 16$
	<p>Момент инерции двигателя, <math>\text{кг} \cdot \text{м}^2</math></p> $J = \frac{GD^2}{4}$	$J = \frac{0,012}{4} = 0,003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

## 2.2 Определение параметров системы регулирования и разработка математической модели нагрузочного устройства

Поскольку контура регулирования должны обрабатывать сигнал задания по моменту, то на вход схемы включаем блок FU, а в контуре тока параметры ПИ – регулятора настраиваем на «оптимум по модулю».

Передаточную функцию разомкнутого контура можно записать в виде:

$$W_{RT}(p) = \frac{\tau_T p + 1}{T_{ИТ} p} \cdot \frac{K_{П}}{T_{П} p + 1} \cdot \frac{1/R_{ЯЦ}}{T_{Э} p + 1} \cdot K_T \quad (2.8)$$

где  $\tau_T, T_{ИТ}$  - соответственно постоянные времени дифференцирования и интегрирования регулятора АА;

$K_T$  - коэффициент передачи обратной связи по току.

Во время настройки параметров АА регулятора на оптимум по модулю постоянной  $T_{Э}$  компенсируется, а постоянная  $T_{П}$  приравнивается малой  $T_{\mu}$

Коэффициент обратной связи по току

$$K_T = \frac{U_Y}{k_M \cdot I_Y} = \frac{15}{2 \cdot 8,7} = 0,86 \frac{B}{A} \quad (2.9)$$

где  $k_M = 2$  – пускового тока кратность;  $U_Y = 15$  В – напряжение управления.

Параметры регулятора тока по 3.22:

$$\tau_T = T_{Э} = 0,03 \text{ с.} \quad (2.10)$$

$$T_{ИТ} = 2T_{\mu} \cdot K_{П} \cdot K_T \cdot \frac{1}{R_{ЯЦ}} = 2 \cdot 0,003 \cdot 16 \cdot 0,86 \cdot \frac{1}{1,104} = 0,074 \text{ с.} \quad (2.11)$$

Результат: оптимизация замкнутого контура регулирования тока может быть представлена звеном с передаточной функцией, другими словами апериодическим:

$$W_{КТЗ}(p) = \frac{I_{Я}(p)}{U_{ЗТ}(p)} = \frac{1/K_T}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} \cong \frac{1/K_T}{T_T p + 1} \quad (2.12)$$

где  $T_T = 2T_{\mu}$  - постоянная времени.

$$W_{РТ}(p) = \frac{\tau_T p + 1}{T_{ИТ} p} = \frac{0,043 p + 1}{0,071 p} \quad (2.13)$$

Расчет параметров контура регулирования скорости вращения производится для режима холостого хода, т.е. при  $M_C = 0$ .

5.4.2.1 Коэффициент обратной связи по скорости вращения по (3.27) [1]:

Передаточная функция ПИ – регулятора тока имеет вид» [1]:

$$K_C = \frac{U_y}{\omega_H} = \frac{15}{314} = 0,047 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \quad (2.14)$$

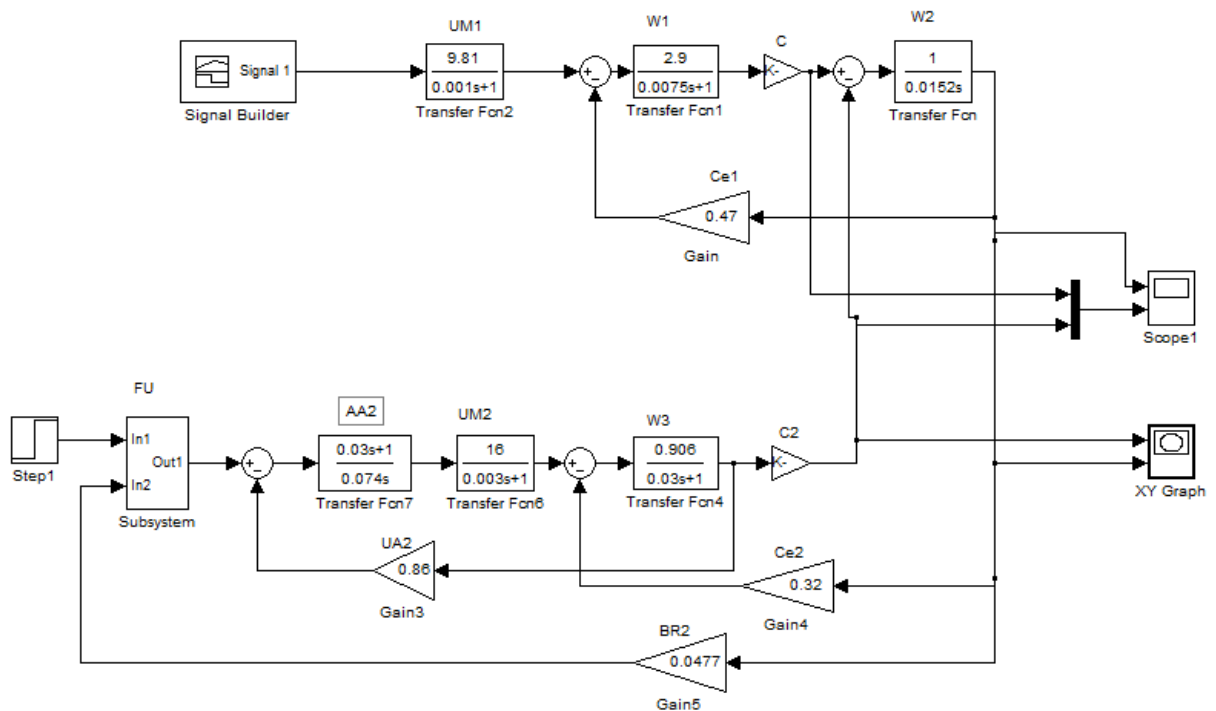


Рисунок 2.4 – Модель исследования нагрузочного устройства

Модель нагрузочного устройства содержит якорную цепь двигателя W3 (Transferfcn4), транзисторный преобразователь UM2 (Transferfcn6), регулятор тока AA2 (Transferfcn7), датчик обратной отрицательной связи по току якоря



UA2 (Gain3) и коэффициент обратной связи по ЭДС двигателя (Gain4). Управление моментом нагрузки осуществляется блоком FU, который формирует требуемые характеристики нагрузочного момента на валу испытуемого электропривода. Регистрация кривых угловой скорости  $\omega$  вращения вала, а также вращающего и нагрузочного моментов осуществляется блоком Scope.

Для исследования работы нагрузочного устройства схема (рисунок 2.4) содержит привод, включающий модель электродвигателя W1 и W2, преобразователь UM1, а также блок управления SignalBulder, который формирует тахограмму вида трапеции.

Осциллограммы исследования нагрузочного устройства приведены на рисунке 2.5. Из кривых видно, что изменение нагрузочного момента (кривая 3) при изменении скорости вращения (кривая 1) не превышает 3%. Динамический момент (кривая 2) соответствует моменту инерции машин M и НМ.

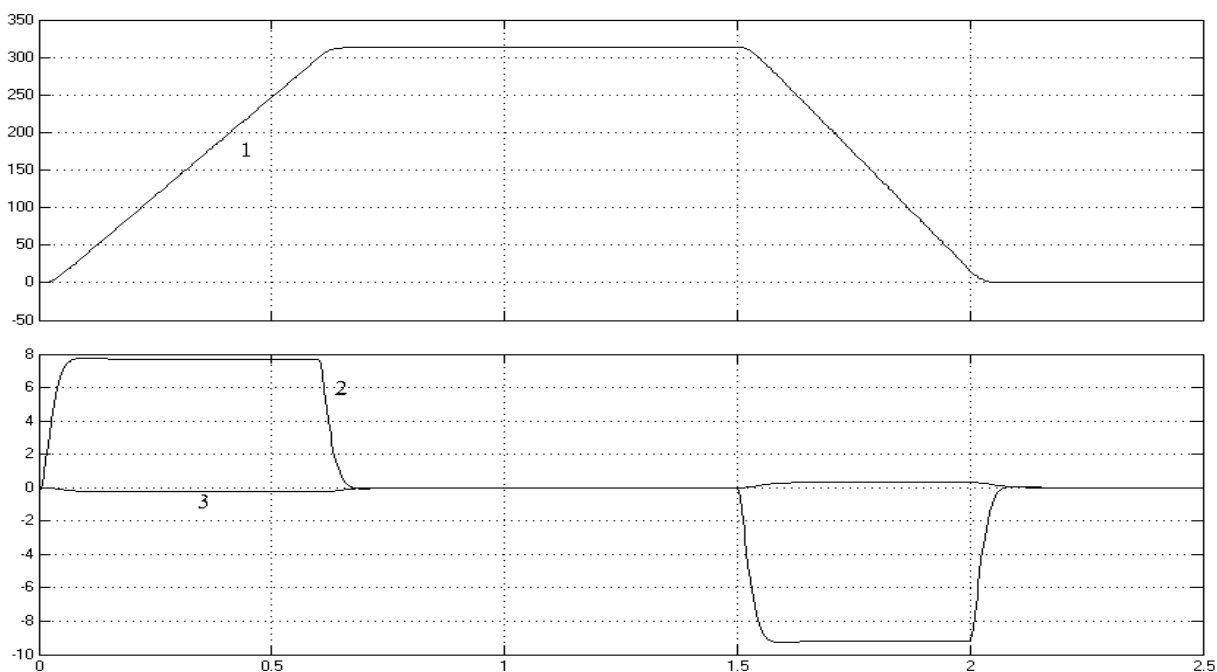


Рисунок 2.5 – Осциллограмма изменения нагрузочного и динамического моментов на валу испытуемого электропривода

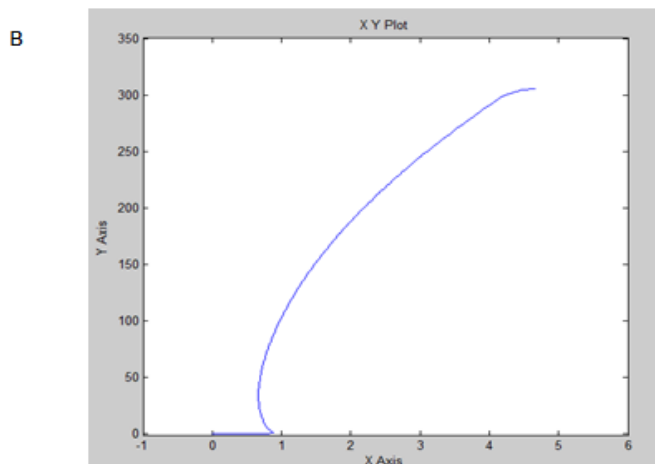
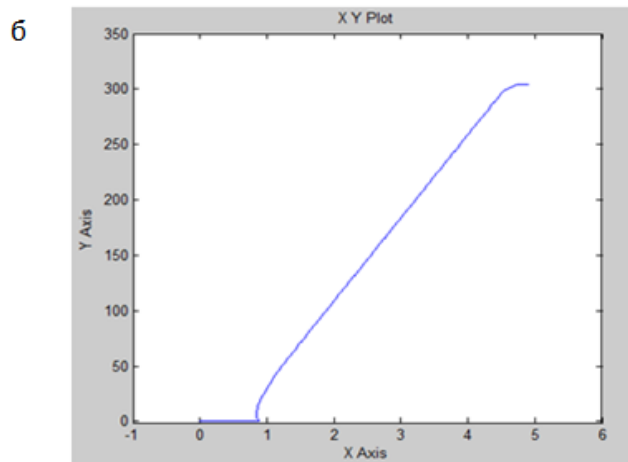
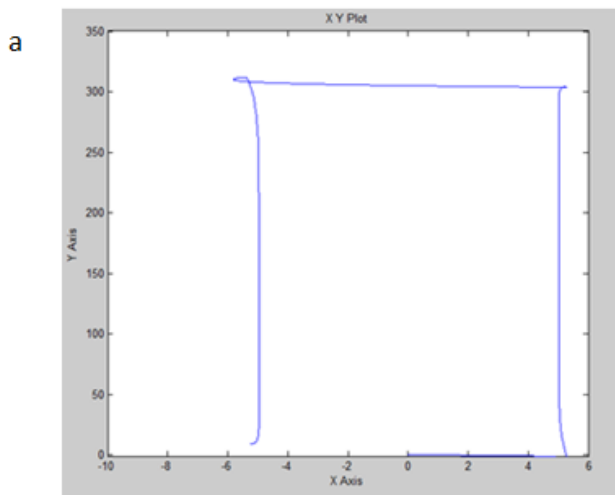


Рисунок 2.6 – Статические моменты нагрузочного устройства: а)  $M = \text{const}$ ; б)  $M = k\omega$ ; в)  $M = k\omega^2 \cdot M_c M_c$

С помощью функционального преобразователя FU можно создавать на валу испытуемого электропривода требуемые виды моментов:  $M = \text{const}$ ;  $M = k\omega$  ;

$M = k\omega^2$ . Виды создаваемых статических моментов на валу испытуемого привода показаны на рисунке. 2.6.

## 2.2 Режимы работы нагрузочного устройства при исследовании электропривода руки портального манипулятора

Для проверки особенностей функционирования и работоспособности нагрузочного устройства проведено моделирование его работы в составе с электропривода портального манипулятора. Исследование системы электропривода должно проводиться с максимальным учетом параметров, входящих в его структуру компонентов. Для этого требуется контроль переменных электродвигателя, недоступных для измерения в реальных машинах. Поэтому исследования приводов в широких пределах проводятся путем математического моделирования с применением прикладного пакета MATLAB&Simulink.

Исследуемый манипулятор используется для автоматических операций погрузки, разгрузки, а так же транспортировки заготовок от транспортера в рабочую зону станка.

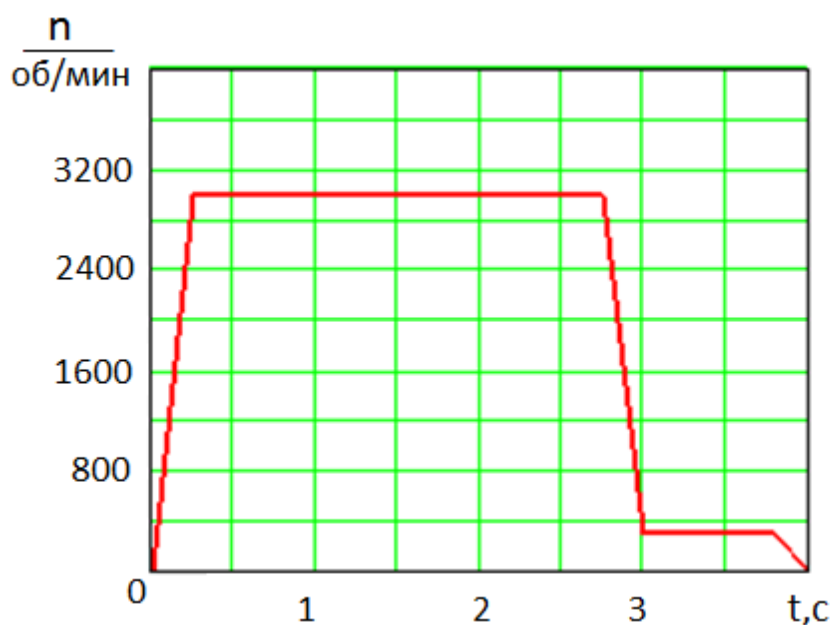


Рисунок 2.7 – Тахограмма движения руки портального манипулятора

В состав портального манипулятора входит электропривод перемещения портала и электроприводы рук для захвата и перемещения деталей. Тахограмма движения руки портального манипулятора за рабочий цикл приведена на рисунке 2.7. В тахограмме отображены следующие операции: раскручивание двигателя до скорости 3000 об/мин.; равномерное движение; торможение до демпферной скорости 250 об/мин.; движение со скоростью демпфирования и торможение до полной остановки.

Рассмотрим математическую модель электропривода руки портального манипулятора и нагрузочного устройства [18, 19,20].

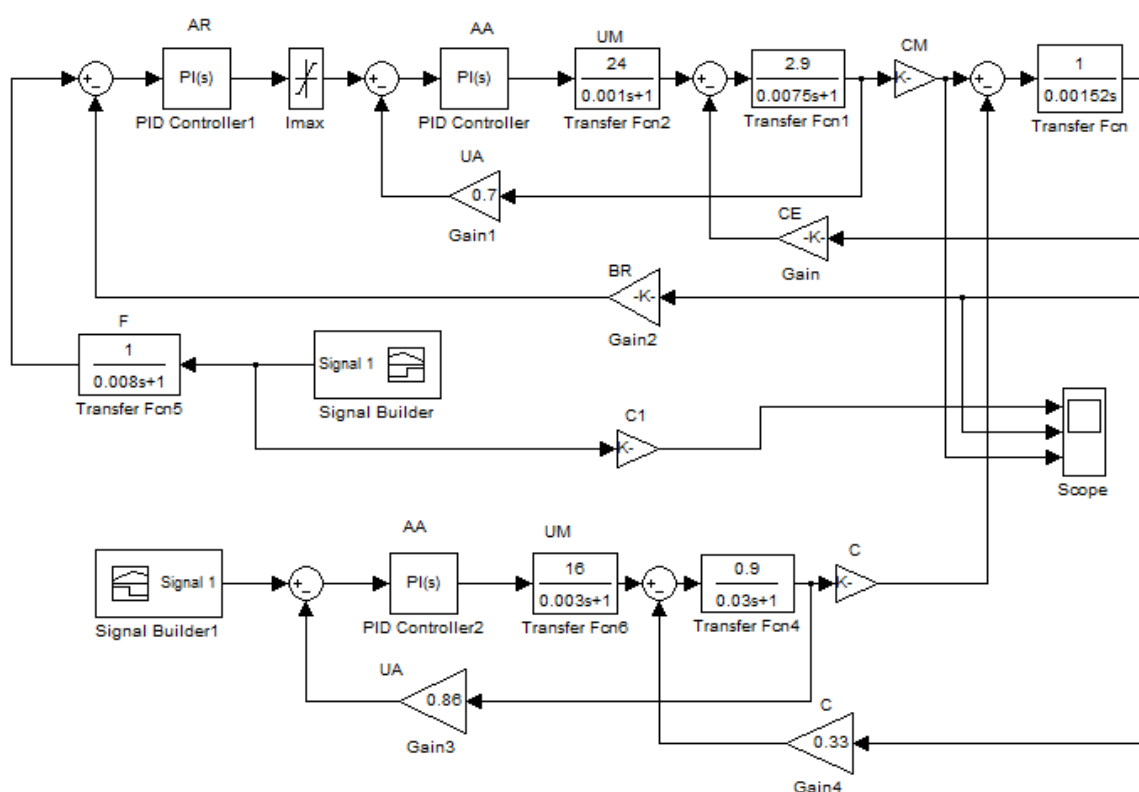


Рисунок 2.8 – Математическая модель электропривода руки манипулятора с нагрузочным устройством

Верхняя часть схемы математической модели (рисунок 2.8) содержит модель электропривода руки манипулятора, а нижняя часть - модель нагрузочного устройства.

Математическая модель электропривода руки манипулятора включает в себя модель синхронной машины (Transferfcn1 и transferfcn, Gain), транзисторного импульсного инвертора UM (Transferfcn2), модели регулятора тока AA (PID-Controller) и регулятора скорости AR (PID-Controller 1), модели обратной связи по току UA и скорости BR (Gain1, Gain2), а так же нелинейности модель I<sub>max</sub>, обеспечивает ограничение статорного тока. Задание скорости обеспечивается блоком SignalBulder, сигнал которого поступает на вход регулятора AR через фильтр F.

Модель нагрузочного устройства содержит якорную цепь двигателя (Transferfcn4), транзисторный преобразователь UM (Transferfcn6), регулятор тока AA (PID-Controller 2), датчик обратной отрицательной связи по току якоря UA (Gain3) и модель обратной связи по ЭДС двигателя (Gain4). Управление моментом нагрузки осуществляется блоком SignalBulder1. Регистрация кривых заданной  $\omega_3$  и действительной угловой скорости  $\omega$  вращения ротора, а также вращающего момента M вентильного двигателя осуществляется блоком Scope.

Таблица 2.3 – Параметры электроприводов руки манипулятора и устройства нагрузки

Электропривод руки портального манипулятора		Электропривод нагрузочного устройства	
Номинальный момент, Нм	4,5	Номинальная мощность, кВт	0,8
Частота вращения, $n_{ном}$	3000	Частота вращения, $n_{ном}$	3000
Постоянная, $C_M$ , Нм/А	0,44	Номинальное напряжение, В	110
Постоянная, $C_E$ , Нм/А	0,477	Номинальный ток, А	8,7
Эквивалентное сопротивление статора, Ом		Коэффициент усиления преобразователя	16
Электромагнитная постоянная, $T_s$ , с	0,0075	Сопротивление якорной цепи, Ом	1,1

продолжение таблицы 2.3			
Коэффициент передачи датчика тока, В/А	0,937	Постоянные машины: $C_m$ , Нм/А и $C_E$ , Нм/А	0,29 0,33
Коэффициент передачи тахогенератора, Вс/рад	0,047	Коэффициент передачи датчика тока, В/А	0,86
Приведенный момент инерции системы электроприводов,	0,00152	Электромагнитная постоянная времени, с	0,03

Параметры и постоянные времени электроприводов руки манипулятора и нагрузочного устройства представлены таблице 2.3.

Математическая модель дает возможность исследовать работу электропривода руки манипулятора при отработке различных режимов изменения задающего сигнала и момента сопротивления, варьировании значений приведённого момента инерции, коэффициента трения реечно - зубчатой передачи, перегрузочной способности двигателя, а отсюда получить исчерпывающую необходимую для настройки параметров системы регулирования приводом.

Результаты моделирования электропривода с вентильным двигателем совместно с нагрузочным устройством приведены в виде осциллограмм на рисунке 2.9. Процесс пуска привода производится за счет подачи на управляющий вход системы сигнала блока BulderSignal и на возмущающий – сигнал блока IBulderSignal 1. Управляющий сигнал блока BulderSignal соответствует графику заданной скорости вращения  $\omega_3$  (рисунок 2.9), а возмущающий сигнал блока BulderSignal 1 имитирует момент нагрузки на валу двигателя в соответствии с массой перемещаемой детали.

В контуре узла токоограничения наличие его позволяет задать непосредственно предельно-допустимые значения тока  $i_{sq\max}$  статора во время пуска. Блок позволяет регистрировать заданную угловую частоту  $\omega_3$ , вращающий момент  $M$  на валу двигателя, действительную угловую частоту  $\omega$  электропривода.

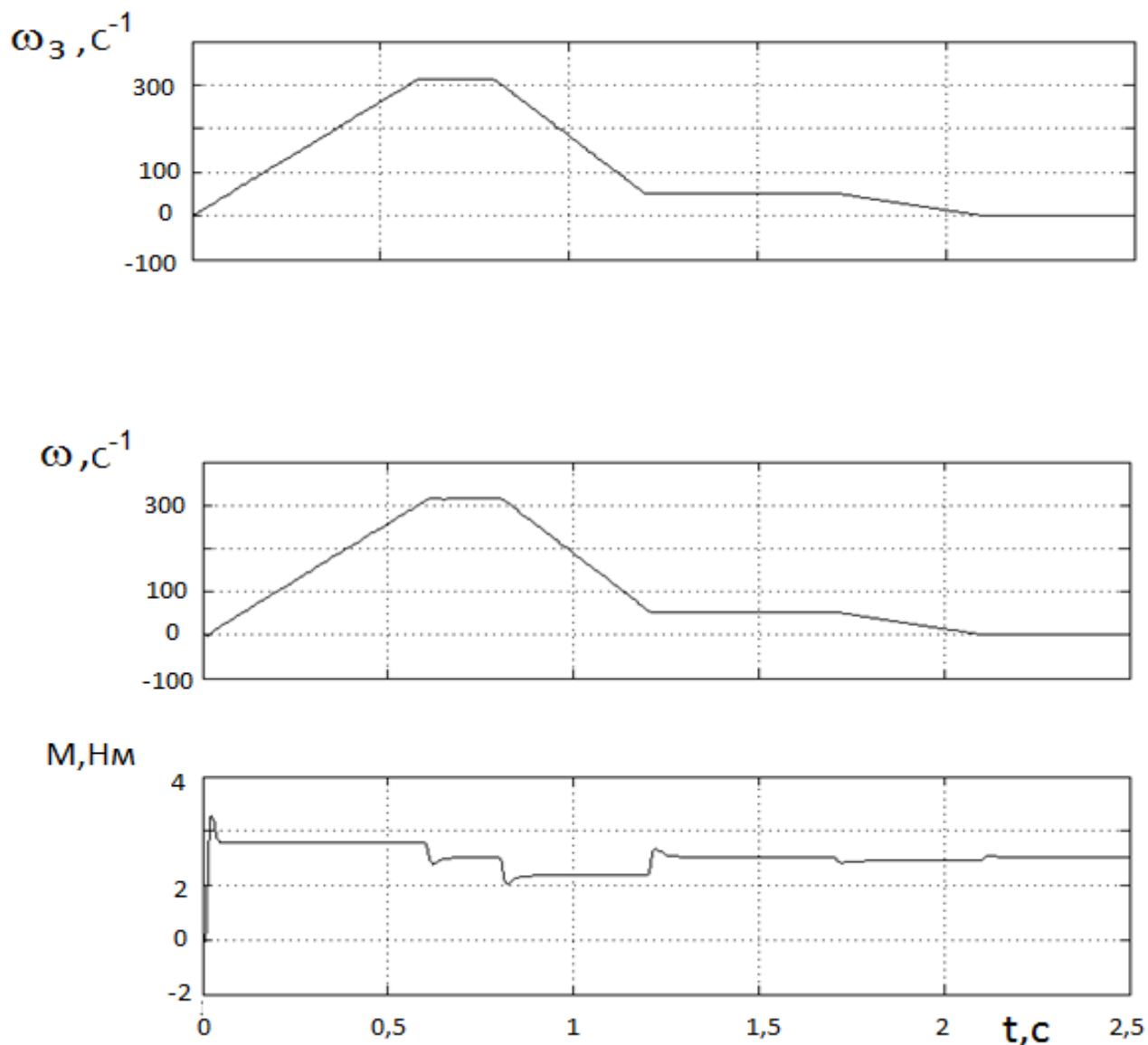


Рисунок 2.9 – Осциллограммы режимов работы электропривода с нагрузочным устройством

## 2.2 Моделирование и исследование позиционной системы электропривода с нелинейной коррекцией

В качестве позиционных электроприводов различных механизмов и устройств широкое распространение получили система электропривода с вентиляльным электродвигателем, по принципу построенным подчиненного регулирования координат. При этом типовая система регулирования электропривода

содержит три контура: тока, скорости и положения. Применение в позиционном электроприводе вентильного двигателя обеспечивает бесконтактность, возможность работы в неблагоприятных средах, высокую надежность и повышенную перегрузочную способность. Однако типовые системы регулирования электроприводами имеют жесткую структуру регулирования, которая позволяет только изменять параметры регуляторов при их настройке и параметры согласования датчиков обратных связей, что явно недостаточно при решении задач дальнейшего повышения быстродействия электропривода.

В данной статье для повышения быстродействия типовой системы позиционного электропривода с подчиненным регулированием параметров предлагается использовать нелинейную коррекцию [23,26]. Коррекция обеспечивается программным путем на основе микропроцессорной системы регулирования транзисторным преобразователем вентильного двигателя или микроконтроллера управления манипулятором.

«В структурной схеме (рисунок. 2.10) у вентильного двигателя изображена электромеханическая часть, аналогом которой является машина постоянного тока с постоянной  $T_S$  времени статора и моментом  $J_\Sigma$  инерции. Данное описание возможно, если влияние перекрестных обратных связей и продольной составляющей статорного тока будут скомпенсированы действием дополнительных сигнала  $e_k$  на входе широтно-импульсного транзисторного  $UZI$  инвертора, представленного в схеме апериодическим звеном с постоянной времени  $T_\Pi$  и коэффициентом  $k_\Pi$ . Система электропривода, а именно регулирующая её часть выполнена по структуре подчиненного регулирования координат и включает в себя внутренний контур регулирования поперечной составляющей  $i_{sq}$  тока статора, контур регулирования угловой скорости  $\omega$  вращения ротора и контур перемещения координаты  $x$  объекта.

Отрицательные обратные связи организованы с помощью датчика тока ДТ с коэффициентом  $k_{OT}$  передачи, тахогенератора ТГ с коэффициентом  $k_{OC}$  передачи и датчика ДП перемещения с коэффициентом  $k_{OP}$  передачи.



В качестве регулятора тока РТ выбран пропорционально-интегральный регулятор, а в качестве регуляторов РС скорости и РП положения – П- регуляторы» [26].

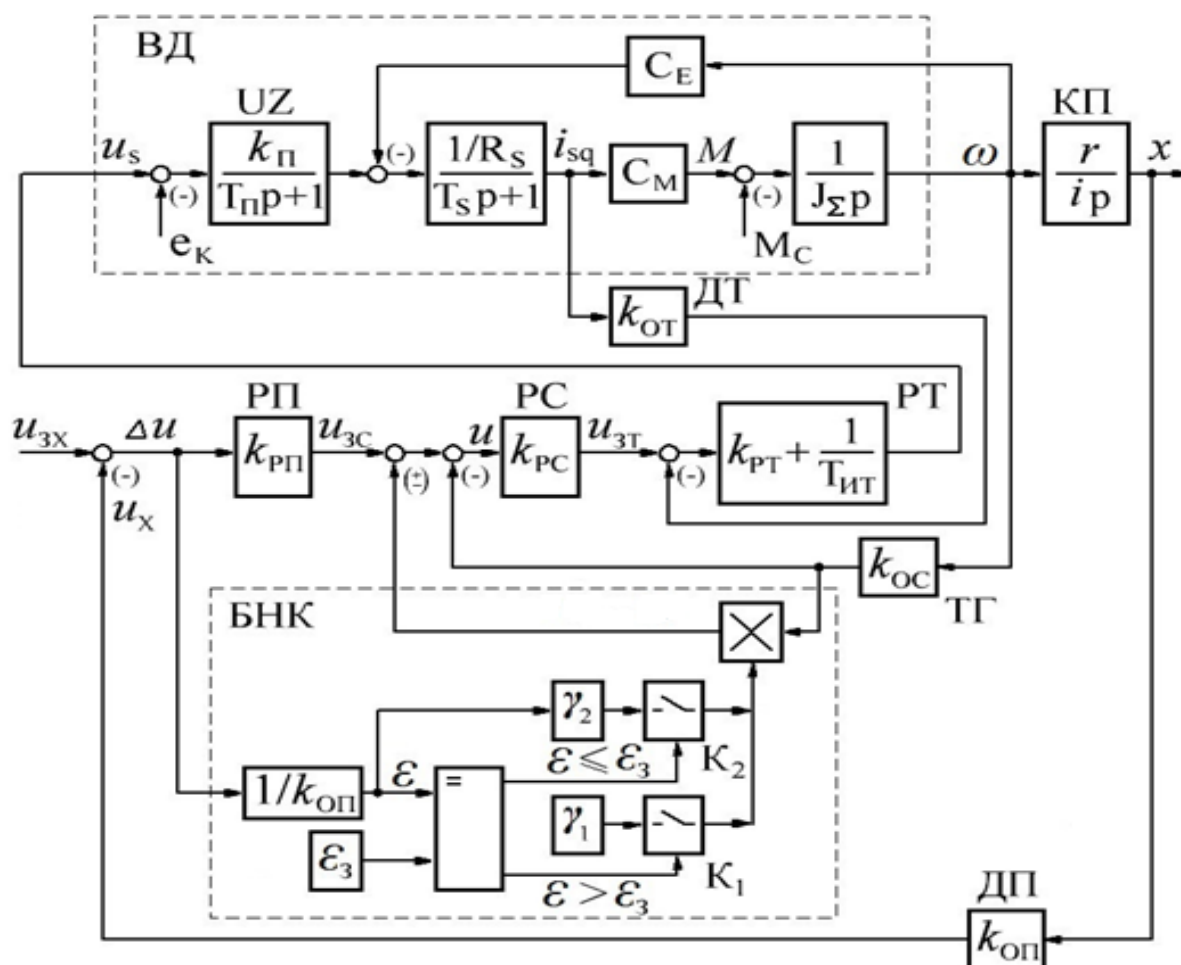


Рисунок 2.10 – Структурная схема позиционного электропривода с нелинейной коррекцией

На модульный оптимум настроены параметры всех регуляторов, этим обеспечивается максимальное быстродействие рассмотренной типовой структуры привода. перемещения. В систему включен блок нелинейной коррекции БНК для получения требуемого (более высокого) быстродействия при отработке. Алгоритм БНК работает в реальном масштабе времени и обеспечивает отработку заданного  $x_3$  перемещения в две фазы. В первой фазе, когда ошибка  $\varepsilon = x_3 - x$  превышает заданную ошибку  $\varepsilon_3$ , т.е.  $\varepsilon > \varepsilon_3$ , на вход регулятора РС через условный ключ К1 вводится положительная обратная

связь по скорости  $\omega$  вращения двигателя с коэффициентов  $\gamma_1$ . В результате чего замкнутая система позиционирования переходит на границу устойчивости и движение объекта КП происходит с предельным ускорением. Как только ошибка рассогласования достигает величины  $\varepsilon \leq \varepsilon_3$ , в действие вступает алгоритм второй фазы. На вход регулятора РС вместо положительной обратной связи вводится отрицательная обратная связь по скорости двигателя с программируемым коэффициентом  $\gamma_2$ , что позволяет обеспечить эффективное торможение электропривода и сформировать переходный процесс с требуемой величиной перерегулирования

В качестве примера выполнено математическое моделирование позиционного электропривода перемещения каретки портального манипулятора, обеспечивающего работу балансировочного станка автоматической линии механосборочного производства ОАО «АВТОВАЗ». Существующая система электропривода, построенная на базе промышленного контроллера с коллекторным двигателем, не способна обеспечить требуемую надежность и имеет низкое быстродействие, что ведет к общей потере производительности станков. Для повышения надежности и быстродействия отработки перемещений предлагается использовать типовую систему электропривода с вентильным двигателем и блоком БНК.

Таблица 2.4 – Параметры электропривода каретки портального манипулятора

Наименование параметра	Величина	Наименование параметра	Величина
Масса подвижной части каретки – $m$	420 кг	Конструктивные параметры вентильного двигателя – $C_E, C_M$	0,478Вс 0,42Нм/А
Момент сопротивления нагрузки – $M_c$	0,077 Н·м	Коэффициенты передачи датчиков – $k_{от}, k_{ос}$ и $k_{оп}$	0,625 В/А 0,0477Вс, 15 В/м
Номинальная частота вращения вентильного двигателя – $n_n$	3000 об/мин	Коэффициенты усиления регуляторов – $k_{рт}, k_{рс}$ и $k_{рп}$	0,417,139 31

Продолжение таблицы 2.4			
Радиус колеса реечной передачи – $r$ Передаточное число редуктора – $i$	0,079 м 6	Интегральная постоянная времени $T_{ит}$ и малая постоянная времени $T_{\mu}$	0,018 с 0,001с
Приведенный момент инерции привода – $J_{\Sigma}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$ кг·м <sup>2</sup>	Требуемое время отработки перемещения каретки $t_{п}$	1 с
Номинальный ток вентильного двигателя – $I_{sq}$	10 А	Допустимая величина перерегулирования	2%
Постоянная времени статорной цепи – $T_{\varsigma}$	0,0075 с	Допустимая статическая ошибка – $\Delta x_d$	2 мм

Осциллограммы (рисунок 2.11, кривые 1) соответствуют переходным процессам в системе электропривода с подчиненным регулированием координат и блоком нелинейной коррекции, а осциллограммы (кривые 2) – переходным процессам в электроприводе с регулированием координат (подчиненным). Скорость отработки с заданным перемещением в системе электропривода с нелинейной коррекцией изменяется по треугольному закону, что позволяет в полной мере использовать перегрузочную способность вентильного двигателя, тогда как в системе электропривода без нелинейной коррекции скорость отработки соответственно изменится по трапецеидальному закону и будет иметь значительно большее число колебаний.

Из сравнения осциллограмм переходных характеристик отработки заданного перемещения  $x = f(t)$  видно, что включение в типовую систему электропривода с подчиненным регулированием координат и блока нелинейной коррекции позволяет сократить время переходного процессов в 2,4 раза по сравнению с системой электропривода без нелинейной коррекции.

При отработке заданного перемещения статическая точность, когда момент  $M_c = M_H$ , не превышает допустимое значение, т.е.  $\Delta x = 0,00172 \text{ м} < \Delta x_d$ .

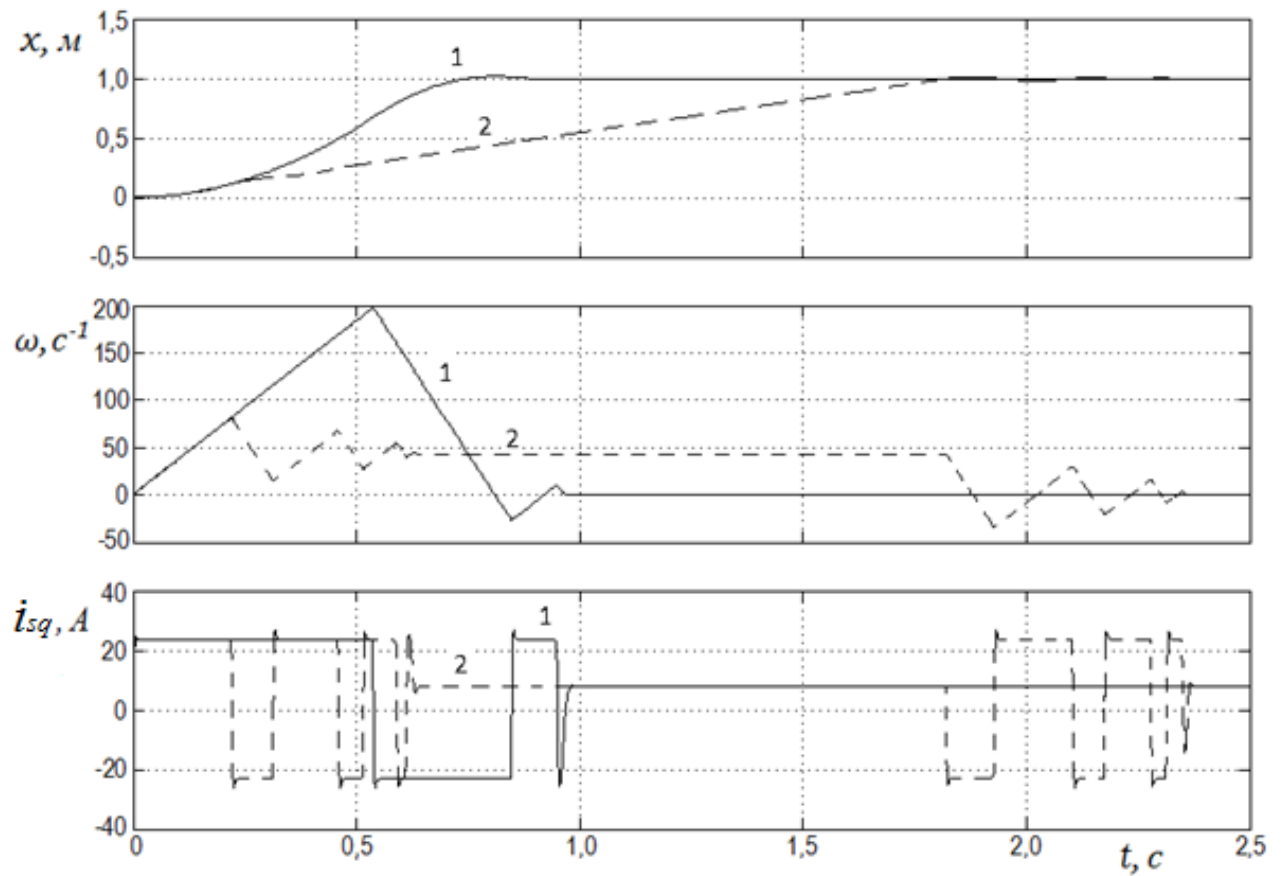


Рисунок 2.11– Сравнительные осциллограммы переходных процессов в системе позиционного электропривода

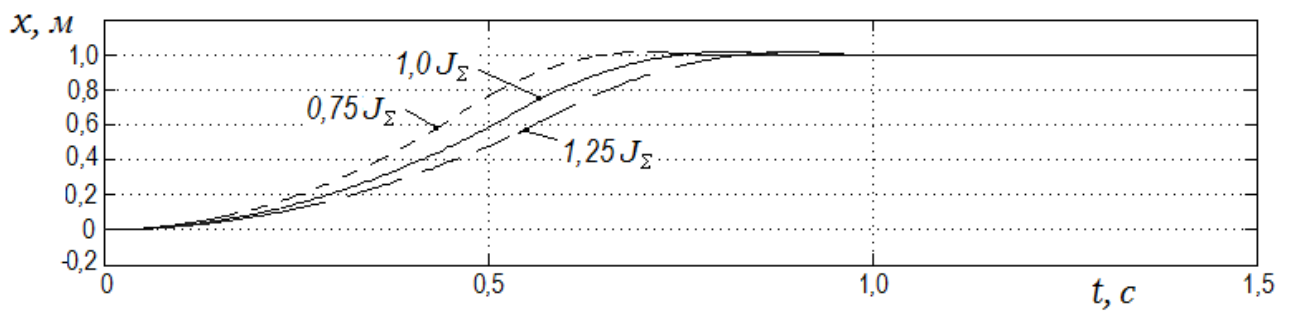


Рисунок 2.12 – Переходные процессы в системе позиционного электропривода при изменении момента инерции объекта КП

При изменении момента инерции объекта (рисунок 2.12) время  $t_{п}$  перемещения каретки изменяется в меньшей степени: так при моменте инерции объек-

та  $0,75 J_{\Sigma}$  время перемещения  $t_{\pi} = 0,65$ сек., при  $1,0 J_{\Sigma}$  время перемещения  $t_{\pi} = 0,75$ сек., а при  $1,25 J_{\Sigma}$  время перемещения  $t_{\pi} = 0,85$ сек. При этом перерегулирование остается в пределах 2% зоны.

Существенное сокращение времени переходного процесса и меньшая восприимчивость к изменению параметров объекта регулирования обеспечивается структурой построения нелинейной коррекции, работающей не во времени, а через текущие значения координат и независимо от того, в какой момент времени они имеют место в процессе обработки перемещения.

Таким образом, в ходе исследований установлено, что введение в типовую систему позиционного электропривода блока нелинейной коррекции позволяет существенно повысить её быстродействие при обработке заданного перемещения. Предложенная структура нагрузочного устройства позволяет наиболее просто проводить исследование позиционного электропривода при изменении момента инерции объекта регулирования.

### **2.3 Исследование режимов работы частотного асинхронного электропривода с векторным управлением**

В настоящее время приобретает широкое применение частотный асинхронный электропривод с векторным управлением. Это объясняется его высокой надежностью, простотой и низкими затратами на обслуживание. В связи с этим становится целесообразно исследовать и дать анализ показателей качества работы электропривода на основе результатов его математического моделирования при использовании нагрузочного устройства. Метод математического моделирования позволяет производить исследования электромеханических процессов, делать выбор структуры электропривода и оценивать динамические свойства и характеристики частотного электропривода. При этом целесообразно использовать прикладной пакет MATLAB&Simulink. Набор библиотек пакета позволяет создавать модели нагрузочного и испытуемого электродвигателя,

систем управления и систем автоматизированного привода. Но использование стандартных моделей пакета не позволяет в полной мере вести учет изменений данных параметров привода в процессе его работы и производить необходимые измерения, из-за того что большинство параметров и переменных состояния электропривода недоступны. Так же нельзя произвести замер параметров ротора, и тока статора во вращающейся системе координат. Помимо этого, не достучность применение стандартных моделей возможности изменение параметров машины такие как насыщение магнитной системы, потери в стали и эффект вытеснения тока в стержнях ротора [3]. В связи с этим необходимо создать гибридную модель.

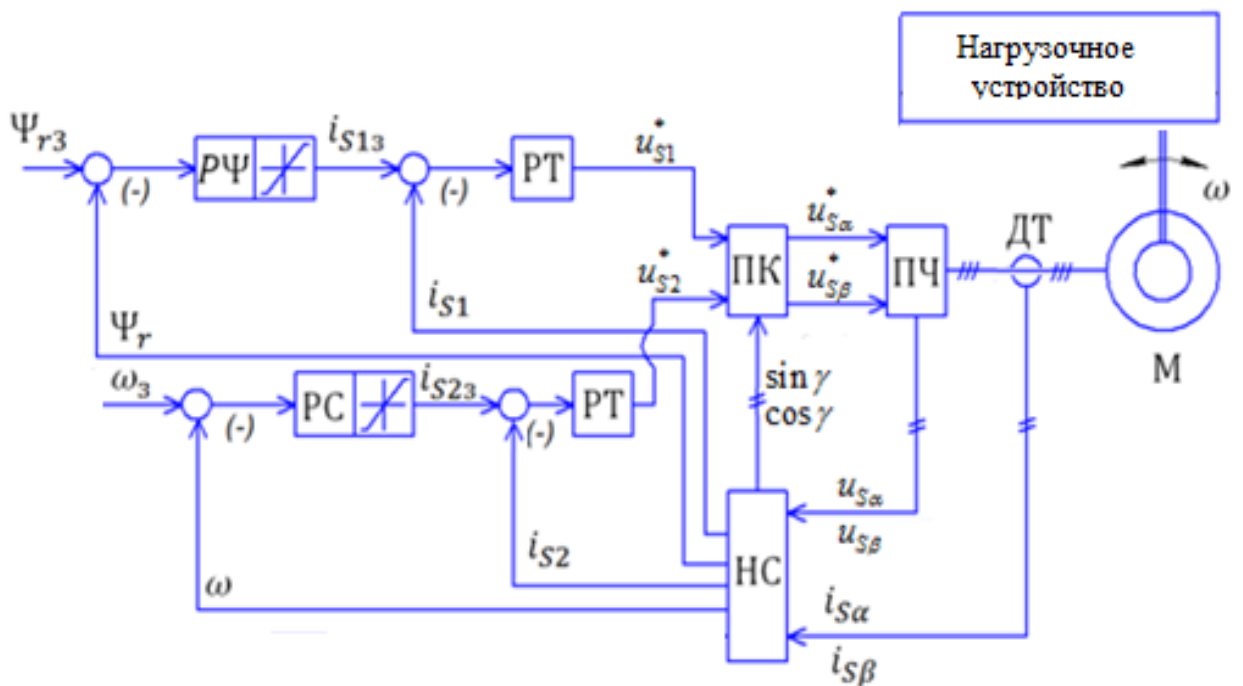


Рисунок 2.13 – Функциональная схема частотного асинхронного электропривода с векторным управлением

В приведенной схеме (рисунок 2.13) используется бездатчиковая системы векторного управления. В схеме вал ротора асинхронного двигателя М через редуктор обеспечивает перемещение портала, а статор двигателя получает питание от преобразователя частоты ПЧ. Регулируемыми переменными являются

намагничивающая составляющая тока  $i_{s1}$  статора, квадратурная составляющая тока  $i_{s2}$  статора, модуль потокосцепления ротора  $\Psi_r$ , угловая скорость ротора  $\omega$  и величина перемещения портала  $X$ . Вычисление переменных осуществляется наблюдателем состояния НС, на вход которого поступают статорные фазные токи  $i_{sa}, i_{sb}$  с датчика тока ДТ и фазные напряжения  $u_{sa}, u_{sb}$ . Координатные преобразования статорных токов из неподвижной системы координат  $(\alpha, j\beta)$  во вращающую  $(1, j2)$  производятся в НС, а преобразование статорных напряжений осуществляется с помощью преобразователя координат ПК. При этом используются следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} i_{s1} &= i_{s\alpha} \cos \gamma + i_{s\beta} \sin \gamma; i_{s2} = -i_{s\alpha} \sin \gamma + i_{s\beta} \cos \gamma; \\ u_{s\alpha}^* &= u_{s1}^* \cos \gamma - u_{s2}^* \sin \gamma; u_{s\beta}^* = u_{s1}^* \sin \gamma + u_{s2}^* \cos \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

Система регулирования электропривода содержит два канала управления: канал стабилизации магнитного потокосцепления ротора и канал регулирования величины перемещения портала. В контурах регулирования используются регуляторы тока РТ, потокосцепления ротора РΨ, угловой скорости РС и перемещения РП.

«Для создания математической модели уравнения асинхронного двигателя представлены в системе координат  $(\alpha, j\beta)$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} &= U_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha}; \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta}; \\ \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} &= -R_r \cdot i_{r\alpha} - p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\beta}; \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = -R_r \cdot i_{r\beta} + p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

где  $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}, \Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}, u_{s\alpha}, u_{s\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  – соответственно потокосцепления ротора и статора, напряжения статора, токи ротора и статора в осях  $(\alpha,$

$\beta$ );  $r_s$  и  $r_r$  – активное сопротивление ротора и статора;  $\omega$  – угловая скорость ротора.

Потокосцепления, токи ротора статора асинхронного двигателя представляем системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \psi_{0\alpha} &= \psi_{s\alpha} - L_{\sigma s} i_{s\alpha}; i_{s\beta} = \frac{1}{L_m} \psi_{0\alpha} - i_{r\alpha}; \\ \psi_{0\beta} &= \psi_{s\beta} - L_{\sigma s} i_{s\beta}; i_{s\alpha} = \frac{1}{L_m} \psi_{0\beta} - i_{r\beta}; \\ i_{r\alpha} &= \frac{1}{L_{\sigma r}} (\psi_{r\alpha} - \psi_{0\alpha}); i_{r\beta} = \frac{1}{L_{\sigma r}} (\psi_{r\beta} - \psi_{0\beta}), \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

где  $\psi_{0\alpha}$  и  $\psi_{0\beta}$  – составляющие главного потокосцепления в воздушном зазоре двигателя по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $L_m$  и  $L_{\sigma s}$ ,  $L_{\sigma r}$  – взаимная индуктивность фаз статора и ротора и индуктивности рассеяния статора и ротора;

Уравнения движения ротора и электромагнитного момента:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_C; \quad (2.18)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}), \quad (2.19)$$

где  $J$  – момент инерции ротора;  $M$  и  $M_C$  – соответственно электромагнитный и статический момент электродвигателя;  $p$  – число пар полюсов.

Учет насыщения магнитной цепи по пути главного потокосцепления и по пути потока рассеяния выполняем введением в уравнения (2) функциональных зависимостей

$$\frac{1}{L_m} = f(\psi_0) \text{ и } (L_{\sigma s}) = f(i_s) \quad (2.20)$$

где  $\psi_0, I_s$  – модуль вектора потокосцепления воздушного зазора и модуль вектора тока статора» [24].



Эффект вытеснения тока в роторной обмотке проявляется в изменении активного сопротивления [14].

$$r_{r1} = k_1 \cdot r_r = 0,07 h \sqrt{s} \cdot r_{rn} + r_{rl}. \quad (2.21)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающие изменение сопротивлений под влиянием поверхностного эффекта;  $r_m$ ,  $r_{rn}$  – сопротивления пазовой части обмотки ротора;  $s$  – скольжение.

Стандартные блоки библиотеки MATLAB&Simulink, предназначенные для моделирования нелинейных систем LookupTable могут быть использованы для учета насыщения магнитной цепи электродвигателя. Такая полная модель электродвигателя в качестве подсистемы может входить в структуру моделей ЗМЭ «(замкнутых систем приводов) с векторным управлением, и высокой степенью точности заменяя обеспечивая хорошие предпосылки для разнообразных исследований электроприводов в переходных режимах реальные объекты.

Уравнения (2.15), (2.16), (2.17), (2.18), и (2.19) благодаря им можно составить модель для того что б произвести исследование динамических режимов, а включение в неё (2.20), и (2.21) обеспечит учет изменений параметров электродвигателя.

Модель управления асинхронным двигателем где действующие сигналы постоянного тока выполняется во вращающейся системе координат,. Благодаря этому есть возможность строить контуры регулирования по принципам подчиненного регулирования, а так же использовать в них стандартные настройки регуляторов, разработанные для электроприводов постоянного тока. Именно это решение применяется в канале регулирования электромагнитного момента и в канале стабилизации модуля потокосцепления ротора»[24]. На основе приведенных уравнений из стандартных элементов в MATLAB&Simulink составляется математическая модель частотного асинхронного электропривода с векторным управлением (рис.2.14).

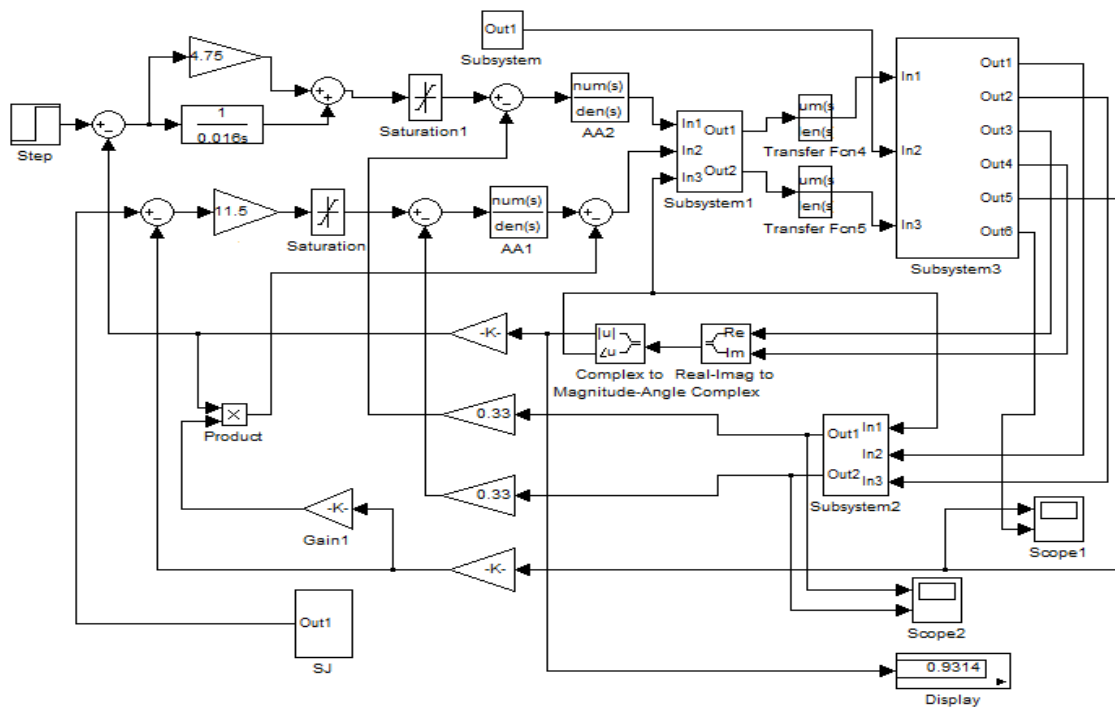


Рисунок 2.14 – Модель асинхронного электропривода с векторным управлением

В схему модели вставлен асинхронный двигатель  $M$ , преобразователь частоты ПЧ, наблюдатель переменных состояния асинхронного двигателя  $H$ , регулятор стабилизации модуля потокосцепления ротора  $\Psi$ , и регулятор скорости вращения  $AR$ , а также прямой и обратный координатные преобразователи (Subsystem 1 и Subsystem 2). В наблюдателе, блок Real – Imag to Complex происходит вычисление вектора потокосцепления ротора  $\vec{\Psi}_r$ , а затем посредством блока Complex to Magnitude – Angle вычисляется модуль  $\Psi_r$  и текущий угол  $\gamma$  состояния вектора. Коэффициент  $k_T$  обеспечивает коэффициент связи по току,  $k_\psi$  - коэффициент связи с потокосцеплением ротора, а  $k_C$  - коэффициент связи по угловой скорости ротора.

Разработанная математическая модель асинхронного электропривода с векторным управлением необходима для исследования и изучения динамических

процессов, отличающаяся от моделей с более простейшей структурой построения, с помощью неё можно учесть изменение параметров электродвигателя и проводить регистрацию переменных вектора состояния системы привода. Максимальное количество координат асинхронного электродвигателя доступно измерению и контролю при проведении исследований, кроме того модель обеспечивает учет влияния насыщения магнитной цепи и эффект вытеснения тока в стержнях ротора в динамических режимах работы асинхронного электропривода.

При математическое моделирование в качестве асинхронного двигателя выбран двигатель 4А80В2У3,  $P_{\text{НОМ}} = 2,2 \text{ кВт}$ ,  $n_{\text{НОМ}} = 3000 \text{ об/мин}$ . Расчет коэффициентов обратных связей и параметров контуров регулирования произведено в табл.2.5.

Таблица 2.5 – Расчет параметров системы регулирования

№п/п	Расчет параметра	Расчет параметра
1	Вектор тока статора $\bar{i}_s = I_{SH} \cos \phi + j I_{SH} \sin \phi$ $= 9,513 + j4,334$	Коэффициент усиления инвертора $k_{\Pi} = \frac{k_3 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\phi H}}{U_H} = 71,559$
2	Вектор тока холостого хода $\bar{i}_o = j \frac{U_{SH}}{\omega \cdot L_s} = j4,093$	Параметры регулятора тока. $T_s = \frac{L'_s}{R'_s} = \frac{\sigma \cdot L_s}{R_s + k_r^2 \cdot R_\gamma} = 6,119 \cdot 10^{-3}$
3	Потокосцепление ротора $\underline{\psi}_r = \frac{1}{K_r} \cdot \underline{\psi}_0 - L_{\sigma r} \cdot \underline{i}_s$ $= j0,684 - 0,067$	$T_{\Pi T} = \frac{2 \cdot T_\mu \cdot k_{\Pi} \cdot k_T}{R'_s} = 5,697 \cdot 10^{-3}$
4	Мах значение модуля потокосцепление ротора $\Psi_{rm} = \sqrt{2} \cdot \psi_r = 0,9314$	Параметры регулятора потокосцепления. $k_{p\psi} = 4,75$ ; $T_{\Pi\psi} = \frac{4T_\mu \cdot \varepsilon \cdot L_m \cdot k_\psi}{k_T} = 0,016$
Продолжение таблицы 2.4		
5	Коэффициент потокосцепления	Коэффициент связи по скорости

	$k_{\psi} = \frac{U_{\psi m}}{\psi_{r m}} = 5,368$	$k_c = \frac{U_{cm}}{\omega_0} = 0,0159$
6	Коэффициент связи по то- ку $k_T = \frac{U_{Tm}}{I_{Sm}} = 0,33$	Коэффициент усиления регулятора корости $k_{pc} = \frac{J \cdot k_T}{6 \cdot k_r \cdot T_{\mu} \cdot k_c \cdot p_{II} \cdot \psi_r} = 11,5$

Результаты исследований режимов работы и качественных показателей асинхронного электропривода с векторным управлением приведены на рисунках 2.15 – 2.18.

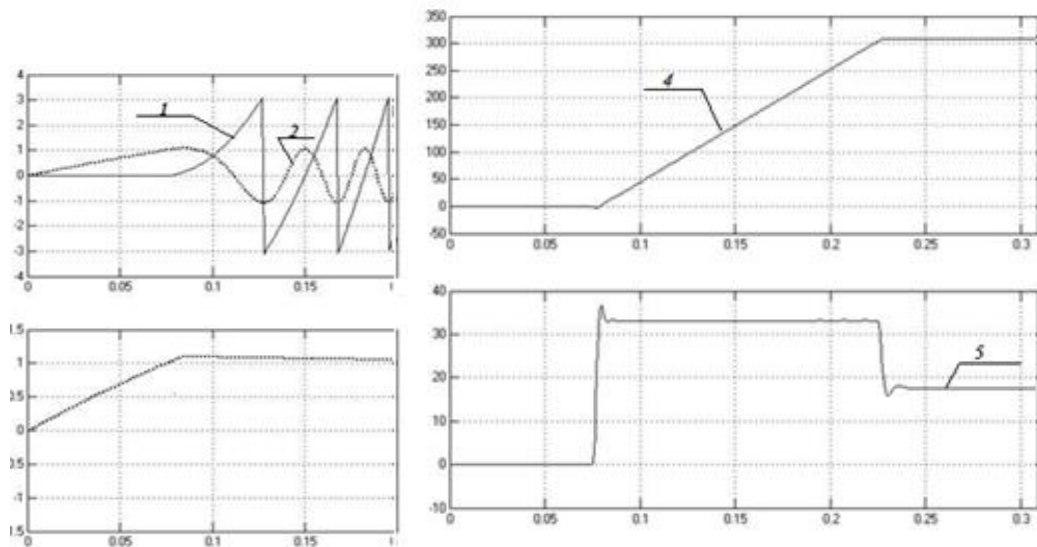


Рисунок 2.15 – Осциллограммы изменения координат при пуске электропривода: а) изменение угла поворота ротора – 1, потокосцепления ротора  $\Psi_{ra}$  – 2 и модуль вектора потокосцепления ротора  $\Psi_r$  – 3; б) скорость вращения ротора – 4 , электромагнитный момент двигателя -5

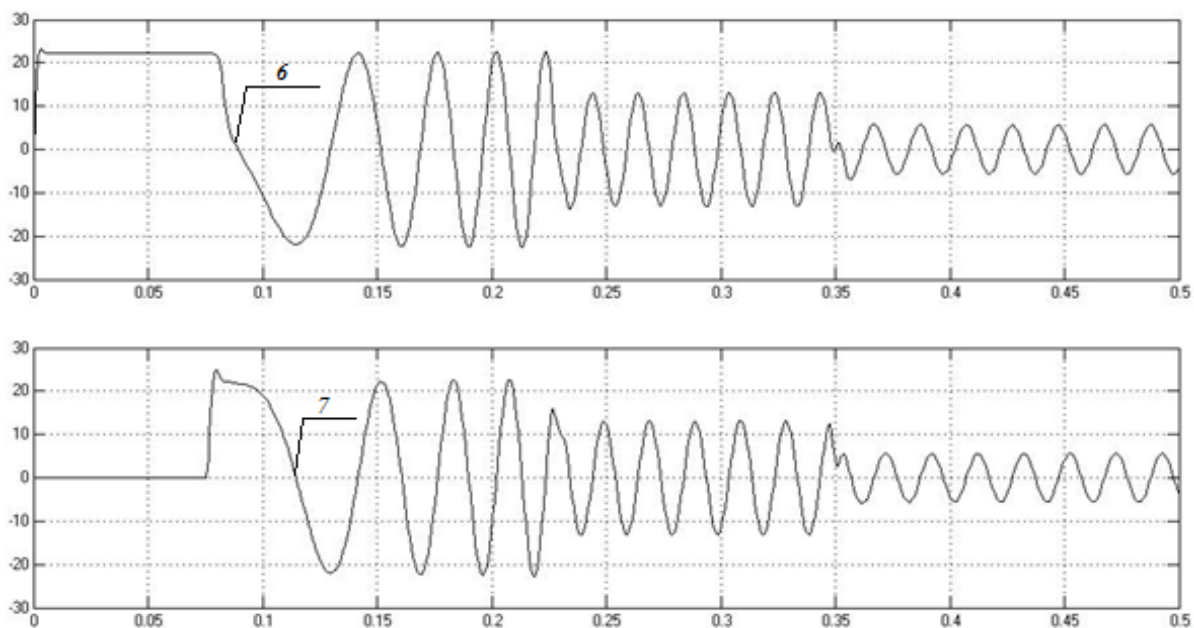


Рисунок 2.16 – Осциллограммы пускового момента статорных токов, при сбросе нагрузки и в номинальном режиме

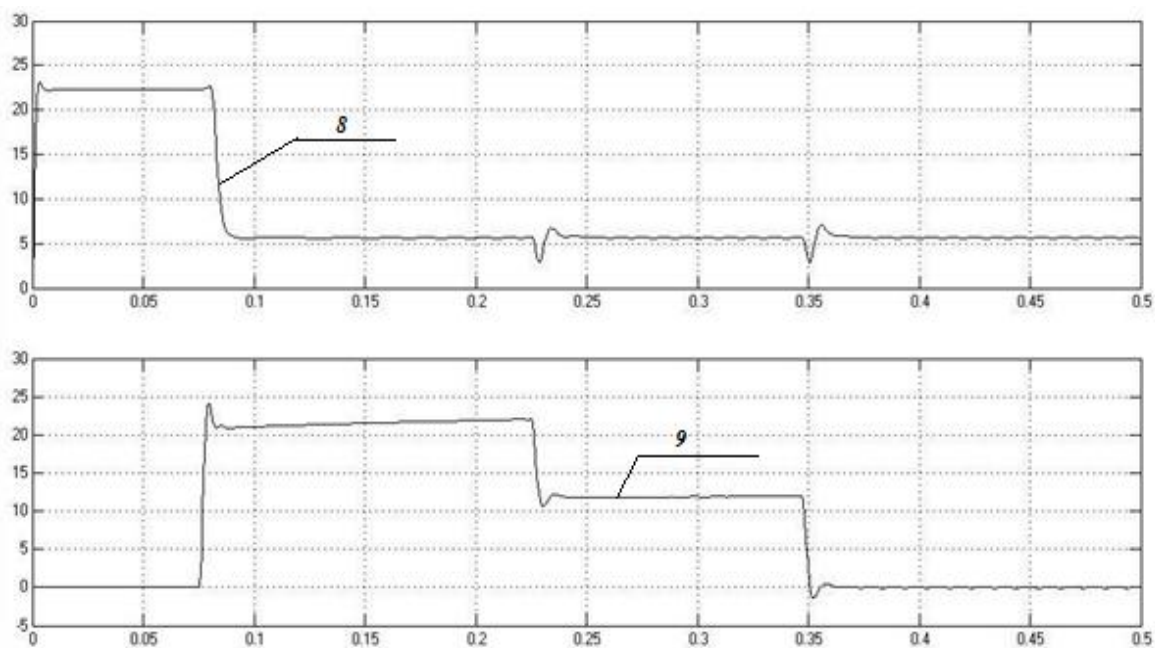


Рисунок 2.17 – Осциллограммы номинальном режиме и сбросе нагрузки во вращающейся системе координат при пусковом режиме

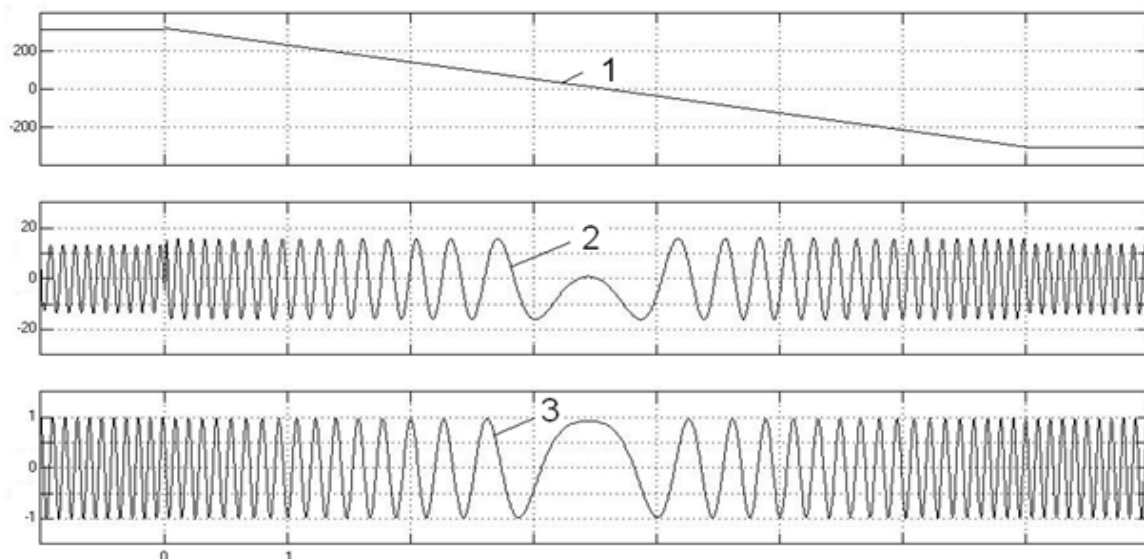


Рисунок 2.18 – Осциллограммы изменения частоты вращения ротора (1), фазного тока статорной обмотки (2) и потокосцепления ротора (3) при реверсе асинхронного электропривода для разработанной модели

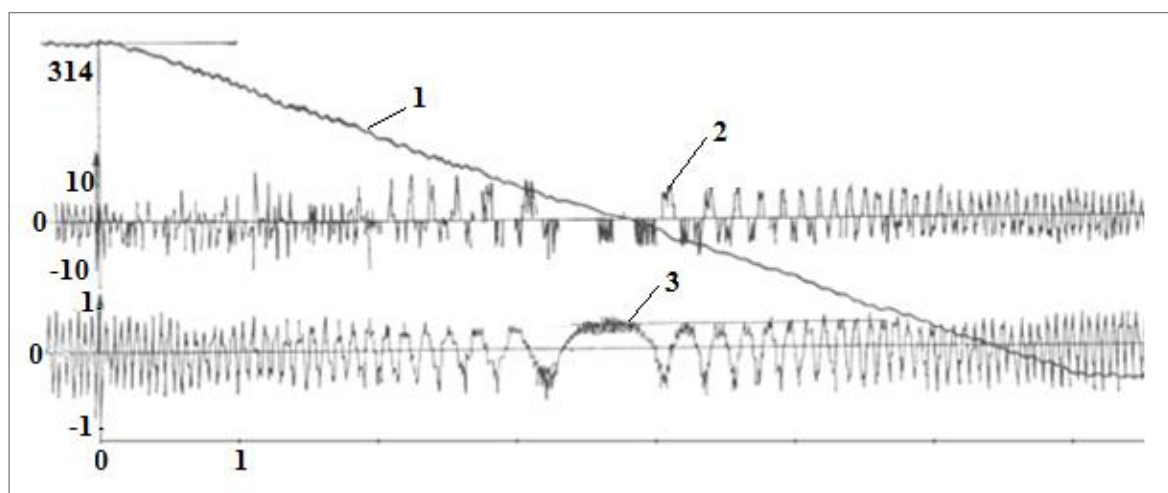


Рисунок 2.19 – Осциллограммы изменения частоты вращения ротора (1), фазного тока статорной обмотки (2) и потокосцепления ротора (3) при реверсе асинхронного электропривода для реальной установки

## **2.4 Выводы**

Разработана система управления нагрузочным устройством, позволяющая создавать на валу испытуемого электропривода типовые рабочие характеристики. Погрешность при воспроизведении нагрузки составляет не более 5%. Разработанное нагрузочное устройство по структуре и схеме управления отличается от известных нагрузочных устройств простотой построения. Проведенные исследования режимов работы вентильного, электропривода руки портального манипулятора и позиционной системы электропривода с нелинейной коррекцией методом моделирования в программе MATLAB&Simulink показали способность создавать нагрузочные моменты согласно заданной программе и устойчивую работу нагрузочного устройства в статических и динамических режимах.

### **3 Экспериментальные исследования нагрузочного устройства на испытательном стенде**

#### **3.1 Работа нагрузочного устройства при исследовании асинхронного электропривода**

Функциональная схема испытательного стенда показана на рисунке 3.1. Она состоит из асинхронного электропривода и нагрузочного устройства. Схема испытуемого асинхронного электропривода питается от сети напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Автоматический выключатель через напряжение QF1. Далее, при замыкании контакта контактора К1, который включается от кнопки SB2, напряжение подаётся на преобразователь U1.

Преобразователь U1 состоит из неуправляемого выпрямителя, защитного устройства и автономного инвертора АИ. От преобразователя U1 через предохранители напряжение поступает на асинхронный двигатель M1.

Схема нагружающего электропривода питается от трехфазной сети напряжением 380 В. Напряжение подаётся через автоматический выключатель QF2 на трансформатор Т1 и Т2. Когда необходимо нагружать исполнительный электропривод, замыкается контакт кнопки SB4, что приводит к включению контактора. От трансформаторов Т1 и Т2 напряжение подаётся на преобразователь U2 и одновременно, через предохранители FU1 и FU2 на неуправляемый выпрямитель блока питания электромагнитного тормоза. Это сделано для того, чтобы при подаче питания на якорь двигателя M2 происходило растормаживание электромагнитного К2, который своими контактами замыкает цепь питания тормоза. Преобразователь U2 нагружающего электропривода состоит из стабилизатора напряжения, неуправляемого выпрямителя, и транзисторного преобразователя с ШИМ UM. От преобразователя U2 питание подаётся на якорь нагружающего двигателя постоянного тока M2.



3-50Гц  
380В

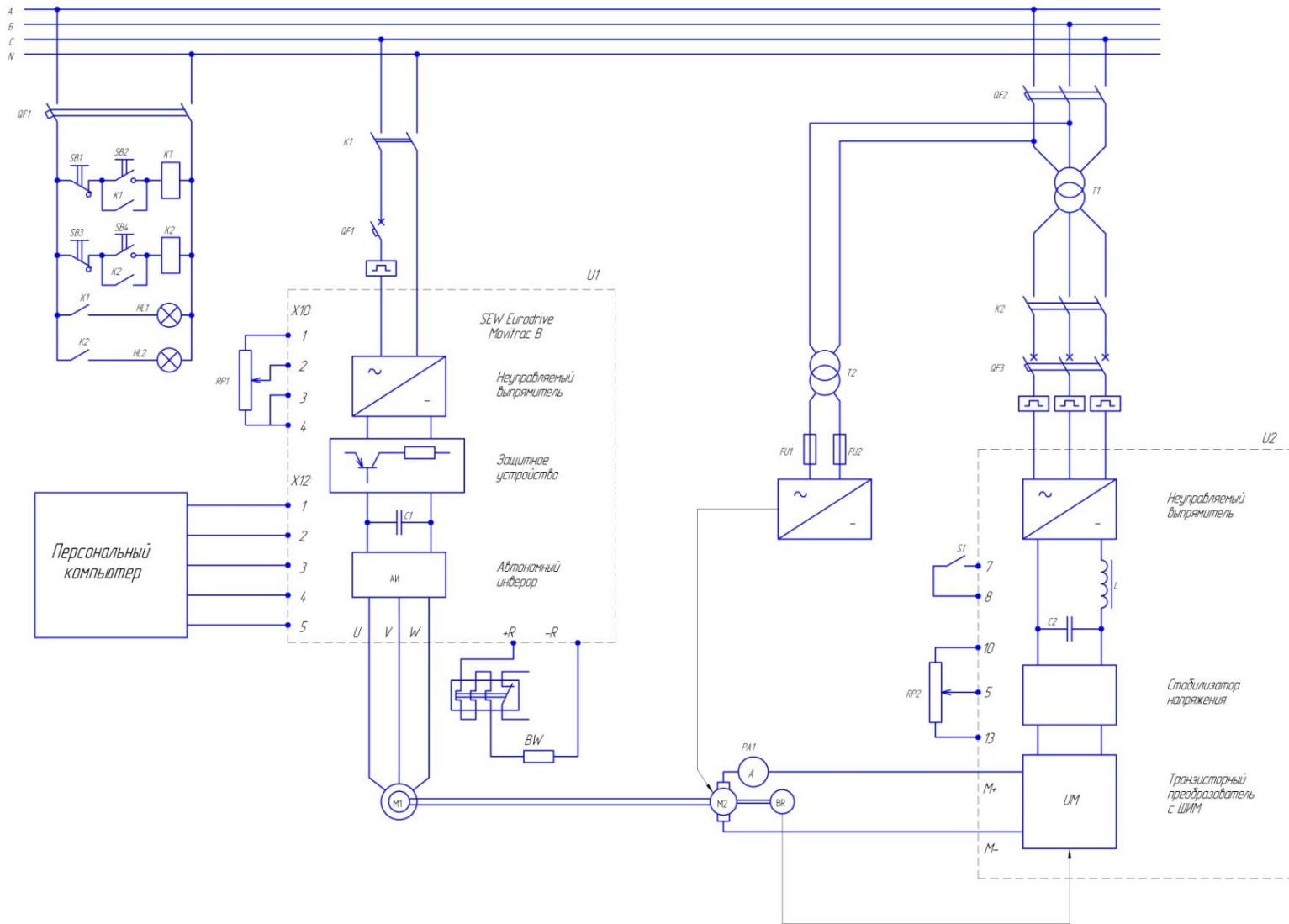


Рисунок 3.1. Функциональная схема испытательного стенда

В цепь питания якоря нагружающего двигателя постоянного тока М2 включен амперметр РА1.

С помощью персонального компьютера выполняются следующие основные операции:

- визуальное отображение состояния параметров и переменных электропривода;
- задание режимов работы электропривода;
- автоматизация экспериментальных исследований;
- осциллографирование измеряемых координат;
- обработка результатов экспериментальных исследований.

### 3.1.1 Пуск программы управления MOVITOOLS MotionStudio и снятие характеристик пуска электропривода



Рисунок 3.2 – Вход программы MotionStudio

1. Пуск программы управления асинхронным электроприводом выполняется в следующей последовательности:

- Запустите программу MOVITOOLS MotionStudio и выберите «Newproject» для создания нового проекта → Ok;
- В строке «Projectname» введите имя проекта, например Work1 → Ok;

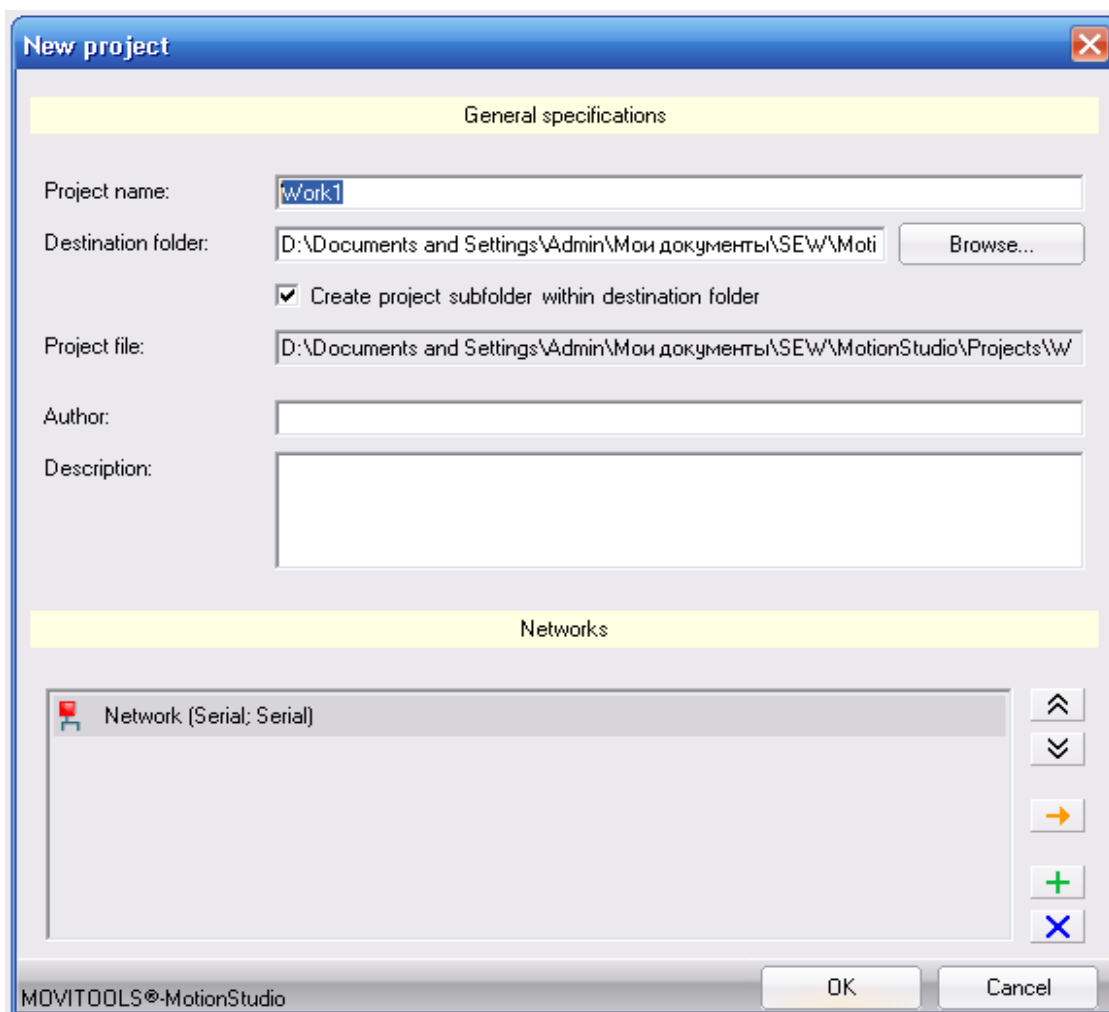


Рисунок 3.3 – Выбор нового проекта исследований

- Кликните правой кнопкой мыши по «Serial (COM 4 USB)» и выберите Networkscan;



Начнётся сканирование сети;



Рисунок 3.4 – Сканирование готовности оборудования стенда

Появится изображение преобразователя частоты. Кликните правой кнопкой мыши для открытия контекстного меню. Выберите «Startup» - «Manual operation».

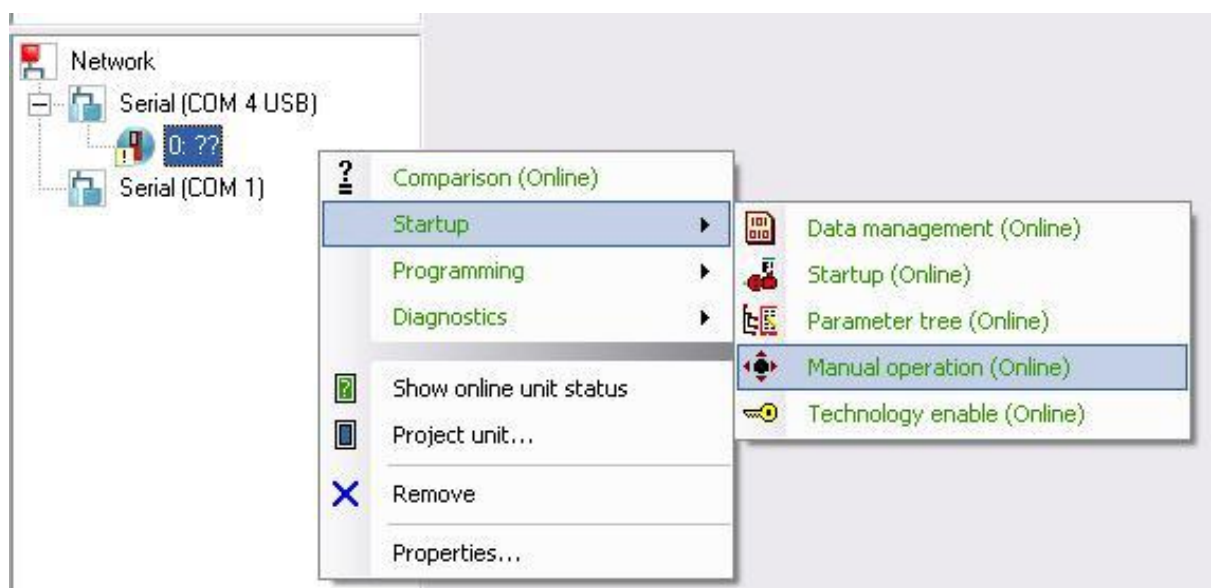


Рисунок 3.5 – Выбор операции «Пуск» программы»

2. Для пуска электропривода на заданную скорость вращения необходимо выполнить следующие операции на компьютере:

- Нажмите для активации ручного режима «ActivateManualoperation», затем для запуска двигателя – «Start»;

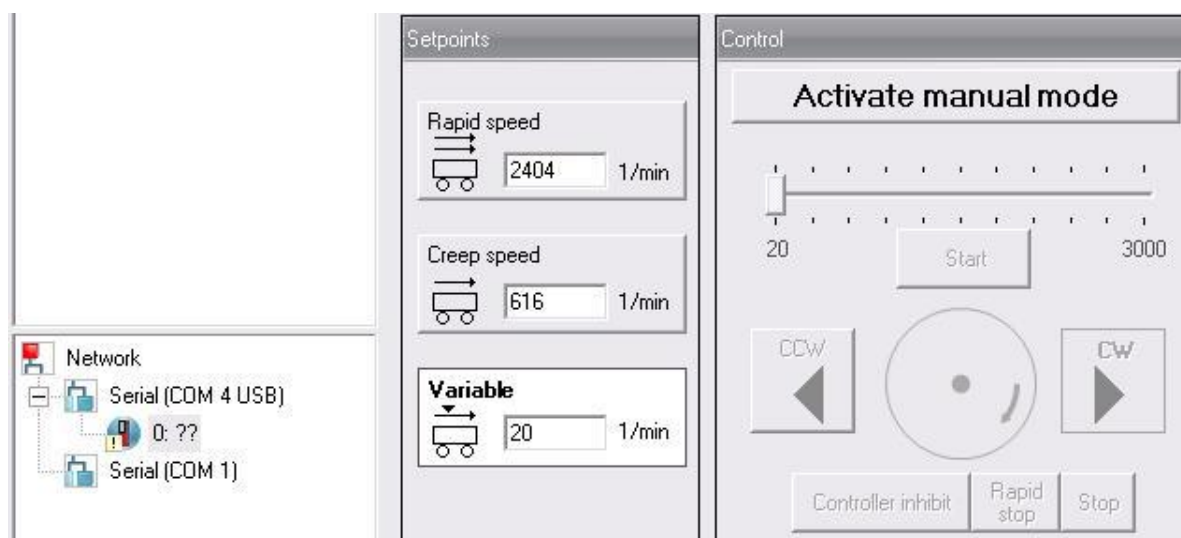


Рисунок 3.6 – Мнемоническая схема старта электропривода

Измените скорость вращения двигателя в «Variable» (на рисунке 292 об/мин).

3. Для выполнения реверса и торможения электропривода необходимо выполнить следующие операции на компьютере:

5.3.1. Сделайте реверс (с помощью кнопок «CCW» и «CW» можно менять направление вращения). Для остановки двигателя нажмите «Stop».

Исследование динамических свойств асинхронного электропривода производится при пуске электропривода на заданную скорость вращения. При этом осуществляется снятие осциллограмм скорости и тока.

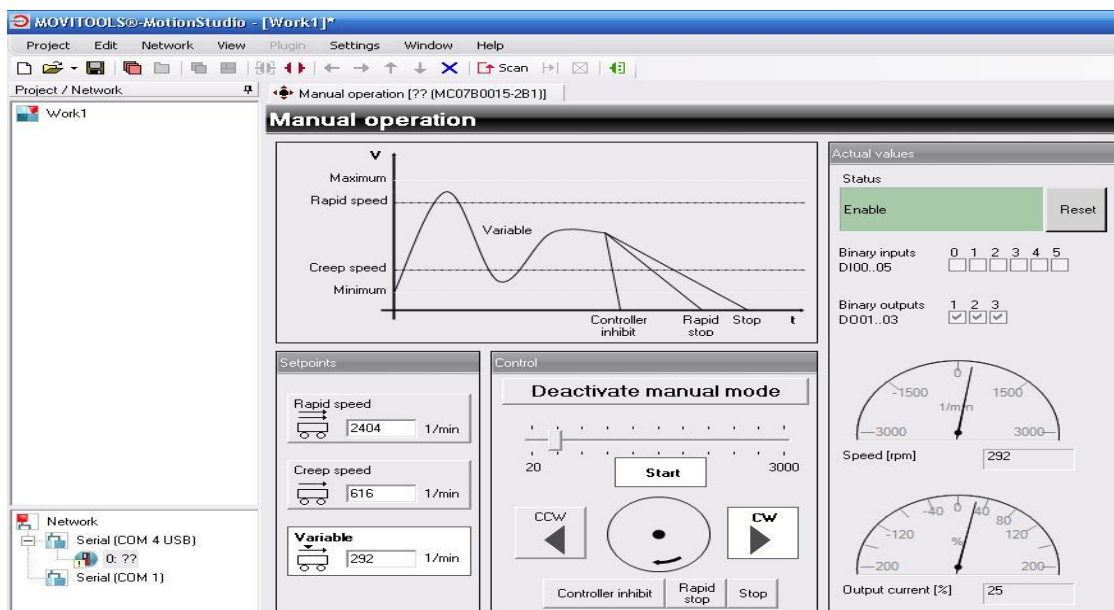


Рисунок 3.7 – Мнемоническая схема выбора вида пуска и торможения электропривода

При пуске переходный процесс носит колебательный характер. Значение первого пика момента  $\mu = 2,2$  о.е. , затем, по мере разгона, колебания момента и скорости уменьшаются. Ударный характер электромагнитного момента создает большие динамические нагрузки и может вызвать повреждения элементов кинематической цепи электропривода.

При частотном пуске асинхронного двигателя ударные пики электромагнитного момента могут быть снижены до допустимого уровня и переходные процессы приобретают монотонный вид. В целом динамические характеристики асинхронного электропривода аналогичны характеристикам привода постоянного тока. Но так как механическая постоянная времени асинхронного двигателя существенно меньше, то могут иметь место колебания ротора. Эти колебания должны быть устранены действием системы регулирования.

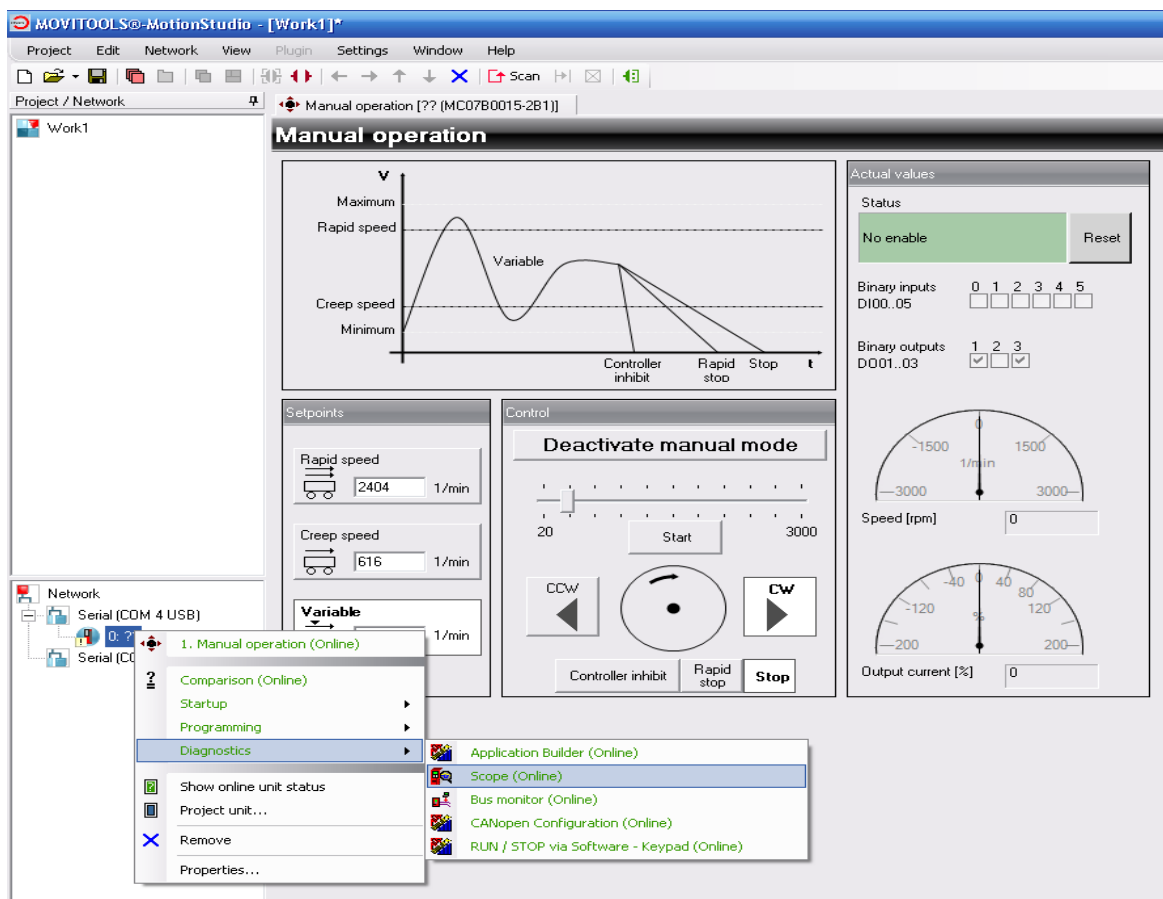


Рисунок 3.7 – Мнемоническая схема выбора вида пуска и торможения электропривода

– Кликните правой кнопкой мыши по изображению преобразователя частоты, выберите «Diagnostics», затем – «Scope».

В результате откроется новое окно «Scope». Для дальнейшего более удобного использования расположите на экране 2 открытых окна: правой кнопкой по панели задач → «Окна слева направо».

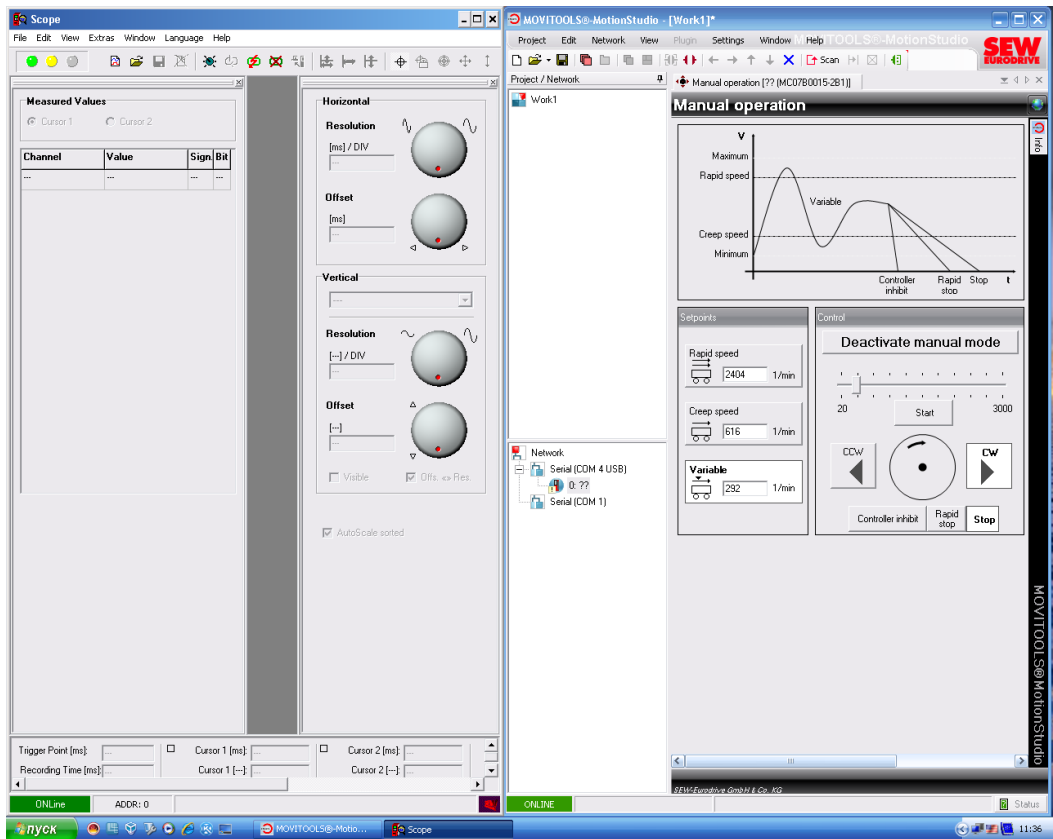


Рисунок 3.8 – Выполнение диагностики электропривода

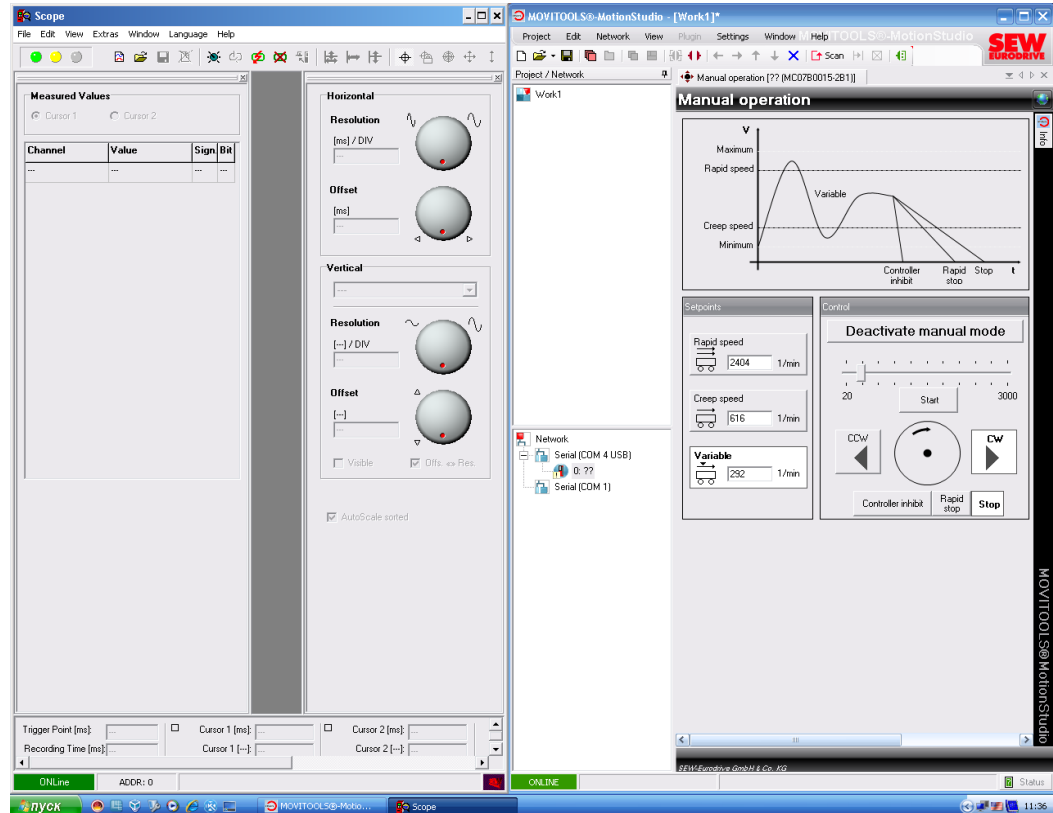


Рисунок 3.9– Окно управления осциллографом



В окне «Score» на панели инструментов нужно нажать «RecordSettings». В открывшемся окне «RecordSettings» нажать «Start», затем – «Trigger».

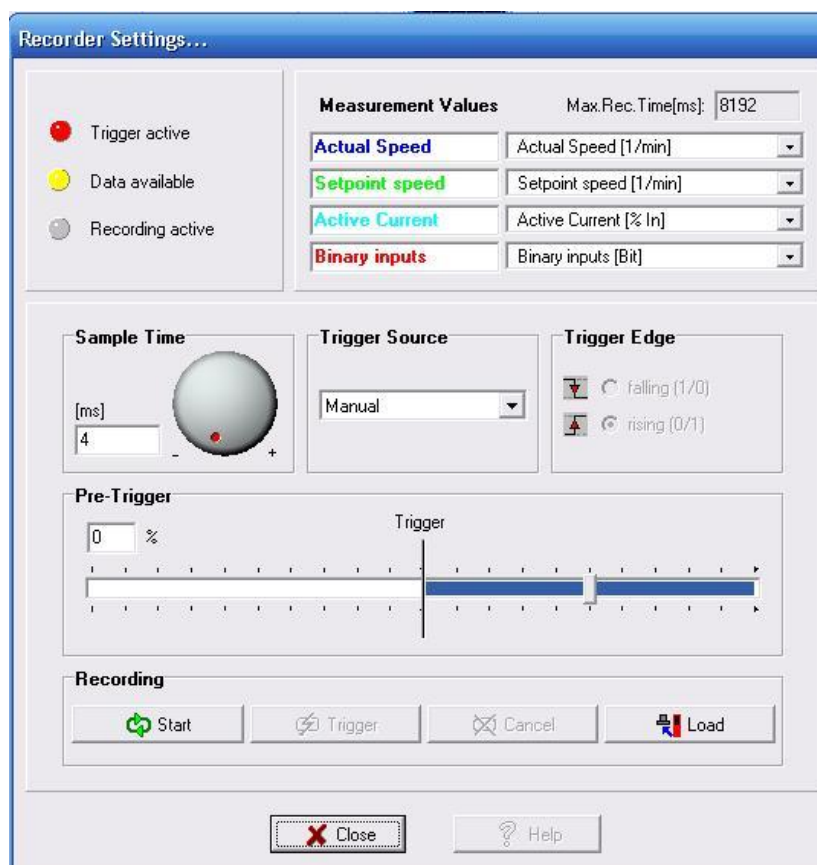


Рисунок 3.10 – Выбор измеряемых величин электропривода

Начнётся запись. Запустите двигатель, увеличьте скорость, остановите двигатель. Для загрузки результатов в окне «RecordSettings» нажмите «Load». Примерно через минуту произойдёт загрузка данных и появятся осциллограммы. Зелёным цветом показана заданная скорость [об/мин], синим – настоящая скорость [об/мин], бирюзовым – активный ток [% от номинального тока], красным – двоичные входы [биты]. С помощью кнопки «zoom» на панели инструментов можно увеличить необходимый отрезок времени, например момент пуска.

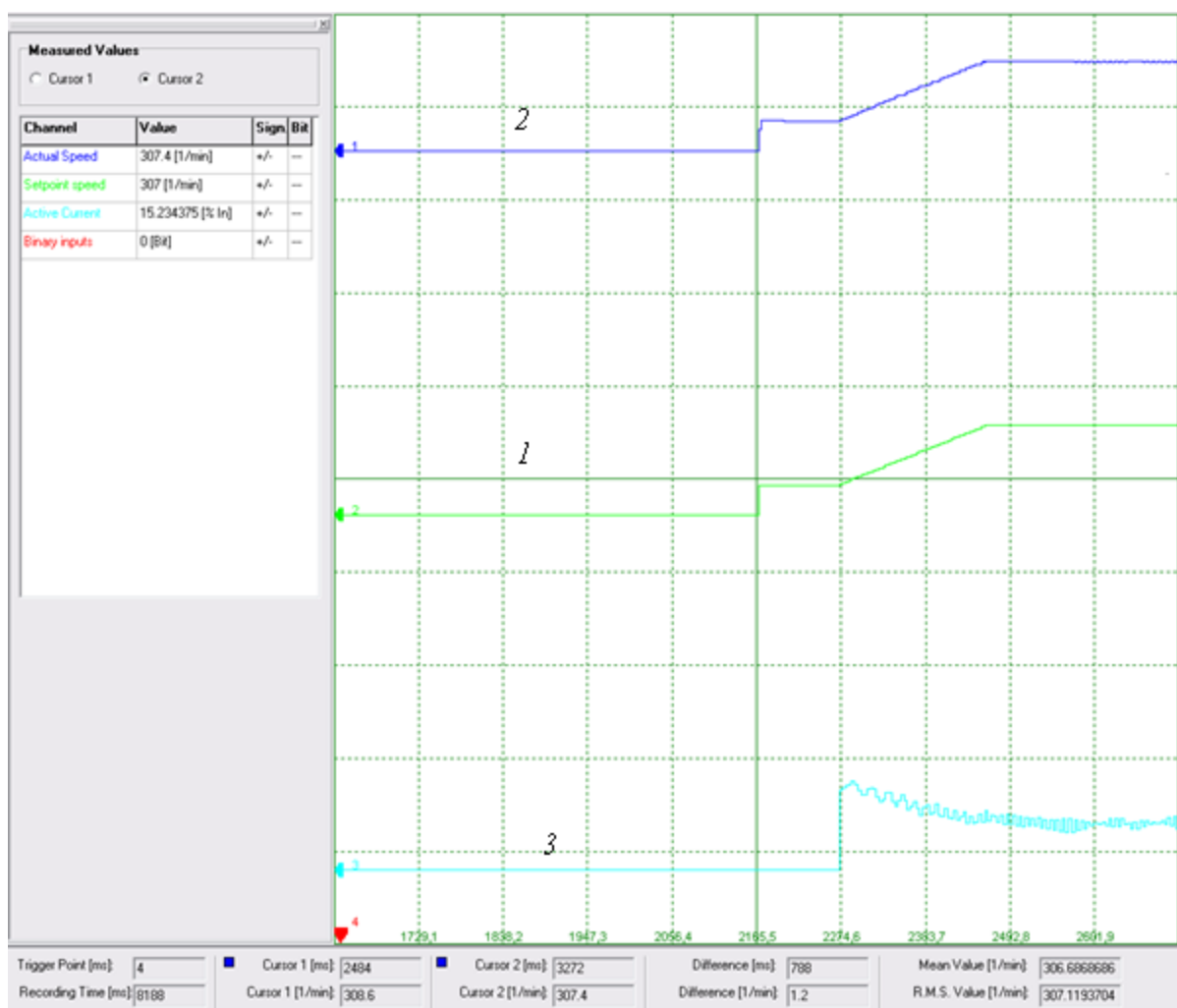


Рисунок 3.11 – Осциллограммы пуска асинхронного электропривода

При пуске действительная осциллограмма скорости вращения (кривая 2) повторяет заданную кривую скорости вращения (кривая 1). переходный процесс носит линейный характер. Значение первого пика тока статора (кривая 3) соответствует 2,2 о.е., затем, по мере разгона двигателя, ток снижается до номинального значения. Частотный пуск позволяет снизить величину ударный тока при прямом пуске двигателя, который создает динамические перегрузки и может вызвать повреждения элементов кинематической цепи электропривода. В целом динамические характеристики асинхронного электропривода аналогичны характеристикам привода постоянного тока.

В осциллограмме статорного тока можно выделить динамическую и статическую составляющие тока (рисунок 3.11 ).

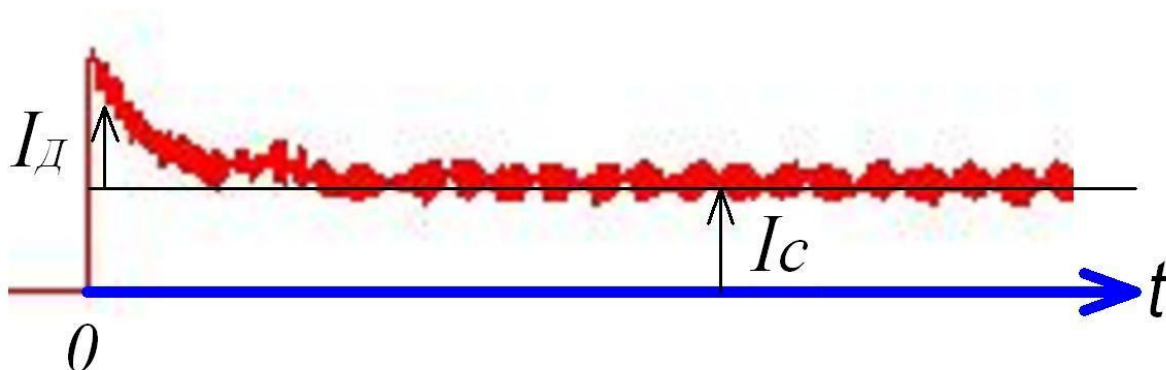


Рисунок 3.12 – Осциллограмма активного статорного тока

### 3.1.2 Динамические характеристики при реверсе и торможении асинхронного электропривода

Для выполнения реверса и торможения асинхронного электропривода – запустите двигатель, увеличьте скорость; – В окне «RecordSettings» нажмите «Start», затем – «Trigger». Сделайте реверс. Остановите двигатель. Нажмите «Load». Процесс реверса асинхронного электропривода показан на рис. 3.13. реверс осуществляется с промежуточной операцией, т.е. сначала производится операция торможения, а затем пуск в обратном направлении.

Как видно из осциллограмм динамическая составляющая тока статора при торможении возрастает, затем ее фаза изменяется на  $180^0$  и увеличивается амплитуда.

Для определения времени торможения и пуска необходимо в осциллограммах реверса выделить (рис.3.14) режим торможения и пуска электродвигателя в обратном направлении. Время торможения составляет 0,12 сек, а время обратного пуска 0,28 сек.

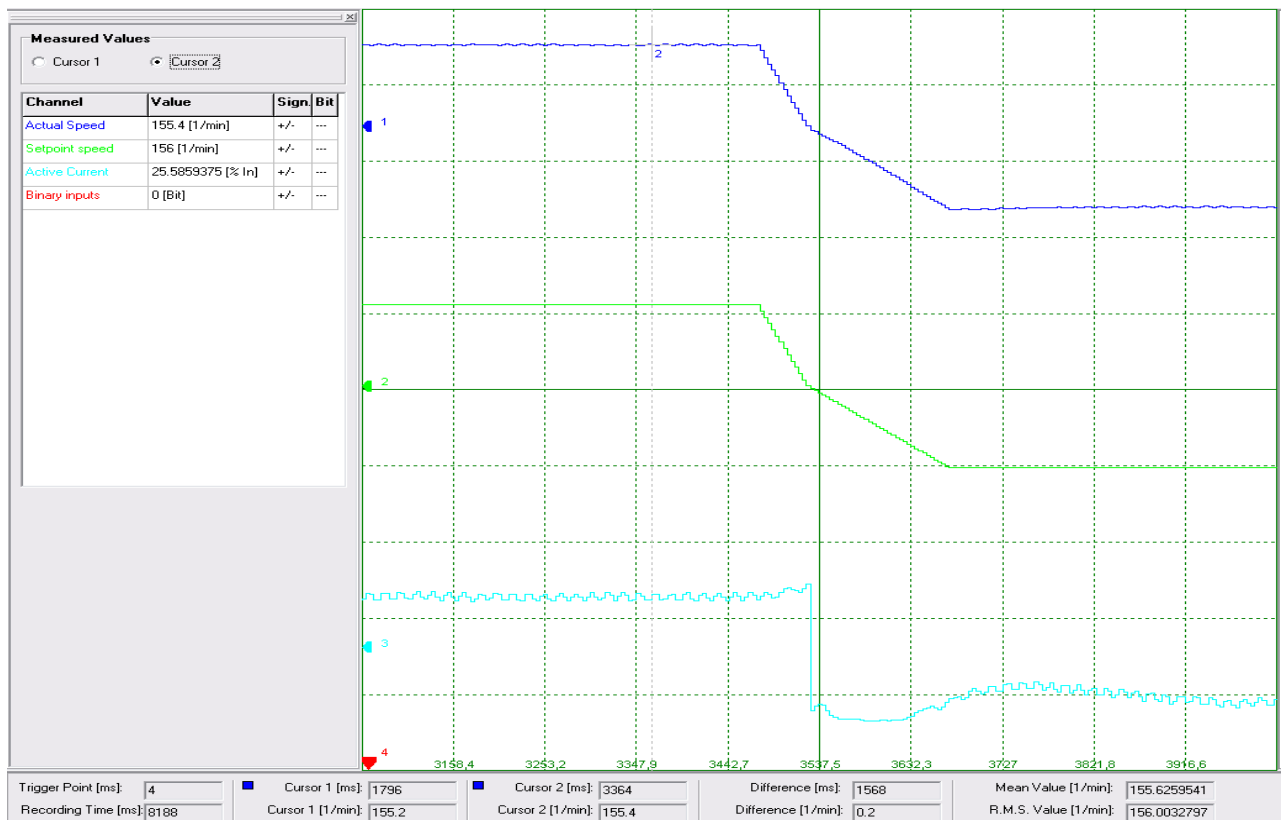


Рисунок 3.13 – Осциллограммы торможения и реверса асинхронного электропривода

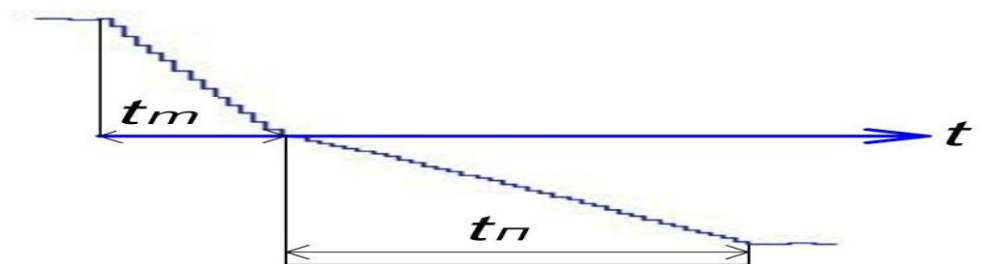


Рисунок 3.14 – Определение времени торможения и пуска электропривода

## 3.2 Исследование нагрузочного устройства при работе с вентильным электроприводом

### 3.2.1 Стенд для испытаний электроприводов с вентильным двигателем

Конструкция испытательного стенда изображена на рисунке 3.15

Рисунок 3.15 – Испытательный стенд: 1 – место установки электродвигателей; 2 - преобразователь 6SC6101; 3 - трансформатор 380V/165V; 4 ПТ150/20; 5 - БП150/80; 6 - БП 24V; 7 – предохранитель; 8 - трансформатор 380V/220V; 9 – ШУ; 10 Приборная панель с индикацией состояния; 11 - ПУ стендом

Конструкция стенда включает в себя следующие элементы:

1) НП постоянного тока, в составе ПТ 150/20 с БП для обеспечения током тормоза электродвигателя ДР-0,8;

2) исследуемый привод 6 SC 6101-A-Z с электродвигателем 1FT5044-OAF01-1Z(Z=G45)

3) ПУ, клеммами и регулятором для измерения скорости исследуемого электропривода, а так же момента нагружающего преобразователя и элементами индикации;

4) Блок АЦП/ЦАП (E14-140) который подключается к персональному компьютеру;

5) трансформатор для 6SC 6101-A-Z(380V/165V).

6) пускорегулирующая аппаратура.

Главным объектом в стенде является конечно же вентильный электропривод. В его состава входят преобразователь 6 SC 6101-A-Z(Simodrive 610) и испытуемого двигателя ф. Siemens серии 1FT5. В роли двигателя который создает нагрузку применяется малоинерционный электродвигатель ДПТ типа ДР(P=0,8 кВт), данный электродвигатель при помощи муфты соединяется с испытуемым электродвигателем [25].

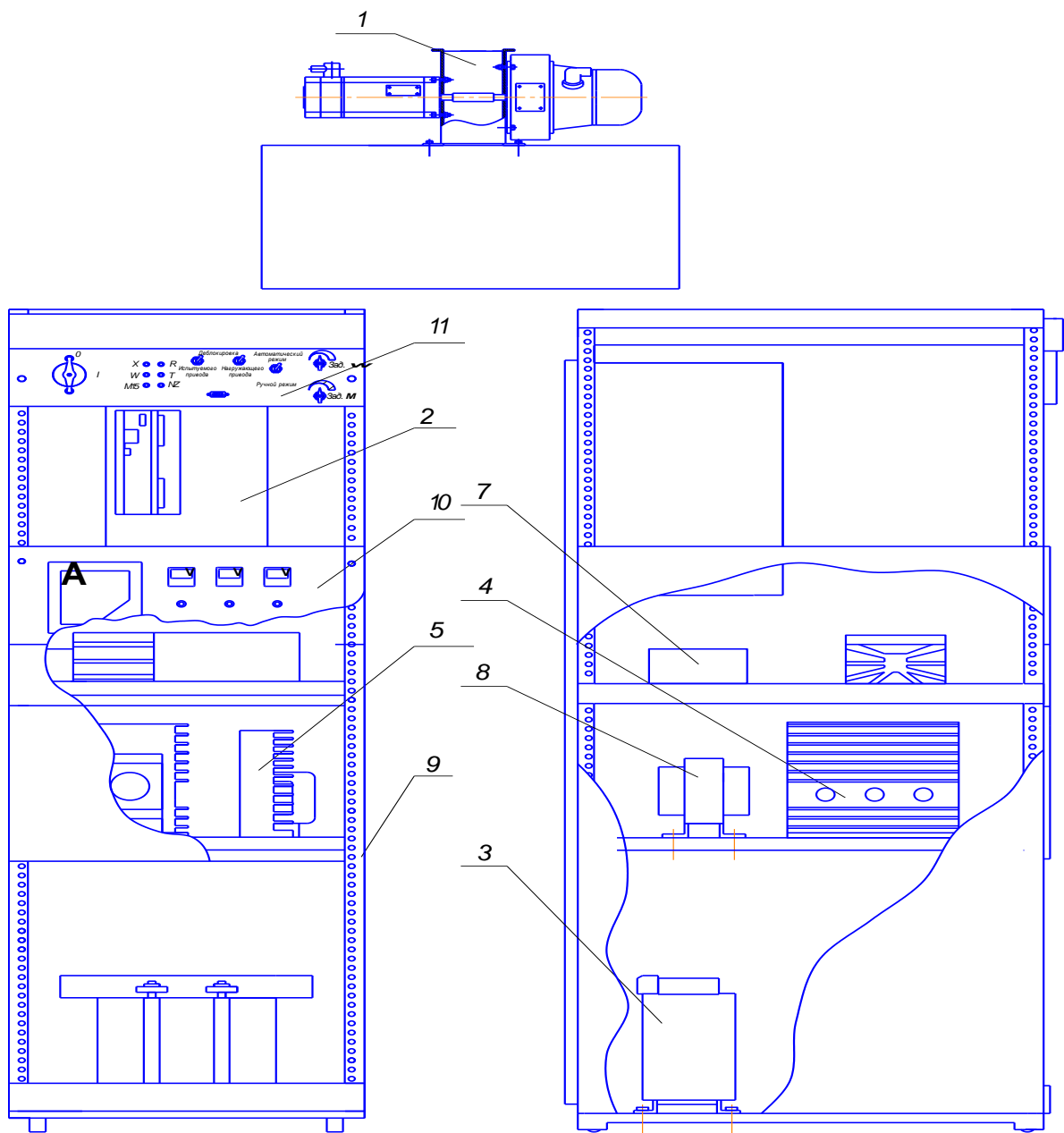


Рисунок 3.15– Конструкция испытательного стенда

Данный электродвигатель этой серии получает возбуждение от постоянных магнитов. Особенностью этого электродвигателя является присутствие в конструкции дискового якоря, обладающего низкой инерцией. Такой тип электродвигателей применяют в основном в качестве приводных двигателей для промышленных роботов. Данный электродвигатель управляется при помощи ТП серии ПТ 150/20 питается от БП 150/80. Чертеж, изображен на рисунке 3.4, разрабо-

танного испытательного стенда а вид внешний данного стенда изображен на рисунке 3.5.

Преобразователь 6 SC 6101-A-Зи ПТ150/20 управляется при помощи платы АЦП/ЦАП (Е 440) ф. "LCARD"[18]. Данная плата может работать как от компьютера, так и с ПУ, которая установлена на стенде. Плата Е14-440 (АЦП/ЦАП) при помощи USB шины подаёт сигналы задания на входы клемм приводов (частота вращения), нагружающего момента сигналы задания и сигналы деблокировки и управления тормозами электродвигателей. Другими словами в лабораторных условиях производится искусственное создание режимов работы оборудования.

Для наблюдения за показаниями, которые снимаются с электроприводов на панели управления установлены амперметры, вольтметры и 3 светодиода индикации сигналов с датчика обратной связи. Также при помощи модуля Е14-440 можно отслеживать состояние привода, подключенного непосредственно к измерительным клеммам на панели управления. Сами же клеммы подключены к соответствующим выходам испытуемого электропривода ( $n_{\text{сoll}}, n_{\text{ist}}, I_{\text{regel}}, I_{\text{max}}$ ).

К бетонному же основанию прикручен вентильный двигатель 1FT5044, вместе с валом нагружающего двигателя через муфту соединен с валом вентильного двигателя. Так же к электродвигателю подключен и силовой кабель, а так же обратная связь, и, задания и деблокировки электропривода обвязка сигналов входов/выходов. Внутри шкафа управления уложена основная часть электропроводки и пускорегулирующего оборудования управления в перфорированные корпуса. Испытательный стенд мобильный его можно с легкостью перемещать из аудитории в аудиторию.[23-25].

Таким образом, при помощи испытательного стенда можно имитировать широкий диапазон нагрузок, производить исследование испытуемого двигателя, а так же производить настройку вентильного электропривода ф."Siemens" серии 6SC 6101.



Рисунок 3.16– Испытательный стенд с преобразователем Simodrive 610





Рисунок 3.17– Внешний вид электрических машин испытательного стенда

### 3.2.2 Описание модуля сопряжения LСARDE440

Предназначение модуля E14-440 ф. LCARD[19] для построения многоканальных измерительных систем ввода/вывода аналоговых и цифровых данных в паре с ПК, подключаемым при помощи USB интерфейса. Модуль LCARD своего рода как компактное устройство многоканального сбора информации.

Благодаря USB-интерфейсу у модуля LCARD есть возможность у пользователя быстро подключить и устройство. Также, USB шина допускает подключение внешних устройств.

С существующими питания сигналами внутри самого интерфейса USB частично используют для питания устройств для подзарядки, без применения БП.

Общий вид модуля сопряжения E 440 представлен на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Модуль сопряжения E 440

Таблица 3.1 - Параметры аналоговых каналов для модуля E14-140

Тип модуля	E14-140
1	2
Количество каналов	16 дифференциальных или 32 с общей землей
Разрядность АЦП	14 бит
Время преобразования	2.5 ms
$R_{\text{входное}}$ при одноканальном вводе	$\geq 1\text{M}\Omega$
Диапазон входного сигнала	$\pm 10\text{V}$ , $\pm 2.5\text{V}$ , $\pm 0.625\text{V}$ , $\pm 0.15625\text{V}$
Максимальная $f_{\text{преобразования}}$	400 kHz
Защита входов	При вкл. питания $\pm 30\text{V}$ При выкл. питания $\pm 10\text{V}$

На порт DRB-37M выведены аналоговые входные/выходные (Y – инвертирующие X – не инвертирующие входы), описание в таблице 3.2. Необходимо помнить об ограничении при подключениях к данному разъему. Только при выключенном питании можно производить подобные манипуляции. Так же необходимо недопустить возможность замыкания между клеммами разъема DIGITAL GND и питание +3.3V и +5V [17-20].

Что бы подключить модуль к ПК при замерах данных необходимо следовать данной рекомендации.

К соответствующему разъему PC с помощью кабеля USB, подключается сам модуль, так же можно производить подключение при включенном питании PC.

Таблица 3.2. – разъем модуля Е 440

N	Назначение	N	Назначение
1	2	3	4
1	DAC1 –выход (1канала ЦАП)	20	TRIG –синхронизация сигнала
2	DAC2– выход 2 канала ЦАП	21	GND32 – общий провод
3	AGND –заземление	---	-----
1	2	3	4
4	input - Y16	22	input - X16
5	input - Y15	23	input - X15
6	input- Y14	24	input - X14
7	input - Y13	25	input - X13
8	input - Y12	26	input - X12
9	input - Y11	27	input - X11
10	input - Y10	28	input - X10
11	input - Y9	29	input - X9
12	input - Y8	30	input - X8
13	input - Y7	31	input - X7
14	input - Y6	32	input - X6
15	input - Y5	33	input - X5
16	input - Y4	34	input - X4
17	input - Y3	35	input - X3
18	input - Y2	36	input - X2
19	input - Y1	37	input - X1

- Распайку ответных разъёмов при необходимости подключения аналоговых или цифровых сигналов производить в соответствии с инструкцией, а непосредственно к модулю Е 440 подсоединяется ответная часть разъёма

- При включении РС, источники сигналов, запускается программное обеспечение.

### 3.2.3 Исследование режимов работы электропривода на испытательном стенде

Точность в настройки электроприводов 6 SC 6101 непосредственно влияет на показатели работы оборудования такие как производительность.

Так как настройка контуров электроприводов на оборудовании занимает обычно довольно таки большое количество времени, это в свою очередь может привести к значительному простоею оборудования, исходя из этого, необходимо использовать испытательные стенды для настройки электропривода.

Внутренний контур внешний контур скорости и тока содержит система регулирования привода. Внутренний контур регулирования поперечной составляющей  $I_q^s$  тока электродвигателя необходимо настраивать при условии технического оптимума, что бы на плате регулирования 6SC6101 в соответствии с инструкцией и настройке предусмотрены DIP – выключатели (8 штук), данные переключатели выставляются по типу используемого электродвигателя и другая настройка не требуется. [24].

На плате с помощью потенциометров  $T_N, K_P$  и  $T_{ach}$  производится настройка контура регулирования скорости на симметричный оптимум. При помощи последовательного увеличения выполняют настройку  $K_P$ , это относится к замкнутой системе с Р-регулятором. В связи с этим добиваются переходного процесса при обработке прямоугольного импульсного сигнала задания или возмущения. Период таких колебаний  $T_k$  и значение  $T_i = T_k / 6$  постоянной интегрирования определяется используя осциллограмму.

Настройка их оптимизации и параметров для систем ПИ- регулятором выполняется и применяется для устойчивых систем производят по методу Циглера.

Так как в электроприводе нет возможности отключить интегральную составляющую, то построенная в среде Simulink математическая модель будет подвержена оптимизации по данному методу [16-17].

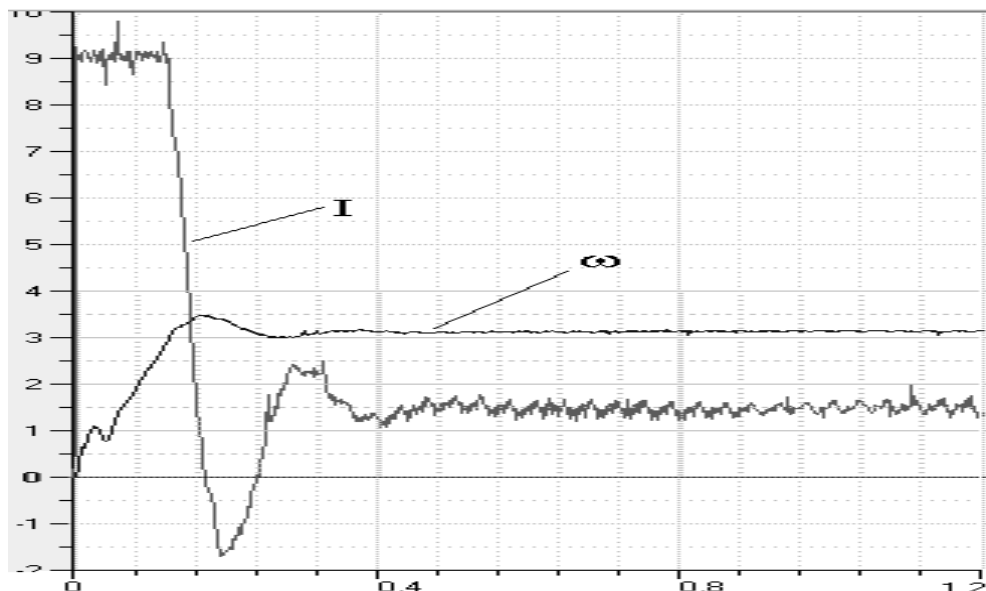


Рисунок 3.7 – Экспериментальные данные осциллограммы для Simodrive 610

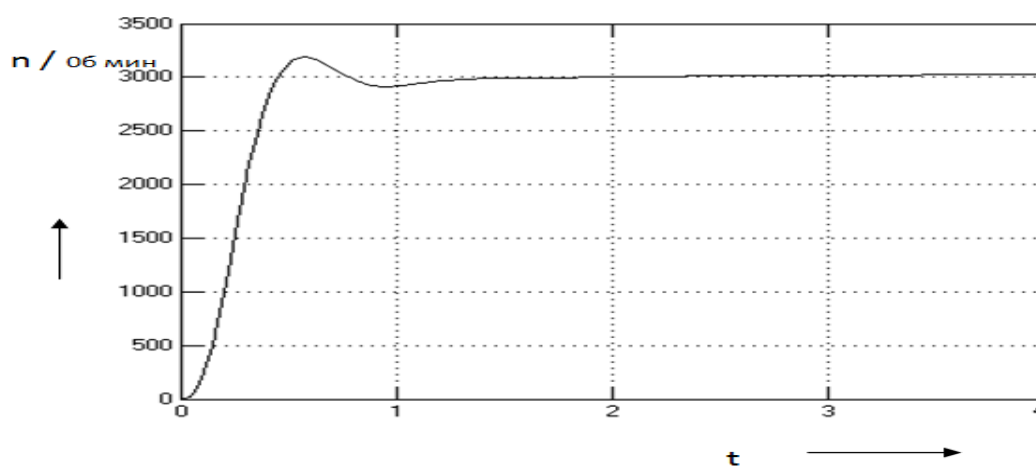
На испытательном стенде были сняты характеристики тока и скорости для проверки коэффициентов вентильного электропривода при набросе нагрузки (рисунок 3.7.)

Проанализировав приведенные характеристики, можно сказать что наблюдается схожесть процессов. Совпадения есть практически и току и скорости вращения переходного процесса, а установившееся значения соответствуют полностью. Так как все модель не может полностью учесть реальные условия и дискретные свойства работы транзисторного преобразователя, соответственно форма характеристик будет иметь незначительное отличие.

Получены переходные процессы, соответствующие кривым пуска электропривода каретки. Из-за того что у привода “Simodrive 610” есть только две пары гнезд: заданное и истинное значение тока и скорости, то на испытатель-

ном стенде можно снять только эти характеристики. Для сравнения реальных и идеализированных кривых приведём кривые тех же переходных процессов (рисунок 3.8), уже полученных значений при подключении внешнего модуля к испытываемому приводу и к ПК. Данные будут обрабатываться в пакете MATLAB. Конечно если качественно рассматривать переходный процесс, то невооруженным глазом видно, что колебания тока на характеристиках которые были сняты на испытательном стенде значительно больше по амплитуде чем соответственной выше по частоте.

а)



б)

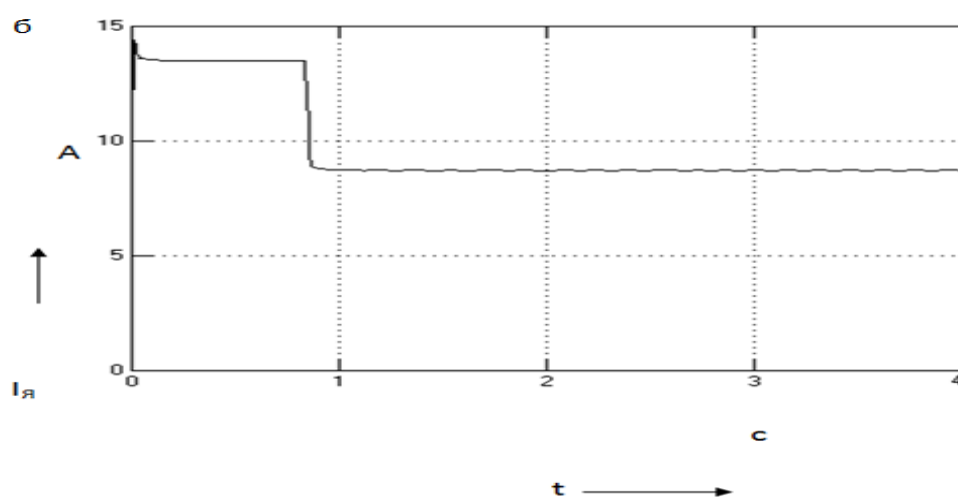


Рисунок 3.8—Осциллограммы а) скорости б) ток при пуске с нагрузки на стенде снятые с помощью LCARDE-440

Модель, построенная в среде пакета Simulink, не может учесть физические процессы, обусловленные нелинейными характеристиками преобразователя и электродвигателя. Из приведенных кривых видно, что перерегулирования на переходных характеристиках скорости возникает из-за того, что на испытательном стенде характеристики снимались при значительно меньшем инерционном моменте электродвигателя [6-8].

В главе 3 описан обзор испытательных стендов для проверки и настройки электроприводов с вентильными двигателями, как собранных самостоятельно так и произведенного промышленным образом,

Разработана конструкция стенда которая необходима для настройки вентильного электропривода, сняты характеристики нагрузки на привод, результаты с полученными на математической модели показали сходство с идеализированными данными,

### **3.3 Выводы**

Проведены стендовые испытания разработанного нагрузочного устройства при работе с частотным асинхронным двигателем и при работе с вентильным электроприводом. В первом случае испытуемый электропривод, включал в себя асинхронный двигатель серии А. и частотный преобразователь SEW Ego-drive Movitrac B. В процессе стендовых испытаний производился частотный пуск, торможение и реверс асинхронного электропривода. Нагрузка на валу асинхронного двигателя ( $m_c = const$ ) производилась с помощью разработанного нагрузочного устройства. Во втором случае в качестве испытуемого электропривода в стендовых испытаниях применялся вентильный двигатель 1FT5044 и с преобразователем Simodrive 610. Результаты испытаний подтвердили работоспособность разработанных нагрузочных устройств, их возможность обеспечивать нагрузочные моменты при стендовых испытаниях электроприводов.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации выполнена разработка нагрузочного устройства для стендовых испытаний современных электроприводов, включая электроприводы с вентильным двигателем. Силовая схема нагрузочного устройства построена на базе малоинерционного двигателя постоянного тока ДР и транзисторного преобразователя ПТ с широтно-импульсной модуляцией. Данное устройство обладает высоким быстродействием, что позволяет создавать на валу испытуемого электропривода нагрузочные моменты с погрешностью не более 5% и с помощью выбранных технических и программных средств автоматизации имитировать типовые нагрузочные характеристики, а также программу стендовых испытаний. Во время разработки стенда, была основной задачей являлась реализация на базе малоинерционного двигателя ДР функции управления моментом, исходя из заданных графических типовых нагрузочных характеристик. Исходя из расчета управления вентильного привода и параметры силовой части построены математические модели системы привода получили на графике кривые переходных процессов, в свою очередь которые продемонстрировали, что может воспроизводить требуемые зависимости так же система устойчива к возникновению перегрузок. Данную задачу решили с помощью современных программных средств, таких как транзисторный преобразователь ПТ с ШИМ, элементы отрицательной обратной связи по току и функционального преобразователя, осуществляющие формирование момента машины.

Для исследования и проверки работоспособности разработанного нагрузочного устройства проведены исследования режимов работы вентильного, электропривода руки портального манипулятора и позиционной системы электропривода с нелинейной коррекцией методом моделирования в программе MATLAB&Simulink. Результаты

математического моделирования показали способность нагрузочного устройства создавать нагрузочные моменты согласно заданной программе и устойчивую работу устройства в статических и динамических режимах.

Проведены испытания разработанного нагрузочного устройства при работе с частотным асинхронным электроприводом SEW Erod Drive Movitrac и при работе с вентильным электроприводом Simodrive 610 и модулем Lcard (E14-440), при помощи которого осуществлялась связь персонального компьютера с испытательным стендом для осциллограмм исследуемых переменных. Результаты стендовых испытаний подтвердили работоспособность разработанных нагрузочных устройств, их возможность обеспечивать нагрузочные моменты при стендовых испытаниях электроприводов.

## Список используемых источников

1. Москаленко, В. В. Электрический привод: Учебник / В.В Москаленко. - М.:НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 400 с.
2. Онищенко, Г. Б. Теория электропривода [Электронный ресурс] : учебник / Г. Б. Онищенко. - Москва : ИНФРА-М, 2015. – 294 с.
3. Денисов В.А. Системы позиционного электропривода с переменной структурой управления. – М.: Спутник +. 2013 – 119 с.
4. Татаринцев, Н.И. Функция управления моментом в асинхронных электроприводах / И.А. Грушевский // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. 2015, вып. №8. С. 51–56.
5. Денисов, В.А., Третьякова М.Н. Теория и переходные процессы электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии. – Тольятти: Кассандра, 2017. – 108с.
6. Кисаримов, Р.А. Электропривод: справочник/ Р.А. Кисаримов– Москва: ИП РадиоСофт, 2014. – 350 с.
7. Васильев, Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропровода: учеб.для вузов / Б.Ю. Васильев – Москва: Солон-Пресс, 2015. – 267 с.
8. Гаррис, М. Н. Системы относительных единиц в теории электрических машин: Пер. с англ./ М. Н. Гаррис – Москва.: Энергия, 2015. – 120 с.
9. Горев, А. А. Переходные процессы синхронной машины/ М. П. Левинштейн, А. А. Суханов. - Ленинград: Наука,2014. – 502с.
- 10.Грузов, Л. Н. Методы математического исследования электрических машин. - Москва: Госэнергоиздат, 2013. – 264 с.
- 11.Анучин, А.С. Системы управления электроприводов / А.С. Анучин. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. – 373 с.
- 12.Крылов, Ю.А. Энергосбережение и автоматизация производства в тепло-энергетическом хозяйстве города. Частотно-регулируемый электропривод:

- Учебное пособие / Ю.А. Крылов, А.С. Карандаев, В.Н. Медведев. - СПб.: Лань, 2013. – 176 с.
13. Курбанов, С.А. Основы электропривода: Учебное пособие / С.А. Курбанов, Д.С. Магомедова. - СПб.: Лань П, 2016. – 192 с.
14. Яни, А.В. Регулируемый асинхронный электропривод: Учебное пособие / А.В. Яни. - СПб.: Лань, 2016. – 464 с.
15. Зиновьев, Г. С. Силовая электроника : учеб. пособие для акад. бакалавриата. В 2 ч. Ч. 1 / Г. С. Зиновьев ; НГТУ. - 5-е изд., испр. и доп.; Гриф УМО. - Москва : Юрайт, 2016. – 390 с.
16. Битюков, В. К. Источники вторичного электропитания: Учебник / В.К. Битюков, Д.С. Симачков - Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. – 326 с.
17. Паршин, А. М. Источники питания электротехнологических установок [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. М. Паршин, В. Н. Тимофеев, М. В. Первухин ; Сибирский федеральный университет. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 108 с.
18. Решмин, Б. И. Имитационное моделирование и системы управления [Электронный ресурс] : учеб.-практ. пособие / Б. И. Решмин. - Москва : Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. – 74 с.
19. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2017. - 464 с.
20. Дьяконов, В. П. MATLAB [Электронный ресурс] : Полный самоучитель : электронное издание / В. П. Дьяконов. - Саратов : Профобразование, 2017. - 768 с.
21. Коновалов, Б. И. Теория автоматического управления [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - Изд. 4-е, стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2016. - 224 с. :

22. Кудинов, Ю. И. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пащенко. - Санкт-Петербург : Лань, 2016. - 256 с.
23. Денисов, В.А. Позиционная система электропривода с программной коррекцией / Р.Р. Мадышев, О.А. Бородин // Вестник Самарского гос. техн. универ. Техническая серия, 2014, №3(43), С.123-130.
24. Денисов, В.А. Математическое моделирование асинхронных электроприводов с векторным управлением / М.Н. Третьякова, О.А. Бородин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. Уфа. 2016. Т12. №1. – С. 5-12.
25. Рузанов, А.Н. Лабораторный стенд систем электропривода с серводвигателем / В.А. Денисов // IV Всероссийская научно–техническая конференция «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов», Тольятти, 12-14 апреля 2016 г. С.125-129.
26. Денисов, В.А. Исследование позиционной системы электропривода с нелинейной коррекцией / Р.Р. Мадышев // «Электротехника», 2017, №2, С. 15-20.
27. Денисов, В.А. Нагрузочное устройство для настройки электроприводов с вентильным двигателем / Р.Г. Мазитов // В сб. тр-ов (ПЭЭЭ-2017): Проблемы электротехники, электроэнергетики, электротехнологии, V Всероссийская научно-техническая конференция, Тольятти, 1-2 ноября 2017 г. - С. 486 – 491.
28. Горячев, В.Ф. Идентификация объектов управления в режиме нормальной эксплуатации / В.Ф. Горячев, А.С. Гудим, Е.Н. Землянская // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т.2. – С. 47–49.
29. Осина, А.В. Синтез систем модального управления с идентификаторами / А.В. Осина, Т.В. Ягодкина // Вестник Московского энергетического института. – 2013. – № 2. – С. 109–114.
30. Ощепков, А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB / А.Ю. Ощепков. – СПб.: Лань. – 2013. – 208 с.

31. An Asynchronous Electric Drive with the Indirect Control of the Output Variables/ [Electronic resource] [https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2017/05/mateconf\\_smart2017\\_01039/mateconf\\_smart2017\\_01039.html](https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2017/05/mateconf_smart2017_01039/mateconf_smart2017_01039.html)  
Published 20 December 2016
32. Statistical optimization of frequency regulated induction electric drives with scalar control/ [Electronic resource] <https://cyberleninka.ru/article/v/statistical-optimization-of-frequency-regulated-induction-electric-drives-with-scalar-control>Published 2017
33. A method for determining location of voltage fluctuations source in electric grid / [Electronic resource] <https://cyberleninka.ru/article/v/a-method-for-determining-location-of-voltage-fluctuations-source-in-electric-grid> 2016Published 2016
34. Three-phase energy supply systems simulation for the total power losses components assessment / [Electronic resource] <https://cyberleninka.ru/article/v/three-phase-energy-supply-systems-simulation-for-the-total-power-losses-components-assessment>Published 2016
35. An induction sensor for measuring currents of nanosecond range / [Electronic resource] <https://cyberleninka.ru/article/v/an-induction-sensor-for-measuring-currents-of-nanosecond-range>Published 2016