

Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 62-83::621.313.3

ГРНТИ 45.41.31 50.43.00 52.13.29

Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева»
От имени Руководителя организации _____ / В.А. Ковалев / М.П.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ОТЧЕТ**

о выполнении 4 этапа Государственного контракта
№ 14.740.11.1105 от 24 мая 2011 г.

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.

Проект: Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии

Руководитель проекта:

_____ /Семыкина Ирина Юрьевна
(подпись)

Кемерово
2012 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ
по Государственному контракту 14.740.11.1105 от 24 мая 2011 на выпол-
нение поисковых научно-исследовательских работ
для государственных нужд

Организация-Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Руководитель темы:

доцент кафедры «Электропривод и автоматизация», кандидат технических наук, доцент	_____	Семыкина И. Ю.
	подпись, дата	

Исполнители темы:

аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация»	_____	Гаргаев А.Н.
	подпись, дата	

аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация»	_____	Кольцов Р. А.
	подпись, дата	

ассистент кафедры «Электропривод и автоматизация»	_____	Киселев А. В.
	подпись, дата	

студент группы ЭА-082	_____	Евстратов А.Э.
	подпись, дата	

студент группы ЭА-082	_____	Пыпа А.А.
	подпись, дата	

студент группы ЭА-082	_____	Татаринов Д.Е.
	подпись, дата	

Реферат

Отчет 59 с., 2 ч., 32 рис., 3 табл., 13 источн., 4 прил.

Ключевые слова: горные машины, асинхронный электродвигатель, регулируемый электропривод, энергоэффективность.

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 4 этапу Государственного контракта № 14.740.11.1105 "Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии" (шифр "2011-1.2.2-226-011") от 24 мая 2011 по направлению "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук в следующих областях:- атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом;- водородная энергетика; - новые и возобновляемые источники энергии; - производства топлив и энергии из органического сырья; - создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии; - создание энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных средств" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы – создание экспериментальной установки, позволяющей оценить степень адекватности разработанной математической модели электропривода горной машины.

При выполнении работ по этапу использовались:

1. Методы компьютерного моделирования.
2. Методы планирования и выполнения эксперимента.

В качестве инструментария использовались:

1. Компьютеризированный испытательный стенд.
2. Компьютерная система сбора данных измерительной информации.

Результаты, полученные при выполнении 4 этапа Государственного контракта:

1. Набор конструкторской документации экспериментальной установки для исследования электропривода в ходе его работы с программно задаваемой изменяющейся нагрузкой.

2. Заключение о степени адекватности разработанной математической модели электропривода горной машины.

Содержание

Определения	5
Обозначения и сокращения	6
Введение	7
Исследование процесса электромеханического преобразования энергии в динамических режимах.....	8
1. Разработка экспериментальной установки для подтверждения адекватности модели.....	9
1.1. Обзор вариантов нагружающих устройств	9
1.1.1. Система нагружения использующая генератор постоянного тока	11
1.1.2. Система нагружения использующая активную нагрузку.....	12
1.1.3. Асинхронно-вентильное нагружающее устройство	12
1.1.4. Использование ферропорошкового тормоза	13
1.1.5. Использование электромагнитного фрикционного тормоза ..	14
1.1.6. Выбор системы	14
1.2. Разработка конструкции.....	15
1.3. Разработка схемных решений	15
1.4. Разработка принципов аппаратно-программного взаимодействия элементов экспериментальной установки.....	26
2. Экспериментальное определение уровня потерь в асинхронном электроприводе в динамических режимах	31
2.1. Результаты работы электропривода с программно задаваемой изменяющейся нагрузкой	31
2.1.1. Статические характеристики стенда.....	31
2.1.2. Динамические характеристики стенда	33
2.1.3. Ступенчатое воздействие	36
2.2. Сопоставление фактически полученных данных с результатами вычислительных экспериментов	38
Заключение	41
Список использованных источников	42
Приложение А	43
Приложение Б.....	46
Приложение В	48
Приложение Г	51

Определения

Коэффициент полезного действия – характеристика эффективности системы электропривода в отношении выполнения электромеханического преобразования энергии.

Энергоэффективность – комплексное понятие, в рамках данной работы подразумевающее эффективное использование электрической энергии, потребляемой электроприводом а процессе своего функционирования.

Энергооптимальность – характеристика, свидетельствующая о достижении экстремума (максимума или минимума) какого-либо энергетического показателя качества функционирования.

Математическая модель – представление объекта автоматизации в виде математических формул описывающих процессы происходящие в объекте с максимальным приближением.

Обозначения и сокращения

Список использованных обозначений:

P – мощность;

ω – угловая скорость;

M – вращающий момент;

F – усилие;

M_C – момент сопротивления;

G – модуль сдвига;

J_p – полярный момент инерции сечения вала;

l – длина вала;

$\Delta\varphi$ – разность углов закручивания вала;

L – расстояние от центра вала до опоры;

K_M – коэффициент передачи по моменту.

Список использованных сокращений:

НУ – нагружающее устройство.

ОИ – объекта исследования.

РС – регулятор скорости.

РМ – регулятор момента.

РТ – регулятор тока.

СФИ – система формирования импульсов.

АД – асинхронных двигатель.

ДПТ – двигатель постоянного тока.

АМ – асинхронная машина.

МПТ – машина постоянного тока.

ИД – испытуемый двигатель.

НМ – нагрузочная электрическая машина.

ИС – измерительная подсистема.

СУНМ – система управления нагрузочной машиной.

БЗ – блок защит.

СУАД – система управления асинхронным двигателем.

ПК – персональный компьютер.

ШИП – широтно-импульсное преобразование.

АЦП – аналого-цифровое преобразование.

ПЭС – принципиальная электрическая схема.

МК – микроконтроллер.

ЭДС – электродвижущая сила.

Введение

Выполнение научно-исследовательских работ по 4 этапу Государственного контракта № 14.740.11.1105 «Исследование процесса электромеханического преобразования энергии в динамических режимах» предполагает следующие виды работ:

1. Разработка экспериментальной установки для подтверждения адекватности модели.
2. Экспериментальное определение уровня потерь в асинхронном электроприводе в динамических режимах.

Разработка экспериментальной установки для подтверждения адекватности модели выполнялась с использованием компьютеризированного испытательного стенда и компьютерной системы сбора данных измерительной информации. Использование данного инструментария позволяет с высокой точностью и высоким быстродействием получать и обрабатывать информацию о динамике переменных в процессе электромеханического преобразования энергии, обеспечивая требуемую достоверность полученных экспериментальных результатов.

Экспериментальное определение уровня потерь в асинхронном электроприводе в динамических режимах и оценка степени адекватности разработанной математической модели электропривода горной машины выполнялись с использованием методов компьютерного моделирования, а также методов планирования и выполнения эксперимента. Применяемые методы позволяют обеспечить достоверность проводимых исследований и дают основание для использования математической модели, разработанной в ходе предыдущих этапов работы, для синтеза систем управления электроприводом горной машины.

Исследование процесса электромеханического преобразования энергии в динамических режимах

Современные электроприводы горных машин, как правило, оснащены нерегулируемыми асинхронными электродвигателями, имеющими завышенную мощность, для преодоления возможных перегрузок. Исходя из этого, большую часть времени двигатель работает в недогруженном режиме и имеет заниженные эксплуатационные характеристики, такие как КПД, коэффициент мощности и др. Помимо этого, для горных машин характерна нагрузка, носящая изменяющийся случайным образом характер, в результате чего электромагнитное состояние двигателя изменяется в широких пределах и высокой интенсивностью.

Как показали результаты выполнения предшествующих этапов работы, использование в горных машинах регулируемого электропривода, позволяющего формировать требуемое электромагнитное состояние двигателя, дает возможность оптимизировать работу двигателя, получая его наилучшие энергетические характеристики. Однако, учитывая высокую интенсивность изменения нагрузки электроприводов горных машин и высокую сложность самого электропривода, разработке алгоритмов управления, позволяющих оптимизировать энергопотребление должен предшествовать этап всестороннего анализа режимов их работы с учетом реальных эксплуатационных факторов. Такой анализ предполагает использование математической модели, учитывающей особенности формирования потерь энергии различного рода при работе электрического привода, а также серию экспериментальных исследований. При этом задача экспериментальных исследований, стоящая на данном этапе работы, носит двоякий характер. С одной стороны целью экспериментов является определение степени адекватности разработанной математической модели электропривода горной машины, а с другой стороны – получение удобного инструментария, имитирующего различные типы нагрузок, соответствующих работе исполнительных органов различных горных машин.

1. Разработка экспериментальной установки для подтверждения адекватности модели

Экспериментальная установка разрабатывается в строгом соответствии с техническим заданием, составленным в ходе работ по 3 этапу Государственного контракта № 14.740.11.1105 «Составление математической модели асинхронного электропривода горных машин в динамических режимах».

Основная задача стенда заключается в имитации различных механических нагрузок и исследовании характеристик регулируемого электропривода на базе асинхронного двигателя (АД) с требуемым характером нагрузки. В его функциональные возможности входит имитация следующих типовых нагрузок:

- активной;
- типа «сухое трение»;
- типа «вязкое трение»;
- вентиляторного типа.

Также предусмотрена возможность задания программируемой нагрузки с персонального компьютера.

Стенд позволяет получать информацию в виде набора данных об электрических и механических координатах испытуемого АД и нагрузочной электрической машины, создающей статический момент нагрузки на его валу, а также в графическом виде в реальном времени.

Данные, полученные в ходе его работы, дают возможность оценить показатели качества регулирования механических координат асинхронного электропривода и переменные потери энергии в АД, зависящие от нагрузки на валу.

1.1. Обзор вариантов нагружающих устройств

Одним из основных элементов стенда является нагружающее устройство, поэтому его правильный выбор может оказать существенное влияние на работу всего стенда.

В нагружении машин основной задачей является отбор энергии с вращающегося вала, поэтому проводят классификацию нагружающих устройств (НУ) только по способу преобразования механической энергии в другие виды, позволяющие осуществить реальный процесс испытаний. Различают следующие типы НУ:

1. Преобразующие механическую энергию объекта исследования (ОИ) в тепловую с последующим ее рассеиванием. К этому классу относятся разного рода тормоза (фрикционные, гидравлические, индукционные, ферропорошковые), электрические машины в режиме автономного генератора.

2. Обеспечивающие взаимный обмен энергии ОИ с другими источниками. К этому классу НУ относятся различные обратимые машины (электриче-

ские, гидравлические) в комплекте с преобразователями и источниками энергии.

3. Преобразующие механическую энергию ОИ в изменение их энергетического состояния. К этому классу НУ относятся разнообразные устройства, использующие изменение кинетической энергии присоединяемых масс, например маховиков, подключаемых через муфты сцепления. Второй путь реализации этого класса НУ, использование кинетической энергии струй (жидкости или газа).

4. Комбинированные, сочетающие в различных вариантах любые из указанных способов преобразования энергии.

На практике для испытания различных машин широко применяют тормоза всевозможных конструкций, например, гидравлические, ферропорошковые, электрические на базе электрических машин, электрические индукционные, фрикционные. Любой тормоз всегда выступает в качестве преобразователя энергии вала ОИ в тепловую энергию теплоносителя (рис. 1), которая может передаваться в окружающую среду.

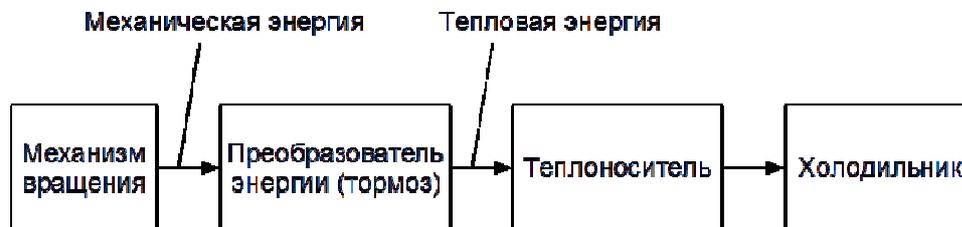


Рис. 1. Схема преобразования энергии в тормозных устройствах

Работа тормоза описывается следующими переменными: мощностью P , поглощаемой тормозом, тормозным вращающим моментом M и угловой скоростью ω вращения вала. Зависимости P и M от ω представляют собой рабочие характеристики, которые для тормозов представлены на рис. 2.

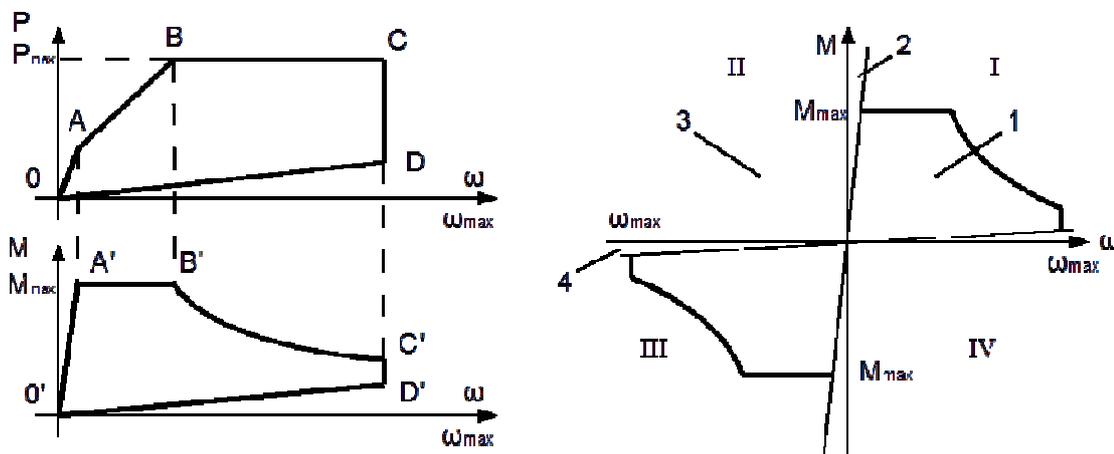


Рис. 2. Области реализуемости рабочих режимов: 1 – возможных режимов; 2 – недостижимости; 3 – принципиально невозможных режимов; 4 – некомпенсируемых потерь

Из второго закона термодинамики вытекает, что тормоза могут обеспечить только однонаправленный поток энергии, следовательно, характеристики нагружения могут находиться только лишь в I и III квадрантах механической характеристики. Рабочие характеристики тормозов принципиально не могут заполнять весь угол, образованный осями ω и M в I и II квадрантах. Всегда при любой совершенной конструкции будут существовать области, недостижимые для рабочих характеристик.

Таким образом, для разработки стенда был выполнен обзор возможных вариантов систем нагружения.

1.1.1. Система нагружения использующая генератор постоянного тока

Можно разделить на два типа: двигатель постоянного тока (ДПТ) в режиме динамического торможения (рис. 3) и ДПТ в режиме рекуперации (рис. 4).

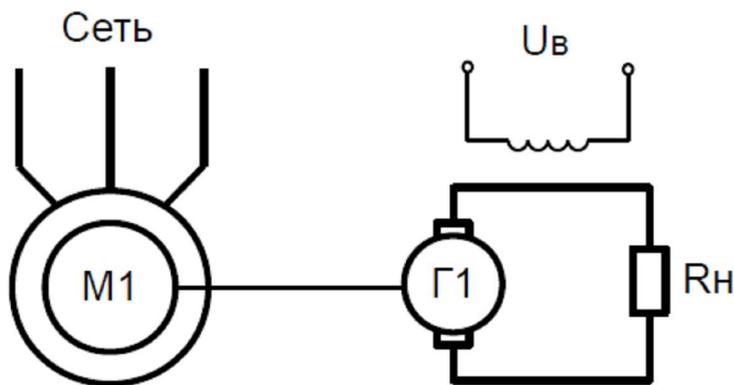


Рис. 3 Система двигатель-генератор

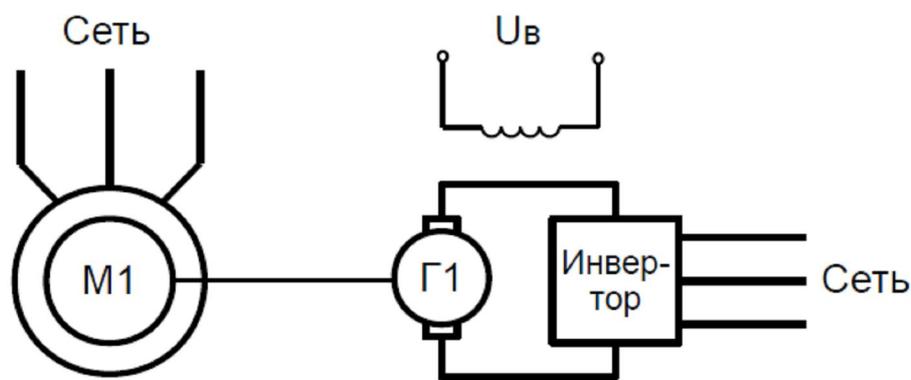


Рис. 4. Схема с ДПТ с инвертором

Принцип работы в режиме динамического торможения заключается в том, что ДПТ создает момент сопротивления, управление которым возможно изменением тока возбуждения и изменением сопротивления нагрузочного реостата в цепи якоря. К достоинствам схемы можно отнести простоту ре-

лизации и малую инерционность при набросе нагрузки. К недостаткам – невозможно реализовать режим стопорения, мощность реостата при плавном регулировании момента сопротивления сопоставима с мощностью двигателя.

При работе ДПТ в режиме рекуперации, ток якоря регулируется инвертором. Это позволяет реализовать режим противовключения и рекуперативного торможения. К достоинствам относится высокая энергетическая эффективность системы, плавное регулирование момента сопротивления. К недостаткам можно отнести сложность реализации системы – высокая стоимость инвертора.

1.1.2. Система нагружения использующая активную нагрузку

В качестве активной нагрузки может использоваться любая подъемная установка (рис. 5.). Момент создается барабаном с намотанным канатом, на конце которого подвешен груз. Изменение момента возможно изменением массы груза, либо изменением диаметра барабана.

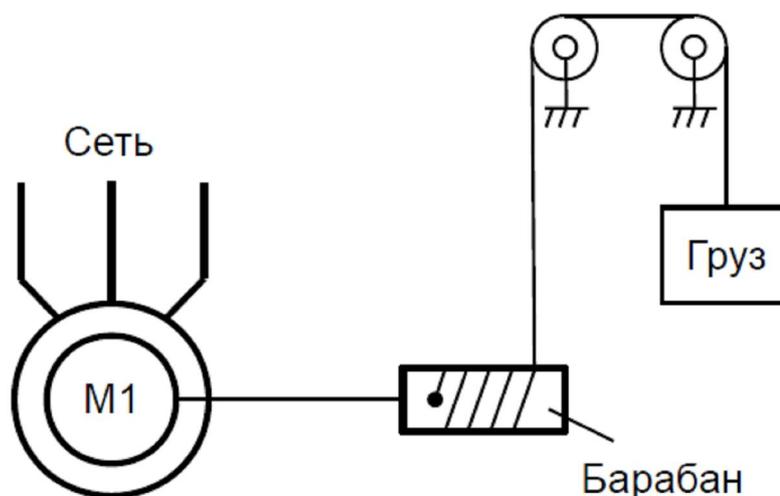


Рис. 5. Нагружение подъемом груза

Достоинства данного способа: достаточно высокая точность определения момента нагрузки, происходит преобразование кинетической энергии в потенциальную, поэтому не происходит выделение тепла, возможность реализации стопорения, постоянство момента во времени. Недостатки: невозможность работы на высоких оборотах, большие габариты установки, сложность управления величиной нагрузки с ПК.

1.1.3. Асинхронно-вентильное нагружающее устройство

Устройство установки показано на рис. 6, где обозначено: РС, РМ, РТ – регуляторы скорости, момента, тока соответственно; СФИ – система форми-

рования импульсов; D_{ω} , D_M - датчики скорости, момента; Б1 – вентильный неуправляемый преобразователь; Б2 – инвертор.

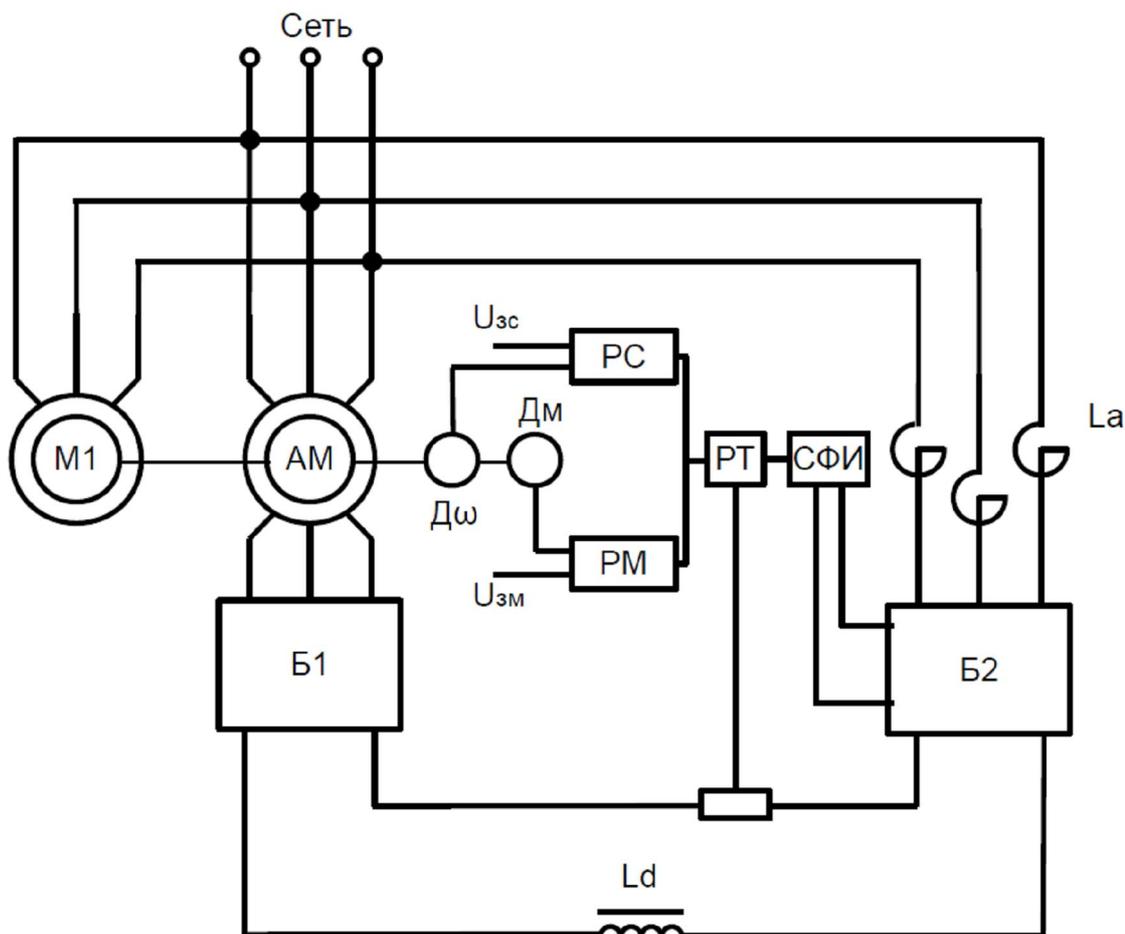


Рис. 6. Схема асинхронно-вентильного НУ

Работа основана на введении в цепь ротора асинхронной машины с фазным ротором добавочной ЭДС.

С помощью вентильного преобразователя Б1 осуществляется управление асинхронной машиной (АМ) и рекуперация части энергии испытуемого двигателя в питающую сеть через преобразователь Б1 и Б2. Изменяя величину ЭДС инвертора Б2 можно изменять режим работы нагружающего устройства.

К достоинствам схемы можно отнести возможность рекуперации энергии в питающую сеть, возможность формирования нагрузки в широком диапазоне скоростей. Недостатки: сложность конструкции, большие габариты, наличие двигателя с фазным ротором.

1.1.4. Использование ферропорошкового тормоза

Устройство установки показано на рис. 7. Момент в ферропорошковом тормозе создается за счет вязкого трения, изменяющегося в зависимости от тока возбуждения.

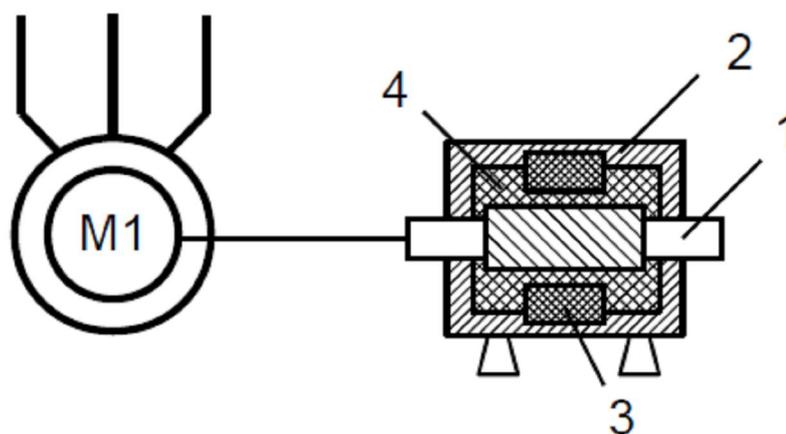


Рис. 7. Схема установки с ферротормозом: 1 – ведущий вал; 2 – неподвижный корпус; 3 – электромагнит; 4 – ферромагнитный порошок

При отсутствии напряжения на обмотке электромагнита вал вращается с минимальным сопротивлением, поскольку наполнитель обеспечивает свободное перемещение ферромагнитных зерен относительно друг друга. Если к обмотке возбуждения подключить источник напряжения, то вязкость среды увеличивается, следовательно, сила трения между валом и корпусом возрастает – на валу появляется тормозной момент.

Достоинства данной системы: простота реализации плавного изменения нагрузки в широком диапазоне; возможность полной остановки двигателя (реализация стопорения). Недостатки: инерционность момента сопротивления по отношению к заданию; при работе в продолжительном режиме необходима система охлаждения; изменение характеристик в зависимости от температуры.

1.1.5. Использование электромагнитного фрикционного тормоза

В тормозах данного типа для создания момента используется трение тормозных дисков друг о друга. При подаче управляющего напряжения возникает магнитный поток и сила, притягивающая тормозные диски. При включении данного вида тормоза возникает сильный нагрев трущихся поверхностей, поэтому длительное торможение невозможно. Достоинства: относительная простота конструкции, плавность регулировки. Недостатки: невозможность длительного режима, большие массогабаритные показатели по сравнению с другими видами тормозов, изменение параметров с увеличением температуры, низкое быстродействие.

1.1.6. Выбор системы

В результате обзора нагружающих устройств в качестве элемента стенда было выбрано ну на базе ДПТ.

1.2. Разработка конструкции

Стенд строится на базе установки «Компьютеризированный испытательный стенд», разработанной на кафедре электропривода и автоматизации КузГТУ. Конструктивно он представляет собой две электрические машины, одна из которых является испытуемым АД, другая – машиной постоянного тока (МПТ), выполняющая функцию нагружающего устройства для АД, как это показано на рис. 8. Электрические машины соединены механической связью, снабжены комплектом необходимых датчиков, индивидуальными системами управления и блоком защит.

Основой конструкции является сварная рама, обладающая высокой жесткостью, на которую установлены электрические машины. Соединение валов выполнено гибкой муфтой, обладающей значимой упругостью.

Для обеспечения безопасности работы со стендом в его конструкции использованы негорючие материалы, а также обеспечена необходимая электрическая изоляция токоведущих частей.

Фотография стенда показана на рис. 9.

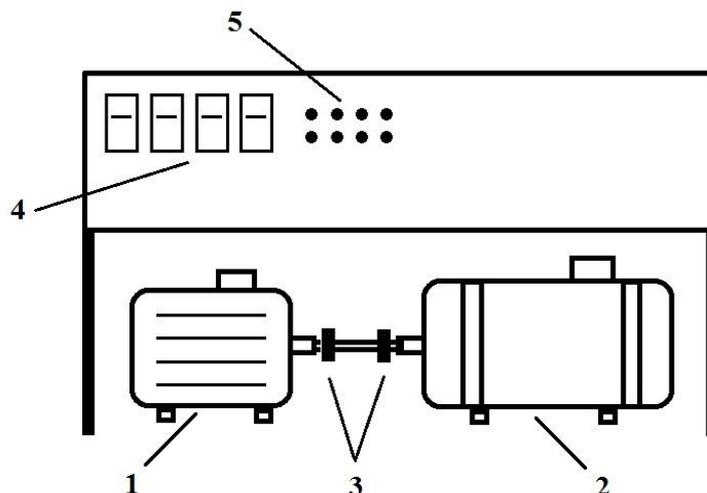


Рис. 8. Конструктивная схема стенда: 1 – испытуемый АД, 2 – нагрузочная МПТ, 3 – датчики угла поворота на валу, 4 – блок защит системы, 5 – элементы управления стендом

1.3. Разработка схемных решений

Принцип действия стенда основан на способе формирования момента нагрузки на валу АД при помощи регулирования тока якоря МПТ путем ввода нагрузочного сопротивления, в этом случае МПТ работает в режиме торможения. Если в качестве тормозного режима использовать режим динамического торможения, особенностью данного способа будет неспособность создания активной нагрузки на валу АД. Исходя из этого, для формирования нагрузки такого типа реализована возможность работы МПТ в режиме торможения противовключением.



Рис. 9. Внешний вид стенда

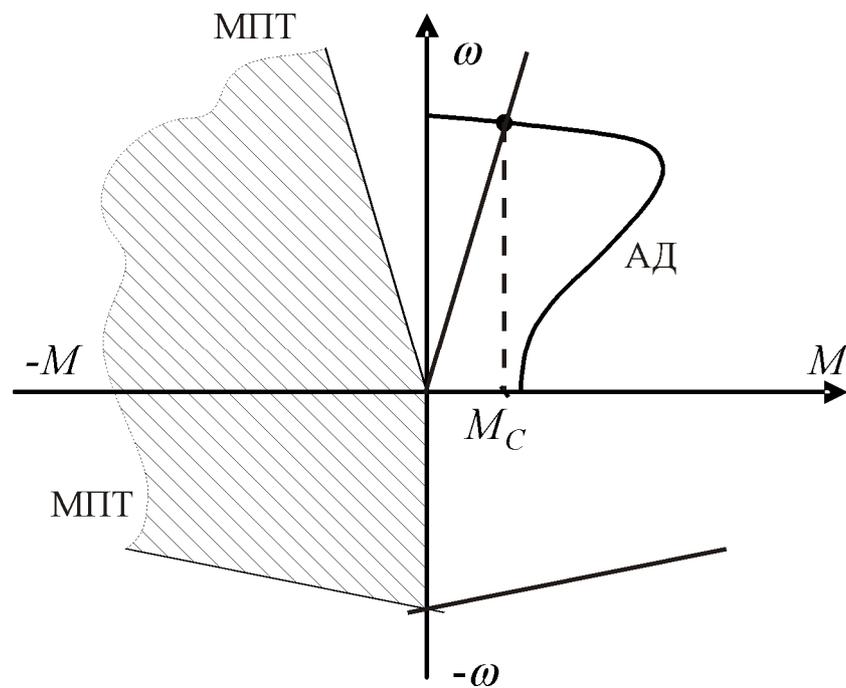


Рис. 10. Механические характеристики режимов работы АД и МПТ

На рис. 10 изображены механические характеристики режимов работы АД и МПТ. Механическая характеристика в I квадранте соответствует двигательному режиму работы АД, характеристика во II квадранте соответствует режиму динамического торможения МПТ, в III квадранте – его режиму торможения противовключением. Учитывая, что включение электрических машин обеспечено во встречном направлении, коммутируя нагрузочное сопротивление методом широтно-импульсного преобразования (ШИП), может быть реализован момент сопротивления M_c любого значения между двумя характеристиками МПТ в пределах его максимально возможного тока якоря.

Организация работы стенда отражена на его структурной схеме, показанной на рис. 11, где введены следующие обозначения: ИД – испытуемый АД, НМ – нагрузочная электрическая машина постоянного тока, ИС – измерительная подсистема стенда, Д1...Д13 – комплект датчиков, СУНМ – подсистема силовой части и управления нагрузочной машиной, БЗ – блок защит системы, СУАД – система управления АД, ПК – персональный компьютер.

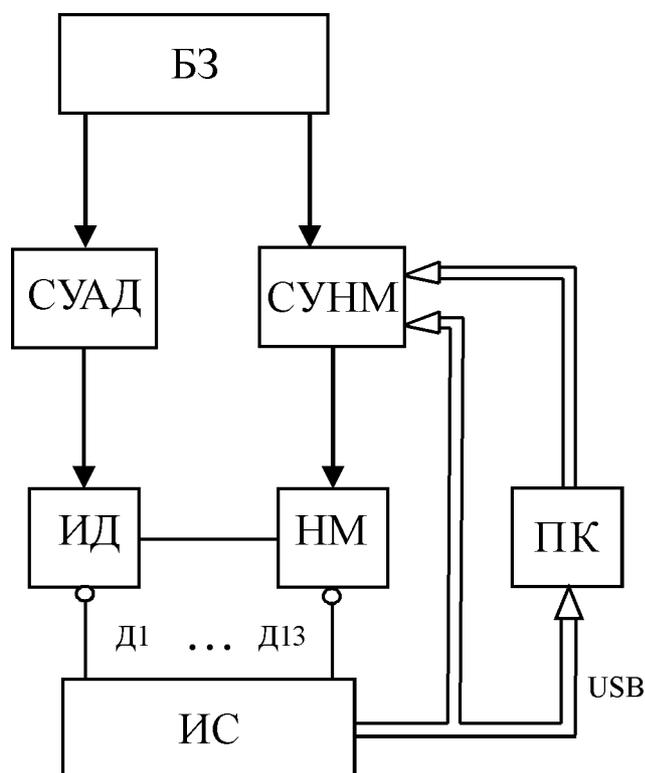
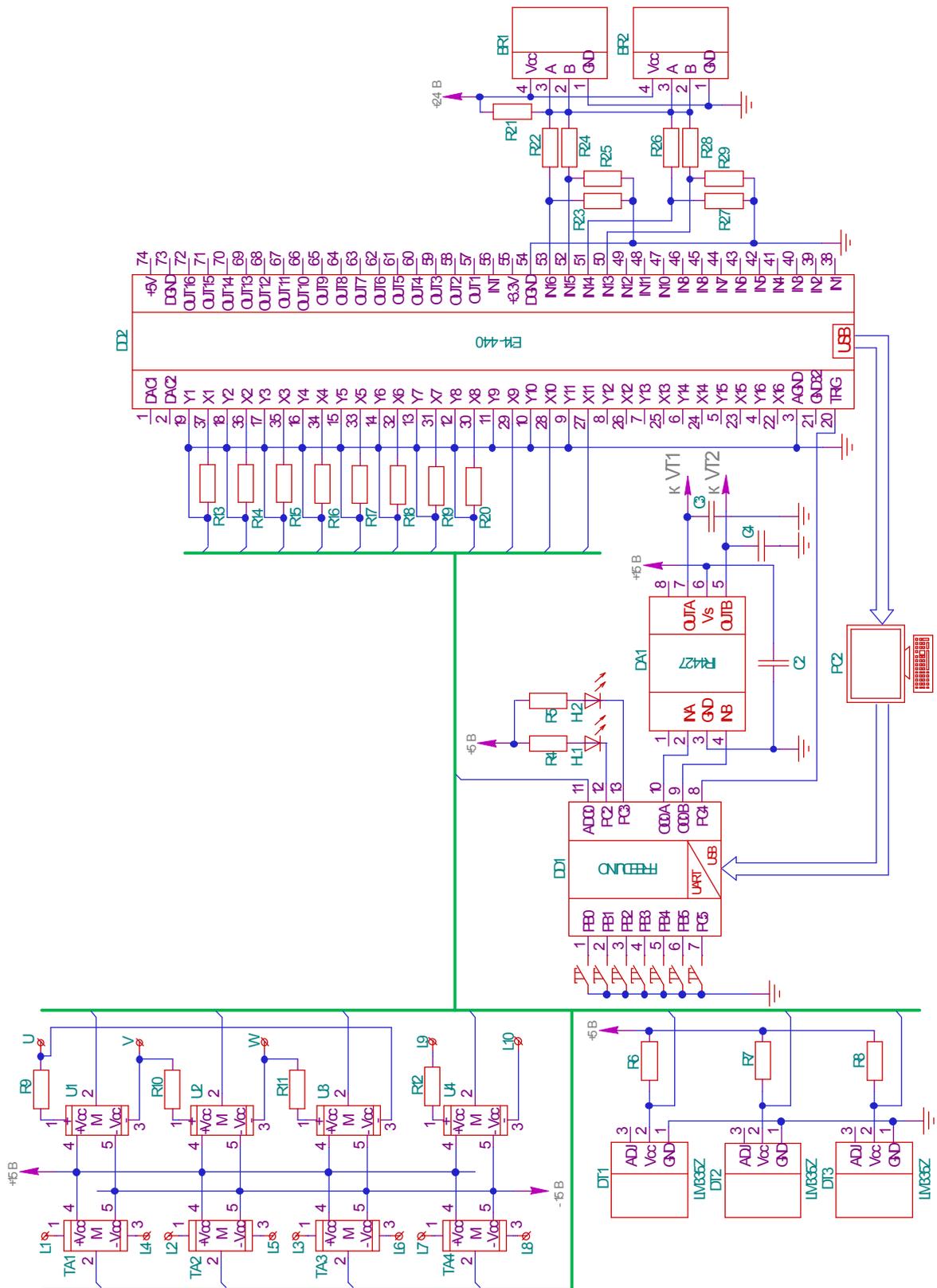


Рис. 11. Структурная схема стенда

Измерительная подсистема стенда предназначена для измерения и последующего аналого-цифрового преобразования (АЦП) текущих параметров испытуемого АД и нагрузочной машины: фазных токов АД, фазных напряжений АД, тока якоря НМ, напряжения якоря НМ, момента на валу НМ, температуры в трех точках станины испытуемого АД, скоростей вращения ротора. Соответственно, ИС включает в себя модуль АЦП и комплект необходимых датчиков.



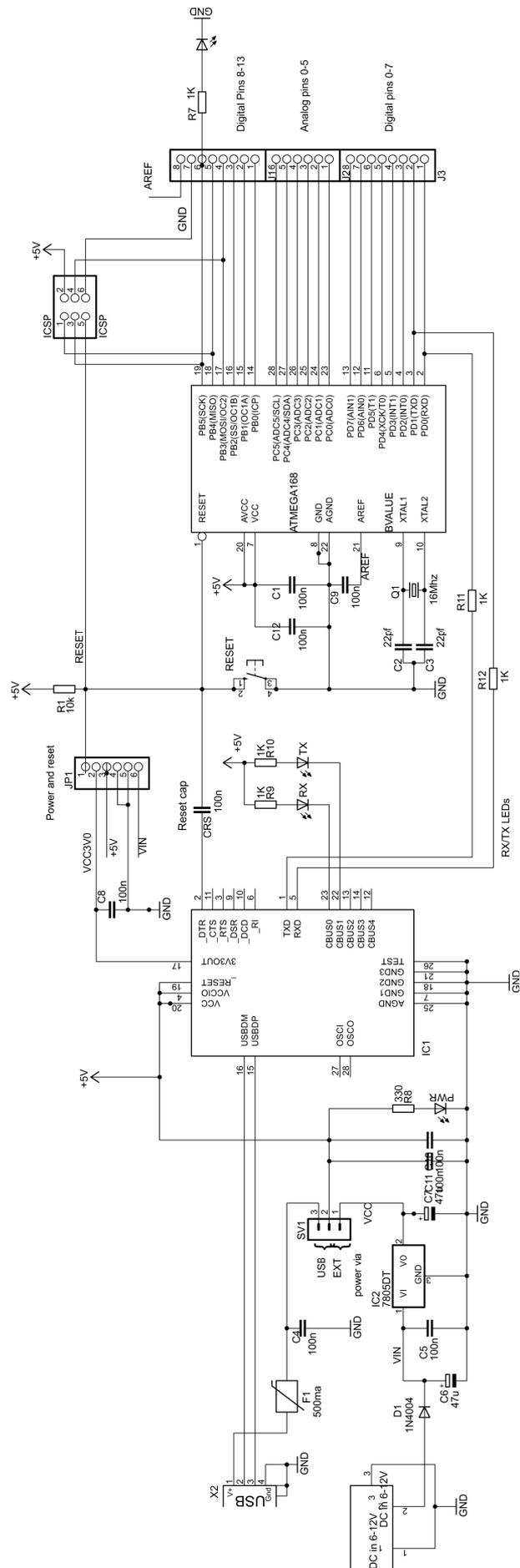


Рис. 14. Принципиальная схема модуля Freeduino

На ПЭС силовой части установки изображены испытуемый асинхронный электродвигатель М, подсистема управления АД UZ, нагрузочная МПТ G, элементы управления МПТ, блок защит БЗ, коммутирующие контакторы КМ1 – КМ3 и кнопочные средства управления ими, а также блоки питания А1 – А5, преобразующие однофазное напряжение с параметрами 220 В, 50 Гц, до уровней напряжений питания низковольтных устройств системы. Сопротивление R1 (рис. 12) представляет собой тормозное сопротивление в режиме динамического торможения НМ.

ПЭС управляющей части системы содержит подсистему управления нагрузочной машины, включающую в себя управляющее устройство на базе микроконтроллера модуля Freeduino Through-Hole DD1, принципиальная схема модуля которого показана на рис. 14, светодиоды HL1, HL2 для сигнализации штатного режима работы системы и сигнализации останова, семь тактовых кнопок для управления работой НМ и задания типа имитируемой статической нагрузки. Драйвер IR4427 DA1 и IGBT выполнены на транзисторах VT1, VT2 (рис. 13) и образуют двухканальный широтно-импульсный преобразователь (ШИП), регулирующий электромагнитный момент НМ в соответствии с заданным типом нагрузки. Входными сигналами для ШИП являются широтно-импульсные сигналы с выводов OC0A и OC0B модуля Freeduino.

Основные технические характеристики примененного модуля Freeduino Through-Hole:

- микроконтроллер ATmega168;
- ППЗУ (Flash Memory) 16 Кбайт;
- ОЗУ (SRAM) 1 Кбайт;
- ПЗУ (EEPROM) 512 байт;
- тактовая частота: 16 МГц;
- интерфейсная микросхема FT232RL, представляющая собой преобразователь интерфейса USB-UART для реализации связи с ПК.

Питание модуля Freeduino можно осуществлять как от шины USB, так и от внешнего источника питания. Freeduino имеют защиту, которая предохраняет USB порт компьютера от коротких замыканий и перегрузок по току (более 500 мА).

Измерительная подсистема содержит плату АЦП E14-440 DD2 и комплект датчиков для измерения необходимых координат АД и НМ. Перечень используемых датчиков отражен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень датчиков системы

Величина	Позиц. обознач-е	Модель датчика	Диапазон работы	Тип выхода	Кол-во
Напряжение	U	LV-25P	10÷500 В	Аналоговый	4
Ток	TA	LAN-50P	0÷110 А	Аналоговый	4

Величина	Позиц. обознач-е	Модель датчика	Диапазон работы	Тип выхода	Кол-во
Температура	DT	LM335Z	-40÷100°C	Аналоговый	3
Момент, скорость	BR1	RSI58N-02048	2048 имп/об.	Цифровой	2
	BR2	E40H12-20483N24			

Оценка статического момента и угловой скорости осуществляется через измерение энкодерами BR1, BR2 углов закручивания вала, соединяющего испытуемый АД и НМ.

Вычисление текущего момента сопротивления M_C осуществляется по формуле:

$$M_C = GJ_p \frac{\Delta\varphi}{l},$$

где $G = 8,1 \cdot 10^{10}$ Н/м² – модуль сдвига; $J_p = 2,035 \cdot 10^{-9}$ м⁴ – полярный момент инерции сечения вала; $l = 0,093$ м – длина вала; $\Delta\varphi$ – разность углов закручивания вала.

Для контроля правильности оценки момента по закручиванию вала используется датчик момента специальной конструкции. Он основан на тензодатчике, измеряющему силу, с которой НМ давит на основание конструкции стенда. При сообщении момента на вал НМ происходит изменение сил на опорах, схема расстановки которых представлена на рис. 14.

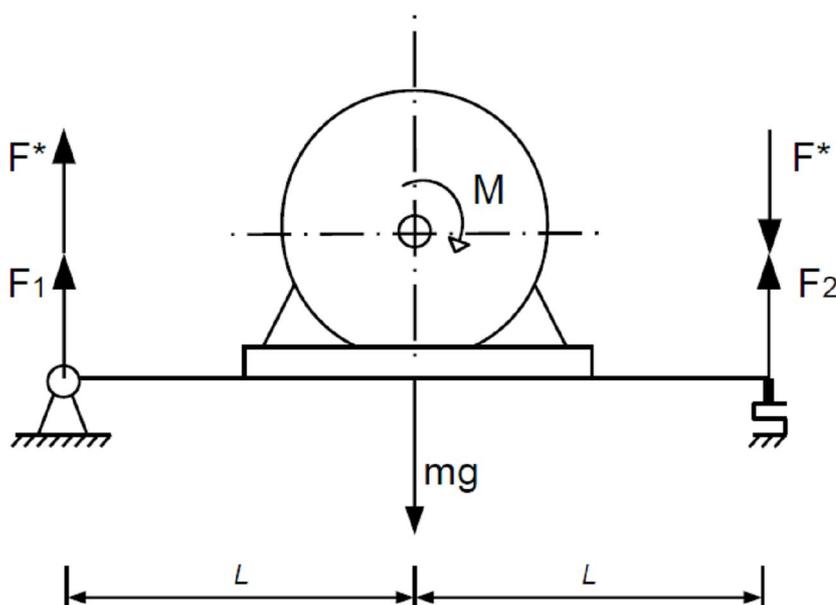


Рис. 14. Устройство датчика момента

На рис. 14 левый край платформы установлен на подвижном шарнире, под правым краем установлен тензодатчик, измеряющий силу F_2 . Для опре-

деления прикладываемого момента M к валу НМ рассмотрим уравнение равновесия моментов относительно центра вала:

$$M + L(F_1 + F^*) - L(F_2 - F^*) = 0,$$

где F^* – сила, которая возникает в опорах при приложении момента к валу НМ; F_1, F_2 – реакции опоры; L – расстояние от центра вала до поры.

Поскольку НМ установлен по центру платформы то $F_1 = F_2$. Таким образом, получаем:

$$M + LF_1 + LF^* - LF_2 + LF^* = 0,$$

откуда:

$$M = -2LF^*.$$

Согласно расчету нагрузок в опорах, при массе двигателя 15 кг, массе НМ 20 кг и ширине плеча для платформы под двигателем $2L=0,245$ м, а для платформы под НМ $2L=0,26$ м, и приняв, что в переходных процессах момент на валу может достигать пятикратной перегрузки от номинального момента двигателя, т.е. значения 37,5 Н·м, сила F^* для двигателя равна 15 Н, а для НМ, соответственно, 14 Н. Таким образом, суммарная реакция в опорах равна для двигателя 73,5 Н, а для НМ, соответственно, 98 Н. Исходя из этого, с учетом всех вариантов согласного и встречного взаимодействия сил, были выбраны тензодатчики, обеспечивающий измерение в пределах от –100 Н до 250 Н, параметры которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры тензодатчиков

Параметр	Значение	Значение
Тип	DEE-100kg	DEE-100kg
Класс точности	C3	C3
Серийный номер	58V771	58V780
Стандарт реализации	OIML R60	OIML R60
Напряжение возбуждения	10...12 В	10...12 В
Чувствительность	1,9974 мВ/В	1,9972 мВ/В
Нулевой выход	0,41 % F.S	0,60 % F.S
Входное сопротивление	400,9 Ом	400,4 Ом
Выходное сопротивление	351,7 Ом	351,7 Ом
Сопротивление изоляции	>5000 МОм	>5000 мОм

Для усиления сигнала с тензодатчика была разработана плата на основе инструментального дифференциального усилителя INA118. Это усилитель с низким током потребления, которые при своих малых размерах содержит в себе три дифференциальных усилителя, что дает ему большое входное сопротивление, позволяет работать в широком диапазоне частот с большим ко-

эффицентом усиления, который меняется внешним резистором в пределах от 1 до 10000. Полная характеристика INA118 представлена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика дифференциального усилителя INA118

Параметр	Условия	Min	Typ	Max
Смещение напряжения Первоначальное, мкВ Температурное, мкВ/°С Источника питания, мкВ/В	$T_A=+25^{\circ}\text{C}$ $T_A=T_{\min}$ до T_{\max} $V_S=\pm 1,35\text{В}$ до $\pm 18\text{В}$		$\pm 10 \pm 50/\text{G}$ $\pm 0,2 \pm 2/\text{G}$ $\pm 1 \pm 10/\text{G}$	$\pm 50 \pm 500/\text{G}$ $\pm 0,5 \pm 20/\text{G}$ $\pm 5 \pm 100/\text{G}$
Длительная стабильность, мкВ/мо			$\pm 0,4 \pm 5/\text{G}$	
Импеданс: дифференциальный, $\Omega \parallel \text{пФ}$ синфазный, $\Omega \parallel \text{пФ}$			$10^{10} \parallel 1$ $10^{10} \parallel 4$	
Линейный диапазон входного напряжения, В		(В+) – 1 (В-) + 1,1	(В+) – 0,65 (В-) + 0,95	
Безопасное входное напряжение, В				± 40
Синфазность, дБ	$V_{\text{CM}}=\pm 10\text{В}$, $\Delta R_S=1\text{k}\Omega$ $G=1$ $G=10$ $G=100$ $G=1000$	80 97 107 110	90 110 120 125	
Смещение тока, нА От температуры, пА/°С			± 1 ± 40	± 5

Тензоусилитель и усилитель мощности для него и выполнены на отдельных платах, их подключение производится через клемные соединения. Схемы приведены на рис. 15 и рис. 16.

Подключение аналоговых датчиков к модулю АЦП в управляющей части стенда (рис. 13) выполнено по дифференциальной 16-ти канальной схеме. Подключение выходных каналов цифровых датчиков угла поворота (энкодеров) к цифровым ТТЛ – совместимым линиям модуля осуществлено через резистивные делители R22:R23, R24:R25, R26:R27 и R28:R29 для сопряжения логических уровней выходных сигналов энкодеров с логическими уровнями модуля АЦП.

Используемая конфигурация платы АЦП E14-440, лицевой вид печатной платы которой показан на рис. 17, имеет следующие характеристики:

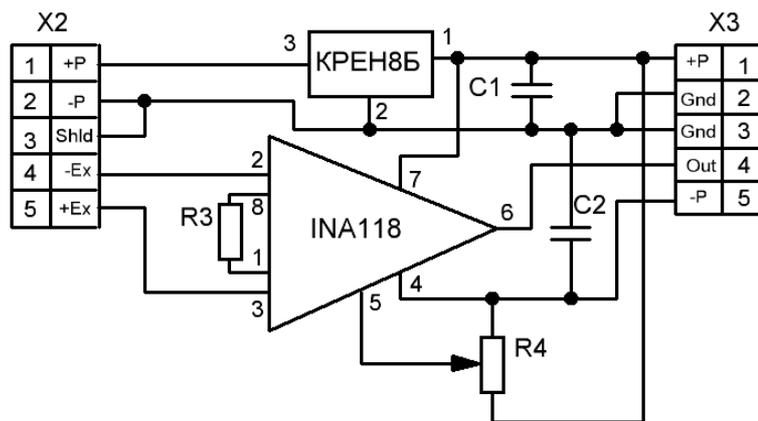


Рис. 15. Принципиальная схема тензоусилителя

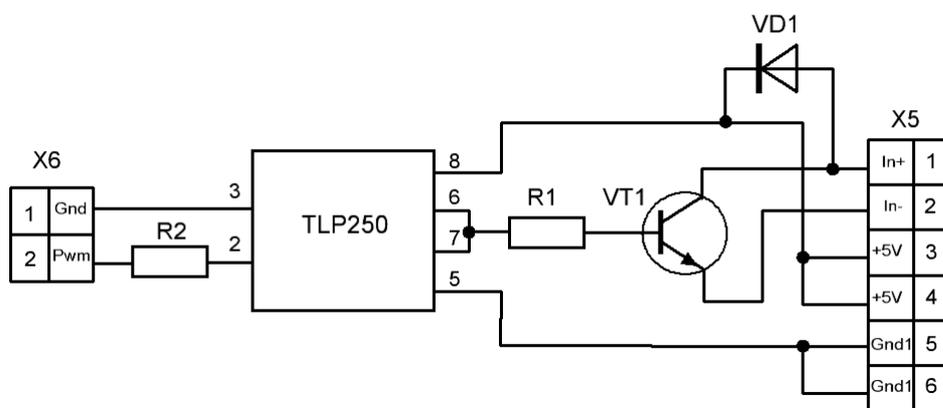


Рис. 16. Принципиальная схема усилителя мощности

- сигнальный процессор (DSP) ADSP-2185M с тактовой частотой 48 МГц;
- 16 дифференциальных каналов или 32 канала с общей землей;
- максимальная частота работы 14-ти битного АЦП – 400 Гц;
- два входа для внешней цифровой синхронизации ввода аналоговых сигналов;
- порт цифрового ввода/вывода, имеющий 16 входных и 16 выходных ТТЛ линий;
- двухканальный 12-ти битный ЦАП с максимальной суммарной частотой 125 КГц.

Блок защит осуществляет селективную защиту подсистем и системы в целом от коротких замыканий и перегрузок по току. В его состав входят автоматические выключатели:

- входной QF1 “Сеть”, рассчитанный на ток 50 А;
- QF2 “АД”, рассчитанный на ток 16 А, потребляемый подсистемой управления АД;
- QF3 “ДПТ”, рассчитанный на ток 25 А подсистемы управления НМ;
- QF4 “Инвертор”, рассчитанный на ток 16 А.

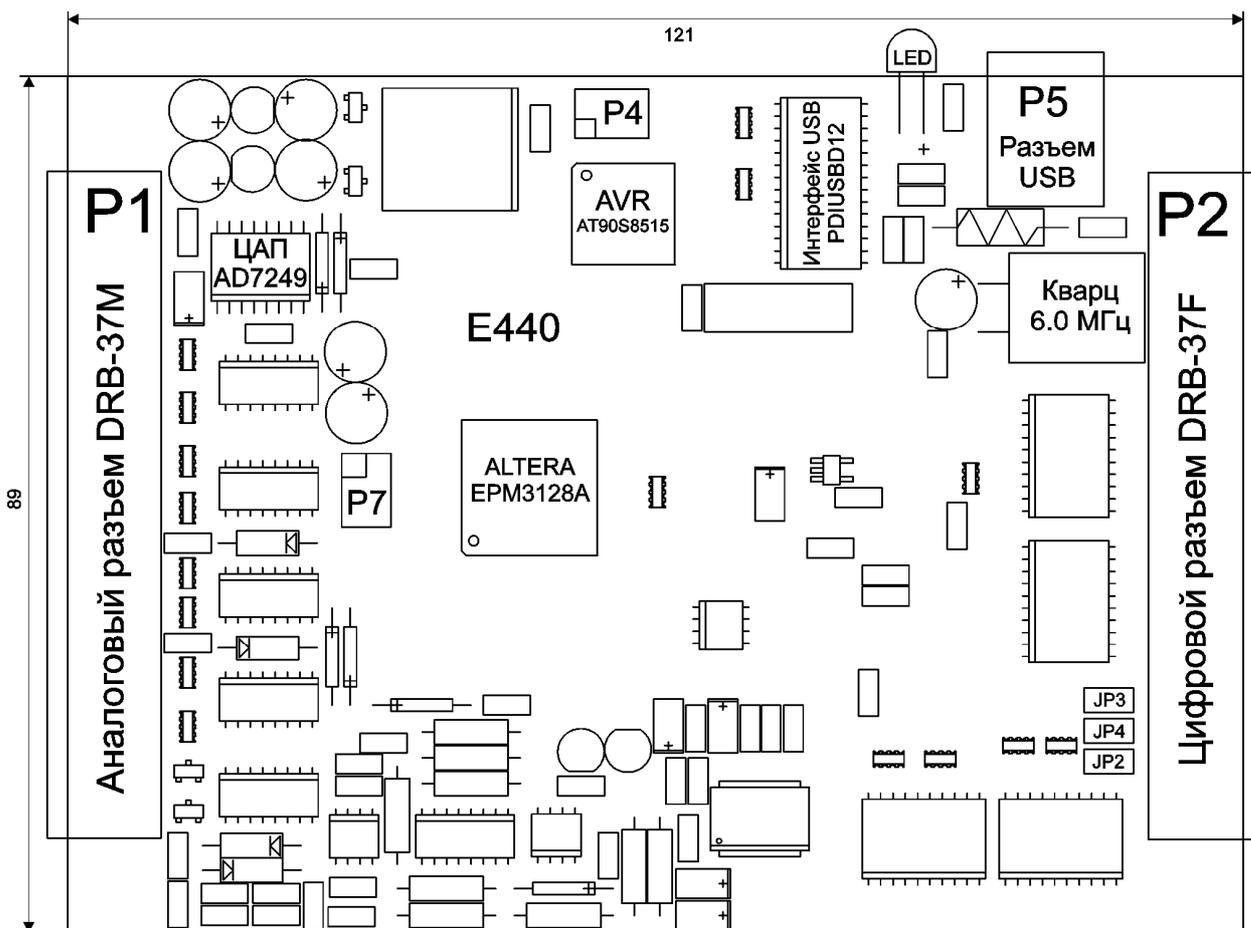


Рис. 17. Лицевой вид печатной платы E14-440

Для вывода графической информации о текущих координатах АД и НМ используется штатное программное обеспечение L-Graph I, поставляемое совместно с модулем АЦП. Подключение платы АЦП к ПК осуществляется по интерфейсу USB 1.0.

1.4. Разработка принципов аппаратно-программного взаимодействия элементов экспериментальной установки

В соответствии с требованиями технического задания, разработанной структурной и принципиальной схемами разработано программное обеспечение для микроконтроллера.

Аппаратно-программное взаимодействие в рамках подсистемы управления нагрузочной машины реализовано на базе открытой платформы Arduino. Выбор данной платформы обусловлен следующими достоинствами:

- не требуется навыков программирования микроконтроллеров;
- не требуются специализированные программаторы и компиляторы;
- удобная и простая среда разработки программ для микроконтроллера.

Написание программ велось в стандартной среде разработки программ Arduino. Идеология программирования в Arduino схожа с языком Processing, который основан на языке java, и обладает простым и понятным Си-подобным синтаксисом. В отличие от Processing, который дает возможность быстро и легко создавать мультимедиа приложения, среда Arduino приспособлена для программирования микроконтроллеров, для чего в составе имеется специальный набор библиотек.

Каждая программа в Arduino обязательно состоит из двух процедур. После каждого включения питания или сброса микроконтроллера (МК) однократно выполняются команды из процедуры Setup. В ней можно настраивать режимы работы выводов МК, настраивать прерывания, инициализировать работу виртуального СОМ порта. После выполнения процедуры Setup начинается бесконечный циклический вызов процедуры Loop, в которой пишется основной текст программы. Выполнение процедуры Loop может останавливаться прерываниями, после которых продолжается выполнение основной программы.

Так, в приложении А приведен текст программы на языке Processing, реализующий управление нагружающей машиной постоянного тока, а в приложении Б – текст программы для проведения динамических испытаний стенда, блок-схема которой показана на рис. 18.

В программе для проведения динамических испытаний реализовано изменение напряжения возбуждения НМ по синусоидальному закону с заранее заданной частотой. Для изменения амплитуды и частоты выходного напряжения необходимо производить изменение коэффициентов в тексте программы и загружать ее в МК. Привязка выполняемых действий в МК к времени реализована с помощью прерываний каждые 5 мс. Данные в порт передаются через каждые 15 мс. Период выходной синусоиды в программе представлен в виде 20 соответствующих значений, которые сменяют друг друга через заданное время. Максимальная частота и шаг возможной частоты определяется временем прерываний. При изменении двадцати значений период равен 0,1 с (каждое прерывание 5 мс), что соответствует частоте 10 Гц.

При нажатии кнопки подключенной к дискретному входу 0 прекращается передача данных на ПК, это дает команду программе на ПК об окончании измерения. Кнопка на дискретном входе 5 включает выходной сигнал, при не нажатой кнопке на выходе ничего не формируется. Все полученные данные передаются в порт ПК в виде ASCII строк. Строки отделяются друг от друга символом переноса (код 13 по ASCII), данные в строке символом табуляции (код 9 по ASCII).

Блок схема программы для проведения статических испытаний стенда и испытания преобразователя частоты показана на рис. 19, текст на языке Processing приведен в приложении В.

Отличие от программы для динамических испытаний в том, что основной упор при написании ставился на точное измерение скорости. Для этого в программе реализован таймер-счетчик и прерывание по переполнению таймера TMR2.

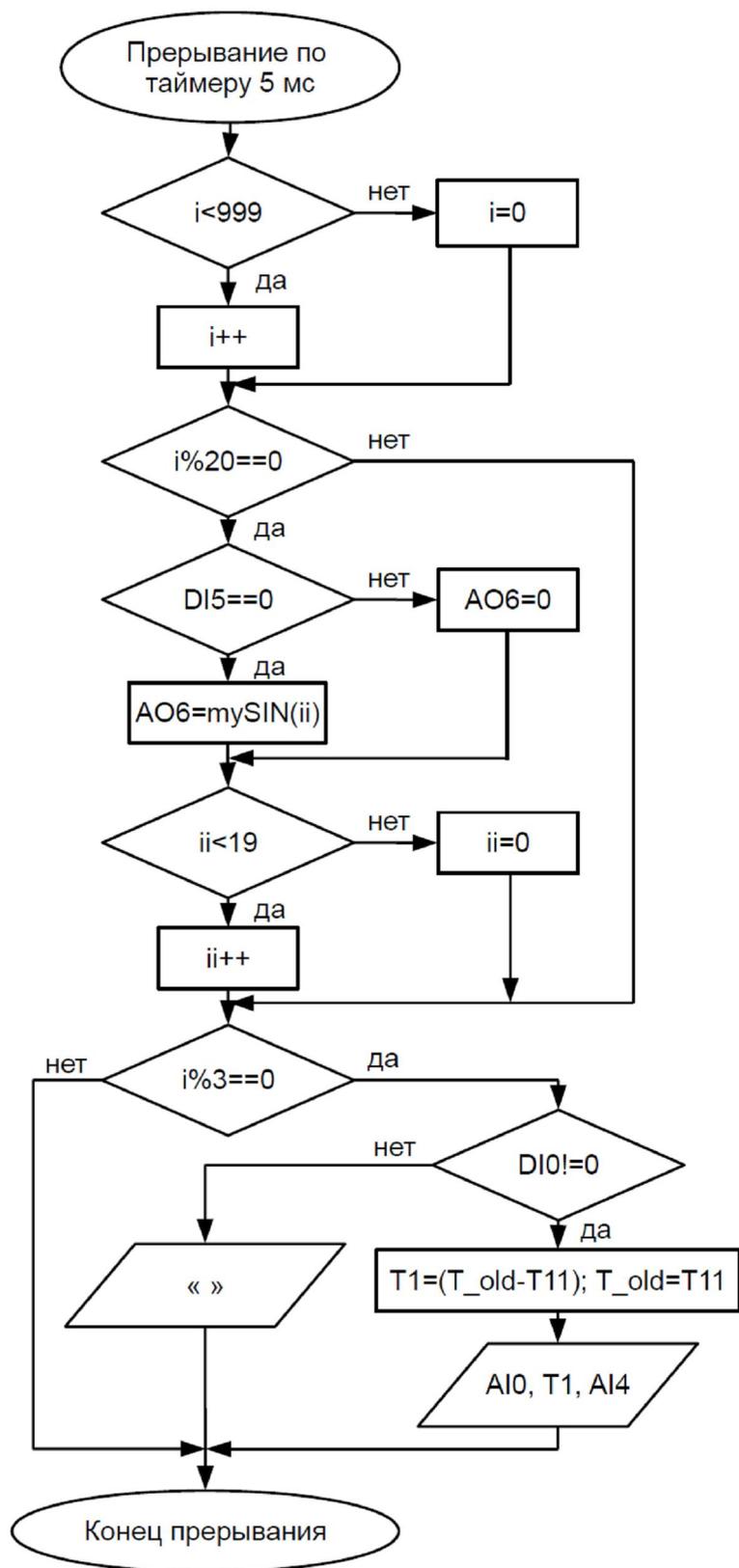


Рис. 18. Блок схема прерывания по таймеру для динамических испытаний

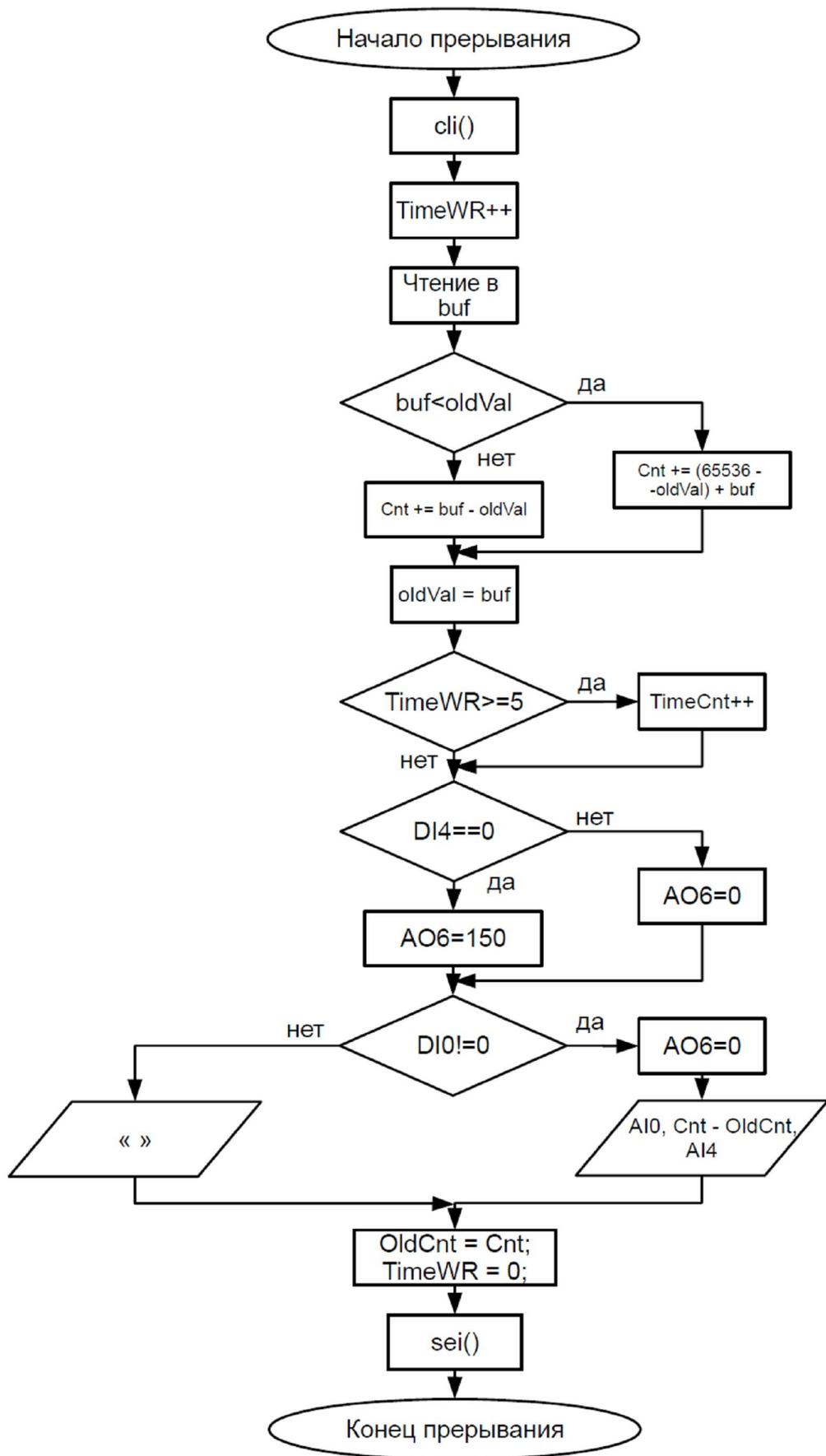


Рис. 19. Блок схема программы для статических испытаний

В прерывании осуществляется вычисление количества импульсов за время работы таймера TMR2, аналогово-цифровое преобразование сигналов с тензоусилителя и датчика тока.

Коэффициент передачи по моменту K_M для датчика под платформой двигателя:

$$K_M = \frac{L \cdot 0,797}{SENS} = \frac{0,245 \cdot 0,797}{SENS} = 0,09783 \text{ Н}\cdot\text{м/знач_АЦП},$$

а коэффициент для датчика под платформой тормоза:

$$K_M = \frac{L \cdot 0,797}{SENS} = \frac{0,26 \cdot 0,797}{SENS} = 0,10381 \text{ Н}\cdot\text{м/знач_АЦП}.$$

Для вычисления скорости программа ведет подсчет количества импульсов за 0,16667 с, зная, что на один оборот датчик выдает 1024 импульса. При скорости 1 об/с (60 об/мин) на выходе 1024 импульса за секунду, тогда за 0,16667 с считывается 170,6667 импульса, отсюда на один импульс приходится 0,35 об/мин.

2. Экспериментальное определение уровня потерь в асинхронном электроприводе в динамических режимах

Теоретические и экспериментальные исследования, дающие достаточные теоретические и достоверные экспериментальные результаты для решения задачи создания средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы, выполнялись в соответствии с программой проведения экспериментов, разработанной в ходе работ по 2 этапу Государственного контракта № 14.740.11.1105 «Разработка плана теоретических и экспериментальных исследований».

2.1. Результаты работы электропривода с программно задаваемой изменяющейся нагрузкой

2.1.1. Статические характеристики стенда

Статические характеристики показывают возможный диапазон создаваемых моментов сопротивления при различных скоростях вращения вала, при разных токах возбуждения НМ. Семейство полученных характеристик представлено на рис. 20.

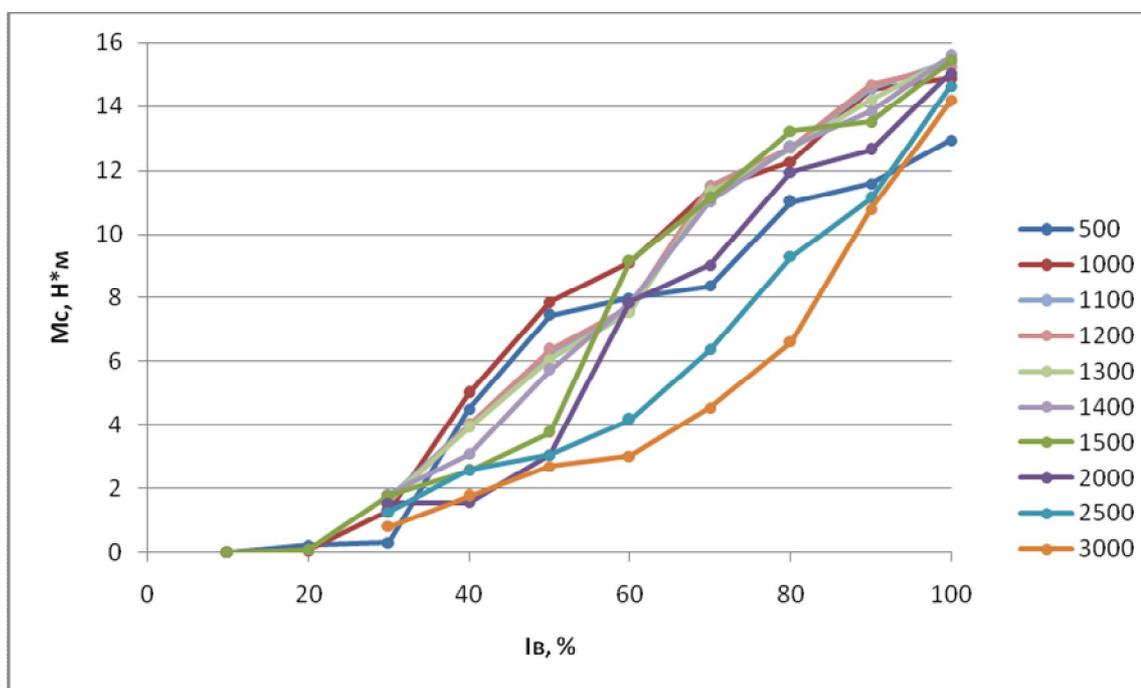


Рис. 20. Статические характеристики стенда при разной скорости вращения вала

Из графиков видно, что с увеличением скорости вращения вала создаваемый момент уменьшается при неизменном токе возбуждения. Большая часть графиков имеет характер насыщения. Это вызвано насыщением магни-

топровода НМ. При стопроцентном токе возбуждения характеристики на высоких и низких скоростях стремятся к одной точке. Здесь это происходит из-за ограниченности электропривода по мощности, что приводит к снижению оборотов вала. Если бы обороты не снижались, то характеристики на высоких скоростях прошли бы ниже.

В процессе выполнения исследований было выдвинуто предположение об изменении во времени статических характеристик в связи с ростом температуры. Данное предположение обосновывается тем, что за время проведения испытаний на установление статических характеристик стенда НМ не успевает выйти в установившийся температурный режим, поэтому изменение температуры со временем при выполнении одной и той же работы можно считать линейным. В то же время сопротивление обмоток НМ при увеличении температуры с $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ должно увеличиваться на 25 %. Для подтверждения предположения был проведен опыт на длительное динамическое торможение, результат которого представлен на рис. 21.

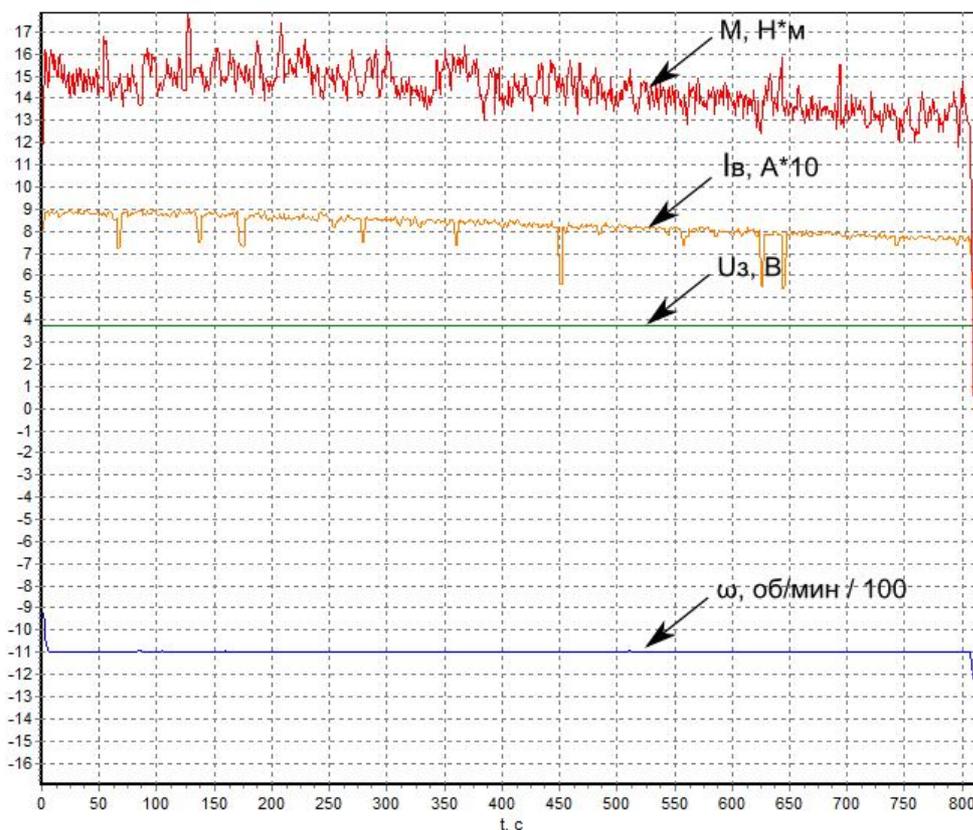


Рис. 21. Длительная работа в режиме динамического торможения

Опыт проводился в течение 14 минут с 80 процентной скважностью напряжения возбуждения. За это время произошло нагревание НМ и как видно на рисунке изменение его характеристик. В процессе работы понизился ток возбуждения, на величину около 15 %. Таким образом можно говорить о том, что температура заметно влияет получаемые характеристики. Также снизился создаваемый момент за счет снижения тока. Таким образом, для

поддержания тока возбуждения на заданной величине целесообразно организовать замкнутую систему регулирования, за счет введения обратной связи по току в источник напряжения. В рамках данного этапа работы это не реализовано, т.к. не ставились задачи по поддержанию стабильности характеристик стенда в продолжение длительного времени, поскольку согласно разработанному регламенту, длительность экспериментов на сопоставление фактически полученных данных с результатами вычислительных экспериментов не превышает единицы секунд.

2.1.2. Динамические характеристики стенда

Целью динамического исследования стенда является определение его рабочего диапазона частот. Для этого проводились опыты с формированием синусоидального момента сопротивления разной частоты, при разной частоте вращения вала испытуемого АД (рис. 22 и рис. 23). Изменение скорости АД выполнялось посредством преобразователя частоты, который работал в скалярном режиме управления. По полученным графикам определялись запаздывания по фазе тока возбуждения и отработываемого момента сопротивления на валу двигателя от управляющего напряжения. В результате были построены зависимости фазовых сдвигов от частоты вращения вала, которые представлены на рис. 24 – рис. 27.

Как и следовало ожидать, фазовое запаздывание тока возбуждения не зависит от частоты вращения вала, а зависит от частоты формируемого момента.

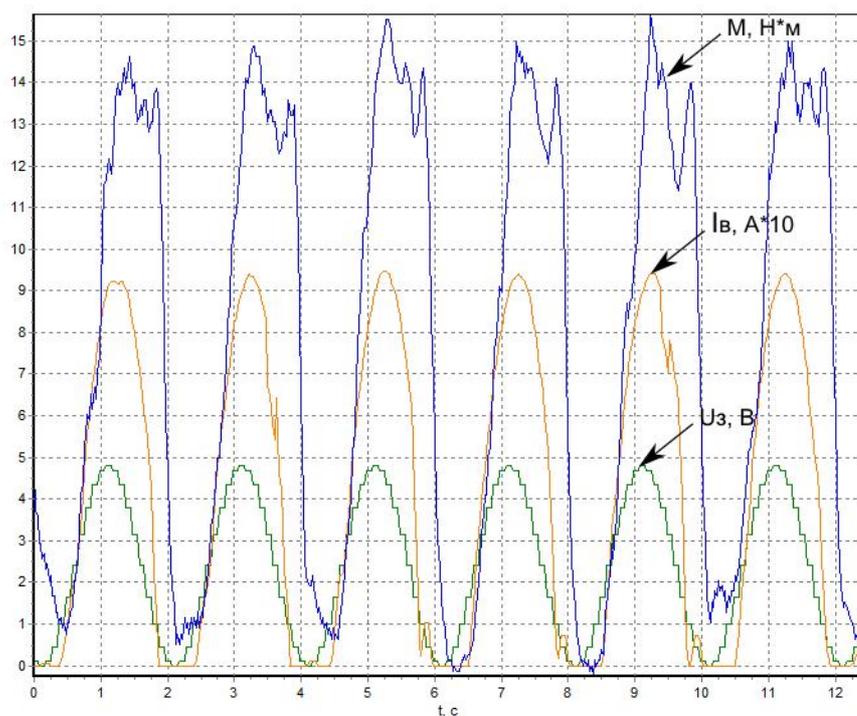


Рис. 22. Синусоидальное воздействие 0,5 Гц, частота вращения поля 20 Гц

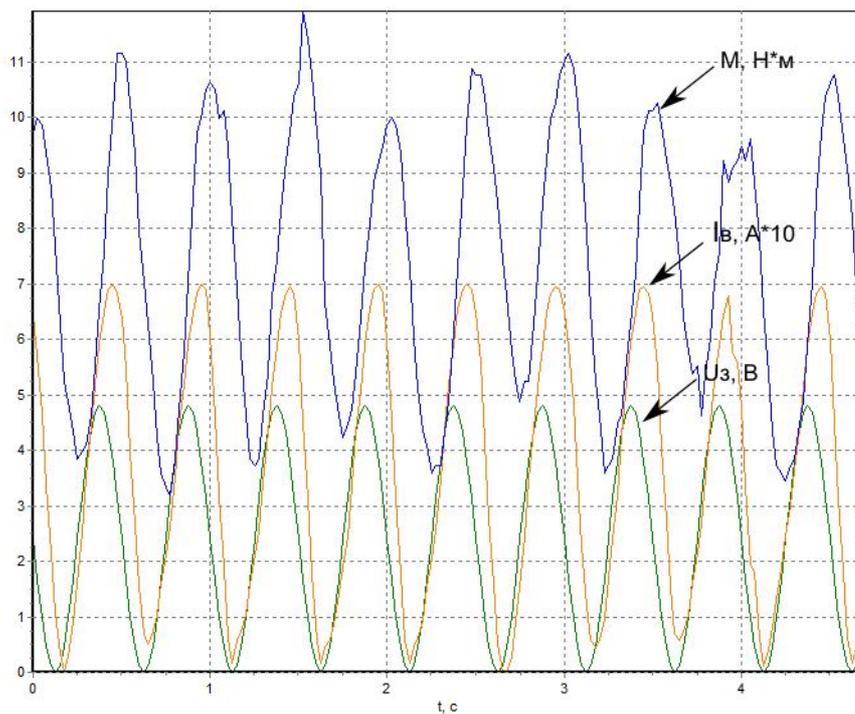


Рис. 23. Синусоидальное воздействие 2 Гц, частота вращения поля 20 Гц

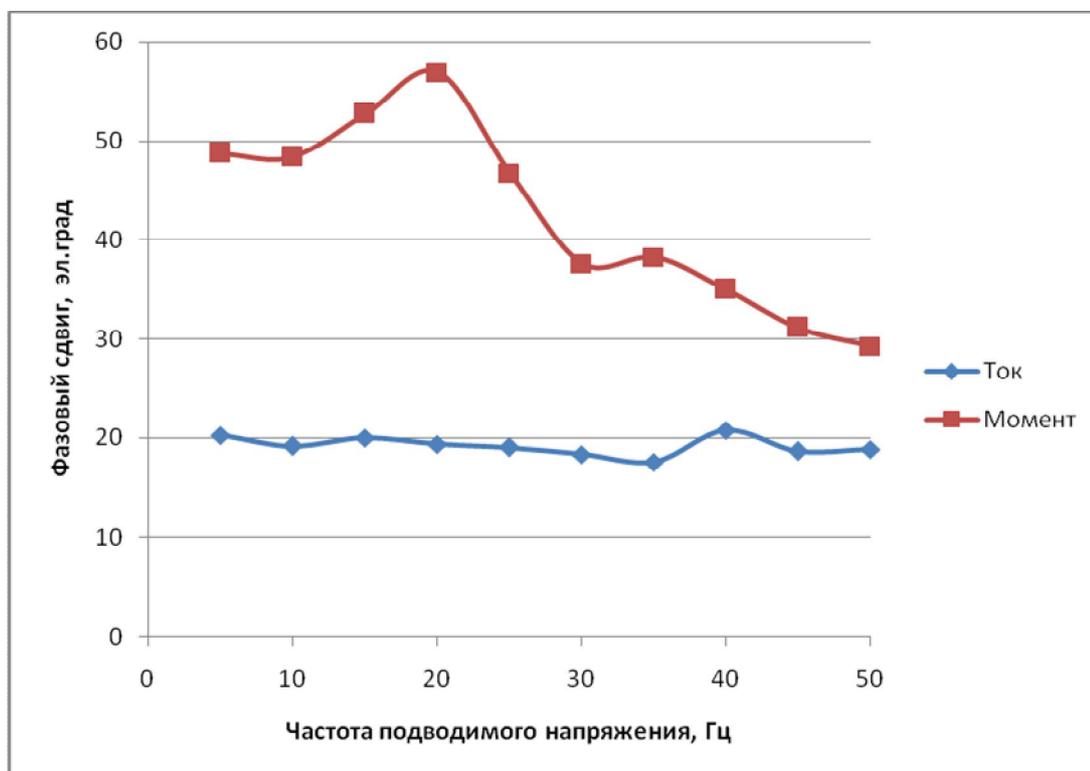


Рис. 24. Фазовые сдвиги при 0,5 Гц

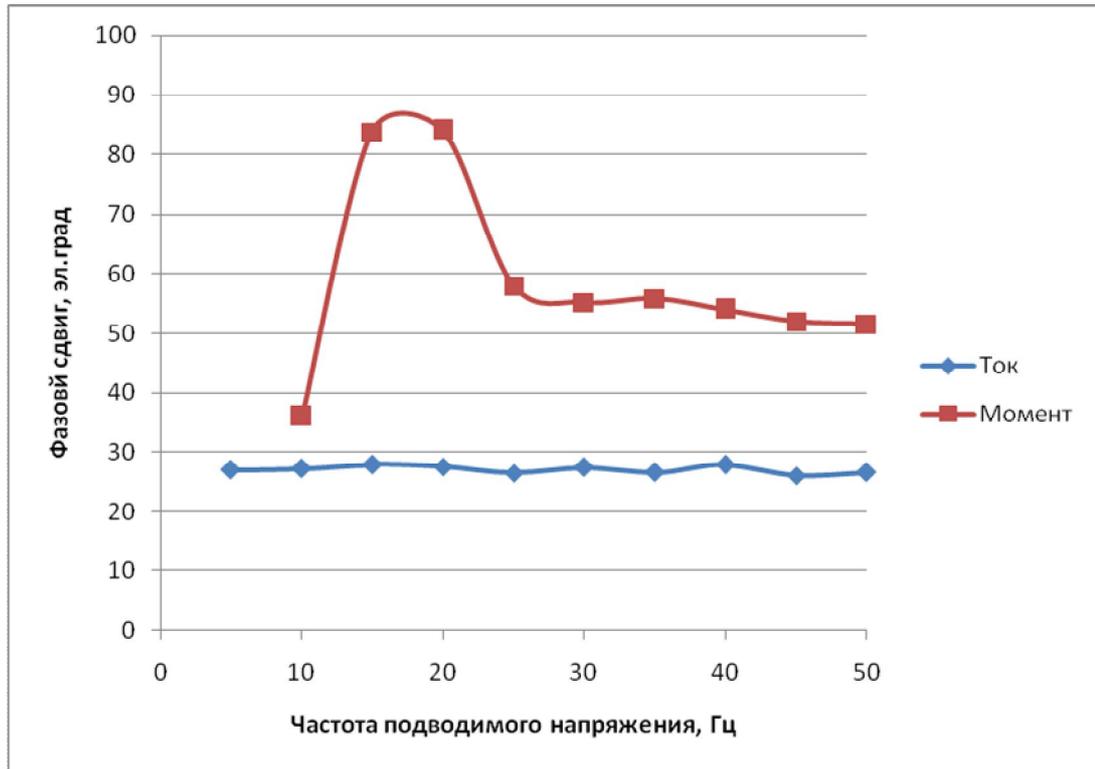


Рис. 25. Фазовые сдвиги при 1 Гц

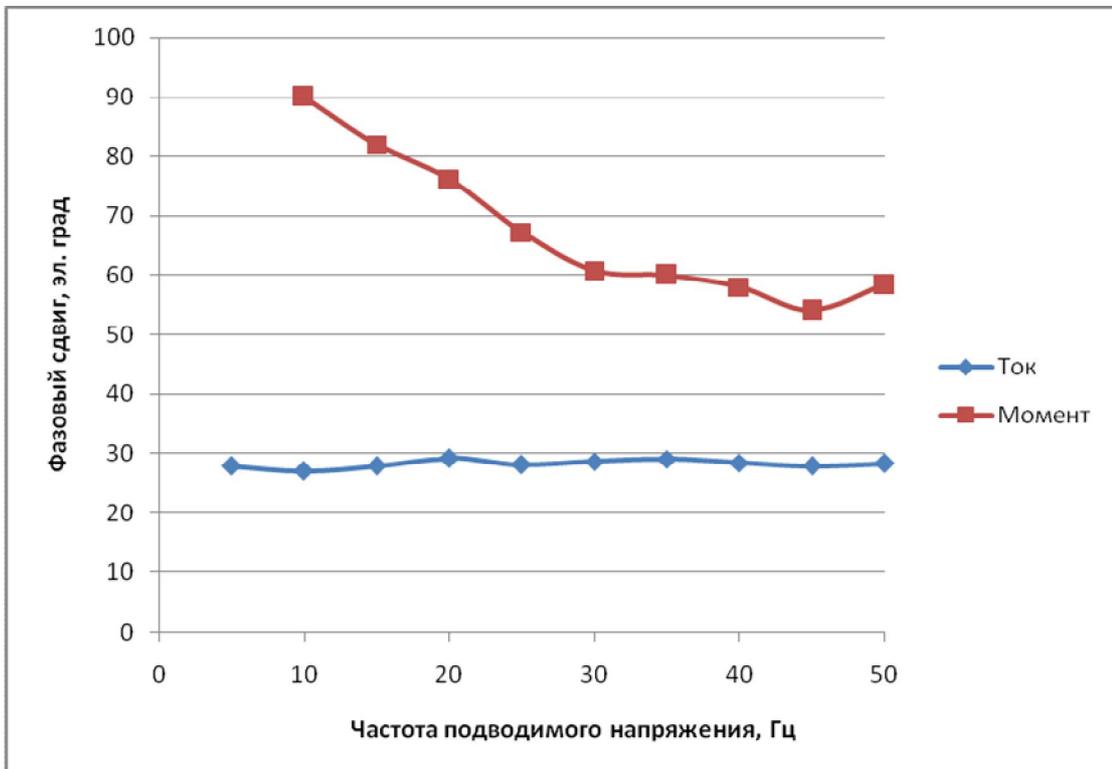


Рис. 26. Фазовые сдвиги при 1,5 Гц

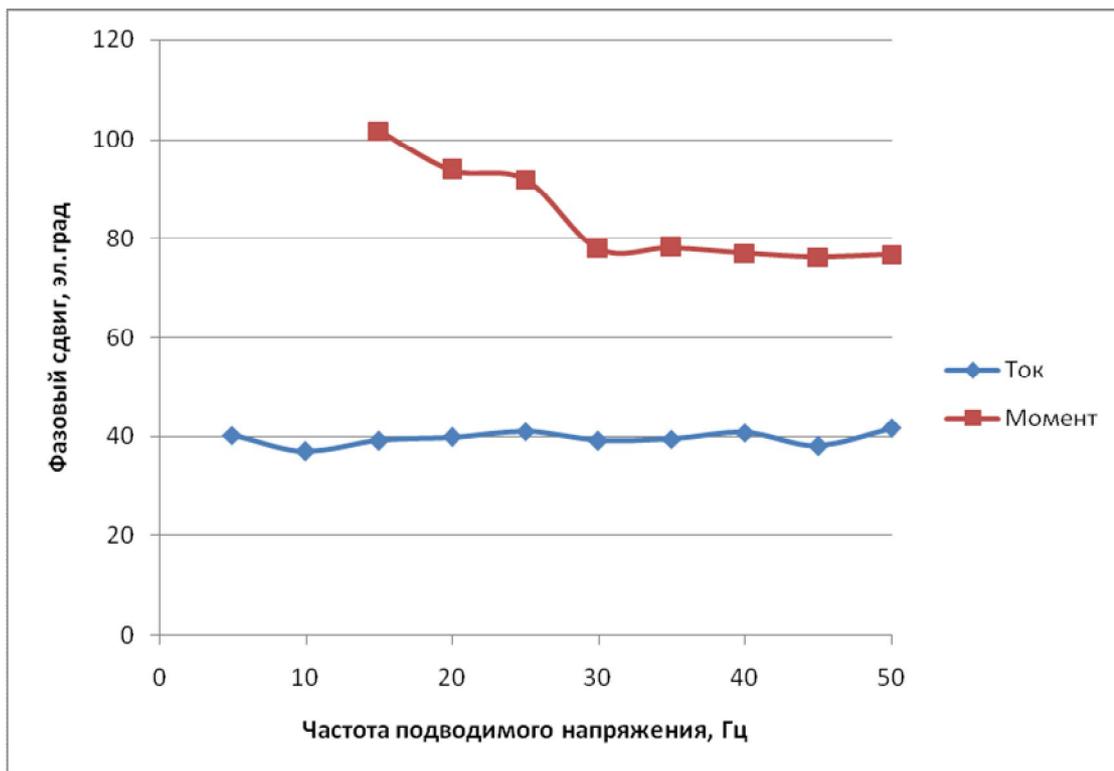


Рис. 27. Фазовые сдвиги при 2 Гц

Запаздывание момента сопротивления зависит как от частоты вращения вала, так и от частоты формируемого момента. Так, с увеличением скорости вращения вала происходит уменьшение запаздывания, что связано с величиной формируемой ЭДС при работе НМ.

2.1.3. Ступенчатое воздействие

Для оценки возможности быстрого действия регулирования при реализации задания программируемой нагрузки с персонального компьютера, были проведены испытания стенда на ступенчатое входное воздействие.

На рис. 28 представлен график электромагнитного момента оцененный ПЧ, на рис. 29 результаты измерения момента, полученные с помощью разработанной измерительной системы. Несмотря на пульсации момента (рис. 29), вызванные погрешностями механической подсистемы, его среднее значение соответствует оценке ПЧ. Это позволяет говорить об адекватности косвенного измерения момента с помощью тензодатчиков.

Анализируя данные переходные характеристики невозможно судить о быстродействии самой НМ, поскольку на характер переходного процесса влияет также преобразователь частоты, управляющий испытуемым АД. Поэтому в данном случае график показывает быстродействие стенда в целом. Поскольку нагрузка горных машин носит изменяющийся случайным образом характер с частотой изменения в пределах не выше 10÷15 Гц, полученное быстродействие стенда можно считать удовлетворительным.

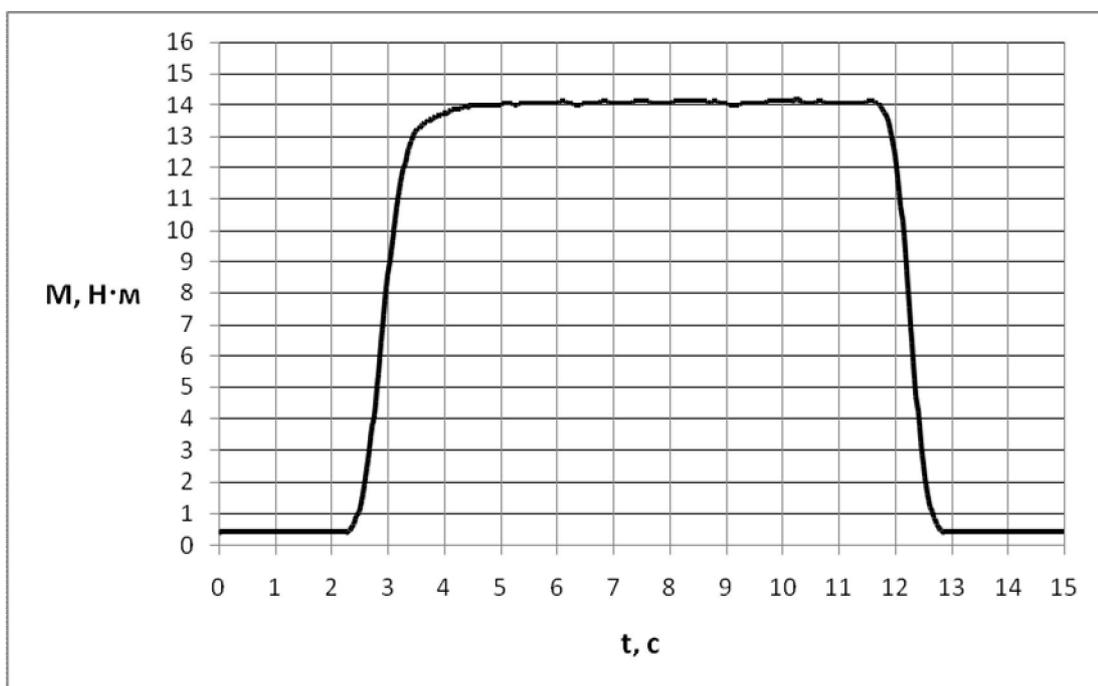


Рис. 28. Реакция на ступенчатое воздействие

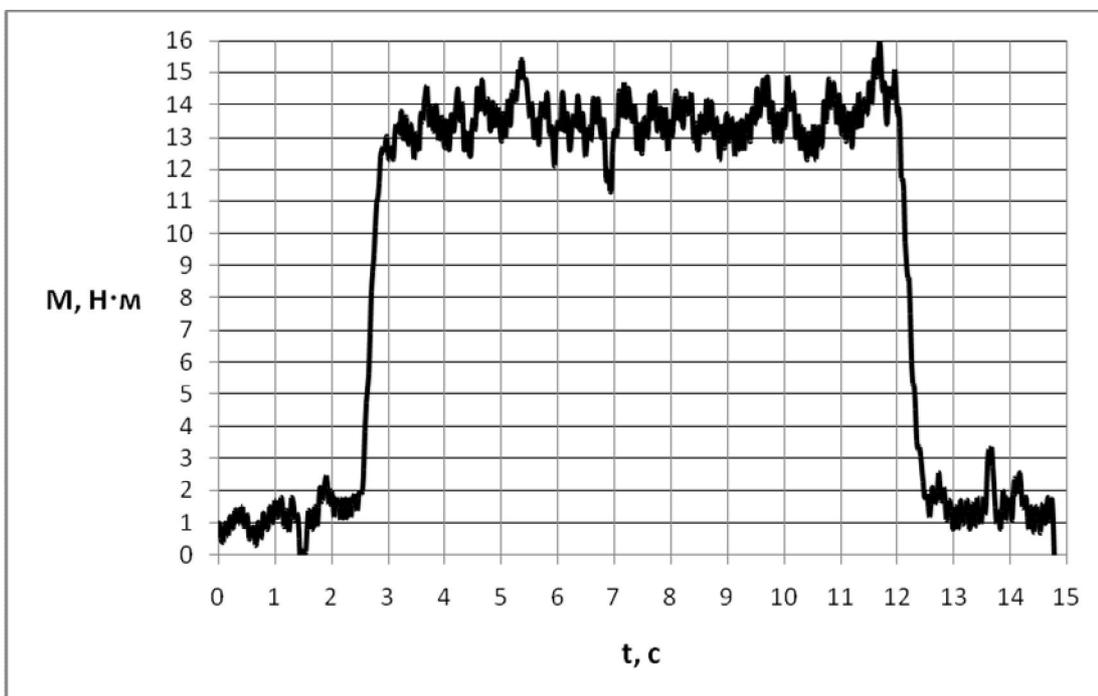


Рис. 29. Реакция на ступенчатое воздействие

2.2. Сопоставление фактически полученных данных с результатами вычислительных экспериментов

В ходе проведения испытания было получено достаточное количество экспериментальных данных, характеризующих работу электропривода горной машины. Типичные данные, полученные экспериментально при варьировании нагрузки, показаны на рис. 30 и рис 31, где ω_1 – угловая скорость двигателя, ω_2 – угловая скорость эквивалентного исполнительного органа.

Следует отметить высокую зашумленность электромагнитного момента двигателя M , которая объясняется погрешностями механической подсистемы. Несмотря на наличие высокочастотных шумов в ходе работ удалось провести адекватное сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования, для чего измеренная информация об электромагнитном моменте подвергалась фильтрации с использованием цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой. Текст программы для реализации данных фильтров, написанной в среде программирования Delphi, представлен в приложении Г.

Результаты компьютерного моделирования с параметрами, соответствующими экспериментальной установке приведены на рис.32. Среднее рассогласование результатов моделирования, где в качестве нагрузки в программу загружается отфильтрованное измеренное значение момента сопротивления, с экспериментальными данными не превышает 8 %.

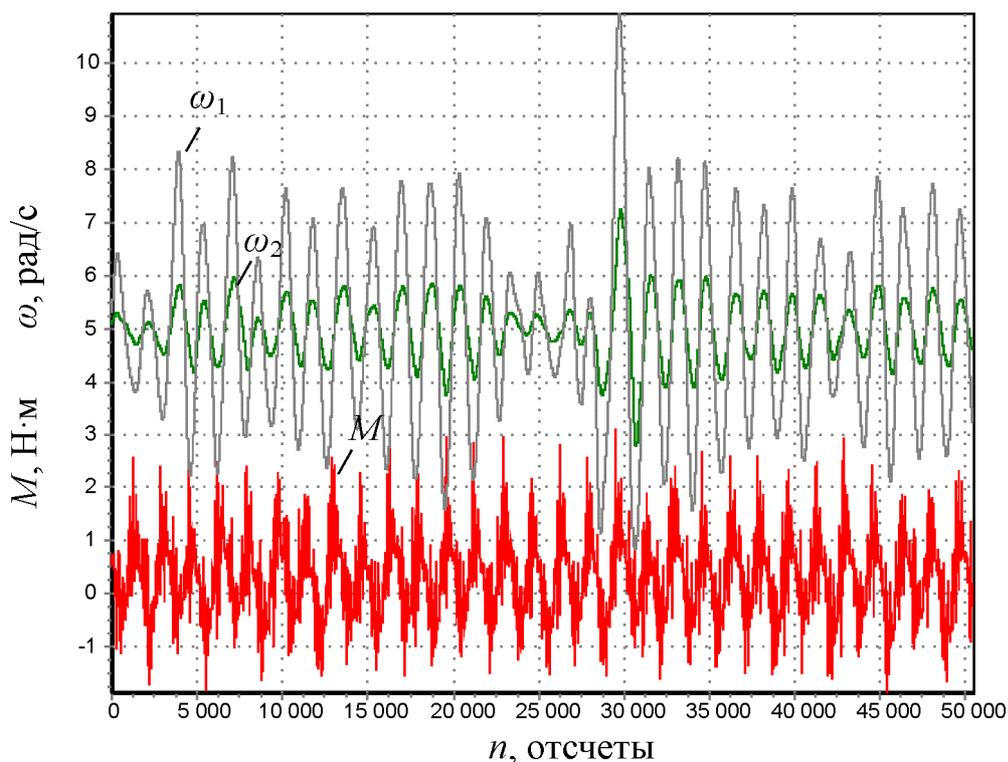


Рис. 30. Экспериментальные данные

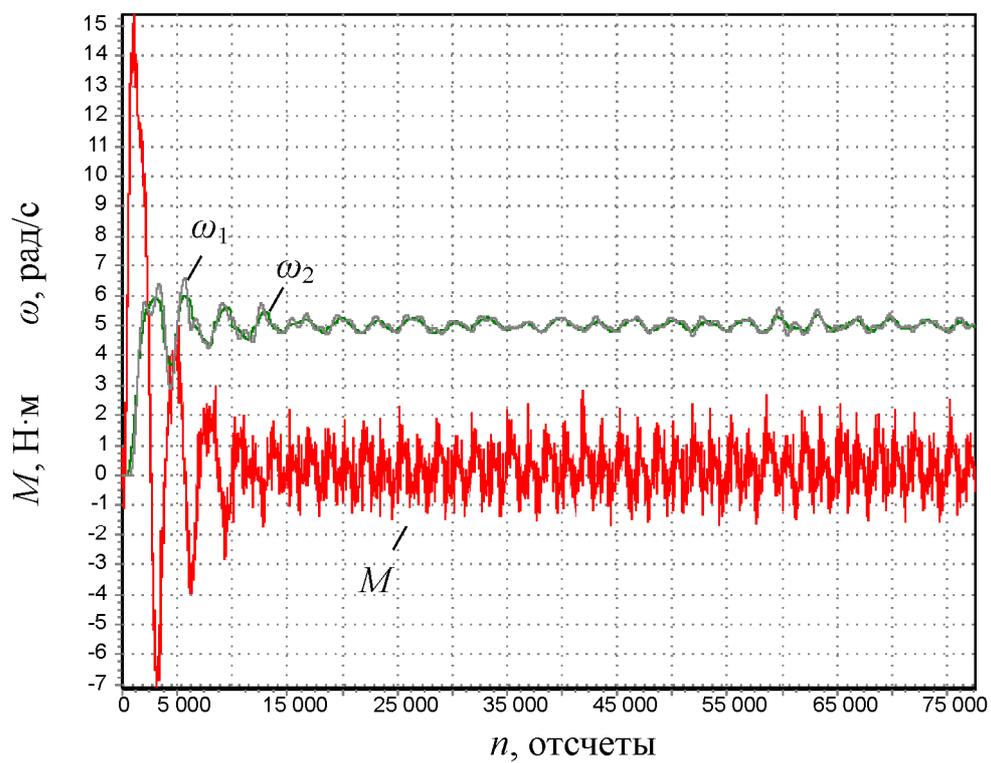


Рис. 31. Экспериментальные данные

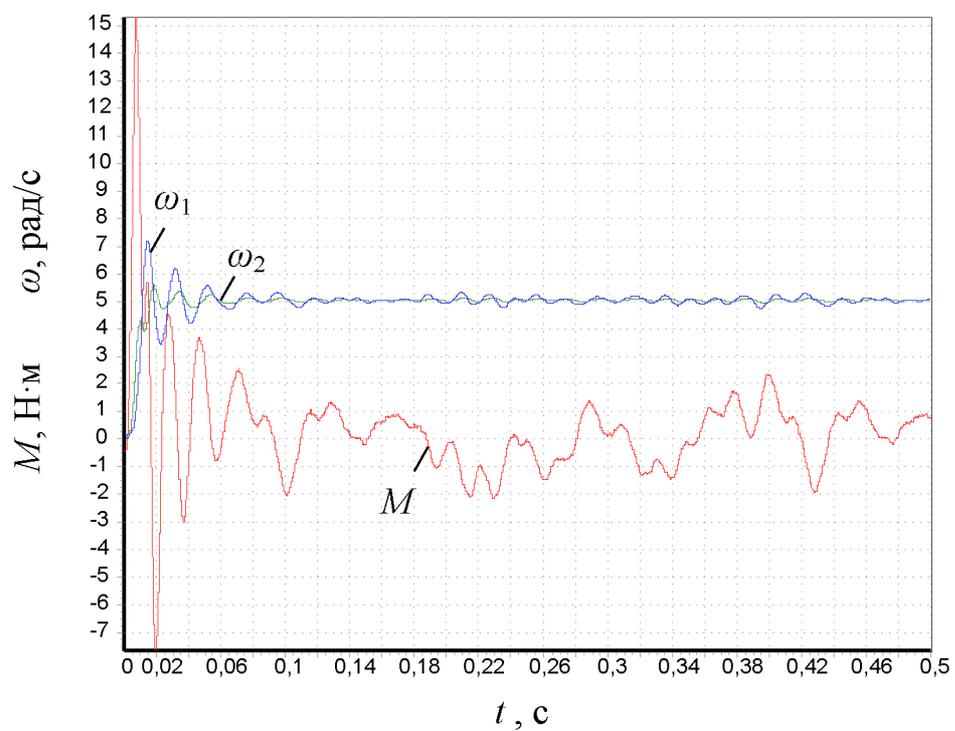


Рис. 32. Результаты моделирования

Таким образом, данные, полученные в ходе натурных испытаний, подтверждают адекватность использованных математической и компьютерной модели, а, следовательно, сама модель может эффективно использоваться для оценки энергоэффективности систем управления электроприводов горных машин.

Заключение

Научно-технический отчет представляет собой описание процесса создания стенда имитирующего работу электроприводов горных машин. Предложенная техническая реализация имеет ряд отличительных особенностей:

- возможность формирования активной нагрузки путем работы нагрузочной МПТ в режиме противовключения;
- схема измерения момента, позволяющая отказаться от дорогостоящих датчиков момента;
- возможность задания программируемой нагрузки;
- гибкая модульная конструкция системы;
- легкость подключения к ПК и использования системы.

В ходе работы были предложены решения для измерения момента, разработан тензоусилитель, усилитель мощности для управления тормозом от микроконтроллера. По результатам испытаний можно сказать, что разработанная измерительная система работоспособна и отвечает предъявляемым к ней требованиям.

Полученный стенд позволил провести оценку адекватности результатов моделирования, полученных с использованием математической модели, комплексно описывающей основные аспекты, влияющие на потери энергии в процессе функционирования электропривода горной машины в динамических режимах. Испытания показали, что даже с учетом переменной нагрузки и фильтрации измерительной информации, погрешность модели составляет единицы процентов, что позволяет использовать разработанную модель для оценки энергосбережения и ресурсосбережения в электроприводах горных машин, работающих в высокودинамичных режимах, за счет внедрения энергооптимальных систем управления.

Список использованных источников

1. Кочубиевский И.Д. Системы нагружения для исследования испытаний машин и механизмов – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
2. Хватов С.В. Асинхронно-вентильные нагружающие устройства / С.В. Хватов, В.Г. Титов, А.А. Поскробко, В.Ф. Цыпкайкин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
3. Шпак Ю.А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. – К.: “МК-Пресс”, 2006. – 400 с.
4. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. – М.: “Додэка – XXI”, 2007. – 592 с.
5. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR – микроконтроллеров. – К.: “МК-Пресс”, 2006. – 208 с.
6. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
7. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
8. Ещин Е.К. Моделирование систем управления электромеханическими объектами – Кемерово: КузГТУ, 2001. - 146 с.
9. Дьяконов В.П. Matlab 6 – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
10. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 247с.
11. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
12. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
13. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с.

Приложение А

Листинг программного кода для управления нагружающей машиной постоянного тока

```
#include <avr/io.h>

#include <avr/iom168.h>

#include <util/delay.h>

#include <stdio.h>

unsigned char i;

#define X_TAL 16000000

int main (void)

{
  DDRB = 0b11000000;
  DDRC = 0b01011110;
  DDRD = 0b11111111;
  PORTB = 0b00111111;
  PORTC = 0b00100000;
  ADMUX = 0b01100000;
  ADCSRA = 0b11101110;/
  ADCSRB = 0b00000000;/
  TIMSK0 = 0x00;
  TCNT0=0x00;
  OCROA = 0x00;
  OCROB = 0x00;
  i == 0;

  while (1)
  {
    if ((PINB & 0x1) == 0)
    {
      _delay_ms(40);
      PORTC = 0x4;
    }
    else
```

```

{
PORTC = 0x8;

if ((PINB & 0x2) == 0)
{
_delay_ms(40);
while (ADCH < 0x266)
{
OCR0A = 0x7f;

TCCR0A=(1<<COM0A1)|(0<<COM0A0)|(0<<COM0B1)|(0<<COM0B0)|(0<<WGM0
1)|(0<<WGM00);
TCCR0B=(0<<WGM02)|(1<<CS00)|(1<<CS01)|(0<<CS02);
}
}

if ((PINB & 0x4) == 0)
{
_delay_ms(40);
while (ADCH < 0x266)
{
while (ADCH < 0xC8)
{
OCR0A = 0xff;

TCCR0A=(1<<COM0A1)|(0<<COM0A0)|(0<<COM0B1)|(0<<COM0B0)|(0<<WGM0
1)|(0<<WGM00);
TCCR0B=(0<<WGM02)|(1<<CS00)|(1<<CS01)|(0<<CS02);
}
i++;
OCR0A == i;

TCCR0A=(1<<COM0A1)|(0<<COM0A0)|(0<<COM0B1)|(0<<COM0B0)|(0<<WGM0
1)|(0<<WGM00);
TCCR0B=(0<<WGM02)|(1<<CS00)|(1<<CS01)|(0<<CS02);
}
}

if ((PINB & 0x8) == 0)
{
_delay_ms(40);
while (ADCH < 0x266)

```

```

{
    i == i*i+1;
    OCR0A == i;

TCCR0A=(1<<COM0A1)|(0<<COM0A0)|(0<<COM0B1)|(0<<COM0B0)|(0<<WGM0
1)|(0<<WGM00);
TCCR0B=(0<<WGM02)|(1<<CS00)|(1<<CS01)|(0<<CS02);
    }
}

if ((PINB & 0x10) == 0)
{
    _delay_ms(40);
    OCR0B = 0xff;

TCCR0A=(0<<COM0A1)|(0<<COM0A0)|(1<<COM0B1)|(0<<COM0B0)|(0<<WGM0
1)|(0<<WGM00);
TCCR0B=(0<<WGM02)|(1<<CS00)|(1<<CS01)|(0<<CS02);
}

}
return 0;
}

```

Приложение Б

Листинг программного кода для проведения динамических испытаний стенда

```
#include <MsTimer2.h>

int mySIN[20]={128,167,202,231,249,255,249,231,202,167,
128,88,53,24,6,0,6,24,53,88};
int i,ii,Output;
boolean flag,fl;

void A() //обработка прерывания A
{
if (i<999) i++; else i=0;
if (i%20==0)
{

if (digitalRead(5)==0)
{Output=0 ; analogWrite(6,Output);}
else {Output=mySIN[15]; analogWrite(6,Output); };
if (ii<19) ii+=1; else ii=0;
}

if (i%3==0) if (digitalRead(0) != 0)
{
Serial.print(Output, DEC); Serial.print('\t');
Serial.print(analogRead(0), DEC); Serial.print('\t');
Serial.println(analogRead(4), DEC);
} else Serial.println();
}

void setup()
{

// initialize serial communications at 115200 bps:

Serial.begin(115200);
MsTimer2::set(5, prer); // 5ms прерывание
MsTimer2::start(); //включить таймер
pinMode(0, INPUT); digitalWrite(0, HIGH); // инициализация кнопок
pinMode(5, INPUT); digitalWrite(5, HIGH);
```

```
    analogWrite(7,0); pinMode(2, INPUT);  
  }  
  
void loop()  
{  
  // все действия выполняются в прерываниях  
}
```

Приложение В

Листинг программного кода для проведения статических испытаний стенда

```
/* Counter impulse from sensor-damage.

TMR1 - impulse counter, TMR2 - time counter;
PORTB.2 - busy led;
PORTD.2 - start button;
*/

#include "avr/interrupt.h"

int TimeCnt;          // Time (s)
int TimeWR;          // Count write-cycle
unsigned long Cnt;    // Total number impuls
unsigned long OldCnt; // Old Total number impuls
unsigned int oldVal;  // Temp variable
unsigned int buf;     // Temp variable
int Output;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // Set up pin
  DDRB |= _BV(5); // PORTB.2 - output
  DDRD &= ~_BV(5); // T1 - input
  PORTD &= ~_BV(5); // pull-up off

  DDRD &= ~_BV(2); // PORTD.2 - input
  PORTD |= _BV(2); // pull-up on
  EIMSK |= _BV(0); // interrupt INT0 enable

  pinMode(4, INPUT); digitalWrite(4, HIGH);
  pinMode(0, INPUT); digitalWrite(0, HIGH);

  // Set up TMR2

  TCCR2B |= _BV(CS22) | _BV(CS21) | _BV(CS20);
  TIMSK2 |= _BV(TOIE2); // interrupt T2 enable
  TCNT2 = 0;
```

```

// Set up TMR1

TCCR1C &= 0x00;
TCCR1B |= 0x06;    // T1 counter enable
TCCR1A &= 0x00;
TIMSK1 &= 0x00;
TCNT1L &= 0x00;
TCNT1H &= 0x00;

// Init variable

TimeWR = 0;
TimeCnt = 0;
Cnt = 0;
OldCnt = 0;
buf = 0;
oldVal = 0;

sei();
}

ISR(TIMER2_OVF_vect) {

// This ISR is called when TIMER2 overflows

cli();
TimeWR++;

buf = (int)TCNT1L + (int)TCNT1H*256;
if (buf < oldVal) {
    Cnt += (65536 - oldVal) + buf;
}
else {
    Cnt += buf - oldVal;
}
oldVal = buf;
if (TimeWR >=5){
    TimeCnt++;
if (digitalRead(4)==0){Output=150; analogWrite(6,Output);}
else {Output=0; analogWrite(6,Output);}
}
}

```

```
if (digitalRead(0) != 0)
{
  Serial.print(Output, DEC); Serial.print('\t');
  Serial.print(analogRead(0), DEC); Serial.print('\t');

  Serial.print((Cnt - OldCnt), DEC); Serial.print("\t");

  Serial.println(analogRead(4), DEC);
} else Serial.println();
OldCnt = Cnt;
TimeWR = 0;

sei();
}
}

void loop()
{
}
```

Приложение Г

Листинг программного кода для реализации цифровой фильтрации

```
unit Unit1;

interface

uses
  Math, Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, TeEngine, Series, StdCtrls, ComCtrls, TeeProcs, Chart, ExtCtrls,
  Menus, Mask, XPMan, Buttons, ActnList;

  Function FilterD(Default: Array of extended): Extended;
  Procedure FormWindow;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Panel1: TPanel;
    Button1: TButton;
    Edit1: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Edit2: TEdit;
    Label2: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Edit5: TEdit;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Edit6: TEdit;
    Edit7: TEdit;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Edit9: TEdit;
    Label10: TLabel;
    Edit8: TEdit;
    Edit11: TEdit;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
    Label14: TLabel;
    Label15: TLabel;
    Label16: TLabel;
```

EditRs: TEdit;
EditRr: TEdit;
EditL1: TEdit;
EditL2: TEdit;
EditLm: TEdit;
EditP: TEdit;
CheckBox1: TCheckBox;
ProgressBar1: TProgressBar;
PageControl1: TPageControl;
TabSheet1: TTabSheet;
TabSheet2: TTabSheet;
TabSheet3: TTabSheet;
PopupMenu1: TPopupMenu;
N1: TMenuItem;
OpenDialog1: TOpenDialog;
Button2: TButton;
Edit10: TEdit;
Label3: TLabel;
Chart1: TChart;
Series1: TFastLineSeries;
Series2: TFastLineSeries;
Series3: TFastLineSeries;
Series4: TFastLineSeries;
Chart2: TChart;
Series5: TFastLineSeries;
Series6: TFastLineSeries;
Series7: TFastLineSeries;
Button3: TButton;
Edit3: TEdit;
Label4: TLabel;
Edit4: TEdit;
Label17: TLabel;
Edit12: TEdit;
Label18: TLabel;
Series8: TFastLineSeries;
Series9: TFastLineSeries;
Series10: TFastLineSeries;
Series11: TFastLineSeries;
Chart3: TChart;
Series12: TFastLineSeries;
Series13: TFastLineSeries;
Series14: TFastLineSeries;

```

Series15: TFastLineSeries;
Series16: TFastLineSeries;
Series17: TFastLineSeries;
Series18: TFastLineSeries;
Series19: TFastLineSeries;
PopupMenu2: TPopupMenu;
N2: TMenuItem;
PopupMenu3: TPopupMenu;
N3: TMenuItem;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure N1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure N2Click(Sender: TObject);
procedure N3Click(Sender: TObject);

private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Load, Swing : extended;           //Резкопеременная нагрузка
    Mc          : array of extended;
    W1,W2,Torque : array of extended; //Экспериментальные данные

    Window,
    M_W1, M_W2, M_M12,                //Фильтрация
    E_W1, E_W2, E_M12,
    dW1_e, dW2_e, dM12_e,
    eW2_e, eM12_e, eMc_e : Array of Extended;
    dW1_m, dW2_m, dM12_m,
    eW2_m, eM12_m, eMc_m : Extended;

    WaitPeriod : Extended;
    Nd          : Integer;
    LoadFile   : boolean = false;

implementation

{$R *.dfm}

```

```
Function FilterD(Default: Array of extended): Extended;
```

```
Var
```

```
  i: Integer;
```

```
  Temp: Extended;
```

```
Begin
```

```
Temp:=0;
```

```
  For i:=0 to Nd do Begin
```

```
    Temp:=Temp + Window[i] * Default[i];
```

```
  End;
```

```
Result:= Temp;
```

```
End;
```

```
Procedure FormWindow;
```

```
Var i, k: Integer;
```

```
  Fc, Fdes: Extended;
```

```
Begin
```

```
Fdes:=strtofloat(form1.edit12.Text);
```

```
Fc:=WaitPeriod * Fdes; {Частота среза с поправкой на  
неединичную частоту дискретизации}
```

```
For i:=0 to Nd do Window[i]:=0;
```

```
For i:=0 to Nd do Begin
```

```
  k:=(Nd div 2) + i;
```

```
  If k = 0 Then Window[i]:=0
```

```
    Else Window[i]:=(1/WaitPeriod){Коэффициент вызванный неединичной  
частотой дискретизации}
```

```
      * (2 * Sqr(Pi) * Fc * k * Cos(2 * Pi * Fc * k)
```

```
      - Pi * sin(2 * Pi * Fc * k)) / Sqr(Pi * k)
```

```
      * (0.54 + (1 - 0.54) * Cos( 2* Pi * k / Nd));
```

```
End;
```

```
End;
```

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
```

```
var i,j,delay : integer;
```

```
  tzap : extended;
```

```
  txt : textfile;
```

```
  TempTxt : array of string;
```

```
begin
```

```

// Чтение параметров с формы
Load:=strtofloat(edit1.text);
Swing:=strtofloat(edit9.Text);

tk:=strtofloat(edit2.Text);
Tzap:=strtofloat(edit11.Text);
Nd:=strtoint(edit4.Text);

// Начальные условия
delay:=0;

N:=6;
h:=0.00001; hz:=h;

// Резкопеременная нагрузка
If CheckBox1.Checked Then
begin
assignfile(txt,'D:\Works \rnd.txt');
reset(txt);
i:=0;

setlength(Mc,0);
setlength(Mc,32768);

setlength(TempTxt,0);
setlength(TempTxt,32768);

while not EOF(txt) do
begin
readln(txt,TempTxt[i]);
Mc[i]:=strtofloat(TempTxt[i]) * Swing + Load;
inc(i);
end;
closefile(txt);
end Else Begin

setlength(Mc,0);
setlength(Mc,32768);

For i:=0 to 32768 do Mc[i]:=Load;
End;

```

```

// Определяем размеры массивов для фильтрации
setlength(Window,Nd+1);
setlength(M_W1,Nd+1);
setlength(M_W2,Nd+1);
setlength(M_M12,Nd+1);

for i:=0 to Nd do begin
    M_W1[i]:=0; M_M12[i]:=0; M_W2[i]:=0;
end;

// Формируем окно КИХ-фильтра для фильтрации
WaitPeriod:=Tzap;

FormWindow;

// Расчет фильтрации с задержкой
If delay * h >= Tzap then
    Begin

// Формирование массивов переменных на предыдущих шагах расчета для
// фильтрации
    i:=Nd-1;
    While i >= 0 do Begin
        M_W1[i+1]:=M_W1[i];
        M_M12[i+1]:=M_M12[i];
        M_W2[i+1]:=M_W2[i];
        Dec(i);
    End;

    M_W1[0]:=y[4];// + 1*sin(500*t); sin(20*t);//
    M_M12[0]:=eM12_m;
    M_W2[0]:=eW2_m;

// Собственно фильтрация
    dW1_m:=FilterD(M_W1);
    eM12_m:=M - J1 * dW1_m;

    dM12_m:=FilterD(M_M12);
    eW2_m:=y[4] - (1/C12) * dM12_m;

    dW2_m:=FilterD(M_W2);
    eMc_m:=eM12_m - J2 * dW2_m;

```

```

    delay:=0;
    End;
    delay:=delay + 1;

// Прореживание массива нагрузки
    If j >= (1/h/32769/87) then {Последнее число - кратность считывания массива}
    Begin
        g:=g+1;
        j:=0;
        End;
        j:=j+1;

// Вывод на экран результатов моделирования
    Chart1.series[0].AddXY(t,Mc[g and 32767]);

    END;
end;

procedure TForm1.N1Click(Sender: TObject);
begin
chart1.SaveToMetafile('D:\Works\edit10.Text+'.wmf');
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
Var i,j, nFiles, Position : integer;
    Strings : TStrings ;
    FileNames : string;

BEGIN
// Начинаем работу с OpenFileDialog
OpenDialog1.Execute;

// Определяем число открываемых файлов
If OpenDialog1.Files.count < 3 Then
    ShowMessage('Вы открыли не все файлы. Попробуйте еще раз.')
    Else Begin

nFiles := OpenDialog1.Files.count - 1;
Position:=0;

```

```

For i := 0 to nFiles do Begin
  FileNames:= OpenFileDialog1.Files.Strings[i];//Считываем по очереди
  //полные имена выбранных файлов

// Создаем динамический строковый массив и пишем в него файл с текущим
именем
  Strings:= TStringList.Create;
  Strings.LoadFromFile(FileNames);

// Определяем какой переменной соответствует записываемый файл
  While(pos('\',FileNames) > 0) do delete (FileNames,1,pos('\',FileNames));

// Задаем размер динамических массивов данных
// Пишем нужный динамический массив
  If (FileNames = 'M.txt') or (FileNames = 'm.txt') Then Begin
    SetLength(Torque, Strings.Count);
    For j := 0 to (Strings.Count-1) do Begin
      Torque[j]:= StrToFloat(Strings.Strings[j]);

      ProgressBar1.Position:=Position + Round(j/(Strings.Count-1)/3*100);
    End;

    Position:=ProgressBar1.Position;

  End Else If (FileNames = 'W1.txt') or (FileNames = 'w1.txt') Then Begin
    SetLength(W1, Strings.Count);
    For j := 0 to (Strings.Count-1) do Begin
      W1[j]:= StrToFloat(Strings.Strings[j]);

      ProgressBar1.Position:=Position + Round(j/(Strings.Count-1)/3*100);
    End;

    Position:=ProgressBar1.Position;

  End Else If (FileNames = 'W2.txt') or (FileNames = 'w2.txt') Then Begin
    SetLength(W2, Strings.Count);
    For j := 0 to (Strings.Count-1) do Begin
      W2[j]:= StrToFloat(Strings.Strings[j]);

      ProgressBar1.Position:=Position + Round(j/(Strings.Count-1)/3*100);
    End;

```

```
End Else
    ShowMessage('Какие-то не те вы файлы открываете! Попробуйте еще
раз.');
```

// Закрываем динамический строковый массив

```
Strings.Free;
End;
End;
```

// Рисуем графики

```
For j := 0 to 2 do Chart2.series[j].Clear;

    For j := 0 to High(Torque) do Chart2.series[0].AddXY(j,Torque[j]);
    For j := 0 to High(W1) do Chart2.series[1].AddXY(j,W1[j]);
    For j := 0 to High(W2) do Chart2.series[2].AddXY(j,W2[j]);

// Индикатор загрузки файлов
LoadFile:=True;

end.
```