

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА»**

На правах рукописи

УДК 681.521

Сацюк Александр Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПРЕССОРНОЙ
УСТАНОВКИ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
Чепцов М.Н.

Идентичность всех экземпляров
ПОДТВЕРЖДАЮ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
канд.тех.наук

Т.В. Завадская

Донецк – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ РАБОТЫ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ.....	13
1.1. Анализ систем автоматизаций сортировочных процессов по критерию минимизации энергозатрат.....	13
1.2. Анализ методов регулирования производительностью компрессорных установок на сортировочной горке.....	21
1.3. Анализ существующих методов управления приводными двигателями.....	27
1.4. Выводы по разделу 1.....	33
РАЗДЕЛ 2 МНОГОФАКТОРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ НА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ	35
2.1. Анализ зависимости электропотребления компрессорной установки от количества обработанных вагонов на сортировочной горке.....	35
2.2. Разработка динамической модели затрат энергии на отпуск поезда.....	42
2.3. Анализ влияния воздушных масс на скатывающийся отцеп.....	52
2.3.1 Зависимость угла сноса и результирующей скорости от путевой скорости.....	56
2.3.2 Зависимость угла сноса и результирующей скорости от скорости ветра.....	57
2.3.3 Зависимость угла сноса и результирующей скорости от угла ветра.....	58
2.3.4 Влияние угла съезда и воздушных масс на отцеп по маршруту движения.....	60
2.3.5 Модель влияния воздушных масс на отцеп с заданными весогабаритными параметрами и типом.....	63
2.4 Выводы по разделу 2	67

РАЗДЕЛ 3 СИНТЕЗ МОДЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ НА СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКЕ.....	68
3.1. Функциональная модель затрат электроэнергии на роспуск поездов.....	68
3.2. Разработка структурной схемы системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки	73
3.3. Синтез динамической модели системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки	75
3.4. Разработка алгоритма формирования прогнозного показателя производительности компрессорной установки.....	86
3.5. Разработка компьютерной имитационной модели системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки.....	91
3.5.1 Модель управления приводным двигателем.....	92
3.5.2 Разработка виртуальной модели управления приводным двигателем.....	99
3.5.3 Анализ основных показателей виртуальной модели управления приводным двигателем.....	102
3.5.4 Выбор оптимальных пусковых показателей виртуальной модели управления приводным двигателем.....	107
3.6 Выводы по разделу 3	110
РАЗДЕЛ 4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ.....	111
4.1 Разработка структуры технических средств системы управления производительности компрессорной установки	111
4.2 Экономический подход к внедрению технических средств системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки.....	114

4.3. Выводы по разделу 4.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
Приложения А. Статистические данные для регрессионного анализа влияния весогабаритных параметров вагонов на затраты электроэнергии	137
Приложение Б. Принципиальная схема микропроцессорной части системы управления приводным двигателем компрессорной установки	138
Приложение В. Принципиальная схема силовой части системы управления приводным двигателем компрессорной установки.....	139
Приложение Г. Листинг программы SemiSel: результаты расчета тепловых режимов для трехфазного инвертора на базе модулей skm450gb12e4.....	140
Приложение Д. Листинг программы SemiSel: результаты расчета тепловых режимов для выпрямительного каскада на базе модулей skkd380.....	144
Приложение Е. Осциллограммы выходного управляющего сигнала инвертора.....	146
Приложение Ж. Исходный код программы на языке ассемблер для микропроцессорного контроллера.....	148
Приложение И. Разработка принципиальных решений в технической реализации системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки.....	168
Приложение К. Копии документов о внедрении результатов исследований.....	201

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Каждый сегмент транспортной отрасли имеет свои особенности, связанные с природно-географическими характеристиками, технологическими процессами, а также особенностями адаптации к новым, современным требованиям и условиям транспортировки пассажиров и груза. Ярким примером такого сегмента является железнодорожный транспорт. В современных условиях эффективность железнодорожного транспорта, является прерогативой на государственном уровне и обретает новое более качественное наполнение необходимых технических и технологических характеристик.

Инфраструктура железнодорожного транспорта состоит из обособленных структурных подразделений в комплексе создающих синергетический эффект. Одним из ее подразделений является сортировочная станция (СС). Деятельность сортировочной станции невозможно переоценить, так как она является одним из ключевых звеньев в перевозочном процессе.

Эффективность сортировочных станций на предприятиях железных дорог невозможна без внедрения нового оборудования и современных технологий автоматизации. В современных условиях постоянного роста стоимости энергоресурсов и требований к надежности системы, вопросы, связанные с повышением качества технологических работ на сортировочных станциях, приобретают все большее значение.

В данных условиях стоит выделить компрессорную установку (КУ), которая потребляет более 70% электроэнергии отводимой на сортировочную станцию.

Своевременная адаптация и внедрение современных подходов системы автоматического регулирования производительности КУ позволит добиться экономичности и безотказности работы агрегатов, повышая качество перевозочного процесса.

Одним из эффективных путей повышения производительности процесса регулирования агрегатов компрессорных установок является совершенствование средств автоматического управления.

В связи с этим, модернизация структуры и параметров системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки является **актуальной научно-технической задачей** имеющей отраслевое значения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами регулирования производительности компрессорных установок на сортировочной горке посвящены работы отечественных и зарубежных ученых.

Вопросами разработки энергосберегающих методов управления компрессорными станциями занимались такие ученые, как Николаев В.Г., Илюшенко В.В., Туркин М.А., Богданов А.А., Башлыков А.М., Корчагина В.А., Шептухин В.В., Паршин А.Н., Нгуен К.Ч., Соломатин А. А., Одиладзе В.Р. и др.

Современные отечественные ученые в своих работах достаточно широко рассмотрели вопросы снижения энергозатрат КУ с применением современных методов автоматического управления на сортировочных горках. Среди этих методов можно отметить: дросселирование, подключение дополнительного надпоршневого объема, остановка двигателя, частотное управление. Отечественными учеными метод частотного управления рассматривается с целью улучшения пусковых характеристик двигателей, при этом регулировка производительности осуществляется по алгоритму пуск/останов машины.

Зарубежные ученые отдают предпочтение частотному методу управления производительности компрессоров. Однако основным показателем, задающим производительность КУ, являются данные технических параметров узлов системы (давления, температуры, напряжения). При этом, технологические особенности на станции не учитываются.

Несмотря на значительный вклад ученых и практиков, работающих по направлению повышения эффективности систем автоматического управления КУ, вопрос регулирования производительности компрессоров с учетом

технологических процессов и погодных условий на станции требует дальнейших исследований.

Цель и задачи исследований. Цель работы – разработать структуру и обосновать параметры системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки, позволяющей понизить энергозатраты на станции и повысить безотказность приводных двигателей.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Определить факторы, влияющие на энергетические показатели компрессорной установки и разработать математическую модель энергозатрат учитывающую параметры технологического процесса и погодных условий на сортировочной станции.

2. Разработать функциональную, структурную, алгоритмическую модель системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки и исследовать динамические характеристики системы на предмет адекватности.

3. Модернизировать математическую модель управления трехфазным асинхронным двигателем и построить имитационную компьютерную модель системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки, провести ее анализ.

4. Построить алгоритм и разработать программное обеспечение вычисления задающих параметров производительности системы автоматического регулирования компрессорной установки.

5. Провести разработку технических средств системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки на сортировочной станции.

Объект исследования. Объектом исследования является система регулирования производительности компрессорной установки на сортировочной станции.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы и средства автоматизации регулирования производительности компрессорной установки на сортировочной станции.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработана прогнозно-динамическая модель затрат электроэнергии КУ, учитывающая факторы технологического процесса и погодных условий на сортировочной станции.

2. Впервые предложена структура и алгоритм функционирования системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки в условиях работы сортировочной горки, что дало возможность исследовать ее динамические свойства.

3. Дальнейшее развитие получила математическая модель частотного управления приводным двигателем, учитывающая задающие параметры производительности КУ.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в раскрытии особенностей влияния факторов погодных условий и технологических работ на затраты электроэнергии КУ и использование этих данных в разработке системы автоматического управления производительности КУ.

Практическое значение результатов исследования:

1. Предложена структура и комплекс технических средств системы автоматического регулирования производительности компрессорной станции.

2. Разработаны алгоритм функционирования и программное обеспечение системы автоматического регулирования производительности компрессорной станции.

3. Разработана и апробирована принципиальная схема микропроцессорной и силовой части системы автоматического регулирования производительности компрессорной станции.

4. Результаты диссертационных исследований, а именно: методы управления производительности компрессорных установок внедрены на ГП

«Донецкая железная дорога» в виде рекомендаций по улучшению эффективности функционирования компрессорных станций.

5. Результаты диссертационных исследований, а именно: динамическая математическая модель скатывания отцепа с горба горки; алгоритмы управления производительности компрессорной установки на сортировочной станции; структура и комплекс технических средств системы автоматического регулирования производительности компрессорной станции на основе современных микропроцессорных устройств внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций по дисциплинам «Станционные системы автоматики», «Электрические машины», «Микропроцессорные информационные управляющие системы», для студентов направления подготовки 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы: методы математического моделирования; системный подход к анализу динамических процессов системы; корреляционный анализ данных; методы регрессионного анализа данных; методы эмпирического исследования и анализа результатов эксперимента; методология имитационного компьютерного моделирования; теоретические методы исследования и анализа научных трудов отечественных и зарубежных авторов, посвященные проблемам энергосбережения и управления на компрессорных станциях.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Методом корреляционного анализа установлена функциональная связь между показателями энергозатрат КУ и факторами погоды (направление ветра, сила ветра, осадки, температура) и параметрами состава поезда, который расформируется. Это позволило разработать многофакторную прогнозно-динамическую математическую модель затрат электроэнергии на компрессорной станции.

2. Установлено, что введение в структуру частотного регулятора приводным двигателем КУ, позволяет достичь уменьшения энергозатрат до 60%

[1,2] в сравнении с традиционной системой управления производительности КУ и повысить показатели безотказности агрегатов за счет применения «мягких» алгоритмов пусков /остановов приводных двигателей.

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается достаточным количеством наблюдений, современными методами исследования, которые соответствуют поставленным в работе целям и задачам. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подкреплены убедительными фактическими данными, наглядно представленными в приведенных таблицах и рисунках. Подготовка, статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации и статистического анализа.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в частности: п.3. «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) ит. д.»; п.13 «Теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации».

Основные положения диссертационной работы апробированы на научно-технических конференциях: V международная научно-практическая конференция «Безопасность и электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте», г. Днепропетровск, 2012г.; Международная научно-техническая конференция «Перспективные компьютерные управляющие телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины», г. Алушта, 2012г.; III международная научно-техническая конференция: «Основні проблеми та сучасні методи вирішення задач енерго- і ресурсозбереження при

експлуатації машин та устаткування», г. Донецьк, 2012г.; I V міжвузівської науково-технічної конференції викладачів, молодих вчених та студентів: «Основні проблеми та сучасні методи вирішення задач енерго- і ресурсозбереження при експлуатації машин та устаткування», г. Донецьк, 2012г.; материалы Второй международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты комплексного развития транспортной отрасли», ДААТ, 25-26 мая, Донецьк, 2016г.; Третья международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта», г. Донецьк, 25 мая, 2017г.

Личный вклад соискателя. Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, цели и задачи работы, в выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке алгоритмов и программного обеспечения, а также их внедрению.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 20 научных работах, в том числе: 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, 7 публикации материалов и тезисов на международных конференциях и 1 патент Украины на полезную модель.

Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности. Полученные результаты, положения и выводы отвечают требованиям паспорта специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)», в частности: п.4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация»; п.5 «Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУТП, АСУП, АСПП и др.»; п.15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ

широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.); п.17 «Использование методов автоматизированного проектирования для повышения эффективности разработки и модернизации АСУ»; п.18 «Средства и методы проектирования технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ»; п.19 «Разработка методов обеспечения совместимости и интеграции АСУ, АСУТП, АСУП, АСТПП и других систем и средств управления».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 196 страниц машинописного текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 111 источников на 12 страницах и 9 приложений на 65 страницах. Основной текст, изложенный на 123 страницах, иллюстрируется 80 рисунками (включая рисунки приложения) и содержит 6 таблиц.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ РАБОТЫ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ

1.1 Анализ систем автоматизации сортировочных процессов по критерию минимизации энергозатрат

Внедрение ресурсосберегающих технологий на сортировочных станциях предусматривает проведение исследований отдельных технологических линий работы станций по критерию снижения энергозатрат, особенно в наиболее энергоемких процессах, к которым относится процесс расформирования составов. Актуальность таких исследований заключается в анализе таких процессов и определении направлений усовершенствования конструктивно-технологических параметров подсистем станции с целью сохранения или уменьшения расходов энергетических запасов. Поэтому исследование энергозатрат горочных систем при расформировании составов имеет практическую ценность.

Анализ известных теоретических подходов к эксплуатации и расчету параметров сортировочных горок показал, что на сегодняшний день слабо освещены проблемы ресурсосбережения с учетом торможения отцепов в процессе отпуска поезда; недостаточно внимания уделено вопросам оптимизации режимов работы компрессорной установки как одного из наиболее энергоемких звеньев процесса расформирования составов; не в полной мере рассмотрены вопросы эффективности систем поддержки принятия решений для операторов горочного процесса.

Сортировочная горка – звено, ответственное за сокращение простоя вагонов на станциях – были и остаются одним из основных потребителей топливно-энергетических и производственных ресурсов на транспорте. Уровень потребления этих ресурсов существенно зависит от таких факторов, как несовершенство существующей технологии регулирования скорости скатывания отцепов и нерациональная эксплуатация технических средств, обеспечивающих

этот процесс; отсутствие комплексной автоматизации процесса расформирования составов на железнодорожных станциях, в частности систем поддержки принятия решений оперативным персоналом; применение традиционной конструкции продольного профиля, наличие в ряде случаев избыточной высоты горок и низкий уровень учета параметров метеорологических условий в процессе эксплуатации сортировочных устройств. Следует также отметить, что случайный характер указанных параметров, а также системный подход к эксплуатации и расчету сортировочных горок не в полной мере учитываются на стадии их проектирования или реконструкции, что соответствующим образом отражается на качестве и экономичности проектов [3].

Основными объектами, в рассматриваемом комплексе технологических работ и существенно влияющих на энергозатраты сортировочной горки являются маневровый локомотив и компрессорная станция.

Согласно циклу технологических работ, маневровый локомотив выполняет следующие операции с вагонами: заезд в подгорочный парк, вытягивания состава на вытяжной путь, надвиг, роспуск и осаживания на путях сортировочного парка. В результате такого цикла локомотив несет большие энергозатраты в виде расхода дизельного топлива.

Компрессорная станция обеспечивает работу пневмоузлов, которые учувствуют в технологическом процессе на станции. Поскольку основную нагрузку по затратам воздуха в операции роспуск составов берут на себя тормозные замедлители, то именно они являются определяющим звеном в системе энергозатрат компрессорной установки в целом.

Как видно из выше описанного, в обоих случаях энергозатраты очень тесно связаны с операцией расформирования состава на станции. Поэтому разработка ресурсосберегающей модели работы в условиях сортировочного процесса является актуальной задачей.

Основными составляющими операций по расформированию составов на сортировочной горке являются:

- время выполнения технологических операций;

- энергозатраты горочных локомотивов и устройств, обеспечивающих торможение вагонов в подгорочном парке;

- безопасность работников станции, участвующих в выполнении горочных технологических операций;

- сохранность горочного оборудования.

Одной из задач данного исследования является создание ресурсосберегающей модели, которая должна отображать все особенности процесса расформирования составов с учетом взаимосвязи выше указанных критериев.

Как было отмечено, в процессе расформирования составов основными потребителями энергоресурсов являются горочные локомотивы и компрессорные установки. Энергозатраты маневровых локомотивов зависят от множества технологических, конструктивных и других факторов сортировочной работы. Энергозатраты компрессорных установок зависят от мощности и количества тормозных устройств, погодных условий, режимов работы самих установок. Составляющими целевой функции энергозатрат горочного локомотива и компрессорной установки при расформировании состава являются:

$$A_{расф} = A_з + A_n + A_{росп} + A_{ос} + A_{ку} + A_{мп} \rightarrow \min, \quad (1.1)$$

где $A_з$ – энергозатраты локомотива на операцию заезд, кВт·ч;

A_n – энергозатраты на операцию надвиг, кВт·ч;

$A_{росп}$ – энергозатраты на операцию роспуску, кВт·ч;

$A_{ос}$ – энергозатраты на операцию осаживание, кВт·ч;

$A_{ку}$ – энергозатраты компрессорных установок, кВт·ч;

$A_{мп}$ – энергозатраты на межоперационные простои, кВт·ч.

Если не учитывать затраты на манёвровые работы, и рассматривать только стационарные объекты станции, то в данной формуле наибольший вклад в энергозатрат на сортировочной станции вносит компрессорная установка (до 70% от общего потребления мощности станции [4]). Поэтому особое внимание следует уделить определению энергозатрат компрессорной установки во время выполнения горочных технологических операций, а также во время межоперационных простоев. Так функциональную зависимость энергозатрат КУ от различных факторов, можно представить в виде

$$A_{ку}(\sum m_i; n_{ваг}; n_{отц}; \sum h_t; R_{ку}; N_{зам}) \rightarrow \min, \quad (1.2)$$

где $\sum m_i$ – суммарный вес вагонов в составе, т;

$n_{ваг}$ – количество вагонов в составе;

$n_{отц}$ – количество отцепов в составе;

$\sum h_t$ – суммарные потраченные энергетические высоты на торможение отцепов, кДж\кН;

$R_{ку}$ – режим работы компрессорной установки;

$N_{зам}$ – количество замедлителей, используемых в процессе роспуска.

Так в функции (1.2) единственным фактором, который поддается корректировке во время роспуска вагонов – это режим работы КУ $R_{ку}$. Причем данный показатель может зависеть от остальных показателей технологического процесса и при оптимальной регулировки существенно влиять на энергозатраты в целом.

Стоит заметить, что современные ученые в своих работах достаточно широко рассматривают вопросы снижения энергозатрат компрессорных установок с применением современных методов управления. Зачастую такое управление сводится к частотному или векторному управлению приводным двигателем компрессоров. В этом направлении работали такие ученые как:

Николаев В.Г., Илюшенко В.В., Туркин М.А. Богданов А.А., Башлыков А.М. Корчагина В.А., Шептухин В.В., Паршин А.Н., Нгуен К. Ч., Соломатина А. А., Одикадзе В.Р. и др.

В своей диссертации [5] Николаев В.Г. разработал модель частотноуправляемого привода компрессора. В этой работе автор использовал в качестве входных величин управления показатели технологических параметров. Однако эти вопросы рассматривались в условиях системы водоснабжения и водоотведения, что не имеет ничего общего с технологическими работами сортировочных станций железной дороги.

В работе [6] Илюшенко В.В. описал алгоритмы управления устройством плавного пуска для группы асинхронных электродвигателей насосной станции с повышенной надежностью, на основе которого разработал математическую модель управления. Однако, делая уклон на пусковые характеристики машин, в своей модели автор не учел значения технологических параметров системы, на которую нагружена компрессорная станция.

Подробное описание модели частотного управления электроприводом компрессорных установок описал в своей работе Туркин М.А. Однако исходными условиями для его разработок является высокодинамичные режимы работы системы. Вследствие этого был выбран и усовершенствован метод векторного управления, что привело к улучшенным энергетическим характеристикам. Однако, такая модель управления не является актуально применительно к низкодинамичным технологическим процессам, компрессорным станциям на сортировочных горках.

Заметим, что выше причисленные ученые занимались вопросами частотного или векторного управления приводами компрессорных установок, работающих в условиях отличных от железнодорожных сортировочных станций. Тем самым не были учтены технологические и технические особенности при эксплуатации этих агрегатов во время сортировочных работ.

Наиболее успешным в вопросе разработки энергосберегающих методов управления компрессорными станциями на железной дороге России является

группа ученых и инженеров Ростовского филиала ОАО «НИИАС» совместно с ПКТБ ЦШ во главе к.т.н. В.Р. Одикадзе. Ими было разработана комплексная система автоматизации управления компрессорной станцией – КСАУКС. В своей работе Одикадзе В.Р. описал функции предложенной системы, включающей в себя [7]:

- управление работой компрессорных установок с использованием устройств плавного пуска главного двигателя;
- управление агрегатами градирен и системы оборотного водоснабжения, клапанами слива конденсата и двигателями приточно-вытяжной вентиляции;
- измерение расхода сжатого воздуха и контроль утечек в пневмосетях;
- контроль потребления электроэнергии;
- контроль систем пожарно-охранной сигнализации и пожаротушения;
- диагностика технического состояния КУ с выявлением предотказных состояний и предотвращением аварийных ситуаций.

При этом, эффект ресурсосбережения достигается избирательным включением необходимого количества компрессоров и вспомогательного оборудования при определенной потребности в сжатом воздухе и автоматическом отключении компрессорных установок при снижении потребления воздуха. На практике данный алгоритм позволил ощутимо уменьшить расход электроэнергии и, как следствие, снизить себестоимость всего процесса отпуска. Избирательность при включении компрессорных установок позволяет оптимизировать наработку узлов и агрегатов компрессора, а также снизить материальные затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования. Система КСАУКС в процессе работы обеспечивает реализацию следующих ресурсосберегающих факторов:

- экономию электроэнергии за счет эффективного управления работой компрессорного и вспомогательного оборудования компрессорной станции;
- снижение трудоемкости эксплуатации компрессорного оборудования за счет реализации автоматического управления и предоставления возможности дистанционного управления агрегатами;

- обеспечение безопасности работы за счет реализации удаленного мониторинга и предотвращения аварийных ситуаций;
- снижение трудоемкости обслуживания оборудования за счет оперативного поиска и устранения неисправностей, предотказной диагностики и оповещения оперативного персонала;
- экономия ресурса агрегатов компрессорной станции за счет снижения коэффициента загрузки и повышения эффективности работы;
- экономия эксплуатационных расходов за счет своевременного устранения утечек в пневмосетях с помощью функций непрерывного мониторинга и контроля расхода воздуха.

Как было отмечено ранее, работа такой системы сводится к своевременному включению приводных двигателей и отключении их в случае отсутствия технологических работ. При этом в дежурном режиме работает постоянно один компрессор.

При таком подходе пневмосистема, как и при классическом решении, будет стравливать избыточный воздух в атмосферу. Кроме того, данный подход не исключает проблему, связанной с опасными переходными процессами при частых коммутациях двигателей. Что в конечном итоге приводит к уменьшению срока службы приводов.

Решение этой задачи может стать автоматическое плавное регулирование оборотов двигателей в зависимости от интенсивности технологических работ на сортировочной горке.

Следует отметить, что вопросами снижения энергозатрат на сортировочной горке также занимались такие ученые как: Тартынский В.А., Карасев С.В., Ольгейзер И.А., Козубенко В.Г., Похилко С.П. и др.

В своей работе Карасев С.В. рассмотрел влияния внешней среды на качество заполнения сортировочных путей горки. Он разработал имитационную модель процесса заполнения путей накопления вагонов. При этом были учтены особенности каждого вагона, а именно его тип, масса, сопротивление движению. Эти характеристики рассматриваются как случайные величины,

определяются на основе обработки реальных данных о структуре перерабатываемого на горке вагонопотока методами математической статистики и задаются при помощи функций распределения. Основное сопротивление движению вагонов были впервые рассмотрены на всей генеральной совокупности возможных значений. Другие виды сопротивления при свободном скатывании были определены в динамике, с учетом ориентации оси сортировки, плана и профиля надвижной и спускной частей горки и сортировочных путей.

Стоит заметить, ученый Карасев С.В. достаточно подробно описал вопрос влияния всех факторов на скатывания отцепа. Однако его модель не была включена в общую функцию энергосбережения, что в свою очередь теряет практическую ценность.

Вопросами влияния климатических условий на сортировочные процессы были рассмотрены ученым Ольгейзер И.А. В рамках данной задачи автор рассмотрел следующие вопросы:

- анализ суровости среды и проблемы сортировочного комплекса, возникающие в этой связи;
- методы получения и обработки статистической и экспертной информации о влиянии среды на сортировочный процесс;
- механизм идентификации текущего состояния среды;
- устройство компенсации параметров внешней среды на сортировочный процесс;
- вопросы обеспечения надежности синтезированной подсистемы.

Ольгейзеру И.А. удалось обобщить опыт ученых в рассмотрении этих вопросов. Однако углубляясь в модель влияния климатических условий на сортировочный процесс автор упускает рассмотреть вопрос о вытекающих результатах своей работы в области энергозатрат на переработку состава. Так, например, предложенная модель могла бы быть определяющей в процессе генерации сжатого воздуха на компрессорной станции.

Вопросами снижения энергозатрат на сортировочных горках занимался ученый Похилко С.П. Им была разработана математическая модель

энергозатрат на сортировочной горке. При этом основным объектом энергозатрат был выбран маневровый локомотив и влияющие на его работы конструкционные особенности горки. Несмотря на то, что потребления компрессорной установки составляют до 70% от общих энергозатрат станции, в своей работе Похилко С.П. вопросы затрат электрической энергии на выработку сжатого воздуха не рассматривал.

Обобщив, можно отметить, что вопросами снижения энергозатрат на сортировочной горке рассматривались многими учеными. Основными их направлениями являются:

- оптимизация технологического процесса по климатическим и/или конструктивным критериям горки;
- оптимизация технологических процессов за счет информационных систем управления;
- оптимизация режимов маневровых работ;
- оптимизация конструкционных особенностей горок.

Анализ научных публикаций показал, что вопросы минимизации энергозатрат за счет разработки системы автоматического управления производительностью компрессорной установкой в зависимости от технологических работ не достаточно были рассмотрены.

1.2 Анализ методов регулирования производительностью компрессорных установок на сортировочной горке

Для обеспечения работы пневматических устройств на механизированных и автоматизированных сортировочных горках, используют сжатый воздух, вырабатываемый компрессорными станциями.

В зависимости от интенсивности потребления сжатого воздуха применяют компрессорные станции с четырьмя компрессорами (при потреблении воздуха 60 м³/мин) и компрессорные станции с шестью компрессорами (при потреблении

воздуха 100 м³/мин) [4, с.324]. В обоих случаях одна установка является резервной для использования в случаях повышенной нагрузки.

В зависимости от типа сортировочной горки число одновременно работающих компрессоров может меняться от 1 до 6. Так, например, сортировочная горка большой мощности для переработки большого числа отцепов при неблагоприятных погодных условиях задействует одновременно все 6 компрессоров. И, наоборот, при отсутствии роспуска состава, число параллельно работающих агрегатов снижается до одного. В любом случае, основной целью системы компрессоров является обеспечение необходимого уровня давления в воздушной магистрали.

Для обеспечения необходимого уровня в существующих компрессорных установках используется система автоматического регулирования производительностью сжатого воздуха (АРПСВ). Она контролирует в заданных пределах основные параметры пневматической системы и не допускает опасных перегрузок по давлению. Кроме того, существующие системы АРПСВ обеспечивают: пуск/останов приводного двигателя компрессора; автоматическую разгрузку компрессора при его пуске и остановке; автоматическую продувку теплообменной аппаратуры; трехступенчатое регулирование производительностью подключением «мертвого объёма»; включение разгрузочного вентиля; отключение двигателя в случае превышения параметров давления (воздуха или масла), температуры в системе или электрических параметров в цепи питания двигателя. Все эти методы регулирования производительности сжатого воздуха имеют два существенных недостатка:

- значительные затраты электроэнергии на переработку одного вагона;
- снижения срока службы привода из-за частых коммутаций.

Ниже детально проведен анализ традиционных методов регулирования производительностью сжатого воздуха, которые используют на КУ сортировочных горок.

Пуск/останов приводного двигателя. Включение – выключение компрессорной установки является наиболее простым способом регулирования

производительности, предусматривающий отключение электродвигателя при повышении давления до максимального уровня и включение его при достижении минимально допустимого уровня давления. Во время простоя компрессора он не потребляет электроэнергию, что является положительной стороной данного метода. Однако постоянные включения и выключения электродвигателя негативно отражаются на работе системы в целом. Так, очередной пуск двигателя приводит к перегреву статорной обмотки пусковыми токами, что значительно сокращает срок службы привода. Кроме того, при пуске, большие механические нагрузки приходятся на вал и соединительные муфты пневмосистемы, что приводит к их быстрому износу.

При выключении двигателя, запасенная в обмотке электромагнитная энергия является причиной разрушения изоляции проводов. В результате возникает короткое замыкание в обмотке статора и двигатель переходит в аварийный режим. А если силовым агрегатом управляет полупроводниковые электронные компоненты, то переходное напряжения с большой вероятностью может привести к электрическому пробое выходного управляющего каскада.

Всё перечисленное усложняется еще тем, что в большинстве случаев в современных компрессорных станциях в качестве приводного двигателя применяются синхронные двигатели типа ДСК, у которых алгоритм пуска сложен и трудоемкий.

Вследствие этого, подобный способ регулирования производительностью сжатого воздуха применим к маломощным компрессорным установкам. Однако на компрессорных станциях сортировочных горок все виды компрессоров оснащены этим методом регулировки производительности. Это является главной причиной, которая снижает срок службы привода и увеличивает эксплуатационные затраты на его обслуживания.

Подключение «мертвого объема». Данный метод применим только для компрессоров поршневого типа. Суть его заключается в следующем. При достижении давления в воздухохборнике выше заданного 0,804 Мпа ($8,2 \text{ кгс/см}^2$) контакты манометра инициируют подключение дополнительного объема в

поршневом резервуаре, что приводит к снижению производительности компрессора до 65%.

С точки зрения термодинамики такой способ регулирования не эффективен, так как приводит к увеличению электрических затрат, при уменьшении объемной производительности. С точки зрения капитальных затрат он также не выгоден, так как усложняется конструкция компрессора, увеличивается стоимость компрессора, повышаются эксплуатационные затраты.

Перевод компрессора на холостой ход. Этот метод регулирования производительности сжатого воздуха получил широкое распространение в компрессорах большой мощности. Он позволяет избежать аварийной ситуации при перегрузки воздушной системы, путем сбрасывания воздуха через электропневматический клапан в атмосферу, тем самым снижая производительность компрессора до 0,1%. Соответственно метод не предусматривает остановки приводного двигателя и не подвергает его влиянию переходных процессов.

Наряду с тем, с экономической точки зрения этот метод является крайне нерациональным, так как в итоге весь энергоресурс, затраченный на сжатие данного воздуха, оказывается растроченным «впустую». Такой способ целесообразно применять только мощных компрессорных установках, в которых редко достигается максимальный уровень давления.

Таким образом, сбрасывание излишков воздуха (перевод КУ на холостой ход) считается самым неэкономичным способом регулирования производительности. Но несмотря на это, современные компрессорные станции на сортировочной горке (СГ) до сих пор используют его, как основной метод регулирования производительностью.

Дросселирование. Этот способ регулирования производительности, осуществляется с помощью пропорционального всасывающего клапана, который не дает давлению в системе повышаться сверх меры, перекрывая путь всасываемому воздуху посредством газодинамического сопротивления. Производительность компрессора при этом значительно понижается, а давление в системе вскоре достигает номинального уровня. Этот метод удобен тем, что

система регулирует производительность практически самостоятельно – заслонка пропорционального всасывающего клапана открывается под влиянием давления воздуха в системе. Кроме того, он более экономичен, чем метод «холостого хода», но в то же время обходится дороже чем выше перечисленные методы. Этот метод регулирования производительностью сжатого воздуха на КУ СТ применяется редко.

На сегодняшний день жесткие требования к ресурсосбережению обязуют, руководство сортировочных горок искать пути экономии электроэнергии. Анализ работы КУ позволил установить два основных пути экономии затрат на сортировочной станции:

- экономия затрат за счет продления срока службы приводных двигателей компрессоров;
- экономия затрат за счет остановки компрессоров на время технологических окон.

Так, например, на сортировочной станции Ясиноватая восточная Донецкой железной дороги, этот вопрос решается следующим образом. Количество заранее включенных компрессоров на станции выбирается исходя из данных сортировочного листа (вес, количество вагонов, назначения вагонов) до того, как состав начал процедуру надвига на горб горки. При этом дополнительный резервный компрессор работает в дежурном режиме на холостом ходу. Когда роспуск состава заканчивается, агрегаты продолжают работать с той же интенсивностью. При этом избыточное давление периодически стравливается в атмосферу, разгружая систему снижением производительности до 0,1%. До начала очередной переработки нового состава КУ работает с пониженной нагрузкой, и с пониженным расходом электроэнергии на станции. При длительном отсутствии роспуска вагонов, часть компрессоров отключают. Таким образом такое решение экономии затрат на роспуск не имеет очевидного выигрыша, поскольку он направлен на увеличение срока службы дорогого привода. Только в таком режиме, с большой вероятностью двигатели КУ не выйдут из строя, работая в нижнем пределе номинального режима. Следовательно, только

при таком режиме уменьшаются затраты на капитальный ремонт и замену приводов.

Другим примером экономии электроэнергии может служить работа компрессорной станции на сортировочной горке станции Ясиноватая западная Донецкой железной дороги. На этой станции до начала роспуска состава КУ начинает работать с установленной интенсивностью. После переработки состава все компрессоры на станции выключаются. До начала следующего роспуска компрессорная станция не расходует электроэнергию, тем самым уменьшает затраты на переработку состава. Однако при подготовке КУ к следующему роспуску, во время пуска приводного двигателя неизбежно возникают переходные напряжения и токи, которые в свою очередь разрушают изоляцию статорных обмоток и перегревают их проводники. В результате двигатель значительно снижает свой срок службы или выходит из строя.

Оба рассмотренных путей в конечном итоге не способны обеспечить экономию затрат на переработку состава. Необходимы новые методы, которые бы удовлетворяли следующим требованиям:

- экономия электроэнергии за счет отключения КУ в моменты технологических окон;
- обеспечения «мягкого» пуска и останова приводных двигателей КУ;
- уменьшения влияния электрических переходных процессов на схему управления;
- возможность регулировки интенсивности работы КУ в зависимости от интенсивности технологического процесса.

Одним из таких решений может быть управление частотой вращения приводного двигателя отдельного компрессора. Суть такого решения заключается в том, что производительность компрессорной установки регулируется скоростью вращения вала двигателя в зависимости от уровня давления в воздушной магистрали. При этом, данный подход должен минимизировать влияния переходных процессов как в пневматической системе, так и в электрической схеме управления приводом. Для этого алгоритм пуска и останова двигателя

должен иметь «мягкий» характер и учитывать фактическое значение нагрузки в начальный момент коммутации.

Входным воздействием, определяющим режим работы КУ, может быть не только показания датчиков давления и температуры, но и данные с натурального листа. Эти данные система управления КУ может получать в автоматическом режиме, например, подключившись к сети системы УКСС. Такой принцип подробно будет описан в следующей главе.

1.3 Анализ существующих методов управления приводными двигателями

На компрессорных станциях сортировочных горок для работы компрессоров применяют трехфазные машины: асинхронные и синхронные двигатели. Их преимущество перед двигателями постоянного тока очевидно. Они выдерживают существенные перегрузки, надежны и просты, а скорость вращения вала не зависит от величины тока и напряжения питания. Однако методы управления этих машин сложны и отличаются в зависимости от области применения установок и их назначения. Под управлением трехфазным двигателем переменного тока понимается изменение частоты вращения ротора и/или его момента.

Из-за принципиального сходства статорных обмоток асинхронного и синхронного двигателей их методы управления рассматриваем, как общими и применимы для обоих типов машин. Для управления трехфазными двигателями переменного тока существуют следующие методы:

- реостатный – изменение скорости вращения асинхронного двигателя с фазным ротором путём изменения сопротивления реостата в цепи ротора, кроме того это увеличивает пусковой момент и повышает критическое скольжение [8];

- частотный – изменение скорости вращения двигателя путём изменения частоты тока в питающей сети, что влечёт за собой изменение частоты вращения поля статора [9,10];

– переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник» в процессе пуска двигателя, что даёт снижение пусковых токов в обмотках примерно в три раза, но в то же время снижается и момент [8, с.234];

– импульсный – управление подачей импульсного напряжения питания [10];

– введение добавочной ЭДС согласно или противоположно с частотой скольжения во вторичную цепь [8, с.236];

– изменением числа пар полюсов, если такое переключение предусмотрено конструктивно [8, с 239];

– изменением амплитуды питающего напряжения, когда изменяется только амплитуда (или действующее значение) управляющего напряжения [8,с.254, 9,с.201, 10, с.187];

– фазовое управление–характерно тем, что изменение частоты вращения ротора достигается путём изменения сдвига фаз между векторами напряжений возбуждения и управления [9,с.204];

– амплитудно-фазовый способ включает в себя два описанных способа;

– включение в цепь питания статора реакторов [10, с.221];

– индуктивное сопротивление для двигателя с фазным ротором [8, с.236].

Наиболее гибким методом управления, который обеспечивает широкий предел управления по частоте и по электромагнитному моменту является частотный метод управления. Это наиболее современный метод с применением электронных и программных средств. Частотное управление может быть реализовано по двум алгоритмам: векторный и скалярный.

Наибольшее распространение получили асинхронные и синхронные электроприводы со скалярным управлением. Его используют в приводах компрессоров, вентиляторов, насосов и прочих механизмов в которых необходимо удерживать на определенном уровне или скорость вращения вала электродвигателя (применяется датчик скорости), либо какого-то технологического параметра (к примеру, давление в трубопроводе, с применением соответствующего датчика).

Принцип действия скалярного управления трехфазным двигателем заключается в изменении амплитуды и частоты питающего напряжения по закону $U/f^n = const$, где $n \geq 1$. То, как будет выглядеть данная зависимость в конкретном случае, зависит от требований, предъявляемых нагрузкой электроприводу. Как правило, в качестве независимого воздействия выступает частота, а напряжение при определенной частоте определяется видом механической характеристики, а также значениями критического и пускового моментов. Благодаря скалярному управлению обеспечивается постоянная перегрузочная способность асинхронного двигателя, независящая от частоты напряжения, и все же при довольно низких частотах может произойти значительное снижение момента, развиваемого двигателем. Максимальное значение диапазона скалярного управления, при котором возможно осуществление регулирования значения скорости вращения ротора электродвигателя, без потери момента сопротивления не превышает 1:10.

Скалярное управление асинхронным двигателем довольно просто реализуется, но имеются два значительных недостатка. Во-первых, если на валу не установлен датчик скорости, то невозможно осуществлять регулирование скорости вращения вала, поскольку она зависит от воздействующей на электропривод нагрузки. Установка датчика скорости решает данную проблему, но еще одним значительным недостатком остается – отсутствие возможности регулирования момента на валу двигателя. Решением данной проблемы может быть установка датчика момента, но стоимость подобных датчиков, как правило, превышает стоимость самого электропривода [11]. К тому же, установка такого датчика, делает систему крайне инерционной. Также, скалярному управлению асинхронным двигателем характерен тот факт, что невозможно осуществление одновременного регулирования скорости и момента. Поэтому приходится осуществлять регулирование той величины, которая в данный момент времени наиболее важна в силу условий технологического процесса.

Для устранения недостатков, скалярного управления двигателем, еще в 71-м году прошлого века компанией SIEMENS было предложено внедрение метода векторного управления двигателем [12]. В первых электроприводах с векторным

управлением использовались двигатели, в которых были встроены датчики потока, что значительно ограничивало область применения подобных приводов.

Современная система управления электроприводом содержит в себе математическую модель двигателя, позволяющую рассчитать скорость вращения и момент вала. Причем в качестве необходимых датчиков устанавливаются только датчики тока фаз статора двигателя. Специально разработанная структура системы управления обеспечивает независимость и практически безинерционность регулирования основных параметров: момент вала и скорость вращения вала.

К сегодняшнему дню сформировались следующие системы векторного управления асинхронным двигателем: бездатчиковые – на валу двигателя отсутствует датчик скорости; и системы, имеющие обратную связь по скорости.

Применение методов векторного управления зависит от области применения электропривода. Если диапазон измерения изменения скорости не превышает 1:100, а требования, предъявляемые к точности, колеблются в пределах $\pm 1,5\%$, то используется бездатчиковая система управления. Если изменение скорости осуществляется в пределах достигающих значений 1: 10000 и больше, а уровень точности должен быть довольно высоким ($\pm 0,2\%$ при частоте вращения ниже 1 Гц), или же необходимо позиционировать вал или осуществлять регулирование момента на валу при низких частотах вращения, то применяется система, имеющая обратную связь по скорости.

Преимущества векторного метода управления асинхронным и синхронным двигателем:

- высокий уровень точности при регулировании скорости вращения вала, несмотря даже на возможное отсутствие датчика скорости;
- осуществление вращения двигателя на малых частотах происходит без рывков, плавно;
- при установке датчика скорости можно достичь номинального значения момента на валу даже при нулевом значении скорости;

– быстрое реагирование на возможное изменение нагрузки – резкие скачки нагрузки практически не отражаются на скорости электропривода;

– высокий уровень КПД двигателя, обусловленный снижением потерь из-за намагничивания и нагрева.

Несмотря на отмеченные преимущества, метод векторного управления имеет и определенные недостатки – большая сложность вычислений, для работы необходимо знание технических параметров двигателя. Кроме этого колебания значения скорости при постоянной нагрузке значительно больше, по сравнению со скалярным методом управления.

Основной областью применения приводов с векторным методом управления являются системы, где нагрузка на валу изменяется в широких пределах. В системах компрессорных установок на сортировочных горках нагрузочный момент на валу двигателя изменяется незначительно, а работа компрессоров в основном определяется частотой вращения вала. Кроме того, системы с таким управлением принято реализовывать на приводах мощностью до 100кВт [11, с35].

Таким образом, для компрессорных станций, в которых в качестве приводов применяют синхронные и асинхронные двигатели мощностью выше 100кВт, наиболее оптимальным решением является применение скалярного метода управления. Этот метод прост и более дешевый по сравнению с векторным. Он позволяет в широком диапазоне регулировать скорость вращения вала при постоянном уровне электромагнитного момента. При этом скольжение увеличивается, что значительно уменьшает потери мощности при регулировании. Но, для получения высоких энергетических показателей двигателя – коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности – необходимо одновременно с частотой изменять и подводимое напряжение. Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки M_c :

– при постоянном моменте нагрузки на валу $M_c = const$ напряжение U_1 на статоре должно регулироваться пропорционально частоте f_1

$$U_1/f_1 = \text{const};$$

– при условиях, когда нагрузка на валу имеет вентиляторный характер, условие имеет вид

$$U_1/f_1^2 = \text{const};$$

-при условиях, когда момент нагрузки, обратно пропорционален скорости

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}.$$

Таким образом, для плавного бесступенчатого регулирования частоты вращения вала трёхфазного электродвигателя, необходимо обеспечивать одновременное регулирование частоты и напряжения на статоре.

Из вышесказанного можно отметить, что применение частотно регулируемого электропривода обеспечивает энергосбережение и позволяет получать новые качества систем и объектов. Значительная экономия электроэнергии обеспечивается за счет регулирования какого-либо технологического параметра. Например, в мощных компрессорных установках можно поддерживать необходимое давление посредством регулирования производительности компрессора.

1.4 Выводы по разделу 1

Проведенный анализ работы компрессорных станций показал, что существующие методы и принципы управления производительностью компрессоров не способны удовлетворить современным требованиям эффективности в энергосбережении. Кроме того, такие подходы снижают срок службы электрических машин системы.

Как отмечено в разделе, современные методы регулирования производительностью отдельного компрессора на сортировочной станции,

должны сводиться к управлению приводных двигателей и полному контролю их электромеханических параметров. А исходными данными для определения интенсивности работы машины должны служить прямые или косвенные данные технологического процесса на станции.

Все это невозможно построить без современной элементной базы. На сегодняшний день на отечественном рынке доступны высокопроизводительные микроконтроллеры, высокоточные и малогабаритные датчики, а на замену тиристорам и реле появились гибридные транзисторы большой мощности. Все это дает возможность решать большую часть практических вопросов, связанных с энергосбережением и повышения показателей безотказности агрегатов в компрессорных установках на сортировочных станциях.

Таким образом, целью работы является разработка структуры, модели и алгоритма функционирования системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки в зависимости от технологического процесса и погодных условий на станции. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Определить факторы, влияющие на энергетические показатели компрессорной установки на сортировочной горке, а также установить их особенности влияния на технологический процесс;
2. Разработать математическую модель влияния факторов технологического процесса и погодных условий на станции на энергетические параметры компрессорной установки;
3. Разработать функциональную, структурную, алгоритмическую модель системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки и исследовать динамические свойства системы;
4. Разработать алгоритм и программное обеспечение, определяющих задающих параметров производительности системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки;

5. Разработать имитационную компьютерную модель системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки, провести ее анализ;

6. Провести разработку структуры технических средств системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки на сортировочной станции.

РАЗДЕЛ 2

МНОГОФАКТОРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ НА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

2.1 Анализ зависимости электропотребления компрессорной установки от количества обработанных вагонов на сортировочной горке

Для разработки математической модели системы автоматического управления производительности КУ необходимо определить факторы, влияющие на энергоресурсы СС. Для этого в диссертации был проведен статистический анализ данных зависимости затрат электроэнергии от веса, количества переработанных вагонов и прогнозных температур за два месяца [13].

Данные для анализа взяты из рабочего журнала электромеханика сортировочной горки станции Ясиноватая восточная Донецкой железной дороги учета расхода электроэнергии. Таблица исходных данных с данными о количестве переработанных вагонов за смену, прогнозная температура воздуха на станции и энергозатраты, приведены в приложении А.

Введены следующие переменные: N_{ei} – количество вагонов, переработанных за i -тый дискретный период времени (смену); E_i – расход электроэнергии на сортировочной горке, t_{cpi} – прогнозная средняя температура воздуха на станции. Путем совмещения статистических данных значений N_{ei} и E_i , а также t_{cpi} и E_i получим диаграммы, изображенную на рисунках 2.1 и 2.2.

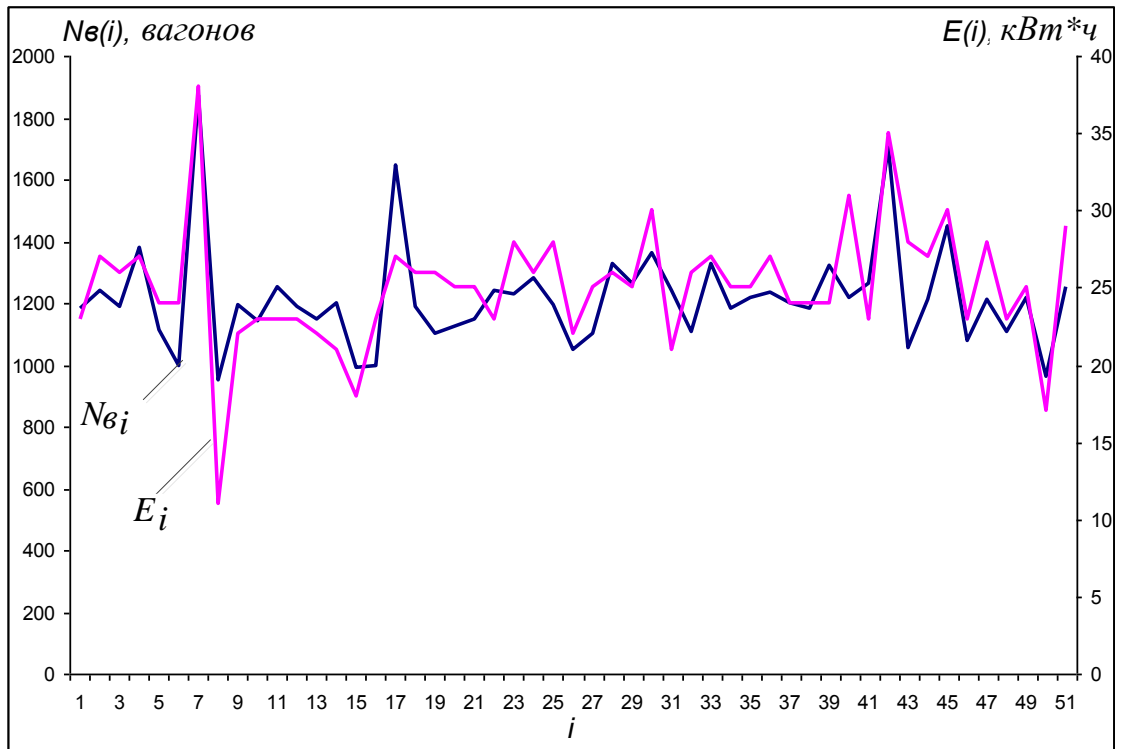


Рисунок 2.1– Диаграмма распределения количества вагонов N_{ei} и потребление электроэнергии за смену E_i .

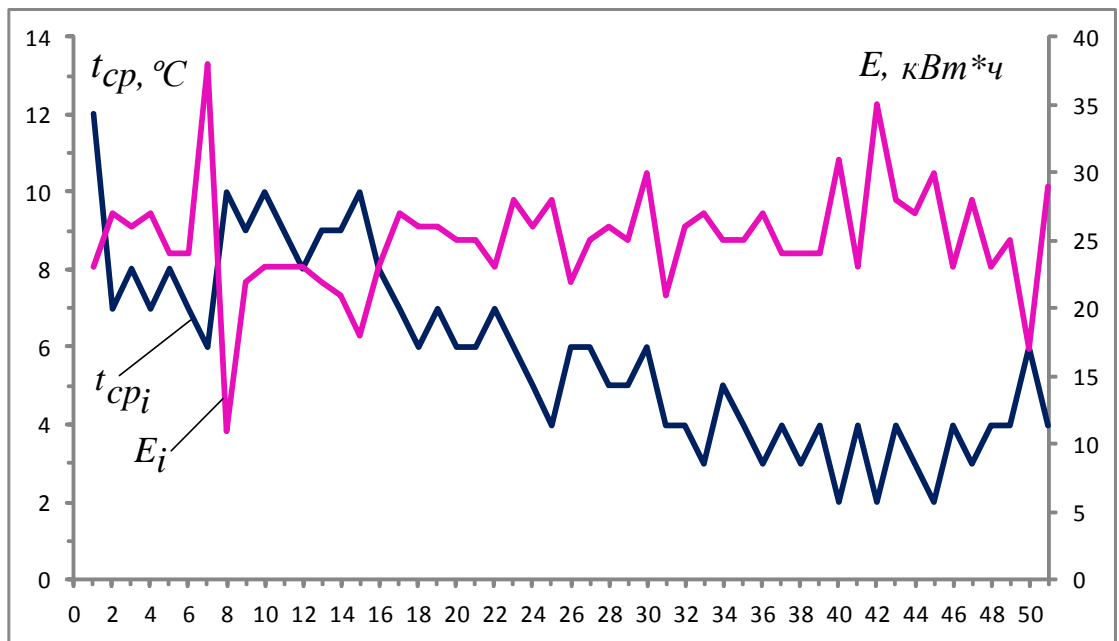


Рисунок 2.2 – Диаграмма распределения средних значений прогнозных температур t_{cp} и потребление электроэнергии за смену E_i .

На диаграммах (Рисунок 2.1) видна связь этих функций, степень которой можно определить на основе коэффициента корреляции Пирсона [14], рассчитываемый в соответствии с выражением (2.1).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (N_{Bi} - \overline{N_{Bi}})(E_i - \overline{E_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (N_{Bi} - \overline{N_{Bi}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \overline{E_i})^2}}, \quad (2.1)$$

где $\overline{N_{Bi}}$ – среднее арифметическое количество вагонов в смену;

$\overline{E_i}$ – среднее арифметическое количество потребления энергии за смену;

i – порядковый номер смены.

Из полученных статистических данных расчетный коэффициент корреляции составляет 0,7389.

На рисунке 2.2 видно, что диаграммы находятся в противофазе. В этом случае можно судит об обратнопропорциональной зависимости. Для определения тесноты связи по выражению (2.2) был проведен расчет коэффициента корреляции

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{cpi} - \overline{t_{cpi}})(E_i - \overline{E_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{cpi} - \overline{t_{cpi}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \overline{E_i})^2}}. \quad (2.2)$$

В этом случае коэффициент корреляции составил минус 0,5118.

По определению Чеддока [15], полученный коэффициент корреляции показывает на наличие сильной связи между функциями N_{Bi} и E_i и заметная связи между функциями t_{cpi} и E_i . То есть, расходы электрической энергии на сортировочных горках зависят от количества распущенных вагонов за смену и погодных условий на данный период времени. Характер этих зависимостей можно определить путем анализа корреляционного поля [16,17], который

приведён на рисунках 2.3 и 2.4 выдвинув гипотезу о линейной связи между величинами $N_{ei} - E_i$ и $t_{cpi} - E_i$ Тогда уравнение принимает видсоответственно

$$E(N_e) = aN_e + b + \varepsilon, \quad (2.3)$$

$$E(t_{cp}) = at_{cp} + b + \varepsilon \quad (2.4)$$

где a – коэффициент, который определяется пересечением линии регрессии с осью E_i ;

b – угол наклона линии регрессии (коэффициент регрессии);

ε – отклонения вследствие неучтенных факторов технологического процесса, которые потребляют электрическую энергию.

Из уравнения коэффициенты a и b определяются как [14, с.315]

$$a = r \cdot \frac{N_e - \bar{N}_e}{\sqrt{\sum (N_e - \bar{N}_e)^2}} \cdot \sqrt{\sum (E - \bar{E})^2} \quad \text{и} \quad b = \frac{\sum E}{n} = \bar{E}, \quad \text{а также} \quad a = r \cdot \frac{t_{cp} - \bar{t}_{cp}}{\sqrt{\sum (t_{cp} - \bar{t}_{cp})^2}} \cdot \sqrt{\sum (E - \bar{E})^2}$$

и $b = \frac{\sum E}{n} = \bar{E}$

Исходя из этого, уравнения линейной регрессии будет иметь вид:

$$E(N_e) = r \cdot \frac{N_e - \bar{N}_e}{S(N_e)} \cdot S(E) + \bar{E}, \quad (2.5)$$

$$E(t_{cp}) = r \cdot \frac{t_{cp} - \bar{t}_{cp}}{S(t_{cp})} \cdot S(E) + \bar{E} \quad (2.6)$$

где r – коэффициент корреляции;

$S(N_e)$, $S(t_{cp})$ и $S(E)$ –среднеквадратические отклонения, определяются как

$$S(N_e) = \sqrt{\sum (N_e - \bar{N}_e)^2}, \quad S(t_{cp}) = \sqrt{\sum (t_{cp} - \bar{t}_{cp})^2} \quad \text{и} \quad S(E) = \sqrt{\sum (E - \bar{E})^2} \quad \text{соответственно.}$$

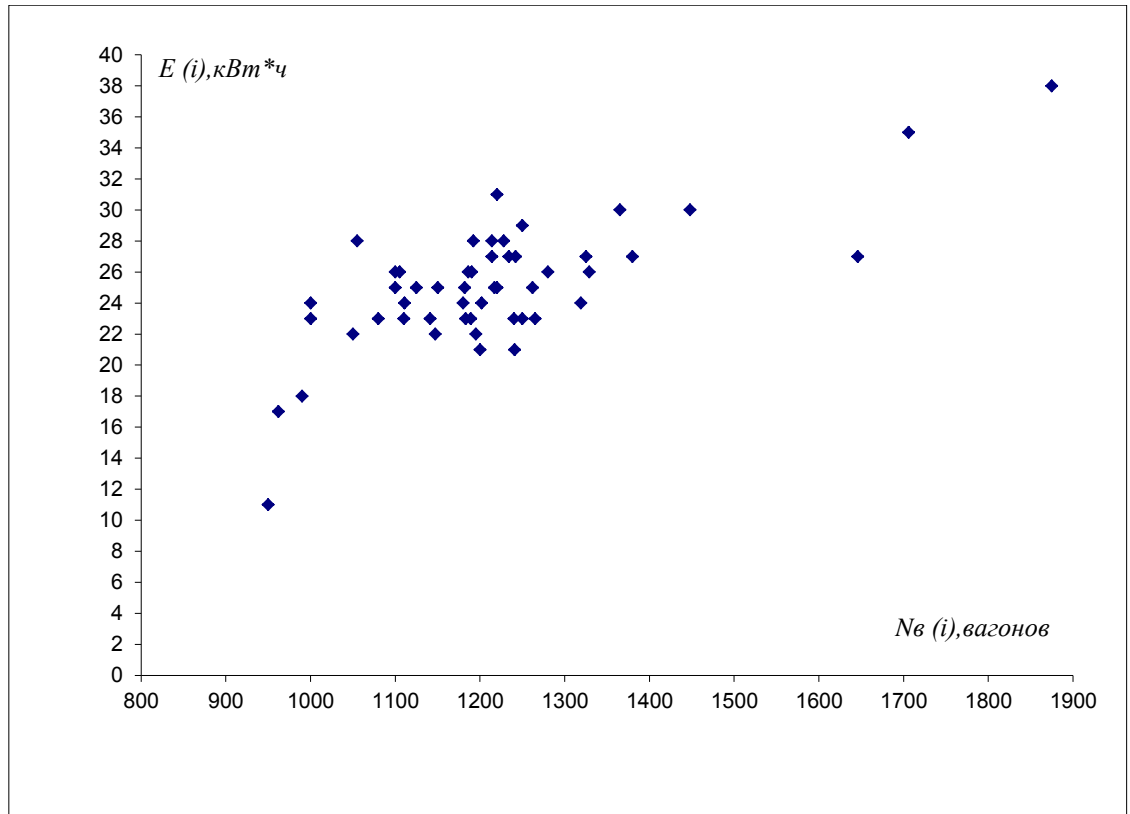


Рисунок 2.3 – Корреляционное поле $E_i(N_{вi})$.

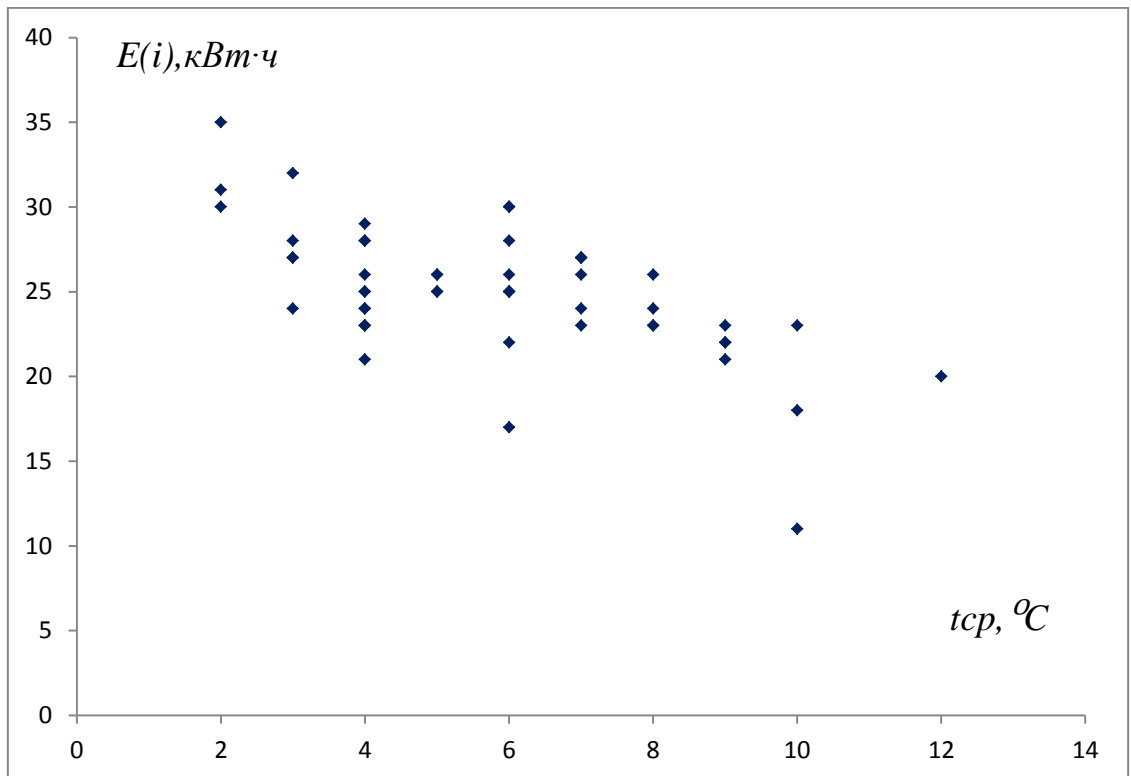


Рисунок 2.4 – Корреляционное поле $E_i(t_{срi})$.

Таким образом уравнение (2.5) и (2.6) будут иметь вид

$$E(N_{ei}) = r \cdot \frac{N_{ei} - \bar{N}_{ei}}{\sqrt{\sum (N_{ei} - \bar{N}_{ei})^2}} \cdot \sqrt{\sum (E - \bar{E})^2} + \bar{E}$$

$$E(t_{cpi}) = r \cdot \frac{t_{cpi} - \bar{t}_{cpi}}{\sqrt{\sum (t_{cpi} - \bar{t}_{cpi})^2}} \cdot \sqrt{\sum (E - \bar{E})^2} + \bar{E}$$

Результатом решения выражения (2.5) и (2.6) для статистических данных, будет линейные уравнения $E(N_{ei}) = 0,01773 \cdot N_{ei} + 3,5772$, $E(t_{cpi}) = 0,00474 \cdot t_{cpi} + 1,08$.

Полученные функции представляет собой математическую зависимость расхода электроэнергии от количества вагонов, перерабатываемых за смену (Рисунок 2.5) и расхода электроэнергии от температуры воздуха на станции (Рисунок 2.6). В полученном уравнении линейные коэффициента $a = 0,01773$ определяет потери электроэнергии, которую потребляет компрессорная станция на единицу переработанного вагона. С помощью этого коэффициента можно прогнозировать с определенной доверительной вероятностью затраты электроэнергии при определенном количестве вагонов. Коэффициент $b = 3,5772$ показывает, какое количество электроэнергии будет затрачено на станции при отсутствии роспуска вагонов в смене, то есть 3,5772 кВт/ч. То есть эти расходы обусловлены средним потреблением энергии установками, которые не учтены в модели.

Таким образом, проведенный анализ статистических данных (потребляемой электроэнергии и количества вагонов, переработанных за смену и погодных условий) выявил корреляционную связь двух функций. На основе регрессионного анализа, была установлена функциональная зависимость этих величин.

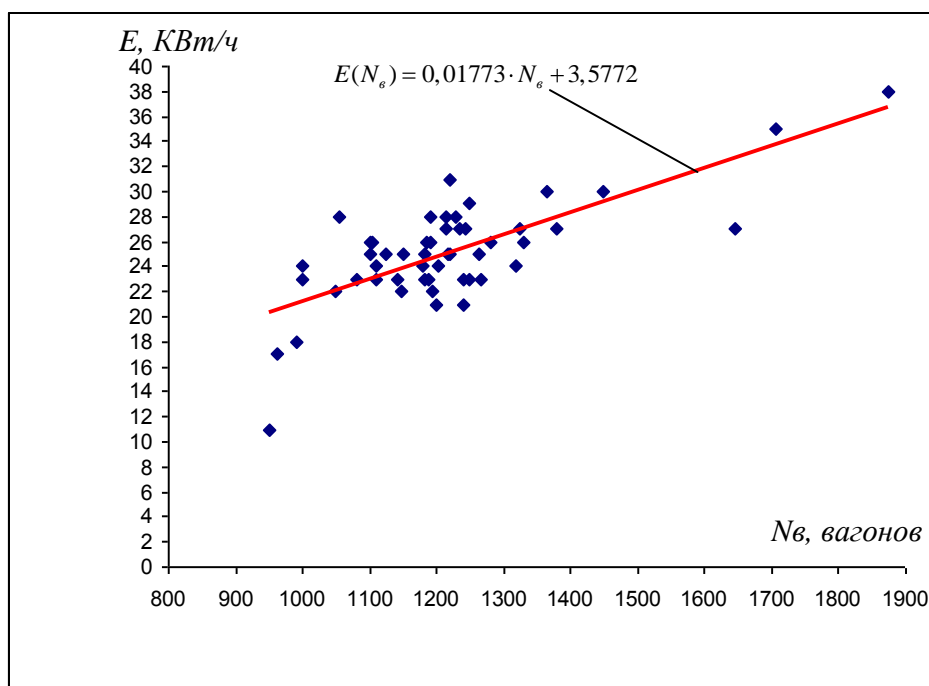


Рисунок 2.5 – График линейной зависимости потерь электроэнергии от количества распущенных вагонов, $E(N_b)$.

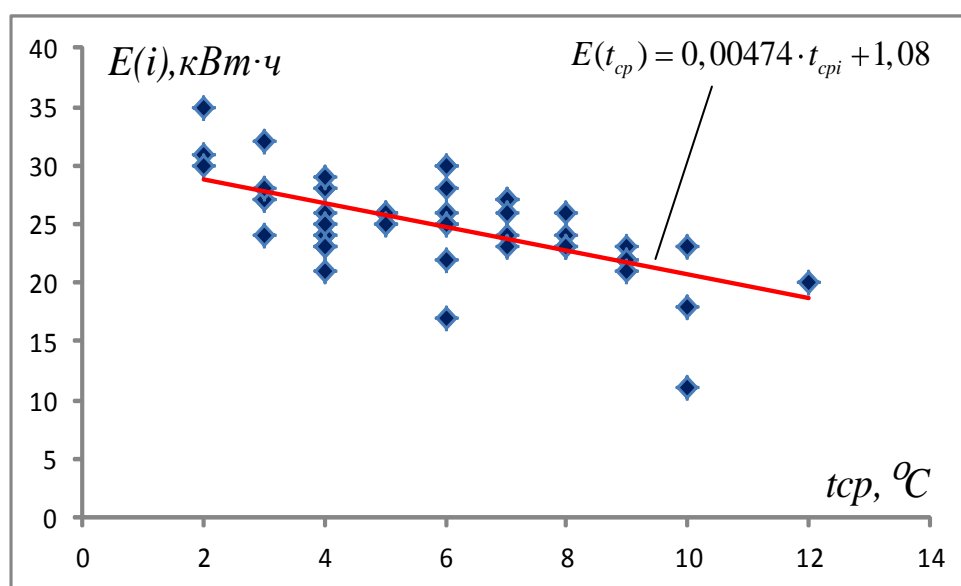


Рисунок 2.6 – График линейной зависимости потерь электроэнергии от количества распущенных вагонов, $E(t_{cp})$.

Полученная в результате анализа функциональная зависимость, может быть использована в качестве прогнозной модели расхода электроэнергии в зависимости от количества переработанных вагонов. С целью построения

многофакторной прогнозной динамической модели необходимо исследовать факторы влияющие на расход электроэнергии КУ и описать их математически.

2.2 Разработка динамической модели затрат энергии на роспуск поезда

Как рассмотрено ранее, основным потребителем электроэнергии на сортировочной горке (СГ) является компрессорная установка (КУ), которая оборудована системой автоматического управления. Такая система обеспечивает непрерывную генерацию сжатого воздуха, но не учитывает особенности технологического процесса [4, с.346]. Это приводит к значительным затратам энергии, что отображено в первой главе ив анализе работы [18]. С другой стороны, благодаря интенсивному развитию информационных систем на железнодорожном транспорте, данные об энергозатратах на СГ можно получить на этапе формирования поезда. Поэтому возникает вопрос разработки модели затрат энергии в прогнозном режиме. Решение этого вопроса позволит снизить энергозатраты на СС и повысить показатели безотказности агрегатов КУ. Для разработки прогнозной модели необходимо рассмотреть математическую модель затрат энергии на переработку одного вагона. Такая модель рассмотрена в работе [19] в виде энергетического баланса горки

$$H_G + h_{0(\max)} = h_w^{OX} + H_{T(\max)} + h_{из}, \quad (2.7)$$

где H_G – энергетическая высота горки, м;

$h_{0(\max)}$ – энергетическая высота, отвечающая максимальной расчетной скорости роспуска, м;

h_w^{OX} – энергетическая высота, обусловленная суммарным действием всех сил сопротивления роспуску при пробеге эталонного отцепа (ОХ), м;

$H_{T(\max)}$ – энергетическая высота, соответствующая общей затраченной энергии тормозных позиций, м;

$h_{нз}$ – разница отметок низа последней тормозной позиции и расчетной точки пути, м.

Если из уравнения (2.7) выразить $H_{T(\max)}$, то можно рассчитать максимальные затраты мощности всех замедлителей, которые приходятся на роспуск одного эталонного отцепа [20]. Недостатком такой модели является негибкость, то есть расчет ведется по критическим параметрам вагона, тем самым не учитываются индивидуальные особенности вагона. Это приводит к максимальному расходу электроэнергии КУ.

Для разработки динамической модели затрат энергии на сортировочной станции в зависимости от технологических параметров роспуска вагонов рассмотрены уравнения энергетического баланса горки. Из выражения (2.7) найдена мощность в метрах энергетической высоты $H_{T(\max)}$, которую потребляют замедлители на торможение одного вагона в наиболее сложных условиях (тяжелый отцеп, максимально заполненный путь приема):

$$H_{T(\max)} = H_{\Gamma} + h_{0(\max)} - h_w^{OX} - h_{нз}$$

После замены $H_{T(\max)}$ на H_{Tj} , $h_{0(\max)}$ на h_{0j} и h_w^{OX} на h_{wj} это уравнение можно использовать для всех типов вагонов при различных условиях расформирования. Стоит заметить, что j -ый индекс является порядковым номером вагона/отцепа, который указан в сортировочном листе. Тогда выражение для j -ого вагона/отцепа принимает вид:

$$H_{Tj} = H_{\Gamma} + h_{0j} - h_{wj} - h_{нзj}, \quad (2.8)$$

где H_{Tj} – энергетическая высота, соответствующая общей энергии тормозных позиций, затраченных на переработку j -го вагона, м;

h_{0j} – энергетическая высота, которая отвечает максимальной расчетной скорости роспуска для j -го вагона, м;

h_{wj} – энергетическая высота, обусловленная суммарным действием всех сил сопротивления роспуску при пробеге j -го вагона с горба горки до расчетной точки, м;

$h_{нзj}$ – разница отметок низа последней тормозной позиции и расчетной точки пути, м.

Распределение энергетических высот (2.8) на участке горки в процессе скатывания вагона горба на путь приема (расчетная точка) приведен на рисунке 2.8.

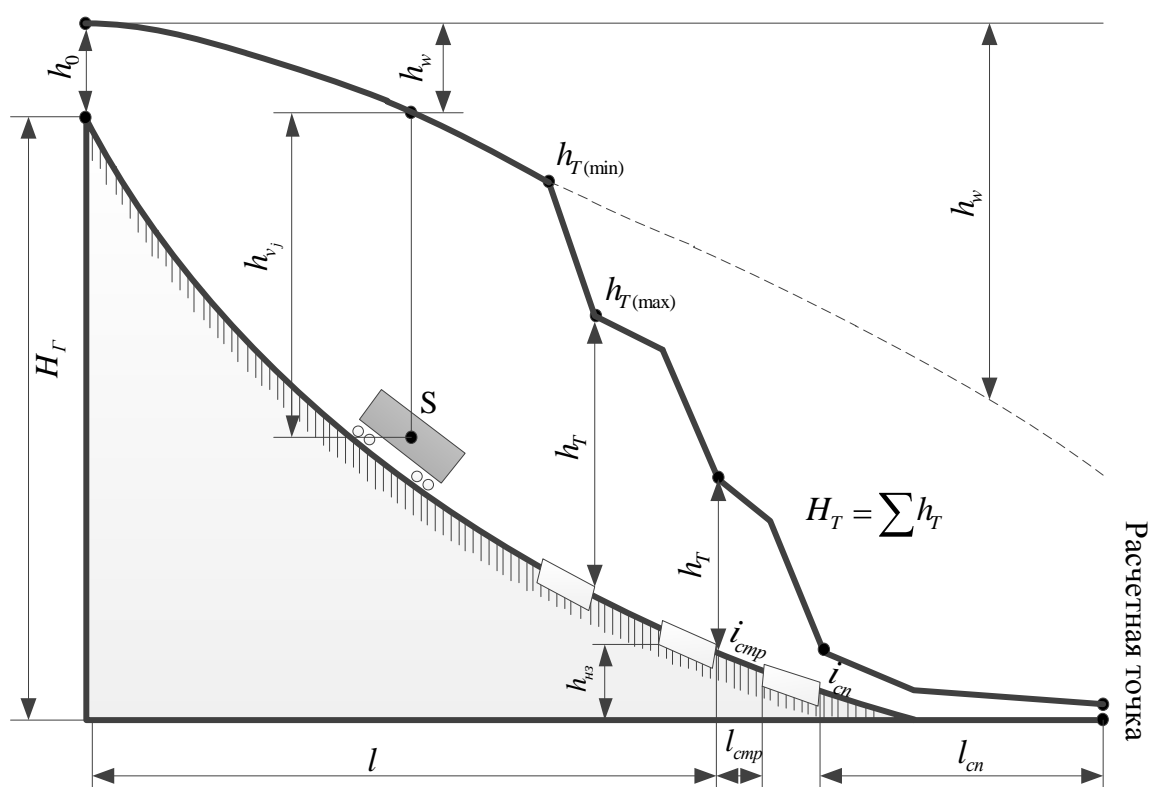


Рисунок 2.8 – Распределение энергетических высот на горке

Ниже рассмотрены составляющие уравнения (2.8).

Энергетическая высота h_0 , зависящая от скорости и веса отцепа, и является основной величиной, влияет на H_{Tj} :

$$h_{0j} = \frac{V_0^2}{2 \cdot g'}, \quad (2.9)$$

где V_0 – максимальная скорость роспуска отцепа (1,9–2,2 м/с);

g' – коэффициент, учитывающий ускорение свободного падения и инерцию

вращающихся механизмов вагона, $g' = \frac{g}{1-\gamma}$, $\gamma = \frac{420 \cdot n_j}{100 \cdot m_j}$,

где γ – коэффициент инерции оси;

n_j – количество осей вагона;

m_j – вес вагона брутто, т.

Поскольку уравнение (2.9) учитывает индивидуальные параметры вагона (величины m_j и n_j), то каждому отцепу, который скатывается с горки, присвоено соответствующее значение h_{0j} .

Второй величиной, которая влияет на значение H_T , является суммарное сопротивление роспуска вагона h_w . Она учитывает все сопротивления, которые действуют на отцеп на протяжении всего маршрута [20, с.201]

$$h_{wj} = 10^{-3} ((w_{0j} \pm w_{cpj})l + 9 \sum_{i=1}^m \alpha_{cni} + 20n_{cni}), \quad (2.10)$$

где w_{0j} – основное удельное сопротивление движению вагона весом m_j ;

w_{cpj} – сопротивление среды (ветер), которое влияет на движение вагона

$\left(\pm w_{cpj} = \frac{17,8C \cdot S}{(273+t^\circ)m_j} v^2 \right)$ или отцепа $\left(\pm w_{cpj} = \frac{17,8C \cdot S + \sum_{j=2}^n C_{xyf} S_j}{(273+t^\circ) \sum_{i=1}^n m_{ij}} v^2 \right)$, здесь коэффициенты S , C ,

$C_{xyf} S_j$ – табличные значения [21], зависят от марки вагона, знак \pm определяется направлением движения воздушных масс [20, с.201] (детально рассмотрены в третьем разделе работы);

l – длина пробега от вершины горки до конца последней тормозной позиции, м;

$\sum_{i=1}^m \alpha_{сп}$ – сумма углов поворотов на m стрелках, которые проходит отцеп по маршруту;

$n_{сп}$ – число стрелочных переводов по маршруту следования отцепа.

Множители в уравнении (2.10) являются вспомогательными удельными работами сил, которые приходятся на одну стрелку. Коэффициенты $S, C, C_{xxf} S_j$ – табличные значения [21, с.135], и зависят от марки вагона. Знак « \pm » определяется направлением движения воздушных масс.

На составляющую $h_{нзj}$ из уравнения (2.8), главным образом влияет длина свободного участка $l_{сп}$ пути назначения:

$$h_{нзj} = 10^{-3} (i_{сп} l_{сп} + i_{сн} l_{снj}), \quad (2.11)$$

где $i_{сп}$ – уклон стрелочного участка (1,5...2‰);

$l_{сп}$ – расстояния от конца последней тормозной позиции до граничного столбика наиболее удаленной стрелки, м;

$i_{сн}$ – уклон пути головы сортировочного парка;

$l_{снj}$ – расстояния от предельного столбика наиболее удаленной стрелки, до расчетной точки, м (Рисунок 2.8).

Анализ выражений (2.8), (2.9), (2.10) и (2.11) показывает, что основные переменные параметры, которые влияют на $H_{тj}$, – это вес и направление назначения вагона (т. е. путь на сортировочной станции). Обе характеристики можно получить из натурального листа для данного подвижного состава на этапе его формирования на станции отправления. Данные о весе вагонов образуют массив $M_{\epsilon} = m_{\epsilon j}, m_{\epsilon(j+1)}, \dots, m_{\epsilon m}$, где $m_{\epsilon j}$ – вес j -ого вагона, m – количество вагонов в составе. Каждому j -ому вагону, который будет скатываться на i -й путь ставится в

соответствие вектор длин $B_{ji} = \{b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jn}\}$, где b_{ji} – длина вагона n – количество путей назначений сортировочного парка.

Следует отметить, что во время роспуска вагонов только один элемент вектора имеет ненулевое значение. Это обусловлено тем, что после скатывания одного вагона (отцепа), занимается участок лишь одного пути СС, другие имеют постоянное значение длин свободных участков l_{cvi} . Таким образом l_{cvi} i -ом пути уменьшается на величину b_{ji} (Рисунок 2.9)

$$l_{cvi} = l_{cvi(j-1)} - b_{ji}. \quad (2.12)$$

Процесс заполнения вагонами участков путей сортировочной станции рассмотрен относительно вагонов. Для этого j -му вагону, который скатывается с горки, присвоены собственные векторы B_{ji} .

Тогда модель заполнения путей для каждого вагона на СС имеет вид

$$L_{cvi} = L_{cvi(j-1)} - B_{ji}, \quad (2.13)$$

где $L_{cvi} = \{l_{cvi1}, l_{cvi2}, \dots, l_{cvin}\}$ – одномерный массив данных свободы участков путей;

n – количество путей;

j – порядковый номер вагона.

На рисунке 2.9 приведена схема функционирования модели (2.13), поясняющая процесс заполнения сортировочного парка вагонами.

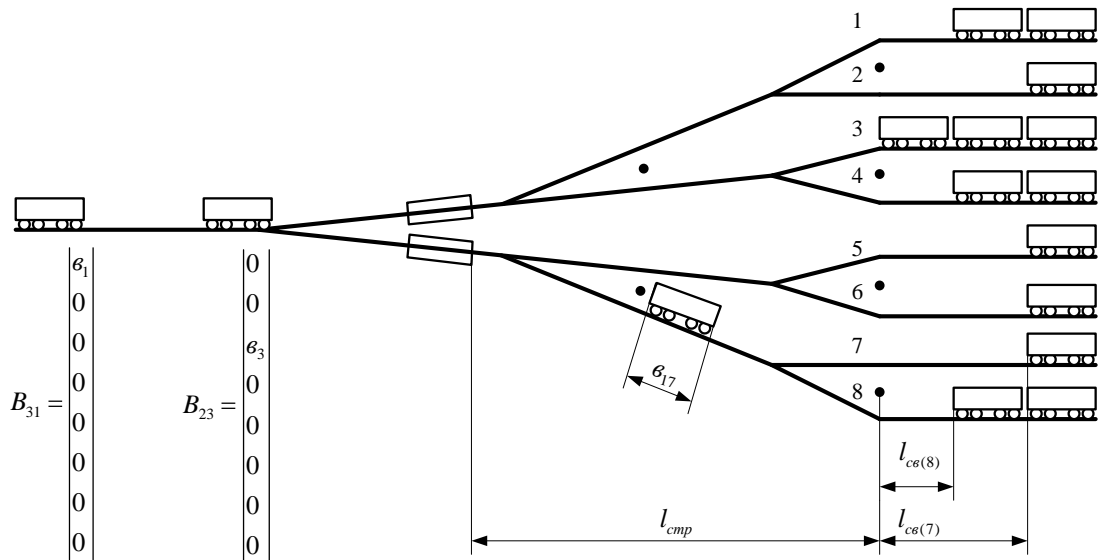


Рисунок 2.9 – Схема заполнения путей вагонами в процессе роспуска

На основании уравнений (2.8) - (2.13), а также учитывая статические и динамические характеристики вагонов, их направление и особенности профиля сортировочной горки, разработана динамическую модель энергетических затрат, которые приходится на торможение одного вагона:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_B = m_{Bj}, m_{B(j+1)}, \dots, m_{Bm} \\ L_{CBij} = L_{CB(i,j-1)} - B_{ji} \\ H_{Tj} = H_{\Gamma} + h_{0j} - h_{wj} - h_{H3j} \\ h_{0j} = \frac{(1 - 420n_j/100m_j)V_0^2}{2g} \\ h_{wj} = 10^{-3}[(w_{0j} \pm w_{cpj})l + 9 \sum_i^m \alpha_{cni} + 20n_{cni}] \\ h_{H3j} = 10^{-3}(i_{стр}l_{стр} + i_{св}l_{свj}) \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Система (2.14) может быть применена, как прогнозная модель (ПМ) затрат механической энергии, которая приходится на торможение одного вагона. Для этого должны быть известны весовые характеристики вагонов и их пути назначения. Эти данные могут быть получены до начала роспуска из сортировочного листа или считана с линии данных автоматизированной системы управления сортировочными станциями (АСУ СС).

Кроме того, суммируя соответствующие энергетические затраты замедлителей H_{Tj} , которые приходятся на роспуск вагонов, можно получить энергетические затраты замедлителей на расформирование подвижного состава

$$H_T = \sum_{j=1}^m H_{Tj} \cdot \quad (2.15)$$

Функционирование прогнозной динамической модели (2.14) и (2.15) без учета погодных условий рассмотрены на примере расформирования подвижного состава из 28 вагонов на сортировочной горке Ясиноватая Восточная (Донецкая область). Исходные данные, полученные из натурального и сортировочного листов к моменту начала роспуска состава, представлены в таблице 2.1. В таблице указаны весовые характеристики вагонов и их назначения (номер пути приема) сортировочной станции. Некоторые вагоны группируются в отцепы (первая колонка).

Таблица 2.1 – Порядок роспуска вагонов по путям назначения

№ отцепа	№ вагона	Вес вагона брутто m_{Bj} , т	№ пути приема
1	56133622	89	23
	53472494	69	23
2	24629354	22	12
3	68566157	91	2
4	52435450	85	3
5	65399909	22	12
6	24334880	22	28
7	59726778	22	3
8	57255614	22	12
9	53825709	62	11
10	66941253	62	12

Продолжение таблицы 2.1

11	24592545	78	12
	24592503	79	12
12	59900092	79	31
	58928663	79	31
13	54386990	91	23
	59929398	91	23
	44900850	91	23
	44938082	86	23
14	44194108	22	31
	44937050	22	31
	24631822	22	31
	68804269	22	31
	68478668	22	31
15	68621804	22	18
	68529676	22	18
	68612670	22	18
	68569326	22	18

Результаты расчета прогнозного распределения затрат энергии на торможение каждого вагона сведены в гистограмму (Рисунок 2.10). Из диаграммы видно, что энергия, затраченная замедлителями на роспуск вагона с меньшим весом на свободный путь минимальна. А при скатывании вагона с большим весом на занятый путь расходы энергии максимальны. При этом суммарная энергетическая высота, которую необходимо погасить (2.12) за время роспуска подвижного состава равен 171,612м.



Рисунок 2.10 – Расчетный прогноз затрат энергии на замедлителях при расформировании подвижного состава

Использование такой модели в составе комплекса технических средств управления компрессорными установками на сортировочной станции дает возможность оптимизировать затраты электроэнергии при расформировании подвижного состава. Для этого на этапе отправки состава на станцию расформирования, необходимо предусмотреть съем информации (количество вагонов, их весогабаритные параметры, тип и назначения) из системы автоматизированного управления сортировочной станцией (АСУ СС).

Как указана в корреляционном анализе [13, с.35], на затраты энергии КУ кроме технологических работ существенно влияет погодные условия. Поэтому необходимо детально проанализировать влияния температуры, силы и направления ветра на процесс роспуска вагонов и как следствие на энергозатраты в целом. После чего усовершенствовать модель (2.14) с учетом прогнозных данных погоды на станции.

2.3 Анализ влияния воздушных масс на скатывающийся отцеп

Как установлено в статье [13, с.38] основным фактором, влияющим на затраты электроэнергии сортировочной станции, является технологический процесс роспускасоставов. В свою очередь, на процесс роспуска вагонов действуют и метеорологические условия (ветер, осадки, температура).

В работе [18,с.43, 22] рассмотрены комплексные воздействия этих параметров на суммарный показатель затраченной энергии при роспуске состава. Однако вопросы влияние метеорологических факторовна объект детально не были рассмотрены.

Более полно влияние ветра относительно скатываемого отцепа было рассмотрено в [23]. Так, в уравнении в определении сопротивления отцепа при скатывании была введена величина - дополнительное удельное сопротивление воздушной среды, которая учитывала угол и силу ветра.

Воздействия воздушных масс на движущийся объект достаточно тщательно изучается в аэронавигации. Так, в работах [24] подробно рассмотрены влияния угла и силы ветра, в зависимости от маршрута движения и скорости самолета. Изложенные принципы в [25] могут быть применены и в случае скатывания вагона по маршруту с горба горки.

Известно, что воздушные массы постоянно движутся относительно земной поверхности в горизонтальном и вертикальном направлениях. Горизонтальное движение воздушных масс называется ветром [26]. Ветер характеризуется двумя параметрами, которые поддаются метеорологическому прогнозу: скоростью и направлением.

Существует два понятия о направлении ветра: навигационное и метеорологическое. Навигационным направлением ветра (НВ) называется угол, заключенный между северным направлением магнитного меридиана и направлением в точку, куда дует ветер [24, с.31]. Отсчитывается оно от северного направления магнитного меридиана по часовой стрелке от 0 до 360° (Рисунок 2.11).

Метеорологическим направлением ветра называется угол, заключенный между северным направлением меридиана и направлением из точки, откуда дует ветер. Обычно на метеостанции отсчитывают метеорологическое направление ветра относительно северного направления истинного меридиана, то есть угол d_u (Рисунок 2.11).

Для навигации подвижных единиц наземного транспорта используют метеорологическое направление ветра.

Скорость ветра $\vec{V}_{вет}$ называется скоростью движения воздушных масс относительно земной поверхности. Скорость ветра удобно измерять в метрах в секунду.

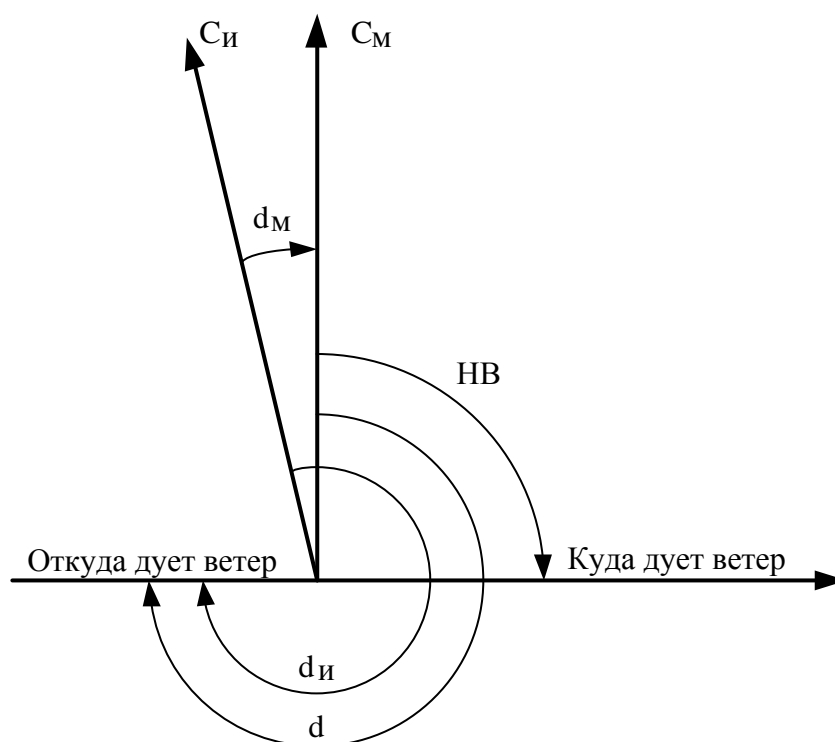


Рисунок 2.11– Навигационное и метеорологическое направление ветра.

Рассмотрим воздействия выше перечисленных параметров на скорость роспуска отцепа скатывающегося с горба горки по маршруту.

Вагон перемещается со скоростью, заданной его энергетической высотой, в направлении своей продольной оси. Одновременно под действием ветра он перемещается вместе с воздушной массой в направлении и со скоростью ее движения. В результате, его движение относительно поверхности будет

происходить по равнодействующей, построенной на слагаемых скоростях отцепа и ветра. Таким образом, при скатывании с боковым ветром векторы воздушного усилия, путевой скорости и скорости ветра образуют треугольник (Рисунок 2.12), который назовем треугольником скоростей. Каждый вектор характеризуется направлением и величиной. Стоит заметить, что результирующая скорость скатывания зависит от типа вагона и его весовой характеристики.

Рассмотрим детально диаграмму (Рисунок 2.12) и введем некоторые понятия.

Вектор путевой скорости $\vec{V}_{пут}$ (м/с), определяет направление и скорость движения вагона относительно земной поверхности. Его направление определяется путевым углом $\varphi_{пут}$ (град), а величина — значением путевой скорости $V_{пут}$ (м/с).

Вектор скорости ветра $\vec{V}_{вет}$ (м/с), определяет направление и скорость движения воздушной массы относительно земной поверхности. Его направление определяется направлением ветра $\varphi_{вет}$ (град), а величина — значением его скорости $V_{вет}$ (м/с).

Вектор скорректированной скорости $\vec{V}_{скор}$ (м/с), определяет скорость движения вагона под действием воздушных масс. Его направление определяется маршрутом отцепа и направлением ветра, а величина — скоростью ветра и скоростью отцепа. Вектор скорректированной скорости образуется суммой вектора ветра и вектора путевой скорости. $\vec{V}_{скор} = \vec{V}_{вет} + \vec{V}_{пут}$. Это результирующий вектор скорости, который воздействует на отцеп и определяет его ускорения или замедление.

Угол сноса $\varphi_{си}$ — угол между вектором фактической скорости отцепа $\vec{V}_{пут}$ и вектором скорректированной скорости $\vec{V}_{скор}$. Отсчитывается от продольной оси маршрута до вектора скорректированной скорости вправо со знаком плюс и влево со знаком минус. Зачастую этот угол может определять степень прижатия реборды колеса к головки рельса, что обеспечивает торможения отцепа.

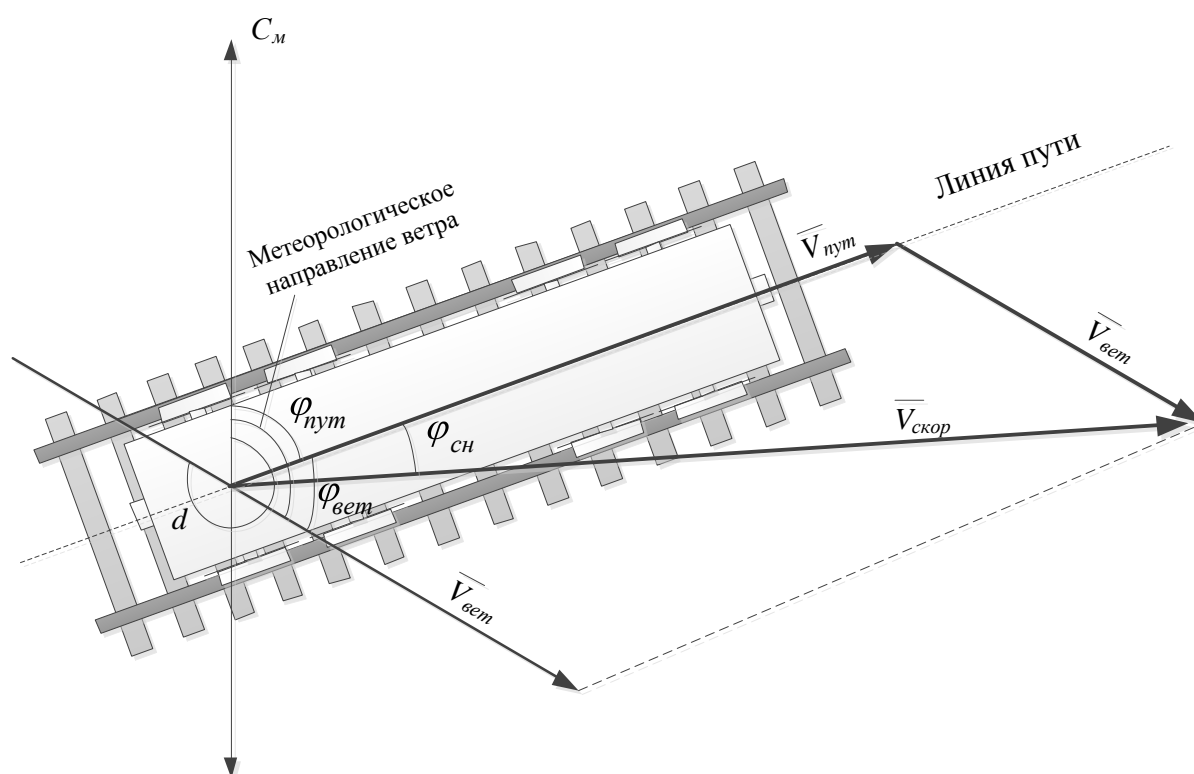


Рисунок 2.12 – Треугольник скоростей и его элементы

Угол ветра $\varphi_{вет}$ – угол, заключенный между фактической линией пути и метеорологическим направлением ветра. Отсчитывается от линии пути до направления ветра по ходу часовой стрелки от 0 до 360°.

Магнитный путевой углом $\varphi_{пут}$ – угол, заключенный между северным направлением магнитного меридиана и линией фактического пути. Отсчитывается от северного направления магнитного меридиана до линии пути по ходу часовой стрелки от 0 до 360°.

Между элементами навигационного треугольника скоростей существует следующая зависимость:

$$\bar{V}_{вет} = V_{вет} \cdot \cos(\varphi_{вет}); \quad (2.16)$$

$$\bar{V}_{скор} = V_{вет} \cdot \cos(\varphi_{вет}) + V_{пут} \cdot \cos(\varphi_{пут}); \quad (2.17)$$

$$\varphi_{вет} = d \pm 180^\circ - \varphi_{пут}, \quad (2.18)$$

$$\bar{V}_{\text{скор}} = V_{\text{скор}} \cdot \cos(\varphi_{\text{сн}}), \quad \varphi_{\text{сн}} = \arccos \frac{\bar{V}_{\text{скор}}}{V_{\text{скор}}}, \quad (2.19)$$

2.3.1 Зависимость угла сноса и результирующей скорости от путевой скорости

Из выражения (2.17) видно, что при неизменном ветре ($V_{\text{вет}} = \text{const}$, $\varphi_{\text{вет}} = \text{const}$) и направлении движения отцепа ($\varphi_{\text{нум}} = \text{const}$), результирующая скорость $V_{\text{скор}}$ изменяется соответственно изменению путевой скорости $V_{\text{нум}}$, то есть с увеличением путевой скорости результирующая скорость становится больше, а с уменьшением — меньше (Рисунок 2.13).

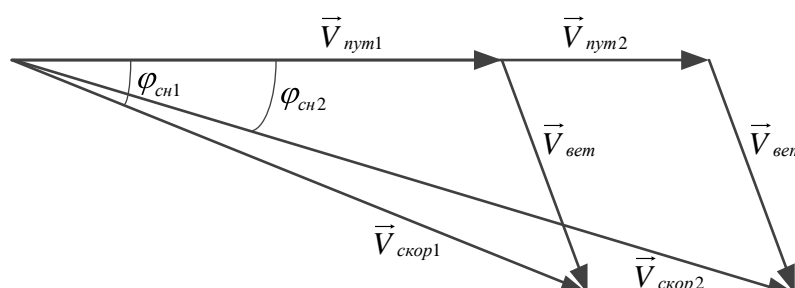


Рисунок 2.13 – Зависимость угла сноса и результирующей скорости от изменения скорости отцепа.

В этом случае изменение скорости скатывания отцепа вызывает пропорциональное изменение вектора скорректированной скорости. Пропорциональность этого подтверждается в выражении (2.17), если записать его с учетом неизменных величин

$$\bar{V}_{\text{скор}} = V_{\text{вет}} \cdot \cos(\varphi_{\text{вет}}) + (V_{\text{нум}} + \Delta V_{\text{нум}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{нум}}),$$

где $V_{\text{вет}} = \text{const}$, $\varphi_{\text{вет}} = \text{const}$, $\varphi_{\text{нум}} = \text{const}$.

Угол сноса с возрастанием скорости отцепа уменьшается, а с ее уменьшением – увеличивается (2.19).

2.3.2 Зависимость угла сноса и результирующей скорости от скорости ветра

При постоянной путевой скорости ($V_{нум} = const$) и маршруте скатывании ($\varphi_{нум} = const$) с увеличением скорости ветра угол сноса увеличивается, а при ее уменьшении – уменьшается (Рисунок 2.14а).

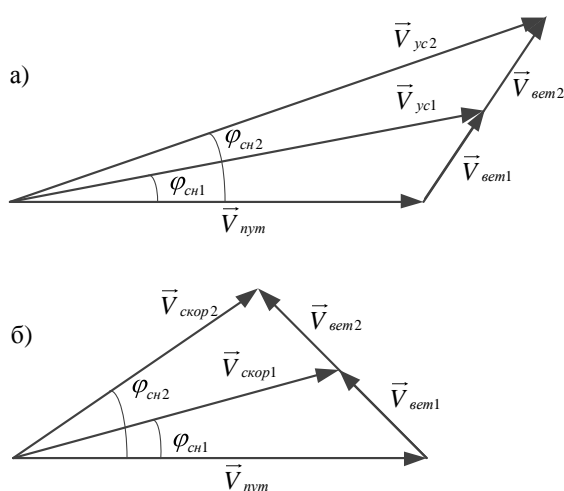


Рисунок 2.14 – Зависимость угла сноса и результирующей скорости отцепа от изменения скорости ветра: а–при попутно-боковом; б – при встречно-боковом ветре.

Результирующая скорость при попутном и попутно-боковом ветре с изменением скорости ветра изменяется так же, как и угол сноса. При встречном и встречно-боковом ветре с увеличением скорости ветра результирующая скорость уменьшается, а с уменьшением – увеличивается.

Аналитически запись результирующего вектора скорости в зависимости от изменения силы ветра имеет вид

$$\vec{V}_{снор} = V_{вет} \cdot \cos(\varphi_{вет} + \Delta\varphi_{вет}) + V_{нум} \cdot \cos(\varphi_{нум}),$$

где $V_{пут} = const$, $\varphi_{пут} = const$.

2.3.3 Зависимость угла сноса и результирующей скорости от угла ветра

Угол ветра на протяжении скатывания отцепа может менять свое значение. Его величина изменяется, как вследствие изменения направления ветра, так и вследствие изменения направления движения вагона по маршруту сортировочной станции.

Отложим в определенном масштабе вектор путевой скорости, как показано на рисунке 2.15. Из конца этого вектора радиусом, равным скорости ветра в том же масштабе, опишем окружность.

Если перемещать вектор ветра по ходу часовой стрелки, то угол ветра будет изменяться. Тогда угол сноса и результирующая скорость будут зависеть от угла ветра следующим образом:

- а). При $\varphi_{вет} = 0^\circ$ (ветер попутный) $\varphi_{сно} = 0^\circ$, $V_{скор} = V_{вет} + V_{пут}$;
- б). При увеличении угла ветра от 0 до 90° угол сноса увеличивается, а скорректированная скорость уменьшается;
- в). При $\varphi_{вет} = 90^\circ$ (ветер боковой) угол сноса максимальный, а скорректированная скорость примерно равна путевой;
- г). При увеличении угла ветра от 90 до 180° , угол сноса и скорректированная скорость уменьшаются;
- д). При $\varphi_{вет} = 180^\circ$ (ветер встречный) $\varphi_{сно} = 0^\circ$, а $V_{скор} = V_{пут} - V_{вет}$;
- е). При увеличении угла ветра от 180 до 270° угол сноса и путевая скорость увеличиваются.
- ж). При $\varphi_{вет} = 270^\circ$ (ветер боковой) угол сноса максимальный, а путевая скорость примерно равна воздушной скорости.
- з). При увеличении угла ветра от 270 до 360° угол сноса уменьшается, а путевая скорость увеличивается.

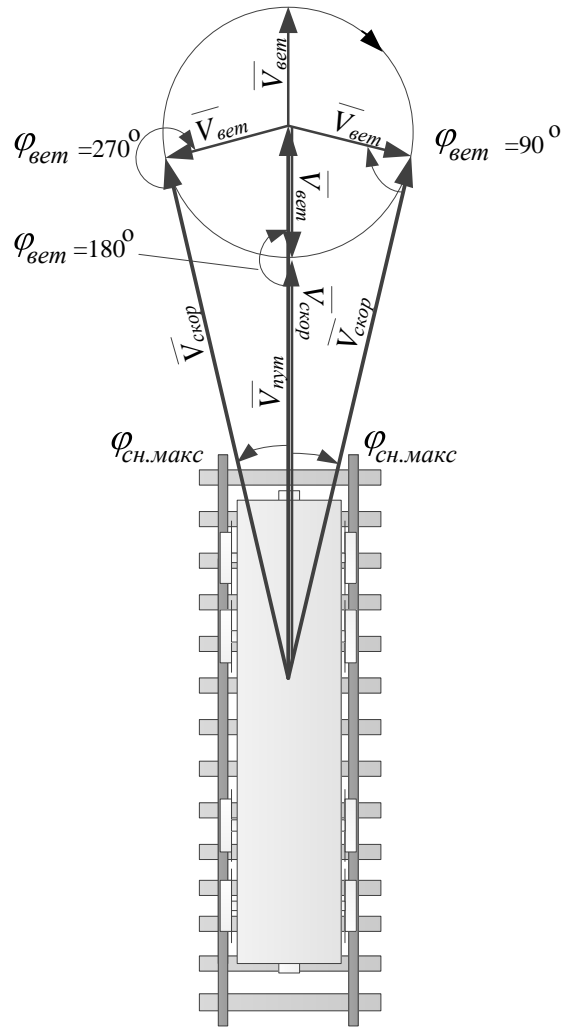


Рисунок 2.15 – Зависимость угла сноса и результирующей скорости отцепа от угла ветра.

2.3.4 Влияние угла съезда и воздушных масс на отцеп по маршруту движения

Сортировочные горки имеют неизменную направленность спускной части, а отклонения на путь приема сортировочной станции имеют не большой угол съезда $\varphi_{сзд}$. Этот угол лежит между продольной осью спускной части и осью пути отклонения на путь приема. Определяется он крутизной стрелки и количеством путей приема.

Рассмотрим процесс спуска отцепа с хорошими ходовыми показателями (тяжелый вагон или группа вагонов) с горба горки на крайней боковой путь. Для

станции Ясиноватая восточная угол съезда на этот путь составляет $\varphi_{сзд} = 11^\circ$ (Рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Снимок со спутника спускной части горки станции Ясиноватая восточная

Заметим, что $\varphi_{сзд}$ является, частным случаем вектора пути $\varphi_{путь}$ (Рисунок 2.17). Поэтому выражение результирующей скорости отцепа движущегося по пути отклонения будет иметь вид

$$\vec{V}_{скор} = V_{вет} \cdot \cos(\varphi_{вет}) + V_{путь} \cdot \cos(\varphi_{путь} + \varphi_{сзд}).$$

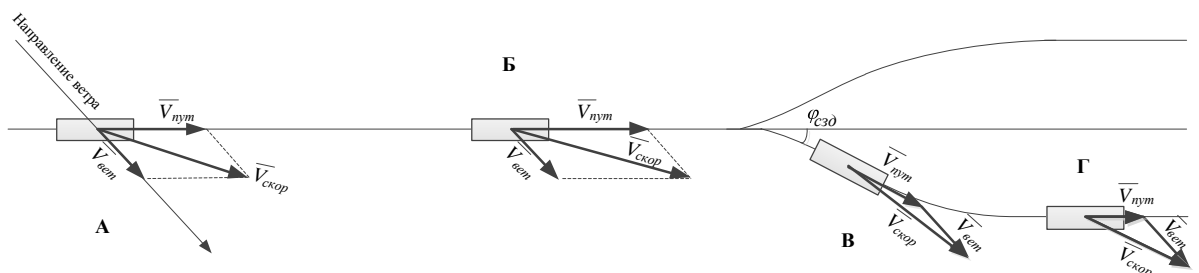


Рисунок 2.13 – Влияния ветра на отцеп в маршруте А-Б-В-Г

На скатывающийся вагон действует попутно-боковой ветер. Его скорость и угол на протяжении всего маршрута остаются постоянными.

На начальном этапе (точка **A**) скорость вагона равна $\bar{V}_{\text{пут}}$, результирующая скорость равна $\bar{V}_{\text{скор}}$. Хорошие ходовые характеристики отцепа и ветер способствуют увеличению скорости скатывания (точка **B**)

$$\bar{V}_{\text{скор}} = V_{\text{вет}} \cdot \cos(\varphi_{\text{вет}}) + (V_{\text{пут}} + \Delta V_{\text{пут}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{пут}}).$$

В точке **B**, после торможения, вагон катиться с уменьшенной скоростью по пути отклонения. Поэтому его путевой вектор скорости будет иметь вид $\bar{V}_{\text{пут}} = (V_{\text{пут}} - \Delta V_{\text{пут}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{пут}} + \varphi_{\text{сзд}})$, а результирующий вектор скорости

$$\bar{V}_{\text{скор}} = V_{\text{вет}} \cdot \cos(\varphi_{\text{вет}}) + (V_{\text{пут}} - \Delta V_{\text{пут}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{пут}} + \varphi_{\text{сзд}})$$

Стоит заметить, в случае, когда вагон скатывается на левый крайний путь, его угол съезда $\varphi_{\text{сзд}}$ имел бы отрицательное значение.

В точке **Г** вагон теряет свою энергию (путевая скорость снизилась). Силы ветра недостаточно, чтобы поддерживать скатывания тяжелого отцепа. Угол сноса возрос, тем самым вектор $\bar{V}_{\text{скор}} \approx \bar{V}_{\text{вет}}$ и оказывает меньше влияния на скоростные характеристики вагона. Вагон начинает останавливаться.

Уравнения вектора результирующей скорости вагона в точке **Г** имеет вид

$$\bar{V}_{\text{скор}} = V_{\text{вет}} \cdot \cos(\varphi_{\text{вет}}) + (V_{\text{пут}} - \Delta V_{\text{пут}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{пут}}), V_{\text{пут}} - \Delta V_{\text{пут}} \approx 0.$$

Просуммируем между собой каждый путевой вектор скорости и скорректированный вектор скорости (Рисунок 2.17).

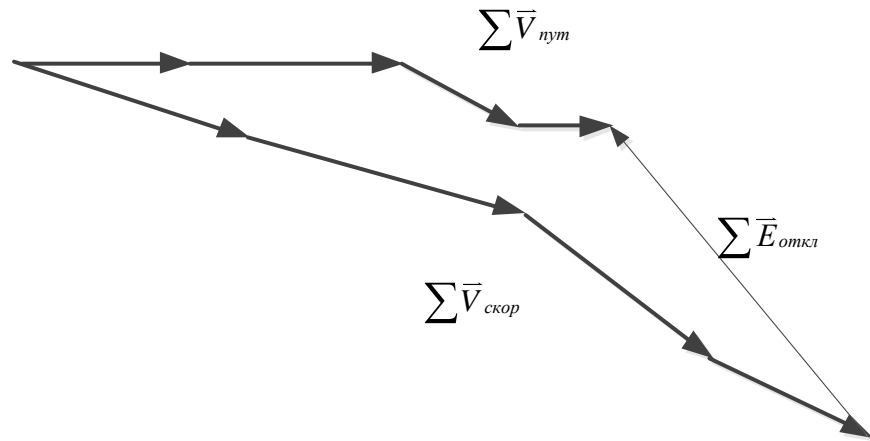


Рисунок 2.17 – Сумма векторных скоростей скатывающегося вагона по маршруту А-Б-В-Г

Верхняя сумма $\sum \bar{V}_{пут}$ является векторной диаграммой скоростей отцепа, скатывающегося по маршруту А-Б-В-Г без учета ветра.

Нижняя сумма $\sum \bar{V}_{скор}$ является векторной диаграммой скорректированной скорости скатывающегося отцепа по маршруту А-Б-В-Г, то есть скорости отцепа с учетом влияния ветра.

Разность между этими векторами, примем за суммарный вектор отклонения $\sum \bar{E}_{откл}$, который обусловлен влиянием ветра на протяжении всего маршрута. Этот вектор по своей величине равен сумме действующих значений ветра, но противоположный по направлению. Или, это суммарная энергия, которую необходимо передать вагону для компенсации влияния воздушных масс на заданном интервале пути следования

$$\bar{E}_{откл} = V_{вет} \cos(\varphi_{вет}).$$

2.3.5 Модель влияния воздушных масс на отцеп с заданными весогабаритными параметрами и типом.

В выражении (2.14), не учтены весогабаритные параметра вагона, которые определяют парусность и инерцию при воздействии ветра. Поэтому рассмотрим эту модель с учетом анализа влияния воздушных масс на движущийся отцеп.

Выражения (2.20) и (2.21) описывает влияния погодных условий на скатывающийся вагон и отцеп соответственно

$$\pm w_{cp} = \frac{17,8C_x \cdot S}{(273+t^o)m} V_{скор}^2, \quad (2.20)$$

$$\pm w_{cp} = \frac{17,8C \cdot S + \sum_{j=2}^n C_{xyf} S_j}{(273+t^o) \sum_{i=1}^n m_i} V_{скор}^2, \quad (2.21)$$

где w_{cp} – сопротивление среды (ветер), которое влияет на движение вагона или отцепа;

C_x – коэффициент обтекаемости одиночных вагонов или первого вагона в отцепе (табличное значение);

C_{xyf} – коэффициент обтекаемости вагонов в отцепе (кроме первого вагона) (табличное значение);

S, S_j – площадь поперечного сечения соответственно одиночного или первого вагона в отцепе и последующих вагонов в отцепе, m^2 (табличное значение);

m – масса вагона, т;

$\sum_{i=1}^n m_i$ – масса, отцепа состоящего из n вагонов, т;

t^o – прогнозная температура воздуха, $^{\circ}C$;

$\bar{V}_{скор}$ – скорректированная скорость отцепа, м/с.

Выражения (2.20) и (2.21) представляет собой затраты энергии при скатывании вагона с весом m на преодоления влияния метеорологических условий окружающей среды.

Как видно зависимость энергии w_{cp} от $\vec{V}_{скор}$ пропорционально- квадратичная. То есть, при попутном ветре скоростью $V_{скор}$, необходимо затратить энергии $w_{cp} = k \cdot V_{скор}^2$, где k – комплексное значение веса-габаритных параметров вагона или отцепа.

Знак «-» или «+» перед выражениях (2.20) и (2.21) означает какую реакцию оказывает ветер на отцеп: «+» - вагон ускоряется под действием попутных воздушных масс; «-»- вагон замедляется под действием встречных воздушных масс. Для пояснения на рисунке 2.18 представлено графическое правило определения знака перед значением w_{cp} .

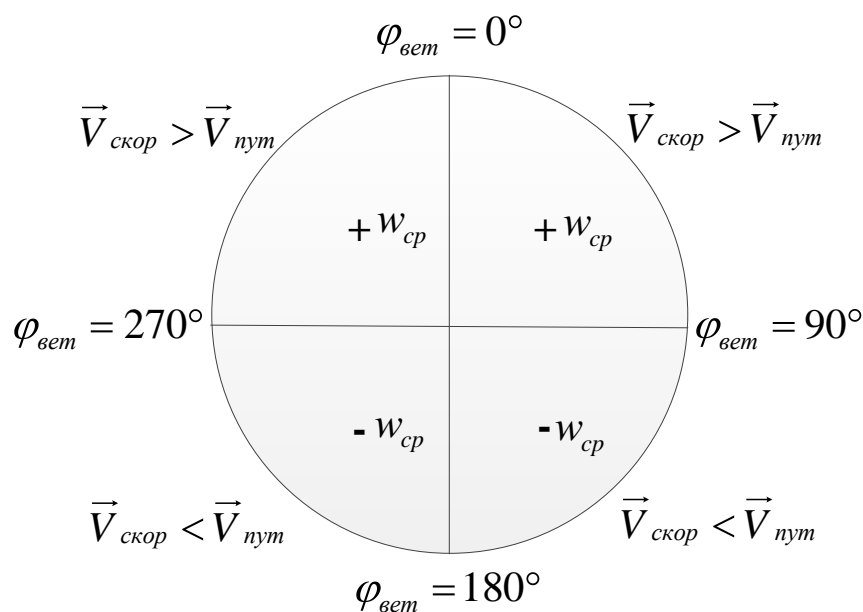


Рисунок 2.18 – Графическое определения знака величины w_{cp}

Построим трехмерную плоскость $w_{cp} = f(V_{вет}, \varphi_{вет})$ зависимости затрат энергии от силы и направления ветра (Рисунок 2.19), для крытого вагона массой 65т и температурой окружающей среды $25^\circ C$.

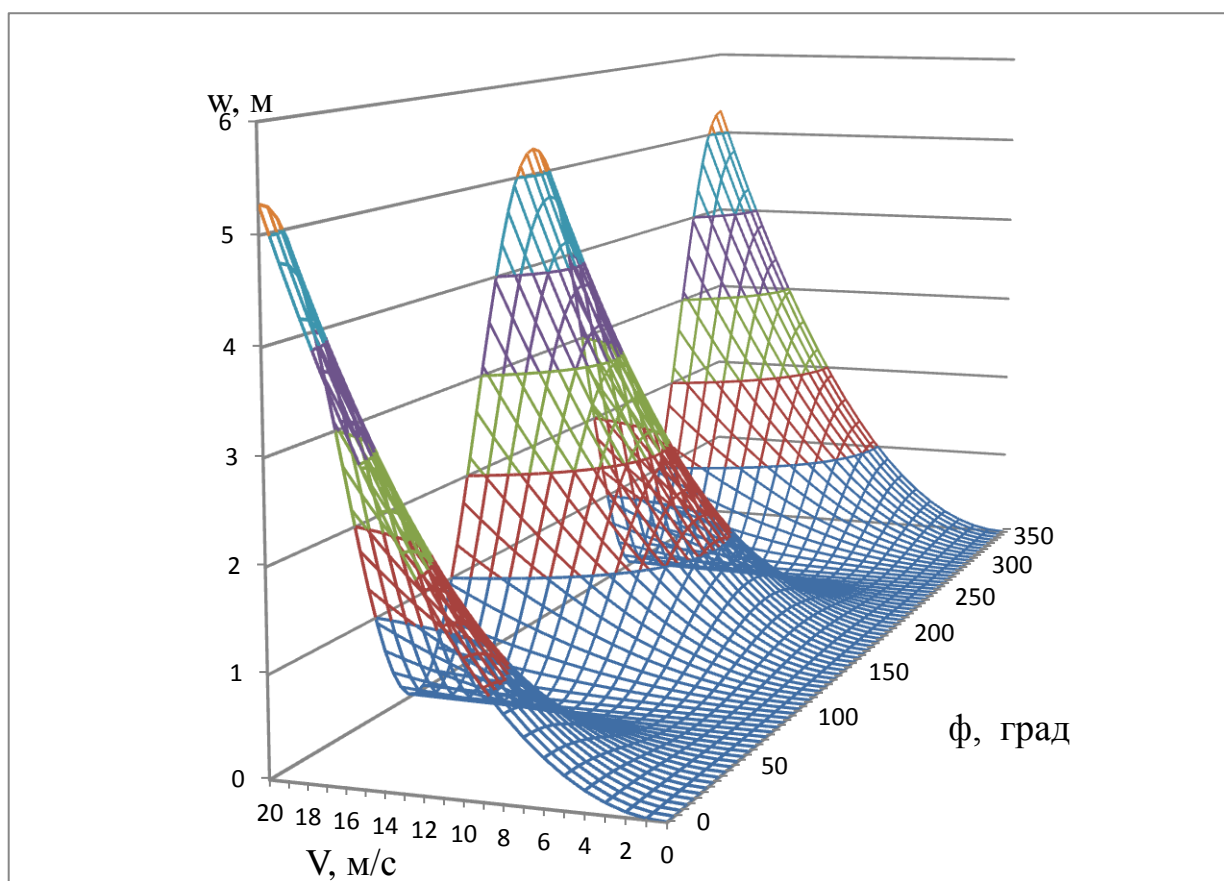


Рисунок 2.19 – График функции $h_w = f(V_{вет}, \varphi_{вет})$

Из графика видно, что при силе ветра $V_{вет} = 20 \text{ м/с}$ и угле $\varphi_{вет} = 30^\circ$ (попутно-боковой ветер) крытому вагону весом 65 т необходимо сообщить энергию 3,955м. Эта энергия направлена на погашения кинетической энергии вагона

$$h_w = h_0 + w_{cp},$$

где h_w – общее сопротивления движению скатывающегося вагона, h_0 – энергия, затраченная на торможение вагона, в безветренную погоду.

При силе ветра $V_{вет} = 20 \text{ м/с}$ и угле $\varphi_{вет} = 210^\circ$ (встречно - боковой), затраты энергии $w_{cp} = -3,955 \text{ м}$ (Рисунок 2.14). В этом случае

$$h_w = h_0 - w_{cp}.$$

Анализ влияния ветра на процесс скатывания отцепа с горба горки показал, что параметры ветра: скорость и его направление в значительной мере влияют на скоростные показатели вагона. Поэтому в разделе была разработана математическая модель влияния ветра на скорость скатывания отцепа и модель затрат энергии на торможения отцепа, на который воздействует ветер. Эта модель позволила скорректировать систему (2.14) с учетом влияния погодных условий на скатывающийся отцеп

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\epsilon} = m_{\epsilon j}, m_{\epsilon(j+1)}, \dots, m_{\epsilon m} \\ L_{\epsilon \epsilon(j+1)} = L_{\epsilon \epsilon j} - B_j \\ H_{Tj} = H_{\Gamma} + h_{0j} - h_{wj} - h_{нзj} \\ h_{0j} = \frac{(1 - 420n_j / 100m_j)V_0^2}{2g} \\ h_{wj} = 10^{-3} \left((w_{0j} \pm \frac{17,8C \cdot S + \sum_{j=2}^n C_{xyf} \cdot S_j}{(273 + t^o) \sum_{i=1}^n m_i} V_{\text{скор}}^2) l + 9 \sum_i^m \alpha_{\text{cni}} + 20n_{\text{cni}} \right) \\ h_{нзj} = 10^{-3} (i_{\text{cmp}} l_{\text{cmp}} + i_{\epsilon \epsilon} l_{\epsilon \epsilon j}) \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Опираясь на данные натурального листа, которые можно получить от системы АСУ СС и метеорологические данные, полученные с метеостанций, такие модели позволяют прогнозировать затраты электроэнергии на сортировочной горке с большой точностью. Это необходимо для определения необходимой интенсивности работы КУ перед началом технологических работ и вовремя их.

2.4 Выводы по разделу 2

1. Проведен статистический анализ данных технологических работ, погодных условий и затрат электроэнергии на станции. В результате анализа установлена сильная корреляционная связь между факторами: энергозатрат и количество перерабатываемых вагонов, а также энергозатрат и погодных условий.

Это дало возможность построить регрессионную функцию, которая может быть применена, как прогнозная модель энергозатрат на сортировочной станции.

2. Проведён анализ энергозатрат на сортировочной станции при торможении скатывающегося вагона/отцепа с горба горки. На основе анализа выявлены факторы, влияющие на определение необходимого тормозного усилия и разработана математическая прогнозная модель энергозатрат на станции с учетом факторов технологических работ.

3. Проведен анализ влияния погодных условий на скатывания вагона/отцепа с горба горки. Это дало возможность учесть погодные условия в математической прогнозном модели энергозатрат на станции.

4. Используя реальные данные сортировочного листа и прогноза погоды доказана адекватность математической прогнозном модели энергозатрат на сортировочной станции Ясиноватая восточная.

РАЗДЕЛ 3

СИНТЕЗ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ НА СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКЕ

3.1 Функциональная модель затрат электроэнергии на роспуск вагонов

Рассмотренная модель (2.18) может быть использована в качестве прогнозной для построения адаптивной системы. Достоинством такой системы является то, что для получения результирующего значения искомого параметра H_{Tj} (энергетические затраты на торможения j -ого отцепа или вагона) можно получить на этапе прибытия состава на станцию расформирования [27].

Входные параметрами этой модели формируются задолго до начала роспуска. К таким параметрам относятся данные принятые из системы АСУ СС и метеорологических станций: характеристики вагона (тип, вес, путь назначения), число вагонов в отцепе, температура, скорость и направления ветра, предполагаемые осадки. Остальные данные определяются косвенно или берутся из таблиц.

Для повышения точности весовые и скоростные показатели могут вычисляться фактически при роспуске. В таком случае система способна корректировать результирующие значения H_{Tj} с учетом давления в воздухохранильнике пневмосистемы.

Рассмотрим работу система автоматического управления производительностью компрессорной установки в процессе технологических работ на сортировочной горке. Для этого на рисунке 2.17 изображены три зависимости $P(t)$ – давление в магистрали, $Q(t)$ – производительность КУ, $E(t)$ – электрические затраты поршневых компрессоров.

На графике установлены следующие логические зависимости:

- $P(t)$ отражает зависимость давления в коллекторе в зависимости от событий технологического процесса и от производительности $Q(t)$ в период восстановления воздуха;

- $Q(t)$ является производительностью, которая сводится к скорости вращения вала двигателя КУ и зависит от фактического значения $P(t)$ и от принятых данных от АСУ СС [28];

- $E(t)$ зависит от производительности $Q(t)$ по формуле $E(t) = E_{\max} \cdot \left(1 - \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\max}}\right)^3$.

В нулевой момент времени система находится в нерабочем состоянии, технологические операции на станции отсутствуют, приводы КУ отключены от системы питания.

В момент времени $t_{\text{инф}}$ система получает информацию от АСУ СС о предстоящем роспуске состава. К моменту времени $t_{\text{обр}}$ заканчивается обработка данных и производится запуск компрессорной установки по рассчитанному алгоритму.

Результатом работы КУ с момента времени $t_{\text{обр}}$ является полное восстановление заданного уровня давления $P_{\text{зад}}$ по рассчитанному $Q_{\text{зад}}$. На это потребуется время $t_{\text{восст}}$. Это время полного восстановления уровня давления $P_{\text{зад}}$ в воздушной магистрали системы. Показатель $t_{\text{восст}}$ является основным, определяющий инерционность системы. Так например, для компрессорной станции оборудованной компрессорами ВП-20/9 УХЛ4 с производительностью $Q_{\text{ку}} = 22 \text{ м}^3/\text{мин}$ и объемом воздухопосборника $V_{\text{ресив}} = 10 \text{ м}^3$ и трубопровода $V_{\text{труб}} = 1 \text{ м}^3$ время полного восстановления уровня давления $P_{\text{ном}} = 7,9 \text{ атм}$ составляет

$$\Delta t_{\text{восст}} = P_{\text{зад}} \cdot \frac{(V_{\text{ресив}} + V_{\text{труб}})}{Q_{\text{ку}}}, \quad (3.1)$$

Таким образом, $\Delta t_{\text{восст}} = 7,9 \cdot \frac{(10+1)}{22} = 3,95 \text{ мин}$ компрессор ВП-20/9 УХЛ4 способен за 4 минуты выйти на номинальное значение давления в магистрали (Рисунок 3.1, 3-7 минута).

В рабочем режиме воздушной системы производится детерминированный отбор воздуха потребителем. Это происходит в интервалах времени $t_{отб(н)1}, t_{отб(н)2}, t_{отб(н)n}$ и $t_{отб(к)1}, t_{отб(к)2}, t_{отб(к)n}$ – начальные и конечные моменты отбора воздуха потребителем. Так длительность отбора воздуха вычисляется как $t_{отб(к)n} - t_{отб(н)n} = t_{но}$, где n – порядковый номер очередного отбора воздуха потребителем. Поскольку разница $t_{отб(к)n} - t_{отб(н)n}$ пренебрежимо мала, $t_{он}$ можно считать мгновенным значением. В этом случае величина $t_{он}$ называется момент отбора воздуха и численно равна $t_{но} = t_{отб(к)n}$.

Показатель $t_{нв}$ – время восстановления заданного давления с момента n -ого отбора воздуха. Эта величина определяется из условий фактического $P_{факт}$ и заданного $P_{зад}$ уровня давления в системе. Если давление в магистрали имеет не нулевое значение, то формула (3.1) должна учитывать отношение заданного уровня давления к фактическому $\frac{P_{зад}}{P_{факт}}$. Стоит заметить, что с учетом нагрева воздуха в системе, которая приводит к уменьшению нормального объема, в расчётной части заглублен уровень давления в сторону уменьшения.

$$\Delta t_{вост} = \frac{P_{зад}}{P_{факт}} \cdot \frac{V_{ресив} + V_{труб}}{Q_{ку}}, \quad (3.2)$$

Так, например время восстановления уровня давления на участке $t_{1о} - t_{1в}$ будет составлять около 25 секунд, а на участке $t_{2о} - t_{2в}$ – 30 секунд. При этом, заданный уровень производительности $Q_{зад}$ восстановится за $t_{Qзад} - t_{1в}$.

В случае, когда отбор воздуха происходит в разные короткие промежутки времени (серия кратковременных срабатываний замедлителя), подстройка системы и нагнетания воздуха происходит с момента первого скачка уровня давления. В остальные моменты отбора воздуха система автоматически корректирует интенсивность производительности. Это показано на интервале времени $t_{3о(н)} - t_{3в(к)}$, при скатывании тяжелого, длинного отцепа. Время полного восстановления $P_{зад}$ в этом случае составит $\Delta t_{вост} = t_{3в} - t_{3о(к)}$ или

$\Delta t_{\text{восст}} = \frac{P_{\text{зад}}}{P_{\text{факт}}} \cdot \frac{V_{\text{ресив}} + V_{\text{труб}}}{Q_{\text{ку}}(t)}$, где $Q_{\text{ку}}(t)$ – линейно подстраиваемая производительность компрессорной установки.

После скатывания последнего вагона (момент времени $t_{\text{ок}}$), система корректирует интенсивность работы КУ и снижает производительность до уровня $Q_{\text{зад}}(10\%)$. При этом давления в магистрали понижается, но не выходит за минимально допустимый предел. Этого уровня давления и производительности достаточно, чтобы поддерживать нормальную работу таких пневмоузлов, как обдув стрелок, пневмопочта, пневмоинструмент. Их работа показана на рисунке 3.1 в интервале времени $t_{\text{ок}} - t_{\text{инф}}$.

В момент $t_{\text{инф}}$ поступает новая информация о предстоящем роспуске состава. Система получает данные о весогабаритных параметрах состава, данные с метеослужб и принимает решение поддерживать высокую интенсивность работы КУ $Q_{\text{зад}}(95\%)$.

На интервале времени $t_{56} - t_{\text{ав}}$ выявлена утечка воздуха из воздушной магистрали. Поскольку нет крутого спада уровня давления, система не компенсирует утечку, пока выполняется условие $P(t) \in [P_{\text{мин.доп}}, P_{\text{макс.доп}}]$.

С момента времени $t_{\text{ав}}$ происходит авария – разрыв воздушной магистрали. Вследствие этого давления сжатого воздуха стремительно падает. Система принимает решение перевести КУ в аварийный режим, включив сирену и отключив приводной двигатель. Как видно из диаграммы, выключение двигателя осуществляется не скачком, а мягким уменьшением оборотов до полной остановки. Это обеспечивает повышение показателя безотказности.

Анализируя представленную функциональную модель работы САРП КУ, можно увидеть, что затраты электроэнергии, за приведённый период 30 минут, снижены – «впадины» в графике $E(t)$. Это связано с тем, что в традиционной системе управления производительностью КУ, привод работает в номинальном режиме, расходуя энергоресурсы во всех технологических событиях, практически одинаково [29]. На рисунке 3.2 приведены сравнительные графики предложенной системы и традиционной.

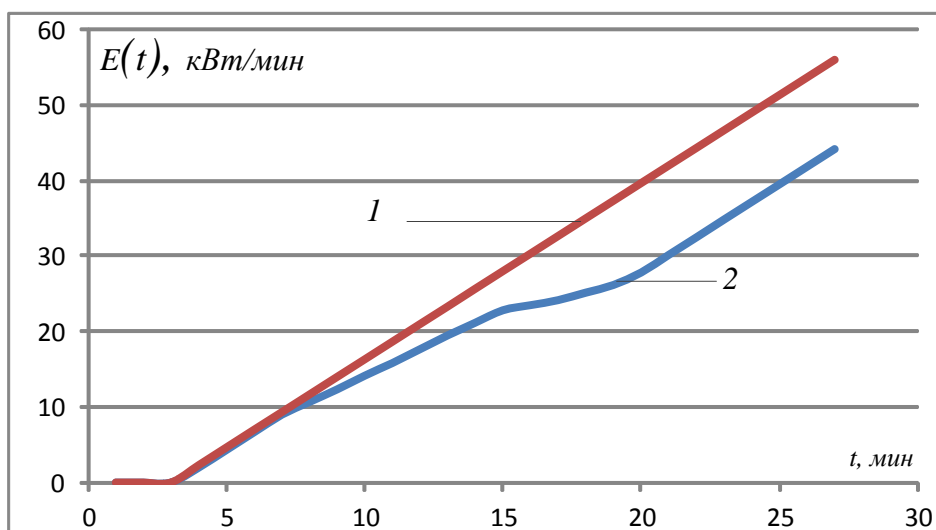


Рисунок 3.2 – Затраты электроэнергии КУ: 1 – при традиционной системе управления; 2 – при частотном методе управления.

3.2 Разработка структурной схемы автоматического регулирования производительности

Описанная модель функционирования системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки (САРПКУ), имеет большое количество входных величин. Поэтому для реализации этой модели необходимо большие вычислительные мощности. Для этого в системе предусмотрено автоматизированное рабочее место (АРМ) старшего электромеханика на базе персонального компьютера, который получает и обрабатывает массив переменных величин.

Переменные значения технологического процесса, такие как количество вагонов в отцепе, номер отцепа, назначение, вес и тип вагонов формируются в массив данных $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ и могут быть получены из сети автоматизированной системы управления сортировочной станции (АСУ СС) – верхний уровень (Рисунок 3.3).

Переменные технического процесса, такие как давления и температура в пневматической и гидравлической системе, ток и напряжение в электроприводе и цепях управления/контроля формируются в массив данных $X_1, X_2 \dots X_n$. Они

определяются посредством датчиков установленных непосредственно в КУ (Рисунок 3.3) – нижний уровень.

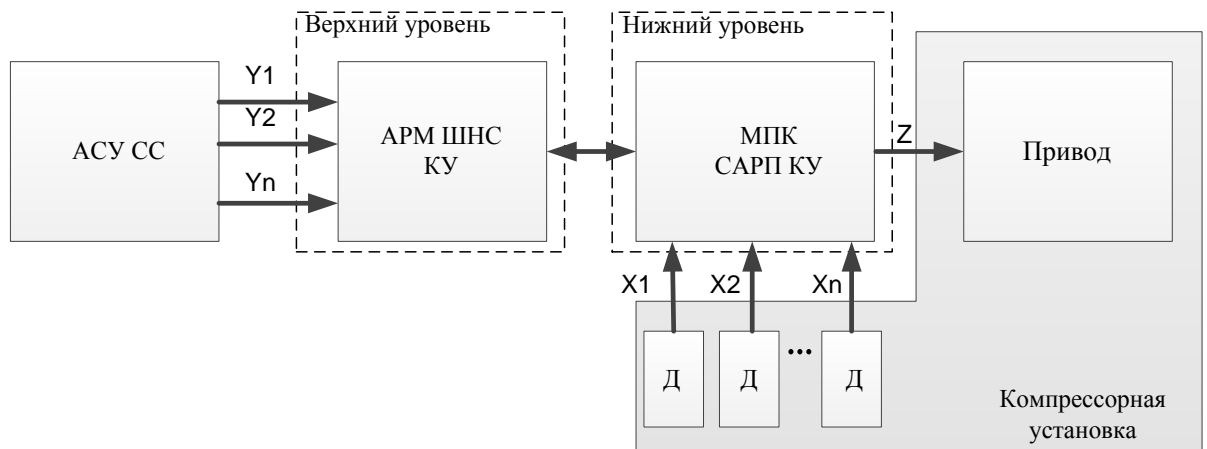


Рисунок 3.3 – Обобщённая структурная схема САРПКУ

Таким образом, входные данные обрабатываются на верхнем уровне в программной среде АРМ на персональном компьютере, данные принятые с датчиков КУ проходят обработку в нижнем уровне системы в микропроцессорном контроллере. Работа верхнего и нижнего уровней обработки данных дают искомого значения Z , задающую интенсивность работы компрессоров на сортировочной станции.

Работа такой структуры может иметь следующий алгоритм. Перед началом роспуска состава данные от АСУ СС поступают на автоматизированное рабочее место старшего электромеханика КУ (АРМ ШНС КУ). В этом узле производится предварительный расчёт интенсивности работы компрессоров для заданного состава.

После пуска компрессоров, данные с датчиков D начинают поступать в микропроцессорный контроллер (МПК), что позволяет контролировать уровень давления и температуры в системе. На протяжении всей работы агрегата опрос датчиков не прекращается, а значения производительности корректируется в зависимости от показаний датчика давления в воздушной магистрали.

Для более объективной оценки работы САРПКУ необходимо рассмотреть ее динамические показатели используя принципы системного подхода, а на основе этого построить компьютерную имитационную модель.

3.3 Синтез динамической модели системы автоматического регулирования производительностью

Для анализа работы системы автоматического регулирования производительности КУ, как динамической системы применен метод построения структур, блоками которой являются передаточные функции узлов агрегата [30]. Преимущества этого метода в том, что выходные характеристики динамической системы любой сложности можно получить до того, как аппарат будет физически реализован [31]. Это достоинство имеет особо важное значение, так как современные реальные аппараты могут быть слишком сложными и дорогостоящими.

Рассмотрим функциональную схему регулирования производительностью сжатого воздуха в существующей КУ (Рисунок 3.4). Манометр (М) получает значение давления $P(t)$ извоздушного коллектора (К). На основании этого М формирует дискретные значения команд $K1$, $K2$ или $K3$ согласно выражению (3.3).

$$\begin{cases} K1, & 0,804 \leq P(t) < 0,824 \\ K2, & 0,824 \leq P(t) < 0,843, \\ K3, & 0,843 \leq P(t) \end{cases} \quad (3.3)$$

где $P(t)$ – фактическое значение давления воздуха в коллекторе в МПа.

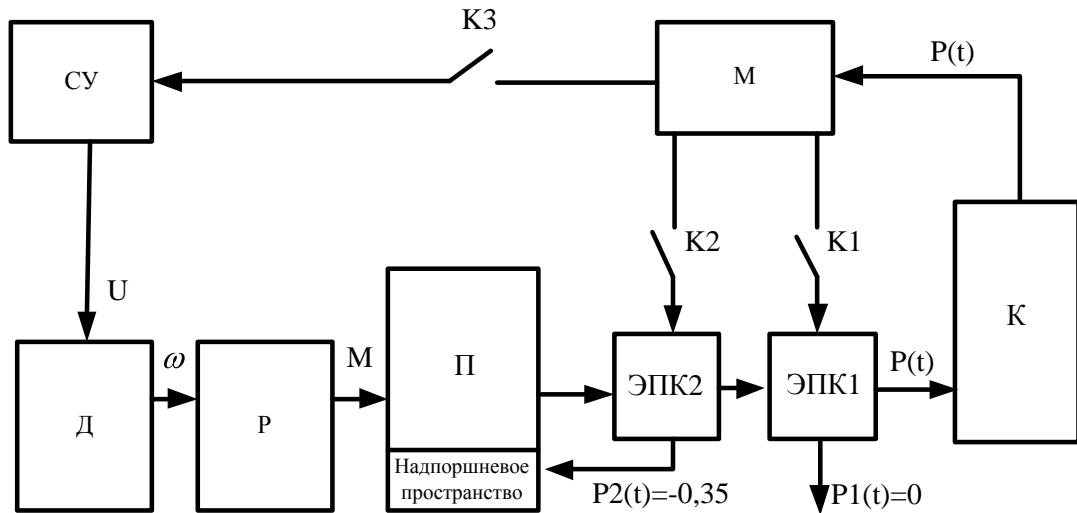


Рисунок 3.4 – Структурно - функциональная схема существующей модели автоматического управления компрессорной установкой

В результате K1, K2 или K3 активируется один из исполнительных механизмов регулирования производительностью сжатого воздуха. В качестве последних выступают электропневматические клапаны ЭПК1, ЭПК2 или схема управления (СУ) двигателем (Д). Каждый из этих узлов структуры непосредственно или косвенно связанные с объектом управления (ОУ) - поршнем (П) и обеспечивают номинальный уровень нагрузки в компрессоре. Таким образом, ЭПК1, ЭПК2, СУ осуществляет регулирование производительностью сжатого воздуха, а уравнение (3.3) может быть представлено как

$$\begin{cases} P(t) = P_{nom}(t) \cdot K1 \rightarrow 0,804 \leq P(t) < 0,824 \\ P(t) = P_{nom}(t) \cdot K2 \rightarrow 0,824 \leq P(t) < 0,843, \\ P(t) = 0 \rightarrow 0,843 \leq P(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

где $P_{nom}(t)$ – номинальный уровень давления в коллекторе в МПа;

$K1, K2$ – коэффициенты, определяющие производительность компрессора 0,65 и 0,01 соответственно.

При выполнении третьего условия $0,843 \leq P(t)$ в уравнении (3.4) осуществляется полная остановка Д. То есть напряжение питания его $U = 0$, угловая частота $= 0$, момент на выходе редуктора (Р) $M = 0$.

Для определения динамических свойств системы автоматического регулирования производительностью КУ необходимо иметь ее математическую модель. Для этого необходимо составить дифференциальные уравнения элементов системы, с помощью которых описываются динамические процесс.

Однако анализ автоматических систем показал, что разные элементы, которые отличаются назначением, конструкцией, принципом работы и физическими процессами, описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями, то есть являются подобными по своим динамичным свойствам [31, 32]. Поэтому модели элементарных звеньев структуры приведены, как соответствующие типовые звенья. На основе функциональной модели, разработана структурная (алгоритмическую) схема автоматического регулирования компрессорной установки. Для этого каждому из функциональных блоков входящих в структуру присваивается своя передаточная функция (ПФ) (Рисунок 3.5).

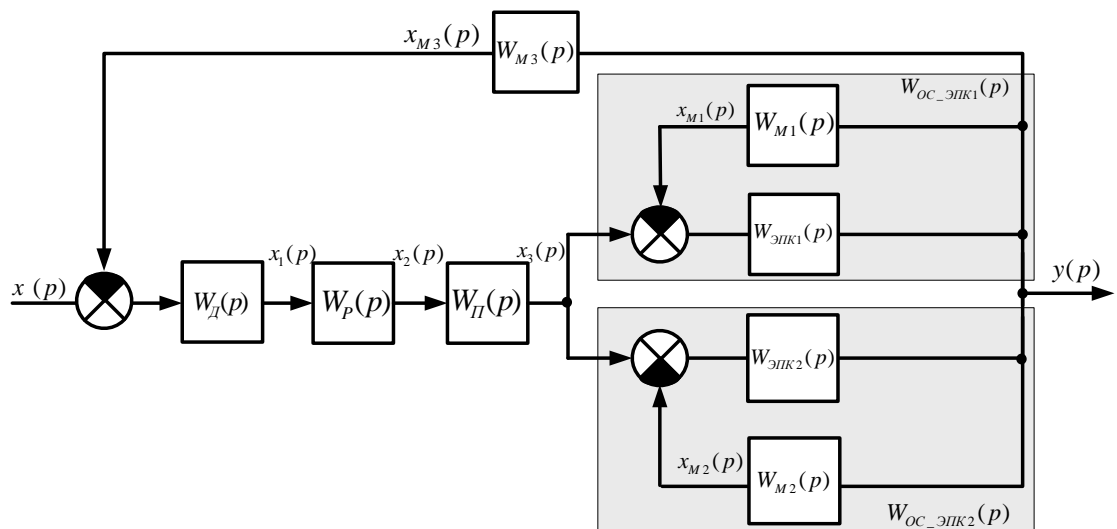


Рисунок 3.5 – Структурная (алгоритмическая) схема существующей системы управления компрессорной установкой.

Схема состоит из следующих звеньев:

$W_d(p)$ – передаточная функция двигателя;

$W_p(p)$ – передаточная функция редуктора;

$W_{II}(p)$ – передаточная функция поршневого механизма;

$W_{ЭПК1}(p)$, $W_{ЭПК2}(p)$ – передаточные функции электропневматического клапана 1 та 2;

$W_{M1}(p)$, $W_{M2}(p)$, $W_{M3}(p)$ – передаточные функции манометра при различных входных дискретных значениях;

$x(p)$ – управляющий сигнал на входе системы;

$y(p)$ – сигнал на выходе системы;

$x_1(p)$, $x_2(p)$, $x_3(p)$ – сигналы на выходе звеньев.

Поскольку датчик М имеет на выходе три дискретных информационных канала, которые влияют на функционирование узлов ЭПК1, ЭПК2 и СУ, то передаточная функция датчика представлена в виде трех независимых звеньев обратной связи с ПФ $W_{M1}(p)$, $W_{M2}(p)$, $W_{M3}(p)$, а сигналы с выхода этих звеньев соответственно $x_{M1}(p)$, $x_{M2}(p)$, $x_{M3}(p)$.

Рассмотрим отдельные ПФ каждого звена в структуре рисунка 3.5.

Согласно классической теории автоматического управления передаточная функция определяется как

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (3.5)$$

где $Y(p)$ – изображения выходной величины,

$X(p)$ – изображения входной величины.

Поскольку динамические свойства каждого элемента структуры известны, это позволит разработать ПФ ее звена. Для этого необходимо применить типовые линейные модели ПФ.

Манометрполучает непрерывный сигнал с выхода системы и в зависимости от этого коммутирует одно из трех цепей управления производительностью. Вследствие наличия инерционных узлов в структуре самого датчика, ПФ манометра будет иметь аperiodический характер с некоторым коэффициентом усиления

$$W(p) = k \cdot \frac{1}{T_0 p + 1}, \quad (3.6)$$

где k – коэффициент усиления;

T_0 – постоянная времени, определяющая инерционность звена.

Тогда ПФ для разных каналов манометра будут иметь вид

$$W_{M1}(p) = k_1 \cdot \frac{1}{T_0 p + 1}, \quad W_{M2}(p) = k_2 \cdot \frac{1}{T_0 p + 1}, \quad W_{M3}(p) = k_3 \cdot \frac{1}{T_0 p + 1}, \quad (3.7)$$

где $k_1 = 0,65$, $k_2 = 0,01$, $k_3 = 0$ – коэффициенты, определяющие уровень производительности сжатого воздуха в компрессоре.

Редуктор представляет собой усиливающий узел. А передача энергии посредством его осуществляется жестким сцеплением, без инерции. Поэтому его ПФ определяется пропорциональное звено

$$W_p(p) = k_p, \quad (3.8)$$

где k – коэффициент усиления, определяющий передаточное число редуктора.

Согласно алгоритму функционирования структуры, ПФ электропневматического клапана выполняет роль усилителя и обладает некоторой задержкой. Причем коэффициент усиления при максимальной

производительности $k = 1$. Уменьшение этого коэффициента осуществляется стравливанием воздуха в атмосферу или перекачиванием воздуха в другую емкость. Этот процесс управляется посредством команды через звено обратной связи с манометром. Таким образом, ПФ ЭПК

$$W_{\text{ЭПК1}}(p) = k_1, \quad W_{\text{ЭПК2}}(p) = k_2, \quad (3.9)$$

а передаточные функции эквивалентных звеньев электропневматических клапанов с наличием отрицательной обратной связи имеет вид

$$W_{\text{ОС-ЭПК1}}(p) = \frac{W_{\text{ЭПК1}}(p)}{1 + W_{\text{ЭПК1}}(p) \cdot W_{M1}(p)} = \frac{1}{1 + 1 \cdot \frac{k_1}{T_0 p + 1}} = \frac{T_0 p + 1}{T_0 p + 1 + k_1},$$

$$W_{\text{ОС-ЭПК2}}(p) = \frac{W_{\text{ЭПК2}}(p)}{1 + W_{\text{ЭПК2}}(p) \cdot W_{M2}(p)} = \frac{1}{1 + 1 \cdot \frac{k_2}{T_0 p + 1}} = \frac{T_0 p + 1}{T_0 p + 1 + k_2}. \quad (3.10)$$

ПФ поршневого механизма согласно [32, с.34] можно примерно представить в виде апериодического звена. Однако, если учесть, что ПМ представляет элемент накопления энергии, то более точная алгоритмическая структура поршневого механизма будет состоять из последовательно соединенной апериодической и интегрирующей звеньев

$$W_{\Pi}(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{k_{\Pi}}{T_0 p + 1} = \frac{k_{\Pi}}{T_0 p^2 + p}. \quad (3.11)$$

Вследствие такого соединения, ПФ поршневого узла компрессора имеет свойства инерционного апериодического звена второго порядка.

Модель ПФ двигателя переменного тока сложна, но в рамках общей передаточной функции всей системы ее можно представить в упрощенном виде. Согласно [33,34] ПФ СД имеет вид

$$W_d(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2^2 p^2 + 2T_1^2 \zeta p + 1}, \quad (3.12)$$

где $T_1 = \frac{1}{\Omega_1}$, $T_2 = \frac{1}{\Omega_2}$ – постоянные времени;

Ω – угловая частота;

ζ – коэффициент затухания.

На основании правил преобразования алгоритмических схем, применяя выражения (3.7) - (3.12) общей вид передаточной функции системы в целом имеет вид

$$W(p) = \frac{W_d(p) \cdot W_p(p) \cdot W_{II}(p) \cdot \left(\frac{W_{ЭПК1}(p)}{1 + W_{ЭПК1}(p) \cdot W_{M1}(p)} + \frac{W_{ЭПК1}(p)}{1 + W_{ЭПК1}(p) \cdot W_{M1}(p)} \right)}{1 + W_{M3}(p) \cdot (W_d(p) \cdot W_p(p) \cdot W_{II}(p) \cdot \left(\frac{W_{ЭПК1}(p)}{1 + W_{ЭПК1}(p) \cdot W_{M1}(p)} + \frac{W_{ЭПК1}(p)}{1 + W_{ЭПК1}(p) \cdot W_{M1}(p)} \right))}. \quad (3.13)$$

Как видно на рисунке 3.4 структура данной системы усложнена наличием трех каналов регулирования производительностью. Вход каждого канала является общим (давление на выходе КУ), а выходы воздействуют на отдельные звенья. То есть для регулирования производительностью сжатого воздуха в существующей системе используется единственный параметр $P(t)$.

В работе [2, с.56] было предложено оборудовать КУ на сортировочной горке системой частотного управления Д. Это позволит значительно упростить структуру, показанную на рисунке 3.5. Кроме того, такая система улучшит пусковые качества двигателя и повысит срок службы агрегата в целом. Кроме того такой подход уменьшит расход электроэнергии, за счет оптимального управления производительностью сжатого воздуха.

Таким образом, ПФ предложенной системы будет иметь вид

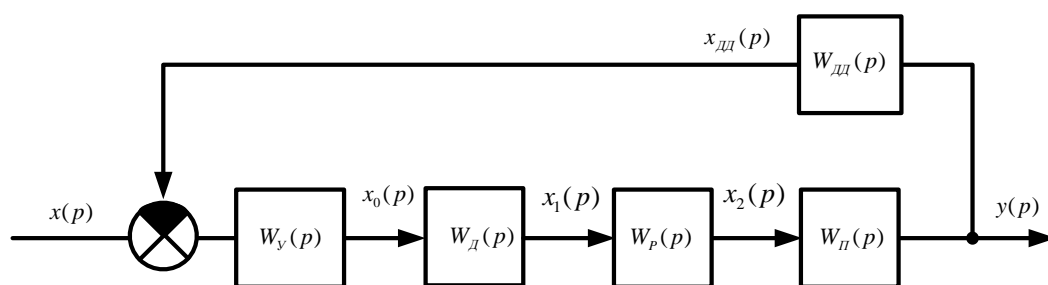


Рисунок 3.6 – Структурная (алгоритмическая) схема предложенной системы управления производительностью сжатого воздуха компрессорной установки

На схеме видно, что вместо трех каналов обратной связи $W_{M1}(p)$, $W_{M2}(p)$, $W_{M3}(p)$ и звеньев электропневматических клапанов $W_{ЭПК1}(p)$, $W_{ЭПК2}(p)$ (Рисунок 3.3) внесен один канал со звеном обратной связи $W_{дд}(p)$ и $W_в(p)$. В такой схеме один выходной параметр воздействует на одно звено.

Звено $W_{дд}(p)$ представляет собой ПФ аналогового датчика давления, который преобразует давление в пропорциональный ему электрический сигнал

$$W_{дд}(p) = k_{дд} p.$$

Звено $W_в(p)$ представляет собой усилитель мощности (трехфазный инвертор), который преобразует информационный сигнал в управляющий. Управляющий сигнал пропорционален информационному $W_в(p) = k_в p$

Передаточные функции этих звеньев будут иметь вид

$$W_{дд}(p) = k_{дд}, \quad W_в(p) = k_в, \quad (3.14)$$

где $k_{дд}$ та $k_в$ - соответствующие коэффициенты усиления датчика давления и усилителя мощности.

Таким образом, общая передаточная функция системы (рисунок 3.6) будет иметь вид

$$W(p) = \frac{W_{\text{дд}}(p) \cdot W_P(p) \cdot W_{\text{п}}(p) \cdot W_Y(p)}{1 + W_{\text{дд}}(p) \cdot W_{\text{д}}(p) \cdot W_P(p) \cdot W_{\text{п}}(p) \cdot W_Y(p)}, \quad (3.15)$$

или

$$W(p) = \frac{\frac{T_1 p + 1}{T_2^2 p^2 + 2T_1^2 \zeta p + 1} \cdot k_P \cdot \frac{k_{\text{п}}}{T_0 p^2 + p} \cdot k_Y}{1 + k_{\text{д}} \frac{T_1 p + 1}{T_2^2 p^2 + 2T_1^2 \zeta p + 1} \cdot k_P \cdot \frac{k_{\text{п}}}{T_0 p^2 + p} \cdot k_Y}. \quad (3.14)$$

Упростив выражение, получим конечный результат ПФ

$$W(p) = \frac{k(T_1 p + 1)}{T_2^2 p^4 T_0 + T_2^2 p^3 + 2T_1^3 T_0 \zeta p + 2T_1^2 \zeta p^2 + T_0 p^2 + p + k_{\text{д}} k T_1 p + k_{\text{д}} k}, \quad (3.15)$$

где $k = k_Y \cdot k_P \cdot k_{\text{п}}$

T_0 – постоянная времени апериодического звена поршневого механизма;

T_1, T_2 – первая и вторая постоянная времени звена ПФ Д;

ζ – коэффициент затухания в ПФ синхронного двигателя.

На основании приведенной структурно - алгоритмической схемы системы рисунок 3.6 и выражений (3.8), (3.11), (3.12), (3.14) была составлена компьютерная модель системы в программной среде VisSim. Она позволяет упростить анализ (не решать дифференциальные уравнения высокого порядка) и визуально наблюдать за динамическими характеристиками системы и отдельных ее узлов.

На рисунке 3.7 представлена имитационная модель системы и ее динамические характеристики. В качестве последних выступают $P(t)$ - давление в коллекторе и $\omega(t)$ - угловая частота двигателя.

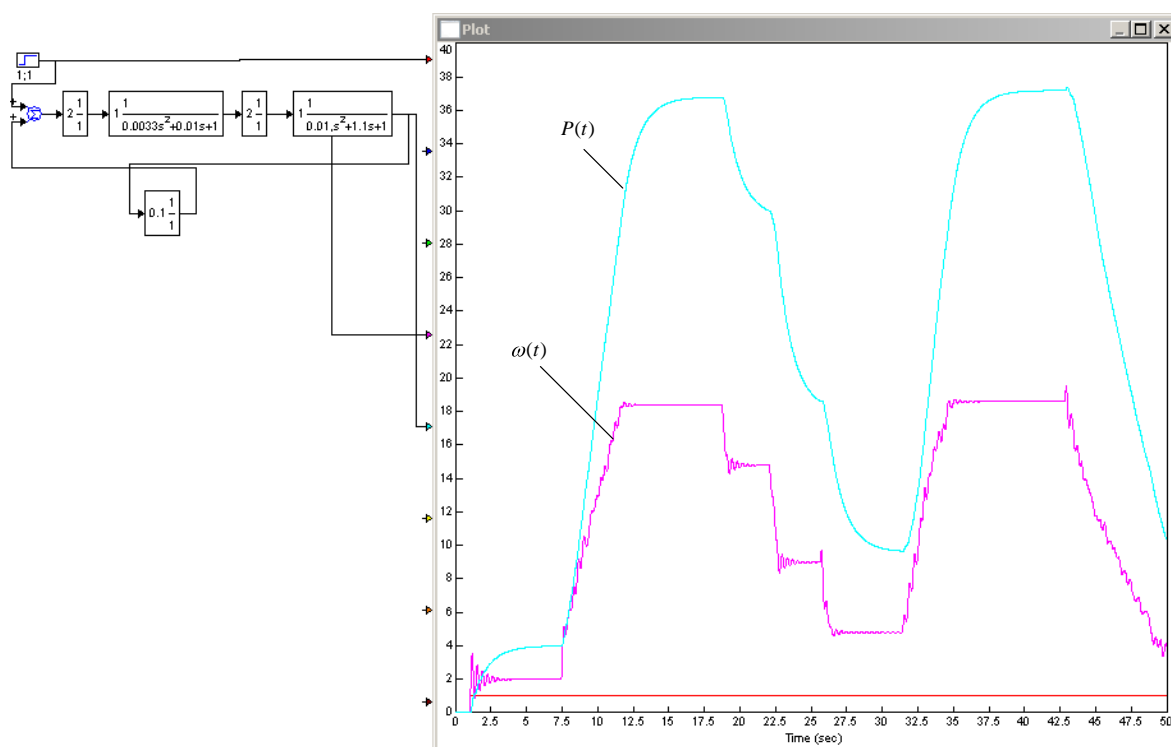


Рисунок 3.7 – Имитация работы системы при изменении давления на выходе

Из графика видно, динамические характеристики при включении системы ($1 < t < 5$), рост давления в магистрали ($7,5 < t < 15$), нагрузка на систему (работа замедлителей $17,5 < t < 27,5$), и выключения системы ($42,5 < t$). Графики показывают, что во всех режимах работы системы ее характер аperiodический. Кроме того видно отсутствие пневматических ударов при действии дискретной нагрузки во время интенсивного отпуска вагонов, плавный пуск и остановка системы.

Сопоставляя результаты имитационных показателей пуска и регулирования системы с реальной уменьшенной моделью САПКУ. Анализ результатов моделирования подтверждает соответствие качественного поведения модели основным характеристикам исследуемого технического процесса, а также данных, приведенных в литературных источниках.

На основе структурно-алгоритмической схемы разработана структурно-функциональная схема системы. Она включает в себя следующие узлы(рисунок 3.8):

СУ– схема управления;

ДД – датчик давления;

У – усилитель управляющего сигнала;

Д – двигатель компрессора;

Р – редуктор;

П – поршневой механизм;

К – воздушный коллектор.

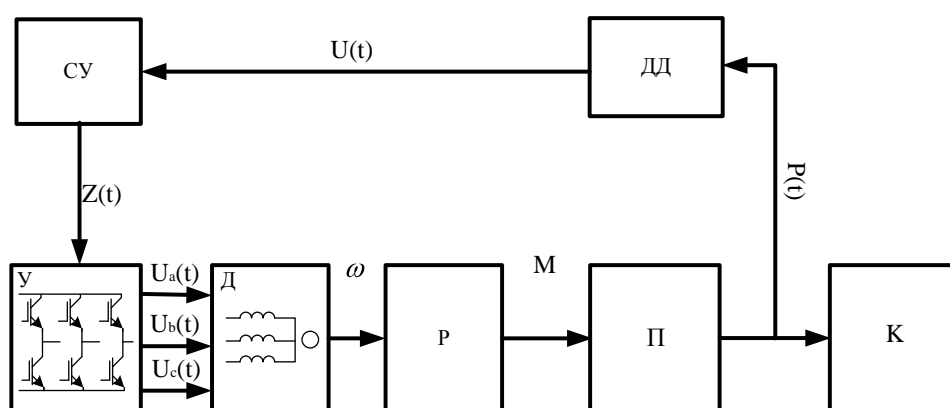


Рисунок 3.8 – Структурно-функциональная схема регулирования производительностью воздуха в компрессорной установке

Значение давления $P(t)$ в коллекторе К непрерывно фиксируется датчиком давления ДД, который преобразует этот сигнал в электрический $U(t)$. На основании $U(t)$ СУ вычисляет значение $Z(t)$ для управления инвертором

$$Z(t) = C(U(t)).$$

где $C(t)$ – закон, по которому осуществляется управление инвертором;

$U(t)$ – сигнал с датчика давления.

Согласно этому закону осуществляется управление инвертором, который в свою очередь воздействует на скорость вращения вала двигателя, что сводится к регулированию производительностью Q компрессорной установки.

3.4 Разработка алгоритма формирования прогнозного показателя производительности компрессорной установки

Основная роль АРМ ШНС в системе САРП на КУ, является расчет оптимальной производительности Q по заданным показателям технологического процесса и технических параметров системы. В расчетах эти два вида выходных данных учувствуют на разных этапах формирования Q и соответственно образуют два алгоритма: задающий и корректирующий.

Задающий алгоритм производит расчет оптимального значения производительности сжатого воздуха, который необходим для обработки предстоящего состава из некоторого количества отцепов. В этом случае в качестве входных данных участвуют показатели технологического процесса, и данные принятые от системы АСУ СС. К ним относятся:

V_0 – максимальная скорость роспуска отцепа;

γ – коэффициент инерции оси;

n_j – количество осей вагона;

m_j – вес вагона брутто.

l – длина пробега от вершины горки до конца последней тормозной позиции;

$\sum_{i=1}^m \alpha_{cn}$ – сумма углов поворотов на m стрелках, которые проходит отцеп по маршруту;

n_{cn} – количество стрелочных переводов по маршруту следования отцепа;

$C_{xxf} S_j$ – аэродинамические коэффициенты, учитывающие тип вагона;

i_{cmp} – уклон стрелочного участка;

i_{cn} – уклон пути головы сортировочного парка;

l_{cnj} – расстояния от предельного столбика наиболее удаленной стрелки, до расчетной точки;

l_{cvi} – длина свободного участка пути.

Алгоритм формирования коэффициента производительности представляет собой линейную структуру с конечным циклом, на выходе которого получают коэффициент производительности Q КУ, пропорциональный рассчитанным затратам энергии, приходящей на затраты усилий на торможения вагонов H_T . Этот алгоритм представлен на рисунке 3.9. Исходный текст программы для микропроцессорного контроллера (МПК) написан на языке Ассемблер AVR и представлен в приложении Б.

Перед началом роспуска состава, данные технологических параметров загружаются в АРМ ШНС. Формируется база данных, из которой в последовательном порядке отцеп за отцепом производится расчет энергии на затраты тормозного усилия H_{Tj} для отдельно каждой единицы. Все найденные величины H_{Tj} суммируются. Когда порядковый номер очередного отцепа равняется общему числу отцепов в составе, цикл завершается. Суммарное значение H_T умножается на весовой коэффициент k , который приводит эту величину к заданному показателю производительности Q . Значение Q передается в МПК и используется в качестве задающей величины производительности сжатого воздуха для расформирования данного состава (Рисунок 3.1).

Корректирующий алгоритм производит расчет значения производительности сжатого воздуха, которое необходимо скорректировать для восстановления уровня давления в коллекторе после отбора воздуха текущим потребителем (Рисунок 3.1). Данный алгоритм включается в работу в процессе роспуска состава. Основной его задачей является регулирование уровня давления в заданном диапазоне, то есть выполнение условия $P_{min}(t) \leq P(t) < P_{max}(t)$. В этом случае в качестве входных данных участвуют показатели технического процесса, принятые от датчиков КУ.

К ним относятся:

$P(t)$ – давления воздуха в воздухосборнике;

$P_m(t)$ – давления масла в пневмосистеме;

t_o° – температура обмоток приводного двигателя;

t_n° – температура поршневой или винтовой системы;

I – ток в обмотка питания двигателя;

U –напряжение питания обмоток двигателя.

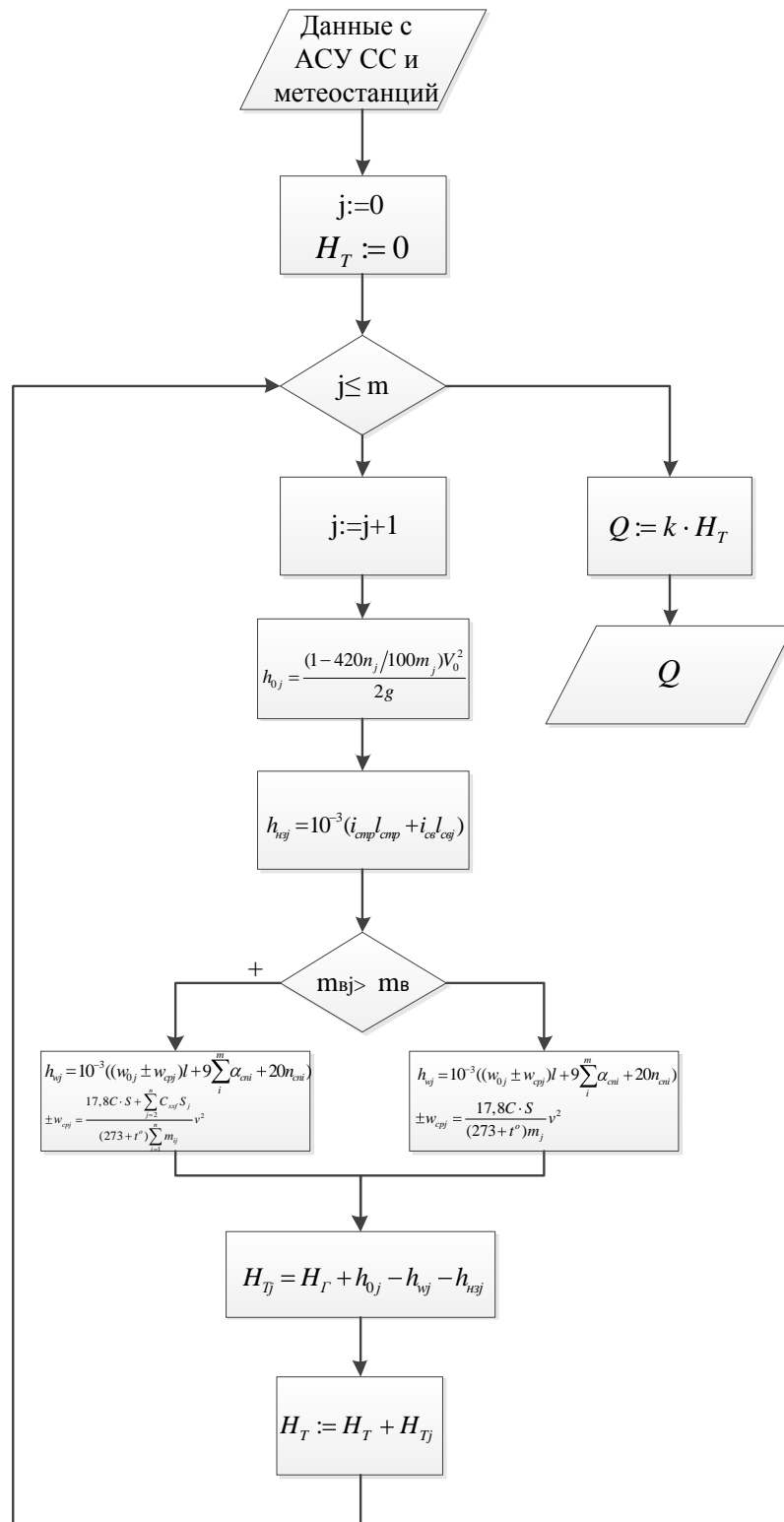


Рисунок 3.9 – Алгоритм формирования задающего коэффициента производительности сжатого воздуха

Алгоритм вычисления корректирующего параметра производительности Q приведен на рисунке 3.10. Исходный текст программы для МПК написан на языке Ассемблер AVR и представлен в приложении В.

Работает алгоритм следующим образом. После включения МПК, инициализации его процессорного ядра и периферийных устройств, производится циклический опрос буфера USART интерфейса RS-232 (связь между АРМ ШНС и МПК). Если в буфере оказывается код «АА», то процессор ожидает данные задающей производительности Q . После это включается подпрограмма формирования ШИМ-сигнала, который обеспечивает мягкий пуск приводного двигателя. В конце каждого микроцикла такой подпрограммы производится сравнения задающего скважность регистра (OCR) с принятой величиной Q . Если значения этого регистра превышает значение Q , запускается подпрограмма удержания установленного уровня производительности. Данная программа работает без участия процессорного ядра. В это время микропроцессор производит считывания давления с манометра и формирует посылку на передачу в АРМ. После чего МП опрашивает другие датчики, контролирующие штатный режим работы системы: датчики давления масла, температуры масла, температуры обмотки двигателя, тока, напряжения. Если все параметры находятся в рамках номинальных значений, цикл повторяется, начиная с приема кода «АА».

Если был принят код «FA», система дешифрирует команду останова. В этом случае подпрограмма плавного останова, обеспечивает безопасное выключение системы.

В случае, когда МП принимает код отличный от «АА» и «FA» программа переходит в начало программы на метку RESET.

Как видно из алгоритма, формат посылки данных составляет два байта, первым из которых идет разрешающий код «АА», вторым код значения производительности Q . Соответственно точность регулирования производительности составляет в пределах от 0 до 170 дискретов.

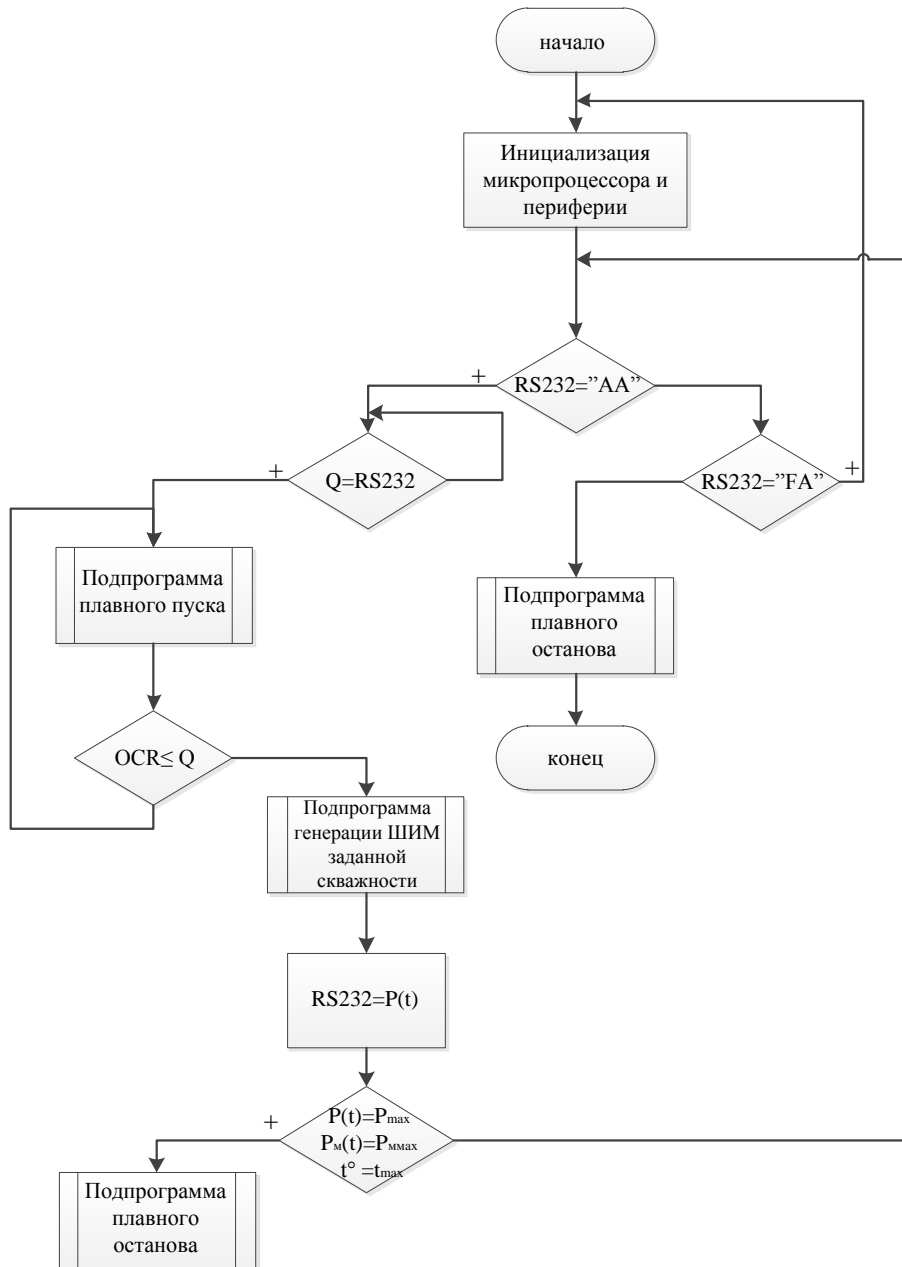


Рисунок 3.10 – Алгоритм формирования корректирующего коэффициента производительности сжатого воздуха

Таким образом, корректирующий алгоритм выполняет прецизионную роль в работе системы автоматического регулирования производительности сжатого воздуха.

3.5 Разработка компьютерной имитационной модели системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки

Для построения модели системы автоматического управления КУ рассмотрим ключевые моменты и принципы существующих устройств.

Известно, что режимы работы КУ исключают остановку приводных механизмов, что ведет к большим затратам электроэнергии на переработку одного состава. С другой стороны, перерыв в работе двигателя в период отсутствия работ на станции, с большой вероятностью при пуске приводит к перегоранию статорной обмотки. Эти две проблемы являются причинами отсутствия управления электромагнитным моментом и скоростью вращения вала приводных двигателей (ПД) компрессорных станций [35,36]. Из курса электрических машин известно, что отсутствия контроля над этими параметрами значительно ухудшают пусковые характеристики, уменьшают срок службы, усложняют процесс запуска синхронных и асинхронных двигателей [2, с.58]. Тем не менее, развитие современных технологий в области силовой электроники, микропроцессорной техники способствует решению этих проблем. А современные алгоритмы частотного и векторного управления обеспечивают наиболее «мягкие» характеристики синхронных и асинхронных машин любой мощности [12, с.35]. Основной задачей таких алгоритмов является обеспечение плавного пуска/останова электропривода, широкий диапазон управления частотой вращения и электромагнитным моментом на валу. Решение таких задач позволит оптимизировать режимы работы двигателя КУ, что значительно увеличит срок его эксплуатации, и уменьшит энергозатраты системы в целом [2, с.64].

Известно, что для разработки системы управления частотного или векторного принципа необходимо учитывать особенности применения, типа и марки двигателя. Поэтому необходимо провести анализ электромеханических характеристик асинхронного двигателя марки 5АН315А2С, который применяется на СГ Донецкой дороги, установить его закон частотного управления и метод генерации управляющего сигнала, построить математическую и компьютерную

модель работы двигателя при частотном методе управления, провести сравнительный анализ существующей и разработанной модели управления производительностью сжатого воздуха на КУ, определить оптимальный режим пуска двигателя при частотном управлении под нагрузкой.

3.5.1 Модель управления приводным двигателем

Известно, что трехфазный двигатель считается полностью управляемым, если есть возможность управлять его электромагнитным моментом. Поэтому за основу математической модели управления двигателем используются выражение относительно этой величины. Рассмотрим уравнение, описывающее работу трехфазного двигателя переменного тока

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{\omega_1 [r_1 + \frac{r'_2}{s}]^2 + (x_1 + x'_2)^2}, \quad (3.16)$$

где p – число пар полюсов статора;

m_1 – число фаз, питающих статорную обмотку;

U_1 – напряжение питания обмотки статора;

r_1 – активное сопротивление обмотки статора;

r'_2 – эквивалентное активное сопротивление обмотки ротора;

x_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора;

x'_2 – эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки ротора;

s – коэффициент скольжения $s = (\omega_1 - \omega)/\omega_1$;

ω_1 – синхронная частота двигателя $\omega_1 = 60 \cdot f/p(1 - s)$;

ω – скорость оборота ротора.

Из уравнения (3.16) видно, что момент M зависит от частоты f_1 и напряжения U_1 питания статора. Обычно на компрессорных установках сортировочной горки эти величины являются неизменными и составляют 50 Гц и

380В соответственно. Поэтому вал привода вращается с постоянной скоростью и моментом (3.16). Вследствие этого, в момент пуска или изменении нагрузки двигатель испытывает большие механические перегрузки, а его обмотка электрические. Но для системы частотного регулирования производительностью (ЧРП) КУ эти величины являются переменными [2, с.59] и легко подстраиваются под любые условия эксплуатации. Это достигается путем генерации управляющего широтно-импульсного модулированного (ШИМ) сигнала, который с максимальной точностью воспроизводит синусоидальное напряжение с заданной амплитудой и частотой. Рассмотрим этот сигнал детально. Для этого были введены некоторые условия:

- амплитуда сигнала должна изменяться симметрично относительно нулевого потенциала (двуполярного ШИМ сигнала);
- частота модуляции не должна быть меньше частоты указанной в правилах Котельникова [11,с.40];
- частота модуляции не должна превышать максимальную частоту, которая указана в документации силовых ключей.

Эти ограничения позволят, выбрать алгоритм формирования ШИМ сигнала. Одним из таких алгоритмов, учитывающий описанные ограничения, является реализация ШИМ с точной фазой. Форма такого сигнала приведена на рисунке 3.11, а его математическая модель вид

$$u_{pwm} t = \frac{M}{2} \cos \omega_1 t + \theta_1 + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m\pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{2}{m\pi} J_n \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m+n \pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + n \omega_1 t + \theta_1, \quad (3.17)$$

$$U_1 \in -U_{1m}; +U_{1m};$$

$$\omega_{VT} > \omega_c > \omega_K.$$

где M – индекс модуляции $M = \frac{2U_1}{C_m}$;

J_n – функция Бесселя первого рода $J_n z = \frac{j^{-n}}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{jz \cos \theta} e^{jn} d\theta$;

ω_c – угловая частота несущего сигнала $\omega_c = 2\pi f_c$;

ω_1 – несущая частота опорного сигнала $\omega_1 = 2\pi f_1$;

θ_c —начальная фаза несущего сигнала;

θ_1 — начальная фаза опорного сигнала;

U_1 —амплитуда опорного синусоидального напряжения;

C_m — амплитуда пилообразного сигнала;

U_{1m} — амплитуда опорного сигнала;

ω_{VT}, ω_K — границы допустимых угловых частот для силовых ключей, и частот, которые оговорены в правилах Котельникова для данного сигнала.

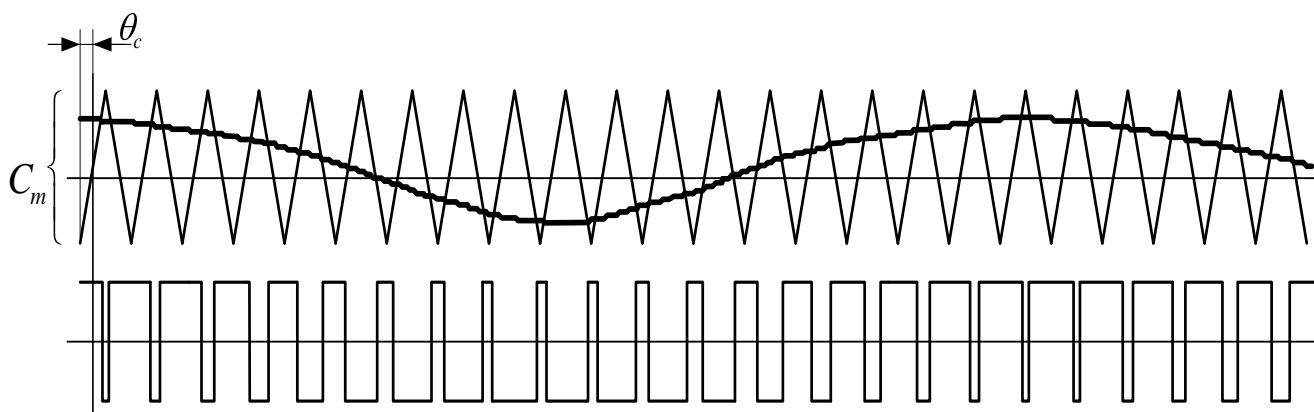


Рисунок 3.11 – Временная диаграмма управляющего широтно-импульсного модулированного сигнала

Первой составляющей в уравнении (3.17) является опорный сигнал, который определяет расположение выходного сигнала относительно нулевого потенциала [37]. Кроме того, она является функцией, которая задает форму напряжения на выходе инвертора.

Вторая и третья составляющая уравнения (3.17) является гармоническим рядом ШИМ-сигнала, который представлен в виде функций Фурье.

Запишем уравнение (3.17) для трехфазной системы

$$\begin{aligned}
u_{pwmA} t &= \frac{M}{2} \cos \omega_1 t + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m\pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + \\
&+ \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1} \frac{2}{m\pi} J_n \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m+n}{2} \pi \cos m \omega_c t + \theta_c + n \omega_1 t \\
u_{pwmB} t &= \frac{M}{2} \cos \omega_1 t + 120 + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m\pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + \\
&+ \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1} \frac{2}{m\pi} J_n \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m+n}{2} \pi \cos m \omega_c t + \theta_c + n \omega_1 t + 120 \\
u_{pwmC} t &= \frac{M}{2} \cos \omega_1 t + 240 + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m\pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + \\
&+ \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1} \frac{2}{m\pi} J_n \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{(m+n)\pi}{2} \cos(m \omega_c t + \theta_c + n(\omega_1 t + 240))
\end{aligned} \quad (3.18)$$

Система выражений (3.18) справедлива для всех асинхронных и синхронных трехфазных машин. Но для частотно-регулируемого привода такая модель имеет некоторые недостатки. При изменении частоты питания распределение моментов на валу будет неравномерным во всем диапазоне частот [38]. Кроме того, вследствие уменьшения реактивного сопротивления, значительно увеличивается ток, что может привести к перегреву и перегоранию обмоток статора. Поэтому для правильного и безопасного функционирования модели трехфазной управляющей системы необходимо рассматривать алгоритмы управления в некотором частотном диапазоне. Для системы КУ, где момент нагрузки изменяется не в больших пределах, был выбран закон оптимального частотного управления с поддержанием постоянного момента в частотном диапазоне регулирования от 5 до 50 Гц.

$$\frac{U_1}{U'_1} = \frac{f_1}{f'_1} \frac{\overline{M_1}}{M'_1}, \quad (3.19)$$

где $\frac{U_1}{U'_1}$ — отношение действующего напряжения на статоре до изменения частоты, к напряжению на статоре после изменения частоты тока;

f_1 — частота питающего напряжения;

f'_1 — измененная частота питающего напряжения;

$\frac{M_1}{M'_1}$ — отношение действующего момента на валу двигателя до изменения

частоты питающего напряжения к моменту на валу после изменения частоты.

Согласно этому закону, момент на валу остается постоянным во всем диапазоне частот регулирования [11, с.35].

В случае превышения частоты выше 50 Гц, электромагнитный момент двигателя значительно снизится, что при определенной нагрузке на валу может привести к полной его остановке. Также завышение частоты может негативно повлиять на механические узлы агрегата. Так, большая часть механизмов КУ рассчитаны на работу от промышленной частоты. В этом случае, превышение оборотов вала могут привести к разрыву муфт, сильному трению и износу механических узлов.

При частотах управления ниже 5 Гц механическая характеристика асинхронного двигателя спуститься, а ее точка критического момента окажется ниже оси X, тем самым уменьшится пределы рабочей зоны момента для номинальной работе КУ [39].

Учитывая эти условия и необходимость поддержания постоянного момента на валу двигателя выражение (3.19) будет представлено в виде

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U'_1}{f'_1} = M = const. \quad (3.20)$$

При этом семейство механических характеристик АД будут иметь вид, который приведен на рисунке 3.12.

Согласно условию (3.20) составлена таблицу соответствий действующих значений напряжений фазы к ее частоте (Таблица 3.1). Введем коэффициент пропорциональности, который соблюдает равновесное состояние модели управления относительно момента на всем диапазоне частот (от 5 до 50 Гц)

$$K = \frac{U_{ном1}}{f_{ном1}} = \frac{380}{50} = 7,6.$$

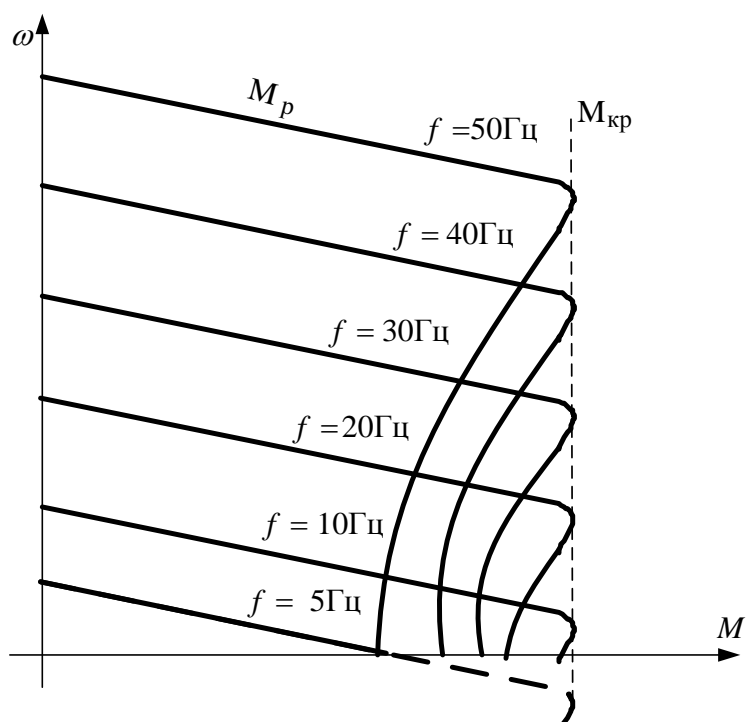


Рисунок 3.12 – Механическая характеристика АД при частотном регулировании по закону $\frac{U_1}{f_1} = M = const.$

Таблица 3.1– Выбор электрических параметров по значению коэффициента k

Uд, В	f, Гц	K
38	5	7,6
76	10	7,6
152	20	7,6
228	30	7,6
304	40	7,6
380	50	7,6
380	60	6,3
380	70	5,3

Как видно, в таблице 3.1, были умышленно допущены частоты, выходящие за диапазон управления двигателем. Это сделано для демонстрации механических характеристик двигателя в повышенных пределах частот управления до 70 Гц (Рисунок 3.13).

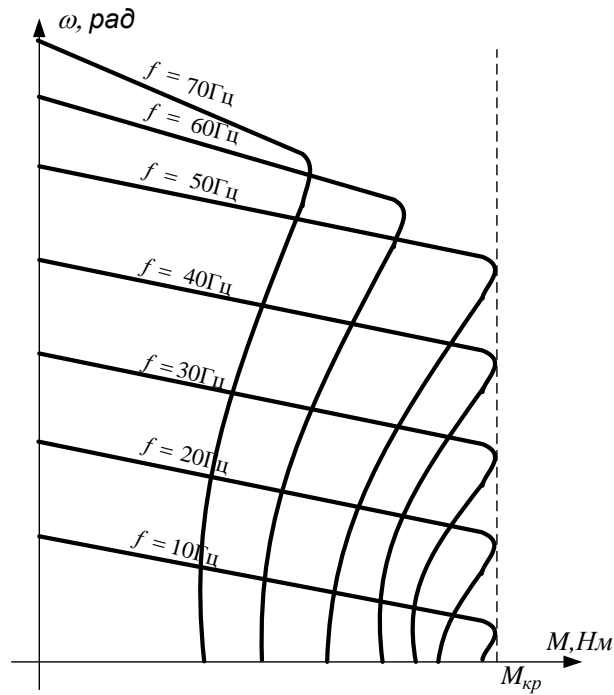


Рисунок 3.13 – Семейство механических характеристик для двигателя марки 5АН315А2С при частотном управлении в диапазоне частот $f \in 5; 70$

Из рисунка видно, что для КУ оптимальным пределом регулирования скоростью вращения АД является частотный диапазон $f \in 5; 50$, а закон управления частотный с постоянным моментом.

С учетом этого, перепишем систему уравнений (3.18)

$$\begin{aligned}
 u_{pwmA} t &= K \frac{M}{2} \cos \omega_1 t + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 K \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m\pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + \\
 &+ \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{2}{m\pi} J_n K \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m+n \pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + n \omega_1 t \\
 u_{pwmB} t &= K \frac{M}{2} \cos \omega_1 t + 120 + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 K \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m\pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + \\
 &+ \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{2}{m\pi} J_n K \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m+n \pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + n \omega_1 t + 120 \quad . \quad (3.21) \\
 u_{pwmC} t &= K \frac{M}{2} \cos \omega_1 t + 240 + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 K \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m\pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + \\
 &+ \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{2}{m\pi} J_n K \frac{m\pi M}{2} \sin \frac{m+n \pi}{2} \cos m \omega_c t + \theta_c + n \omega_1 t + 240 \\
 \omega_1 &= 2\pi f \\
 f &\in [5; 50]
 \end{aligned}$$

Выражение (3.21) является математической моделью частотного управления двигателем алгоритмом генерации ШИМ сигнала с точной фазой и поддержанием постоянного электромагнитного момента на диапазоне частот от 5 до 50Гц.

3.5.2 Разработка виртуальной модели управления приводным двигателем

Используя программную среду MathLab Simulink, разработаем и проанализируем компьютерную модель устройства, описанной системы уравнений. Такая модель включает такие структурные блоки (Рисунок 3.14):

- источник питания;
- трехфазный транзисторный мост (инвертор на основе IGBT)
- выходной LC- фильтр;
- асинхронный двигатель (марки 5АН315А2С)
- генератор ШИМ- сигнала.

Двигатель 5АН315А2С, имеет следующие параметры [40]:

- мощность 200кВт;
- номинальное напряжение на статоре 380 В, трехфазная система питания;
- номинальная частота питания 50Гц;
- номинальная частая оборотов вала 1500 об/мин.;
- номинальный ток фазы 373А;
- сопротивление статора 0,021Ом, индуктивность статорных обмотки 0,000155 Гн;
- сопротивление ротора 0,017 Ом, индуктивность роторной обмотки 0,000155 Гн;
- взаимоиндуктивнисть между ротором и статором 0.00755Гн;
- момент инерции 2,1 кг*м.кв
- сила трения 0,05668 Н;
- коэффициент перегрузки 2,1;
- количество полюсов 2;
- начальный коэффициент скольжения 1;

- начальная скорость оборотов 0 об/мин.

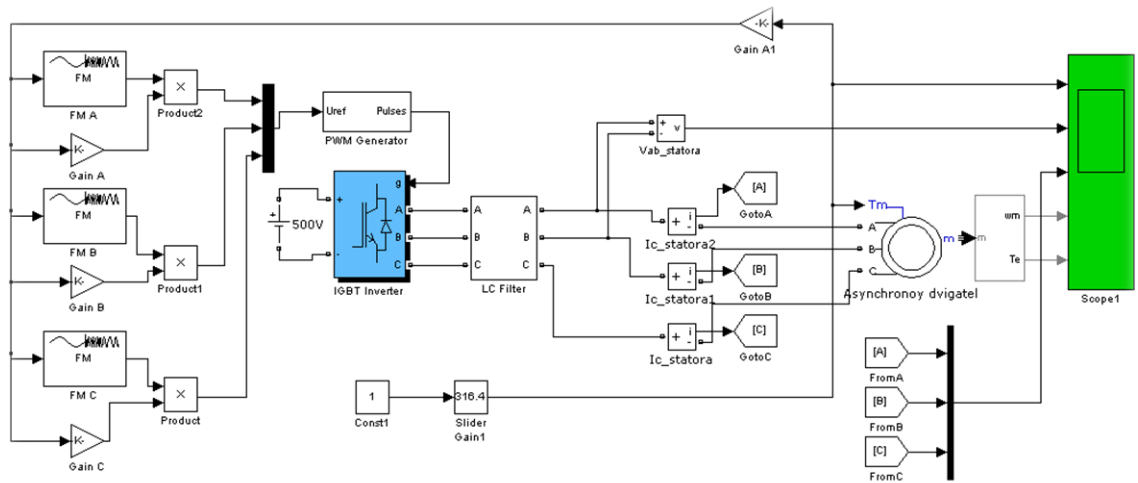


Рисунок 3.14 – Компьютерная модель системы автоматического регулирования приводным двигателем компрессорной установки

Двигатель 5АН315А2С питается от трехфазного инвертора, который получает управляющее воздействие (3.21) от модулятора (левая часть схемы). Основным фактором, воздействующим на узел формирования этого закона, является уровень давления, преобразованный в пропорциональный электрический сигнал (верхняя часть схемы). В общем виде, такую модель можно описать выражением

$$\omega = f p(t) , \quad (3.22)$$

где $p(t)$ - давления в воздушной магистрали в данный момент времени, Мпа;
 ω - угловая частота ротора приводного двигателя, рад/сек.

Рассмотрим диаграммы работы системы управления, показанные на рисунке 3.15.

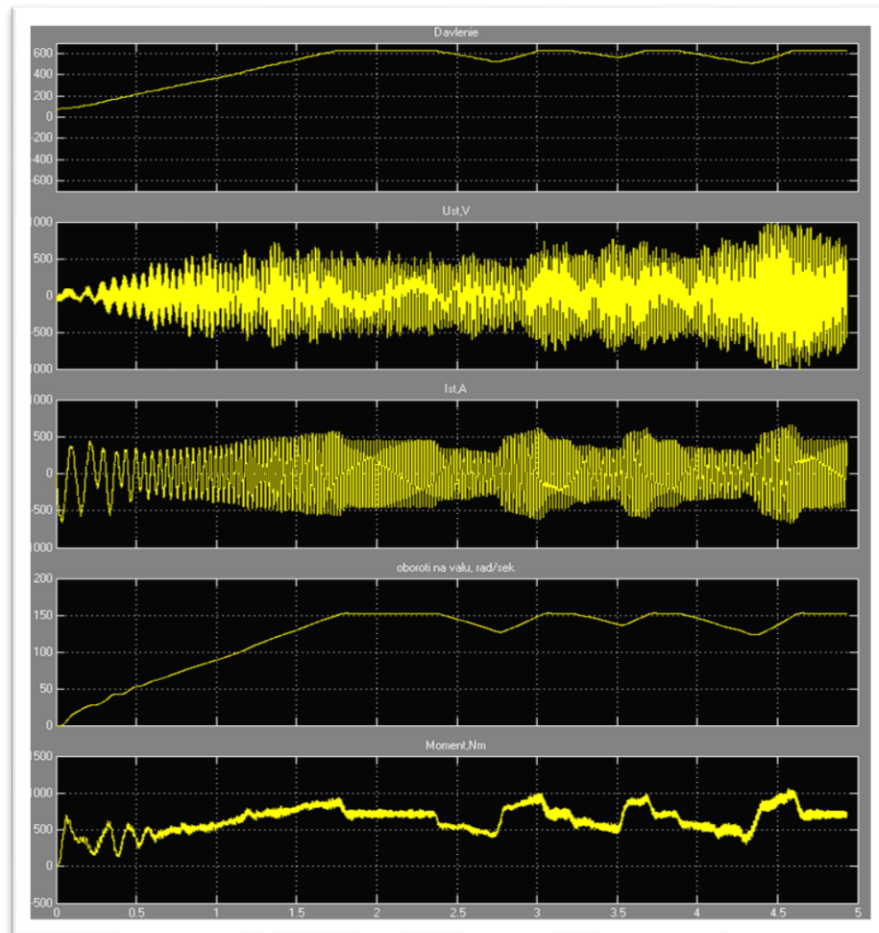


Рисунок 3.15 – Временные диаграммы пуска и регулирования двигателем компрессорной установки

Перед пуском КУ давление воздуха в магистрали имеет ненулевой уровень. Этого достаточно, чтоб создать при пуске сопротивление нагрузки равное 70Нм. Плавный пуск АД позволяет избежать больших бросков токов и момента [41]. С линейным ростом скорости вращения вала растет уровень давление сжатого воздуха. Когда давление достигает близко к граничному 8,6 атмосфер (момент двигателя 637Нм), система снижает интенсивность работы привода. После 2 секунды происходят 3 отбора воздуха замедлителями. Поскольку воздушная система крайне инерционна, снижения уровня давления в ней происходит достаточно плавно, не вызывая вредных переходных бросков. После этого уровень давления, быстро восстанавливается и удерживается на необходимом уровне. На графике видно, что скорость восстановление давления в магистрали

превышает скорость расхода сжатого воздуха. Это дает возможность использовать систему на сортировочных горках большой мощности.

3.5.3 Анализ основных показателей виртуальной модели управления приводным двигателем

Для анализа пусковых режимов на разных частотах управления, рассмотрим семейства механических характеристик двигателя (Рисунок 3.16). Одновременно с этим зададим фиксированную предельную нагрузку на валу двигателя. Электромагнитный момент, который может развивать двигатель вычисляется по формуле

$$M_{\text{эм}} = \frac{P}{\omega_1}, \quad (3.23)$$

где P – электрическая мощность двигателя, Ват;

ω_1 – синхронная угловая частота двигателя рад/сек.

Известно, что момент нагрузки не может превышать значения $M_{\text{эм}}$, так как произойдет опрокидывания двигателя или его остановка. Таким образом, принято $M_{\text{эм}} = M_{\text{нmax}} = 637 \text{ Нм}$ для двигателя марки 5АН315А2С.

Рассмотрим механические характеристики двигателя при ЧРП. Механические характеристики построены с учетом плавного пуска двигателя с линейным разгоном от 1 Гц с шагом 1 Гц до рабочей частоты управления. Такой алгоритм позволяет максимально компенсировать броски пусковых токов и момента на валу [42].

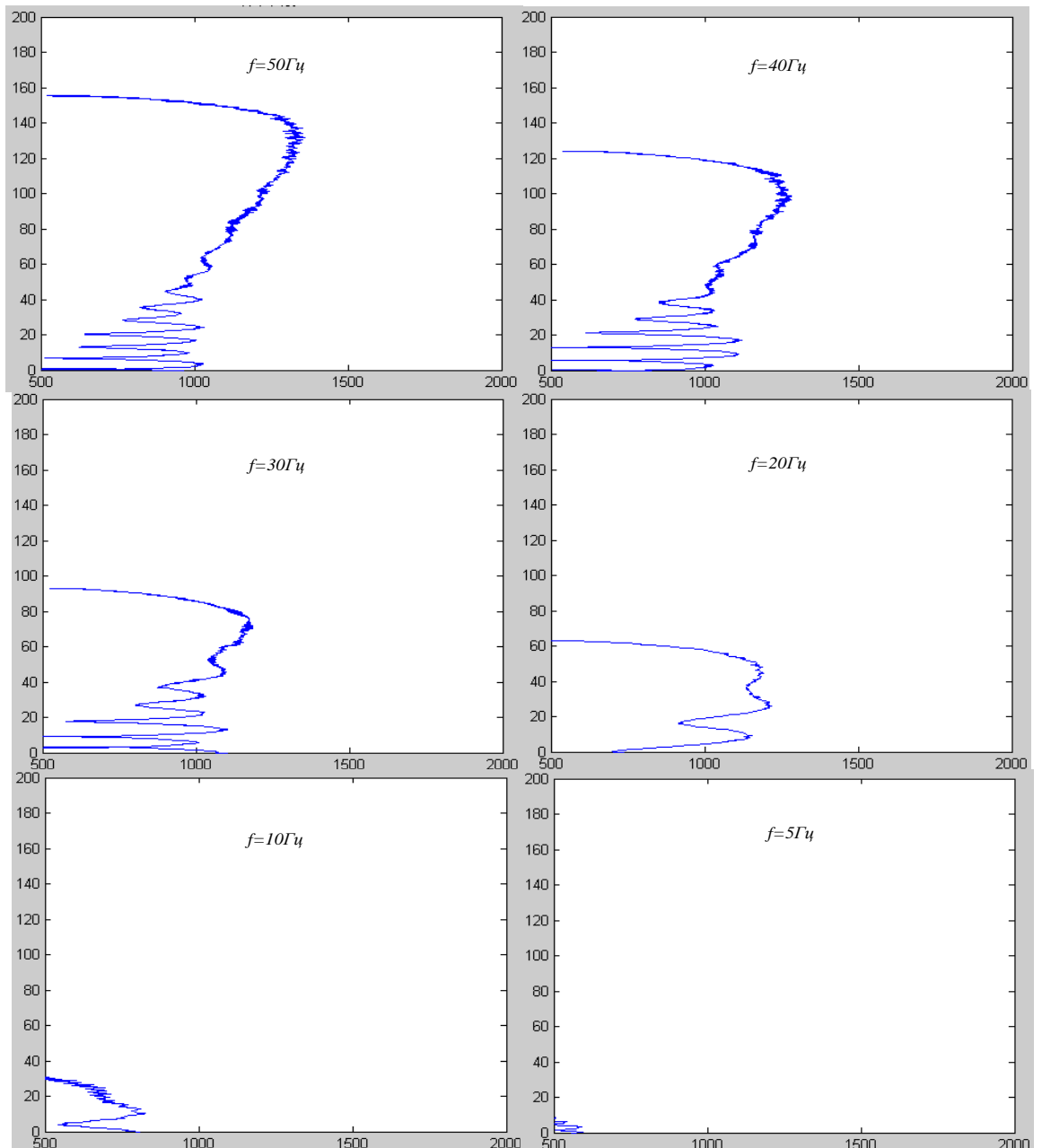


Рисунок 3.16 – Механические характеристики двигателя 5АН315А2С при разных частотах управления

На рисунке видно, что все характеристики обладают достаточной жёсткостью, что свойственно АД при традиционном пуске от сети трехфазного промышленного напряжения. Кроме того, предел области устойчивой работы широкий и имеет хороший запас по перегрузки: на частотах 20, 30, 40, 50Гц - 2,2 - 2,5 раза, на частоте 10Гц - 1,5 раза. Однако, последняя диаграмма показала, что для данного двигателя на максимальной нагрузке при частоте управления 5 Гц отсутствует запас по перегрузки. Из этого следует, что при соответствующем

давлении в воздушной магистрали, когда сформирован сигнал управления 5Гц, АД должен перейти в режим «мягкого» выключения [43].

Как видно из графиков на рисунках 3.15 и 3.16, основным достоинством перед существующей системой управления двигателем КУ это отсутствия крутых бросков тока и электромагнитного момента за счет «мягкой» регулировки током

Для сравнительного анализа был рассмотрен процесс пуска двигателей КУ с традиционной системой автоматической управления и системой частотного управления. Для этого был проведен опыт двух систем (Рисунок 3.17), работающих на одинаковую нагрузку 300Нм. Производительность КУ одинаковая, то есть работа от частоты 50Гц, напряжения 380В.

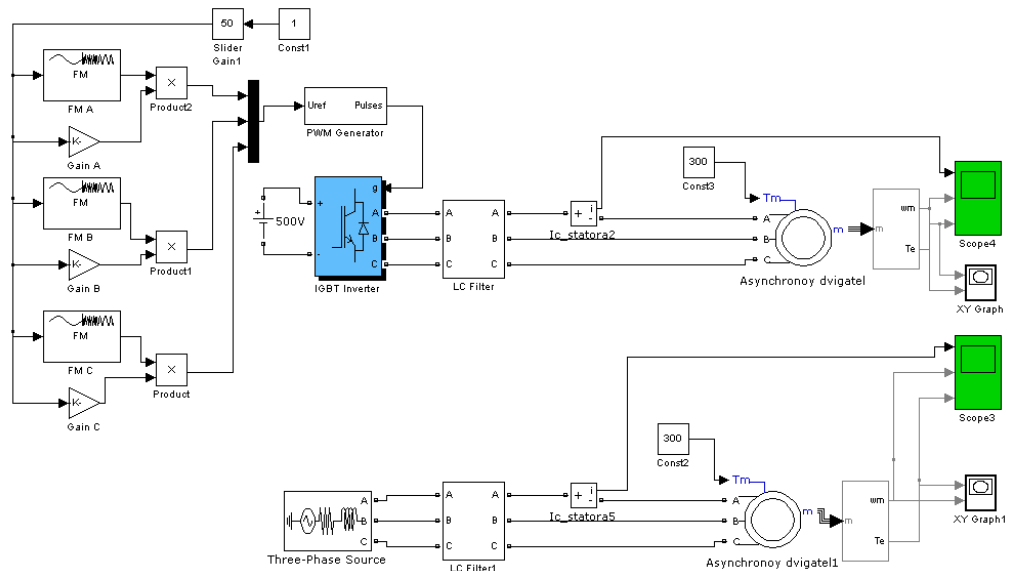


Рисунок 3.17 – Модели двух систем управления компрессорной установкой: традиционной и предложенной

На рисунке 3.18 приведены сравнительные диаграммы пусков. Левая часть на рисунке 3.17 соответствует пуску КУ с частотно-регулируемым приводом, правая -традиционной системе.

Как видно из диаграмм, система с частотным регулированием входит в установившийся режим с большей временной задержкой. Однако размах переходных токов, а, следовательно, и моментов вдвое меньше.

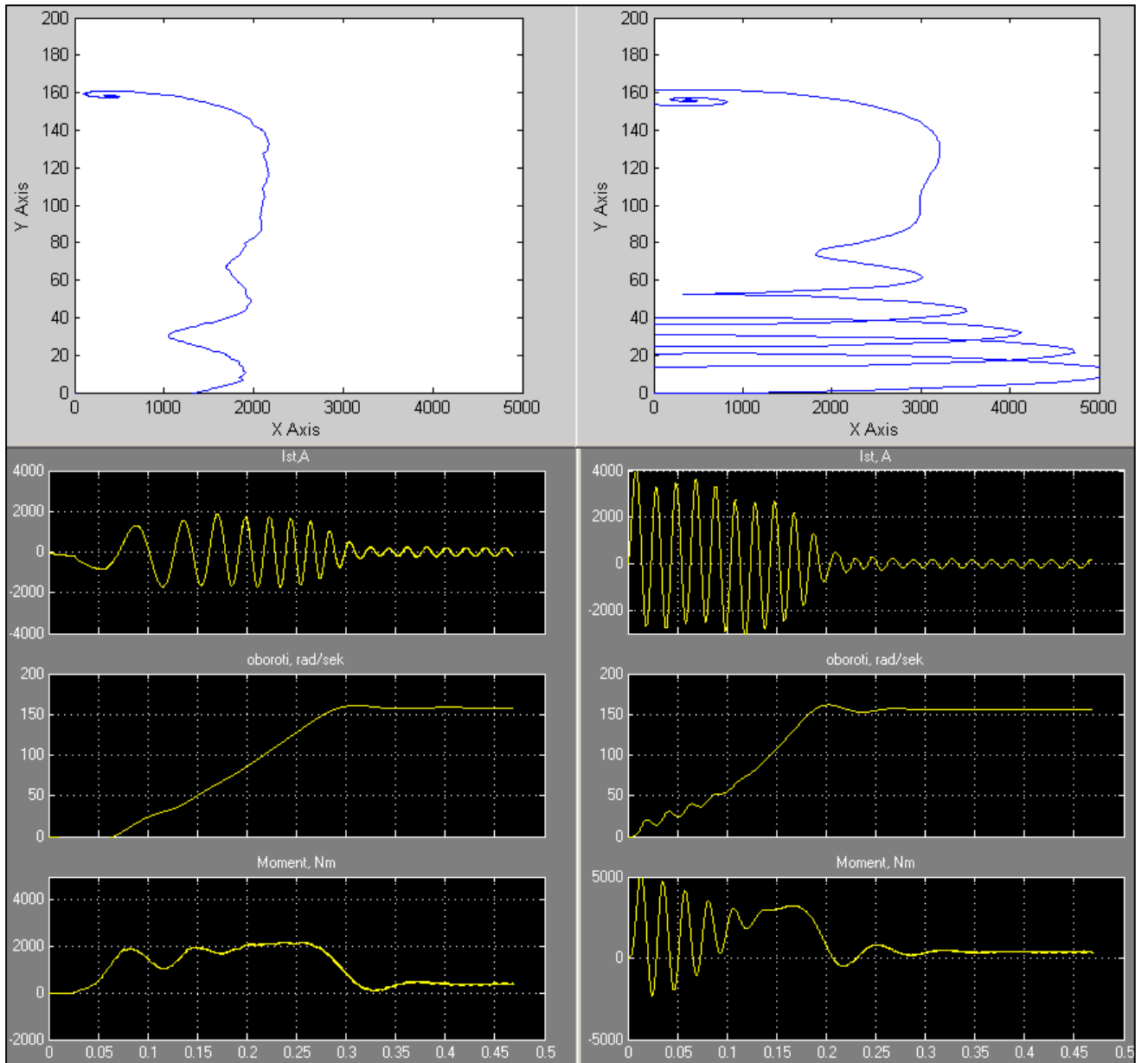


Рисунок 3.18 – Сравнительные диаграммы пуска систем частотного управления КУ и традиционной системы управления КУ

Также анализ пусковых характеристик позволил установить зависимость пускового тока, электромагнитного момента и время переходных процессов от скорости разгона двигателя. Это дало возможность оптимизировать процесс безопасного пуска АД под нагрузкой. Полученные значения приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 –Сравнительные характеристики пуска ЧРП и системы с традиционного управления КУ

Характеристика	Частотное управление приводом КУ	Традиционный управления приводом КУ
Момент нагрузки, Нм	300	300
Максимальный ток, А	1820	4030
Критический момент, Нм	2050	5280
Минимальный ЭМ момент, Нм	0	2480
Длительность переходного процесса, сек	0,3	0,2

Для этого введем понятие разгонный коэффициент β . Этот коэффициент определяет наклон прямой к оси времени, по закону которого линейно возрастает частота (Рисунок 3.19). Очевидно, что чем больше этот коэффициент, тем больше амплитуда переходных параметров. Для систем традиционного пуска в КУ $\beta = 90^\circ$. В этом случае переход из стационарного состоянии системы в динамическое происходит быстро, что вызывает значительные механические перегрузки, которые практически делятся $T_{пер} = 3...5\tau$, где τ - постоянное времени

$$\tau = \frac{L}{R}, \quad (3.24)$$

где τ – постоянная времени, с;

L –индуктивность статорной обмотки двигателя, Гн;

R – активное сопротивление статорной обмотки АД, Ом.

Для двигателя 5АН315А2С $T_{пер} \approx 0,369с$.

Удобно привязать разгонный коэффициент β к длительности переходного процесса $T_{пер}$: $\beta = \frac{t_{разг}}{T_{пер}}$. Так, например, для традиционного пуска АД можно считать, что частота питания 50 Гц установится в момент коммутации, то есть на 0 секунде, тогда коэффициент $\beta = 0$. При разгоне длительностью, равной

переходному процессу ($0,369\text{с}$), $\beta = 1$. Важно заметить, что разгонный коэффициент не имеет никакого отношения к электрическому или геометрическому углу.

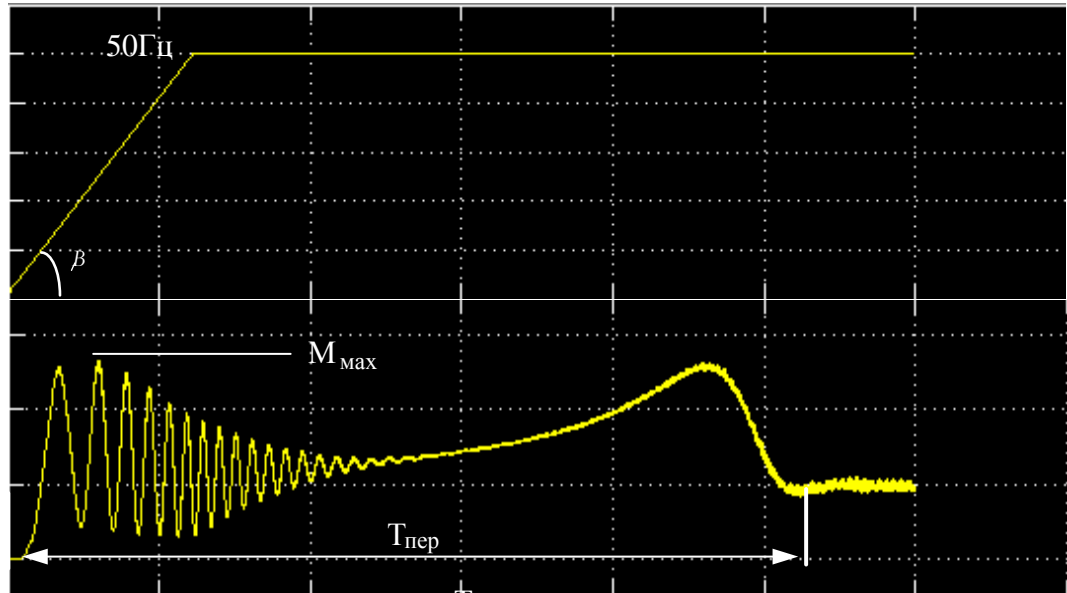


Рисунок 3.19 – Диаграмма, поясняющая разгонные параметры при пуске двигателя КУ

3.5.4 Выбор оптимальных пусковых показателей виртуальной модели управления приводным двигателем

Рассмотрим диаграммы пусковых характеристик (Таблица 3.3) с различными β и выберем оптимальный режим разгона для двигателя 5АН315А2С компрессорной установки.

Основные условия пуска: момент нагрузки 400Нм , рабочая частота 50Гц .

Результаты исследования 14 пусковых характеристик занесены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3– Параметры двигателя 5АН315А2С в зависимости от разгонного коэффициента

Разгонный коэффициент, β	Максимальный пусковой ток, I, А	Макс/мин пусковой момент, критический момент М, Нм	Длительность переходного процесса, $T_{i\dot{\alpha}\alpha}$, с
3,5	700	750/650, 650	-
2,5	1000	1000/500, 790	1,125
1,25	1400	1100/400, 1300	0,69
1	1800	1200/350, 1300	0,65
0,815	1850	1250/300, 1300	0,68
0,520	1900	1280/250, 1300	0,71
0,5	1950	1400/100, 1300	0,74
0,38	1950	1580/-50, 1300	0,76
0,35	1950	1600/-150, 1300	0,78
0,31	1950	1600-200, 1300	0,8
0,26	1950	1750/-400, 1300	0,82
0,25	1950	1800/-500, 1300	0,825
0,185	1950	1800/ -550, 1300	0,83
0,125	1950	2000 -600, 1300	0,84
0,1	1950	1900 -700, 1300	0,85
0	1950	1800 -800, 1300	0,85

Из табличных значений видно, что при разгонном коэффициенте большем переходного периода, полученного аналитически, величина реального переходного процесса возрастает, а пусковой ток стремится к значению номинального

$$\beta > T_{пер.расчет} \rightarrow T_{пер.реал} \uparrow, I_{пуск} \downarrow, M \approx M_{кр} \approx M_{пуск}.$$

При достаточно высоком β переходные значения тока уменьшаются в 1,5-2 раза, в течение времени $T_{пер} = 3...5\tau$. Такой пуск осуществляется в течение нескольких секунд, что для системы КУ не оказывает существенных влияний.

Когда разгонный коэффициент снижается ниже расчетного переходного времени, пусковой ток остается постоянным на своем пиковом значении, время переходного процесса увеличивается, пусковой момент возрастает

$$\beta \leq T_{пер.расчет} \rightarrow T_{пер.реал} \uparrow, I_{пуск} = const, M_{пуск} \uparrow.$$

Начиная с величины, $\beta = 0,38$ появляется значения отрицательного пускового момента и далее с уменьшение разгонного коэффициента пусковой момент начинает спускаться ниже нулевой оси. Это сказывается негативно на характеристиках АД.

Из проведенного анализа, можно сделать вывод, что для оптимальной величины разгонного коэффициента существуют условия:

$$\begin{aligned} M_{кр} &= const; \\ M_{пуск} &\rightarrow min \cup M_{пуск} \geq 0; \\ I_{пуск} &\rightarrow min; \\ T_{пер} &\rightarrow min. \end{aligned}$$

Для двигателя марки 5АН315А2С оптимальным разгонным коэффициентом является $\beta \in [0,5;1)$.

3.6 Выводы по разделу 3

1. На основе предложенной прогнозно-динамической модели, разработана функциональная модель затрат энергии на роспуск состава с горба горки в интервале времени 30 минут, в которой отображены действия системы при скатывания порожнего или груженого состава, а также при обрыве воздушной магистрали.

2. Разработана структурная и динамическая модель системы автоматического регулирования производительности КУ на основе которых

получены пусковые и регулировочные характеристики модели. Результаты моделирования подтвердили соответствие качественного поведения модели основным характеристикам исследуемого технического процесса, а также данных, приведенных в литературных источниках.

3. Разработан алгоритм формирования задающего и корректирующего коэффициента производительности, который будет учтен при разработке программного обеспечения микропроцессорного контроллера.

4. В среде MathLabSimulink разработана компьютерная имитационная модель системы автоматического регулирования производительности КУ, которая учитывает технические характеристики двигателя КУ. Результаты моделирования подтвердили соответствие качественного поведения модели управления двигателем при частотном алгоритме управления.

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ
МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПРЕССОРНОЙ
УСТАНОВКИ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ4.1 Разработка структуры технических средств системы управления
производительности компрессорной установки

Система управления компрессорной станции должна обеспечить надежное управления несколькими агрегатами, нагруженными на единую воздушную систему одновременно [4, с.347]. Для этого модернизированная система управления производительности оборудуется комплектами микропроцессорных контроллеров (МПК), которые управляют по одному компрессору. Каждый МПК связан между собой и с автоматизированным рабочим местом оператора (АРМ) в единую сеть. Кроме того, данная сеть поддерживает связь с автоматизированной системой управления сортировочными станциями (АСУ СС) (Рисунок 4.1). Это позволяет в любой момент времени посредством АРМ произвести запрос данных о предстоящем роспуске состава.

Данные о параметрах состава (назначении следования каждого вагона и его принадлежность, технические характеристики отцепов) формируются на станции отправления и поступают посредством АСУ СС в АРМ оператора компрессорной станции сортировочной горки, на которой предполагается расформирования заданного состава. Из полученных данных программного обеспечения верхнего уровня формирует задающий показатель производительности и передает его в МПК. В зависимости от необходимого уровня производительности производится запуск одного или нескольких агрегатов. После запуска и установки необходимого уровня давления в воздушной магистрали МПК корректирует уровень производительности в зависимости от текущих состояний датчиков.

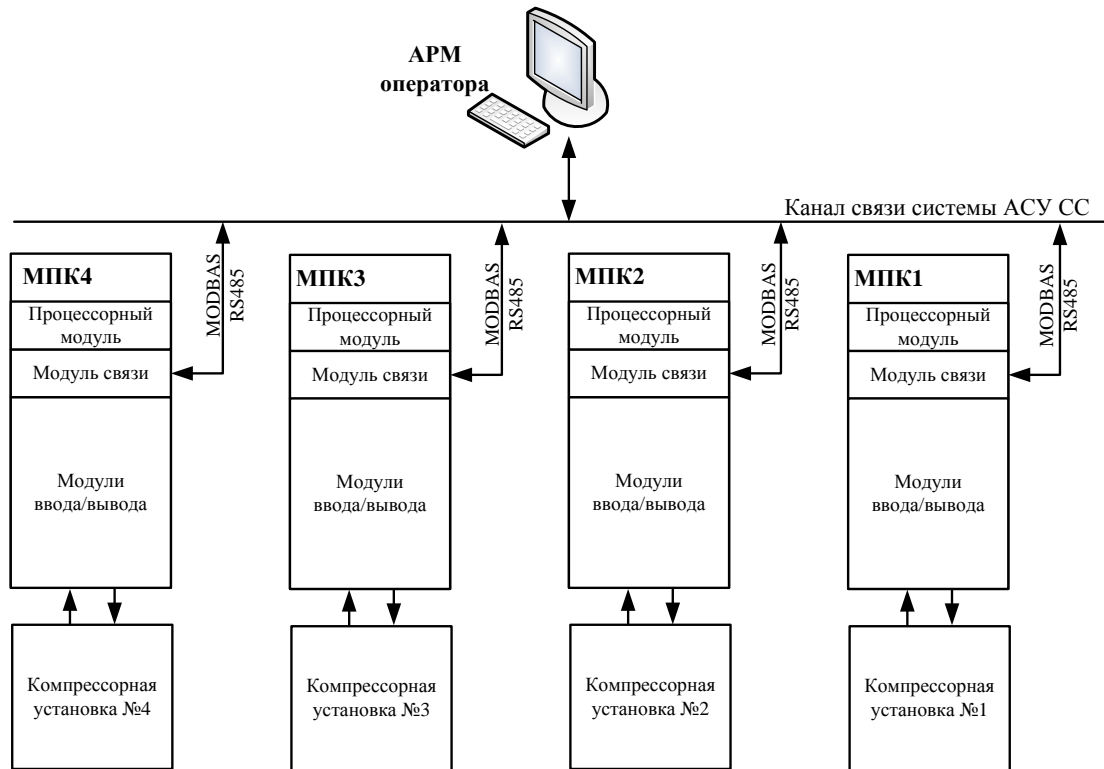


Рисунок 4.1 – Структура организации связи между МПК и АСУ СС

Для этого МПК обеспечивает постоянный контроль технических характеристик каждой КУ: температура охлаждающей жидкости (ДТВ), температура масла (ДТМ), давления масла (ДТМ), давления воздуха в коллекторе (ДДВоз), ток (ДТ) и напряжение питания (ДН) приводного двигателя (Рисунок 4.2).

Для опроса этих параметров в МПК предусмотрены дискретные и аналоговые модули. А для управления трехфазным мотором трехфазный модуль управления. Если в КУ предусмотрен синхронный двигатель, МПК позволяет подключить канал управления обмоткой индуктора (Рисунок 4.2).

Модули управления подключаются к двигателям посредством узлов согласования - усилителя мощности (УМ) и трехфазного усилителя мощности и (3фУМ). Принципиальные схемы микропроцессорного контроллера с узлами согласования и усилителями мощности (трехфазного инвертора) приведены в приложениях Б и В.

4.2 Экономический подход к внедрению технических средств системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки

Экономический эффект от внедрения системы с частотно регулируемым приводом не вызывает сомнения. На сегодняшний день существует множество методик и алгоритмов расчетов экономических показателей. Так, например, в работах [7, с.144] были подробно рассмотрены эти вопросы. В системах по перегону газоздушных смесей, вопросы частотного регулирования приводов являются особо важными. Основной задачей таких агрегатов замена традиционных методов управления, которые преимущественно направлены на прямое управления потоком воздуха (дросселирования, подключения «мертвого объема», стравливание воздуха через клапаны), на регулирования приводным двигателем. Особенно важны эти вопросы в аппаратах, где затраты электрической энергии составляют сотни киловатт в час. Так существующие компрессорные установки на СГ с параллельно работающими 4-6 компрессорами потребляют более 500кВт/ч. Таким образом, решения вопросов экономической эффективности в этих системах являются актуальными. Далее рассмотрим их.

Анализ работы предложенной системы показал, что вследствие привязки к технологическим процессам, в системе САРП КУ экономический эффект будет оцениваться по двум показателям.

Первый экономический показатель связанный с применением частотного управления приводного двигателя КУ. В этом случае с точки зрения экономии средств частотно регулирование производительности КУ приводит и к ряду положительных эффектов, в их числе: снижение износа арматуры; снижения влияния пусковых переходных токов и напряжений на статорные обмотки двигателя; снижению затрат времени и средств на ее ремонт или замену; снижение износа подшипников и самой машины; исключение гидравлических ударов в газопроводных сетях.

Второй экономический показатель связанный с алгоритмом оптимальным расходом сжатого воздуха, который зависим от технологических работ на

станции. В этом случае система управления КУ по протоколу связана с системой АСУ СС. Это дает возможность оптимизировать затраты электроэнергии за счет прогнозирования энергетических затрат на перерабатываемый состав, а затем корректировать производительность в течение всего роспуска вагонов.

Так к моменту роспуска вагонов уровень давления в коллекторе находится на заданном уровне. Избыток давления периодически сбрасывается в атмосферу. При этом двигатель компрессора не останавливается и не снижает свою интенсивность. С учетом того, что давления магистрали имеет не нулевой уровень давления, время на генерацию сжатого воздуха до уровня $P_{ном}$ составляет от нескольких секунд до 2-3 минут. Из этого следует, что сброс воздуха в атмосферу производится многократно, до тех пор, пока не подключится потребитель. Каждое срабатывания клапана уменьшает КПД КУ в целом, расходуя часть энергии на холостую работу двигателя.

После роспуска состава, зачастую компрессоры не выключают, а переводят в холостой режим, до начала следующего роспуска. В таком режиме двигатели КУ работают в щадящем режиме, но при этом потребляют энергию, ожидая сеанс очередного расформирования состава.

При системе оптимальной регулировки производительности сжатого воздуха КУ, специальный алгоритм позволяет рассчитать необходимую интенсивность работы двигателя индивидуально для каждого состава. При этом с выключенного состояния с нулевым уровнем давления в коллекторе, система безопасно запуститься и в течении меньше пяти минут выйти на рабочий режим.

После каждого отбора воздуха, система корректирует свою производительность, компенсируя провалы в давлении. В любом случае ситуации, когда необходимо включать выпускной клапан, не возникает. Задача с перегрузкой решается путем автоматического уменьшения скорости вращения вала приводного двигателя. В случае аварии или при штатном выключении, двигатель останавливается в безопасном мягком режиме. При этом расход энергии не осуществляется.

Таким образом система САПКУ позволяет:

- значительно экономить электроэнергию за счет правильно рассчитанной интенсивности работы КУ;

- экономить ресурс приводного двигателя, а вследствие, экономить средства на его капитальный ремонт и приобретения запасных частей, за счет мягкого пуска/останова и отсутствия механических рывков.

Как указывалась ранее в САРП КУ используется метод частотного регулирования трехфазным асинхронным/синхронным двигателем. С точки зрения экономики реализация такого управления значительно дороже. Но практика показала, что для мощных установок (более 100кВт) эти затраты себя окупят в сравнительно короткие сроки. Для подтверждения этого проведём расчет экономических показателей используя методику [44].

При частотном регулировании приводов компрессорных установок используются известные математические зависимости между частотой вращения вала, производительностью машины, напором и мощностью привода [45]

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (4.1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad (4.2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3, \quad (4.3)$$

где Q – производительность машины в м³/с;

H – создаваемый напор сети в вод.ст.;

P – мощность, потребляемая машиной в кВт.

Индексы 1 и 2 в формулах (4.1) – (4.3) обозначают два режима работы машины. Как и в работе [2, с.54] вводим два понятия P_{max} – мощность привода

машины при отсутствии создаваемого местного гидравлического сопротивления, то есть при полностью открытых клапанах или задвижках, P_{min} – тоже при полностью закрытых клапанах или задвижках. Таким образом, в первом случае, в сети будет создаваться максимально возможный расход Q_{max} , создаваемый данной машиной в данной гидравлической трубопроводной сети, а во втором случае расход Q будет равным нулю. Соответственно, расходуемая мощность привода при крайних пределах регулирования расхода будет составлять P_{max} и P_{min} , а при регулировании частоты вращения вала привода соответственно P_{max} и ноль.

При частотном регулировании от производительностиравной Q_{max} до некоторого значения Q мощность привода будет изменяться в пределах от P_{max} до P .

При регулировании производительности машины дросселированием, то есть закрытием шиберов (задвижек) или стравливания воздуха в атмосферу, связь между степенью уменьшения производительности и степенью снижения мощности, как показано в работе [2, с.60], принимается линейной и записывается в виде

$$P_{op} = P_{min} + (P_{max} - P_{min}) \frac{Q}{Q_{max}}, \quad (4.4)$$

где P_{op} – мощность электропривода машины при частичном закрытии шибера (задвижки).

Мощность привода при частотном регулировании будет составлять

$$P_{cp} = P_{max} \left(\frac{Q}{Q_{max}} \right)^3 \quad (4.5)$$

Выполним преобразование формул (4.4) и (4.5). Для этого учтем некоторые изменения параметров мощности и производительности

$$Q_{\max} - Q = \Delta Q; \quad P_{\max} - P = \Delta P. \quad (4.6)$$

С учетом этих обозначений формула (4.4) примет вид

$$\frac{\Delta P_{op}}{P_{\max}} = \left(1 - \frac{P_{\min}}{P_{\max}}\right) \frac{\Delta Q}{Q_{\max}}, \quad (4.7)$$

а формула (4.5)

$$\frac{\Delta P_{cp}}{P_{\max}} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta Q}{Q_{\max}}\right)^3. \quad (4.8)$$

Из формулы (4.6) видно, что относительное изменение мощности $\Delta P_{op}/P_{\max}$ зависит не только от относительной производительности машины $\Delta Q/Q_{\max}$, но и от отношения P_{\min}/P_{\max} .

Используя формулы (4.7) и (4.8) представим график зависимости потребляемой мощности, $\Delta P_{op}/P_{\max}$ и P_{cp}/P_{\max} от производительности КУ $\Delta Q/Q_{\max}$ в процентном соотношении (Рисунок 4.1). Для этого произведен расчет этих величин при условии, что $P_{\min}/P_{\max} = 5$ [1, с.33].

Таблица 4.1 – Относительные изменения мощности электропривода при различных изменениях подачи воздуха.

Изменение подачи $\Delta Q/Q_{\max}$	0	0,1	0,25	0,50	0,75	1,00
Изменение мощности привода $\Delta P/P_{\max}$ путем закрытия шиберов (задвижек)	0	0,05	0,125	0,50	0,375	0,50
Изменение мощности привода $\Delta P/P_{\max}$ путем частотного регулирования привода	0	0,271	0,578	0,875	0,984	1,00

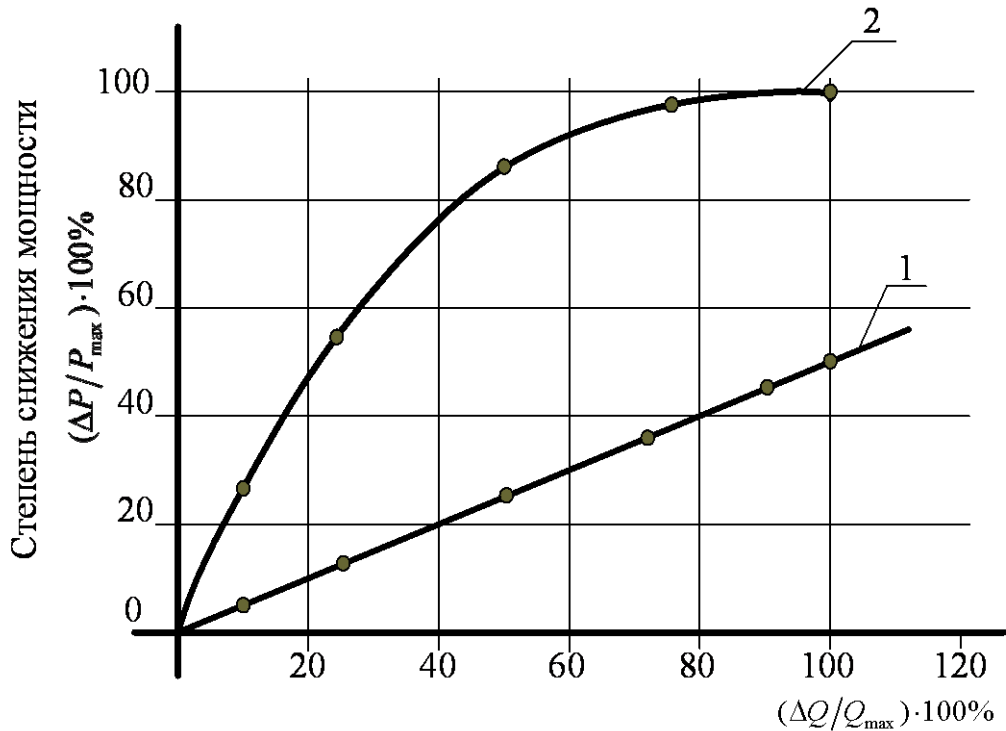


Рисунок 4.3 – Изменения потребляемой мощности компрессора при регулировании ее производительностью: 1–методом дросселирования; 2– частотным методом.

Из приведенных данных в таблице 4.1 и рисунка 4.3 видно, что при отсутствии регулирования производительность машины не изменяется ($\Delta Q/Q_{\max} = 0$), следовательно, мощность привода $\Delta P/P_{\max} = 0$. Однако с увеличением степени сокращения производительности, увеличивается степень сокращения потребляемой мощности. [56,57] Так, при полном сокращении подачи воздуха КУ ($\Delta Q/Q_{\max} = 100\%$), потребляемая мощность привода уменьшается при дросселировании на 50% а при регулировании частоты вращения вала привода – на 100%. Кроме того, из графика видно, что при ЧРП экономия электроэнергии осуществляется в значительной мере при снижении интенсивности работу КУ.

В аналитическом виде снижение мощности привода при частотном регулировании по сравнению с регулированием дросселированием может быть

выражена разностью $\frac{\Delta P_{\text{чр}}}{P_{\text{max}}} - \frac{\Delta P_{\text{др}}}{P_{\text{max}}}$. Эту разность можно представить в виде

$$\frac{\Delta P_{чр}}{P_{\max}} - \frac{\Delta P_{ор}}{P_{\max}} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta Q}{Q_{\max}}\right)^3 - \left(1 - \frac{P_{\min}}{P_{\max}}\right) \frac{\Delta Q}{Q_{\max}}. \quad (4.8)$$

Из формулы (4.8) видно, что функция в правой части уравнения относительно величины $\Delta Q/Q_{\max}$ не является гладкой. Кроме того видно, что при некотором значении $\Delta Q/Q_{\max}$ левая часть этого уравнения имеет точку максимума. Точка экстремума находится по известному правилу дифференцируя левую часть уравнения по $\Delta Q/Q_{\max}$ и приравнивая ее к нулю. Из этого условия находят величину $\Delta Q/Q_{\max}$, при котором левая часть уравнения имеет максимальное значение. Выполнение этой операции показало, что левая часть уравнения (4.8) имеет максимум при $\Delta Q/Q_{\max} = 0,592$. То есть, указанный максимум имеет место быть при уменьшении производительности машины до 59,2% от Q_{\max} . Однако, это не означает, что при дальнейшем регулировании производительности машины мощность её привода не будет снижаться. Из рисунка 4.3 видно, что при полном прекращении генерации воздуха $\Delta Q/Q_{\max} = 100\%$ мощность привода при частотном регулировании (кривая 2) будет асимптотически приближаться к нулю ($\Delta P/P_{\max} \approx 100\%$), тогда как при регулировании закрытием шиберов (задвигки) она в этом случае может снизиться только на 50%.

График сравнительной функции, построенный по уравнению (4.8) при принятом значении $\Delta P_{\min}/P_{\max}$ равном 0,5, показан на рисунке 4.4.

Из рисунка видно, что эффективность системы регулирования КУ с ЧРП во всем диапазоне выше, по сравнению методом дросселирования. При этом на глубине регулирования 20% от максимального расхода и выше, дополнительное снижение мощности привода при частотном регулировании по сравнению с традиционным методом (40...60)% от максимальной мощности привода. А при снижении производительности машины на 10% мощность привода снизится примерно на 20%. То есть, при небольшой глубине регулирования снижение

производительности на каждый процент к снижению затрачиваемой мощности на 2%.

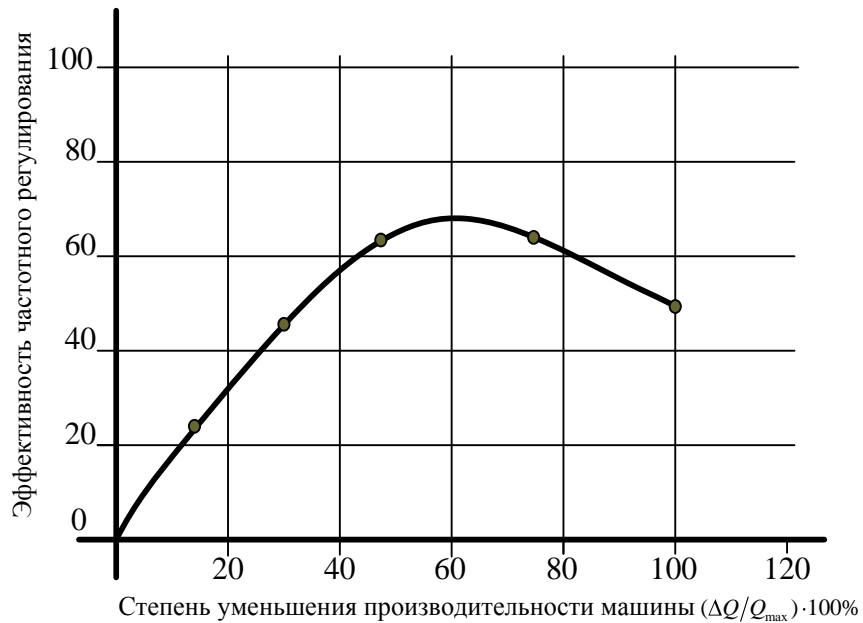


Рисунок 4.4 – Сравнительная эффективность частотного регулирования производительностью машины по сравнению с регулированием методом дросселирования

Приведенные выше результаты получены при $\Delta P_{min}/P_{max} = 0,5$. Однако в реальных условиях значение этого отношения будет зависеть как от гидравлической или аэродинамической (для винтовых КУ) характеристик машины, так и от характеристик трубопроводной сети, на которую работает эта машина. Поэтому величины P_{min} и P_{max} необходимо в каждом случае определять экспериментальным путем в реальных условиях.

4.3. Выводы по разделу 4

1. Разработана структура технических средств системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки, что позволило реализовать принципиальную схему микропроцессорного контроллера, провести ее испытания в масштабе и подтвердить адекватность разрабатываемой системы.

2. Обоснована экономическая эффективность модернизации системы автоматического управления производительности КУ. Установлено, что при снижении производительности машины на 10% мощность привода снизится примерно на 20%. То есть, на каждый процент снижения производительности, затрачиваемой мощности снижается на 2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и получено решение научно-практической задачи совершенствования системы регулирования производительности компрессорной установки на сортировочной станции, позволяющее понизить энергозатрат и повысить безотказность и долговечность узлов. При этом обеспечивается открытость, масштабируемость и тиражируемость системы.

По результатам диссертационной работы сформулированы следующие выводы:

1. Выполнен анализ статистических данных и определены факторы влияющие на энергетические затраты на сортировочной станции. Это позволило выявить корреляционная связь между затратами электроэнергии и факторами технологического процесса, а также определить функциональную зависимость этих параметров.

Более глубокий анализ технологических работ и природных явлений, влияющих на сортировочный процесс на станции, позволил разработать многофакторную прогнозно-динамическую математическую модель затрат энергии на переработку одного вагона/отцепа.

2. Выполнена разработка функциональной и структурной модели системы регулирования производительности компрессорной установки, на основе которых разработана алгоритмическая схема. Данная схема дала возможность смоделировать и исследовать динамические свойства предложенной системы. Анализ результатов моделирования подтверждает соответствие качественного поведения модели основным характеристикам исследуемого технологического и технического процесса, а также результатам, приведенным в литературных источниках.

3. Проведена модификация математической модели управления частотно регулируемого привода с учетом задающих коэффициентов производительности. На основе этого выполнен синтез компьютерной

имитационной модели системы автоматического регулирования компрессорной установки, что позволило провести объективный анализ пусковых и регулировочных характеристик предложенной системы и существующей. На основе анализа выявлены следующие достоинства предложенной системы управления: мягкий пуск и останов приводных двигателей, что значительно увеличивает срок службы агрегатов; уменьшение энергозатрат за счет регулировки производительности с учетом технологических работ на станции.

4. Разработаны алгоритмы функционирования программного обеспечения микропроцессорного контроллера, которые включают в себя полученную математическую модель управления трехфазным двигателем компрессорной установки. На основе этих алгоритмов разработано программное обеспечение нижнего уровня.

5. Разработан комплекс технических средств системы автоматического регулирования, а также подключения ее к автоматизированной системе управления сортировочной станции АСУ СС. Это позволило разработать принципиальную модель в масштабе системы регулирования производительности КУ и провести испытания. Данные испытания подтвердили адекватность разрабатываемой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сацюк, А.В. Экономическая эффективность частотно-регулируемого электропривода машины по перекачки газожидкостных смесей. А.В. Сацюк, А.М. Гушин, В.И. Дорошко // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту.– 2012.– №32. – С.195-200
2. Сацюк, А.В. Экономическая эффективность частотно – регулируемого электропривода компрессорной установки на сортировочной станции. А.В. Сацюк, А.М. Гушин // Труды Ростовского государственного университета путей и сообщений. Научно технический журнал. – Ростов-на-Дону, 2015.– №3(32).– С.56-61.
3. Похилко, С.П. Забезпечення ресурсозбереження шляхом удосконалення технології роботи технічних засобів підсистеми розформування сортувальних станцій [Текст]:: дис. канд. техн. наук: 05.22.20/ С.П. Похилко; Українська державна академія залізничного транспорту. – Харьков. –2005. – 273с.
4. Сагайтис, В.С. Устройства механизированных и автоматизированных сортировочных горок: учеб. пособие для вузов / В.С. Сагайтис, В.Н. Соколов.– Москва: Высшая школа,1991. – С.400.
5. Николаев, В.Г. Энергосберегающие методы управления режимами работы насосных установок систем водоснабжения и водоотведения [Текст]:: дис. докт. техн. наук: 05.23.04/ В.Г.Николаев; ОАО «НИИ ВОДГЕС». – Москва, 2010. – 375с.
6. Угольников, А.В. Оптимизация режимов работы рудничных пневматических сетейпри транспортировании сжатого воздуха. [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.05.06 / А.В. Угольников; ОАО Институт "УРАЛГИПРОШАХТ", Екатеринбург, 2008. – 161с.
7. Одикадзе, В.Р. Развитие технологии и разработка средств мониторинга функционирования систем автоматизации сортировочных процессов. [Текст]: дис. канд. техн. 05.13.06/ В.Р. Одикадзе; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2008. – 199с.

8. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек.– Москва: Энергия,1974. – 839с.– (Учебник для студентов высш. техн. заведений.).
9. Кацман, М.М. Электрические машины автоматических устройств: учеб. пособие / М.М. Кацман.– Москва: «ФОРУМ – ИНФРА-М». – 2002. – 262с.
10. Слежановский, О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями учеб. пособие / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 256с.
11. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод (на базе преобразователей ALTIVAR) / Центр обучения, Санкт-Петербург. – 1999. – 39с
12. Усольцев, А.А. Векторное управление асинхронным двигателями: учебное пособие / А.А. Усольцев.– Санкт –Петербург, 2002. – с.40.
13. Сацюк, А.В. Аналіз роботи привідного двигуна компресорної установки на сортувальній гірці при частотному управлінні / А.В. Сацюк // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту.– ДонІЗТ. – 2013. – №32. –С.37-47.
14. Длина, А.Н. Математическая статистика: учебное пособие/ А.Н. Длина.– Москва: «Высшая школа», 1975.– с. 398.
15. Гайдышев, И.А. Анализ и обработка данных: специальный справочник/ И.А. Гайдышев. – Санкт Петербург: Питер, 2001. – 752с.
16. Вентцель, В.Е. Теория вероятности: учебное пособие / В.Е. Вентцель, Л.А. Овчаров.– Москва: «Наука»,1969.– с.366.– (главная редакция физико-математической литературы).
17. Горельшева, Г.В., Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и заданиях с применением Excel: учебное пособие / Г.В. Горельшева, И.А. Кацко.– Ростов-на-Дону: «Феникс», 2005.– с.478.
18. Сацюк, А.В. Прогнозное динамическое моделирование энергетических затрат при расформировании подвижного состава на сортировочной горке / А.В.Сацюк, С.В. Бушуева, М.Н. Чепцов // Научно-технический журнал. Транспорт Урала.– Екатеринбург, 2015.– №4.– С.69-74.

19. Сацюк, О.В. Аналіз залежності електроспоживання компресорної установки від кількості оброблених вагонів на сортувальній гірці / О.В. Сацюк, В.Й. Поддубняк, М.М. Чепцов // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Донецьк, 2012. – № 29. – С.85-88.
20. Правдин, Н.В. Проектирование железнодорожных станций и узлов: учебное пособие / Н.В. Правдин, Т.С. Банек, В.Я. Негрей.– Часть 2.– Минск: «Высшая школа», 1984. – 288с.
21. Пастухов, И.Ф. Конструкция вагонов / И.Ф. Пастухов, В.В. Пигунов, Р.О. Кошкалдо. – 2-е издание. – Москва, 2004. – 504с.
22. Сацюк, О.В. Прогнозне динамічне моделювання енергетичних витрат при розформуванні рухомого складу на сортувальній гірці / О.В. Сацюк // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Донецьк, 2012. – №31. – С.42-47.
23. Правдин, Н.В. Проектирование железнодорожных станций и узлов. / Н.В. Правдин, Т.С. Банек, В.Я. Негрей.– Часть 2 – Минск: «Высшая школа», 1984. – 288с.
24. Шмелев, В.Ф. Планерование / В.Ф. Шмелев. – Москва: Ордена «Знак почета», издательство ДОСААФ СССР, 1977. – 34с.
25. Сарайский, Ю.Н. Аэронавигация. Основы навигации и применение геотехнических средств: учебное пособие / Ю.Н. Сарайский, И.И. Алешков. – Санкт-Петербург, 2010. – 307с.
26. Хромов, С.П. Метеорология и климатология: классический университетский учебник / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – Москва: Московский государственный университет им. Ломоносова, 2006. – 569с.
27. Похилко, С.П. Оптимизация энергозатрат компрессорной установки в условиях сортировочного процесса. / С.П. Похилко, А.В. Сацюк, А.В. Петрушина, М.Н. Чепцов, Л.Ф. Риполь-Сарагоси, Т.Л. Риполь-Сарагоси // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозастроения. Новочеркасск., 2017.– №4 (78).–С.28-37.

28. Бочаров, О.П. Динамічна модель сортувальної станції та її роль в подальшій оптимізації процесу перевезень / О.П. Бочаров, Г.О. Міхальов, В.П. Мороз, В.О. Шиш // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Харків, 2011.– №5.– С.74-76.
29. Типовой технологический процесс работы сортировочной станции / МПС РФ от 27.05.2003.– Москва: ТЕХИНФОРМ. –2003. – 274с.
30. Сацюк, А.В. Разработка динамической имитационной модели системы регулирования производительностью компрессорной установки на сортировочной горке / А.В. Сацюк, Л.Ф. Риполь-Сарагоси, Т.Л. Риполь-Сарагоси, М.Н. Чепцов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозастроения.– Новочеркасск, 2015.– №2(70).– С.168-178.
31. Гайдук, А.Р. Математические основы теории систем автоматического управления. – Москва: Фирма «Испо-Сервис», 2002. – 152с.
32. Батицкий, В.А. Автоматизация производственных процессов и АСУТП в горной промышленности: учебное пособие / В.А. Батицкий, В.И. Куроедов, А.А. Рыжков, Москва: Недра, 1991.–303с.
33. Герасимьяк, Р.П. Динамика асинхронных электроприводов крановых механизмов: учебное пособие/ Р.П. Герасимьяк. – Москва: Энергоатомиздат,1986.– 168 с.
34. Программная среда VisSim / Visual Solution Inc.: [Електроний ресурс] /<http://www.vissim.com/>
35. Сацюк, А.В. Моделювання динамічних характеристик компресорної установки на сортувальній гірці / А.В. Сацюк, М.Н. Чепцов, В.Й. Поддубняк // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту.– Донецьк, 2012.– №30. – С.51- 58.
36. Сацюк, А.В. Разработка модели оптимального управления двигателем компрессорной станции на сортировочной горке / А.В. Сацюк // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – Донецьк, 2017.– №44.–С.9-23

37. Sun, J. Pulse-Width Modulation. Chapter 2/ Jian Sun// Department of Electrical, Computer, and Systems Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180-3590, USA
38. Герасимьяк, Р.П. Динамика асинхронных электроприводов крановых механизмов / Р.П. Герасимьяк.– Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 168с.
39. Зайцев, Г.Ф. Теория автоматического управления: учебное пособие / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов, О.И. Брицкий. – Киев: Техніка, 2002. – 587с.
40. Технічна документація на асинхронний двигун марки 5АН315А2С/ АО ВНИИЭ:МЭИ, Москва, 1997. – 24с
41. Герасимьяк, Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещев. – Одесса: СМІЛ, 2008. – 192 с.
42. Бібліотека і доступність інформації у сучасному світі: електронні ресурси в науці і техніці: Консультаційний центр MathLab [Електронний ресурс] / официальный сайт The MathWorks.–2013.– режим доступа до ресурсу: <http://matlab.exponenta.ru/>
43. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода, АО ВНИИЭ:МЭИ, Москва, 1997. – 12с
44. Сацюк, А.В. Метод расчета силовых каскадов при проектировании системы управления тяговыми электродвигателями / А.В. Сацюк // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозастроения. – Новочеркасск,2018. – №1-2(79). – С.126-135.
45. Колпаков, А.И. Особенности теплового расчета импульсных силовых каскадов /А.И. Колпаков // Компоненты и технологии. –2002. – №1.–С.23-28
46. Колпаков, А. И. Программа теплового расчета SemiSel /А.И. Колпаков // Компоненты и технологии.– 2002. –№ 9.–С.12-19
47. Двигатель постоянного тока тяговый типа ЭД-118А У2 16.514.058-72 [Электронный ресурс] / СпецТехноРесурс: Москва.– Computer. - Электрон. дан. - 2013. - Vol. 46, № 2. – Режим доступа: <http://laborant.ru/eltech/01/3/3/01-98.htm>

48. Modules SEMiX453GB12E4 SEMIKRON [Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL: http://www.semikron.com/Datsheet_Trench_IGBTModules_SEMiX453GB12E4p.pdf
49. «Бесплатная помощь при разработке конвертеров» /Arendt Wintrich. «Freehelpwith your converter design», Semikron Elektronik,2006. [Электронный ресурс]/ Режим доступа: [http:// https://www.semikron.com/Freehelpwith_your_converter_design](http://https://www.semikron.com/Freehelpwith_your_converter_design)
50. Колпаков, А. И. Обеспечение надежности силовых IGBT модулей /А.И. Колпаков // Электронные компоненты. – 2003. – № 4. – С.23-25
51. Колпаков, А. И. Принципы работы и особенности программы теплового расчета SemiSel /А.И. Колпаков // Электронные компоненты.– 2004. – № 6.– С.41-46.
52. The Internet of Things: SEMIKRON. Datsheetdriver IGBTSKH1 27W [Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL: [http:// https://www.semikron.com](http://https://www.semikron.com).– Загл. с экрана.
53. Datsheet microcontroller Atmega48pu ATMEL. [Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL: http://www.microchip.com/Datsheet_microcontroller_Atmega48pu.pdf.128с.
54. Datsheet max232: TexesInstrumental. [Электронныйресурс] / Режим доступа: URL: http://www.ti.com.Datsheet_max232.pdf.–26с.
55. Автоматизация и механизация переработки вагонов на станциях / Муха Ю.А., Шейкин В.П., Харланович И.В. и др.–Москва: Транспорт,1985.–247 с.
56. Автоматизация работы сортировочных станций (с применением вычислительных машин) / Под ред. Г.И. Олешко и Б. дел РИО. – Москва: Транспорт, 1964 – 175 с.
57. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на станциях магистрали // Под ред. Е.М. Шафита. Сборник научных трудов ДИИТа, 1986. – 127 с.

58. Аксенов В.И., Нурмухамедов Р.З. Применение тепловозов на маневрах – мощный резерв увеличения перерабатывающей способности станции.//Тр. ТашИИТ.1960.- вып. XIII. – С.15 - 32.
59. Акулиничев В.М., Кудрявцев В.А., Шульженко П.А. Применение математических методов и вычислительной техники в эксплуатации железных дорог.- Москва: Транспорт, 1973. – С. 115 – 141.
60. Астахов, П.Н. О сопротивлениях подвижного состава при малых скоростях движения / П.Н. Астахов, И.М. Сирота // Вестник ВНИИЖТ. – № 4. – 1973.
61. Ахвердиев, К.С. Оптимальный горочный профиль и динамика скатывания отцепа по нему/ К.С. Ахвердиев, Б.И. Алибеков, В.П. Жуков // Транспорт: наука, техника, управление.–1991.–№8. – С. 5-10.
62. Бутько, Т.В. Лослідження впливу конструктивних параметрів поздовжнього профілю насувної частини гірок на витрати палива при розформуванні составів / Т.В. Бутько, О.М. Огар, М.П. Топчієв // Зб. наук. праць, Укрдазт, 2003. – № 53. – С. 13-19.
63. Буянов, В.А. Автоматизированные информационные системы на железнодорожном транспорте / В.А. Буянов, Г.С. Ратин– Москва: Транспорт, 1984.–С.64-72.
64. Буянова В.Н. Моделирование на ЭЦВМ отпуска составов с переменной скоростью. В книге «Автоматизация управления перевозочным процессом». – Москва: Транспорт, 1966.–344с.
65. Варгин, С.Н. ЭЦВМ ускоряет формирование и отправление поездов / С.Н. Варгин, А.Ф. Крапивин, Л.В. Бурашников, Н.Д. Иловайский // Железнодорожный транспорт, 1965.– №4. С.34-44.
66. Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистики. Учеб. пособие для вузов./ В.Е. Гмурман. Изд. 5-е, стер. - Москва: Высш. шк., 1999. – 400 с.
67. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов./ В.Е. Гмурман - Москва: Высш. шк., 1999. – 479 с.

68. Гуричев, Ю.Т. Об одном подходе к задаче нахождения оптимальных параметров горки / Ю.Т. Гуричев, А.Н. Гуда, С.Н. Дегтярев, Н.Н. Новгородов // Микропроцессорные системы управления на железнодорожном транспорте. Труды РИИЖТа.–Ростов-на-Дону, 1984.– С.35-38.
69. Данько, Н.И. Исследование вопросов надежности транспортного обслуживания топливно – энергетического комплекса Украины (на примере перевозок каменного угля) / Н.И. Данько.// Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Харьков, ХарГАЖТ, 1994. –26 с.
70. Данько, М. І. Математичне моделювання витрат палива маневровими локомотивами / М. І. Данько, Т. В. Бутько, В.Д. Зонов, М.П. Топчієв // Залізнич. транспорт України, 2004. – №3. – С. 29 – 32.
71. Дашков, М.Г. Анализ норм проектирования сортировочных горок и условий пропуска по их профилю вагонов с увеличенной базой / М.Г. Дашков // Совершенствование управления перевозками на железных дорогах Урала и Сибири.–Межвуз. сб. науч. трудов.–Новосибирск, 1986.–С. 19-28.
72. Дашков, М.Г. Вопросы проектирования и выправки профиля сортировочных горок: Автореф. Дисс. канд. техн. наук.–Ленинград, 1980.-18 с.
73. Дашков, М.Г. О возможности увеличения максимального значения уклона скоростного участка сортировочной горки/ М.Г. Дашков // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. науч. трудов. – Днепропетровск, 1981.– № 216/14.- -С. 76-84.
74. Ефименко, Ю.И. Этапность развития железнодорожных станций и узлов./ Ефименко Ю.И. – Ленинград: ЛИИЖТ, 1989. – 37 с.
75. Правдин, Н.В. Железнодорожные станции и узлы (задачи, примеры, расчеты) / Ред. Н.В. Правдин. – Москва: Транспорт, 1984.–296 с.
76. Забело, М.Л. Маневровая работа на железных дорогах / М.Л. Забело.– Москва: Трансжелдориздат, 1958. – 244 с.

77. Пригоровский В.Ф. Выбор рациональных сортировочных устройств малой мощности на железнодорожных станциях: Автореферат дис. канд. техн. Наук.– Москва, 1962. – 24 с.
78. Разработка современных теоретических основ комплексного расчета сортировочных горок и систем управления процессом расформирования составов: отчет о НИР ВНИИЖТа / Рук. Л.Б.Тишков. 01.00.26.93.94.00; инв.№ 01930002341. – С. 120 – 184.
79. Родимов, Б.А. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных горок / Б.А. Родимов, В.Е. Павлов, В.Д. Проникова. – Москва: Транспорт, 1980.– 97 с.
80. Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. – Москва: Транспорт, 1996. - 328 с.
81. Смирнов, В.И. Вариационные принципы и динамика сортировочной горки/ В.И. Смирнов // Транспорт: наука, техника, управление.–1993.–№3. – С. 11-15.
82. Смирнов, В.И. Динамика скатывания одновагонных отцепов с сортировочной горки / В.И. Смирнов // Транспорт: наука, техника, управление. Москва, 1993.– №10.– С.29-34.
83. Совершенствование технических устройств и технологии управления процессом расформирования составов на сортировочных станциях: Межвуз.сб.науч тр. / Под ред. Ю.А. Мухи и др. - Днепропетровск: ДИИТ, 1986. – 115 с.
84. Сотников, Е.А. Интесификация работы сортировочных станций. – Москва: Транспорт, 1979. – 239 с.
85. Сотников, И.Б. Эксплуатация железных дорог: в примерах и задачах / И.Б. Сотников // - Москва: Транспорт, 1990. – 232 с.
86. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам. Под ред. А.И. Тищенко. Т.1. - Москва: Транспорт, 1976. – 432 с.
87. Техничко – экономические расчеты в эксплуатации железных дорог/ Под ред. Сотникова И.Б. Москва: Транспорт, 1983. - 254с.

88. Типовые нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожном транспорте. – Москва: Транспорт, 1987. – 367 с.
89. Типовий технологічний процес роботи сортувальної станції. – Киев: Транспорт України, 1998. – 201 с.
90. Фонарев, Н.М. Автоматизация процесса расформирования составов на сортировочных горках.–Москва: Транспорт, 1971.–271 с.
91. Хомич, А.З. Экономия топлива и теплотехническая модернизация тепловозов / А.З. Хомич, О.И. Тупицын, А.Э. Симсон – Москва: Транспорт, 1975.– 264 с.
92. ЧМЭ 3 Механическая часть. Том 1. Инструкции по эксплуатации и уходу за тепловозом ЧМЭ 3 и его описание. Механическая часть. Тяговая характеристика 3-02-9010-051. / ЧКД; Отраслевое предприятие завод Локомотивка-Соколово.–Прага, 1976. – С. 15-136.
93. Шапкин, И.Н. Информационные технологии в организации перевозок / И.Н. Шапкин // Железные дороги мира, 2003– №4. – С. 25-33.
94. Шафит, Е.М. Современные принципы построения АСУ сортировочных станций / Е.М. Шафит, И.В. Жуковицкий // Залізничний транспорт України, 2000.– №3. – С.22-26.
95. Шафит, Е.М. Совершенствование автоматизированных систем управления технологическими процессами на сортировочных станциях / Е.М. Шафит, И.В. Жуковицкий, Ю.А. Косорита, В.В. Елисеев // Залізничний транспорт України, 2003.– №5. – С. 53-55.
96. Шейкин, В.П. Эксплуатация механизированных сортировочных горок/ В.П. Шейкин, Москва: Транспорт, 1992. - 240 с.
97. Шипулин, А.П. Проектирование подвижной части сортировочных устройств с использованием ЭВМ для применения АЗСР/ А.П. Шипулин // Вопросы совершенствования проектирования и использования устройств железнодорожных и промышленных узлов: Труды МИИТа. Москва, 1976. – С. 88-89.

98. Электровоз ВЛ8. Руководство по эксплуатации. - Москва: Транспорт, 1973. – 312 с.
99. Миняев, Ю. Н. Энергосберегающие компрессорные технологии при эксплуатации пневмохозяйства промышленных предприятий / Ю. Н. Миняев, А. В. Угольников // V всероссийское совещание-выставка по энергосбережению: сборник материалов. – Екатеринбург, 2004. - С. 13-14.
100. Миняев, Ю. Н. Реинжиниринг пневмохозяйства промышленных предприятий / Ю. Н. Миняев, Б. Б. Зобнин, В. В. Молодцов, В. Ф. Копачев, А. В. Угольников // VI всероссийское совещание-выставка по энергосбережению: сборник материалов. – Екатеринбург, 2005. - С. 2-3.
101. Миняев, Ю. Н. Децентрализация при снабжении пневматической энергией шахтных потребителей сжатого воздуха / Ю. Н. Миняев, В. Т. Дмитриев, А. В. Угольников, В. В. Молодцов // Материалы Уральской горнопромышленной декады. - Екатеринбург, 2005. - С. 79-80.
102. Миняев, Ю. Н. Минимизация потерь энергии при транспортировании сжатого воздуха / Ю. Н. Миняев, А. В. Угольников, А. Х. Зарипов // V международная научно-техническая конференция «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». - Екатеринбург: УГГУ, 2007. - С. 157-163.
103. Угольников, А. В. Энергосбережение при транспортировании сжатого воздуха рудничных компрессорных установок/ А. В. Угольников // Материалы Уральской горнопромышленной декады. - Екатеринбург, 2008. - С. 283-285.
104. Яновський, П.О. Технологічне забезпечення якості перевізного процесу / П.О. Яновський // Збірник наукових праць «Проблеми транспорту». Національний транспортний університет, Київ, 2004.– С.93-100.
105. Яновський, П.О. Стан організації перевізного процесу на вітчизняних залізницях / П.О. Яновський // Залізничний транспорт України, 2005. – Київ. – №1, С.10-14.
106. Ed John Gero. Expert System in Computer Aided Design // Elsevier Science Publishers. – North – Holland. IFIP, 1987. – С. 21-28.

107. Gopner M. Моделирование скатывания отцепов с сортировочной горки // *Rangiertechnik und Gleisanschluss-technik*, 1987/1988.–P.25-29.
108. Grolms R., Mickler G. Микропроцессорная система управления расформированием составов на сортировочной станции Мюнхен-Северный // *Signal und Drant*, 1989.– №11.– P.207-214.
109. Herbst W. Should and Can the Productivity of High-Performance Marshalling Yards be Further increased // *Rail international*, 1989.– №11.–P.3-14.
110. Richard Mc Gill Frics, E.C. Harris. The future of rail infrastructure procurement of Europe // *European Railway Review*, November, 1996. – С.8-12.
111. Schwanhauser W., Muller A. Интеграция расцепляющих роботов в процесс расформирования составов на сортировочной горке // *Eisenbahntechnische Rundschau*, 1995. – №10. – P.697-703.

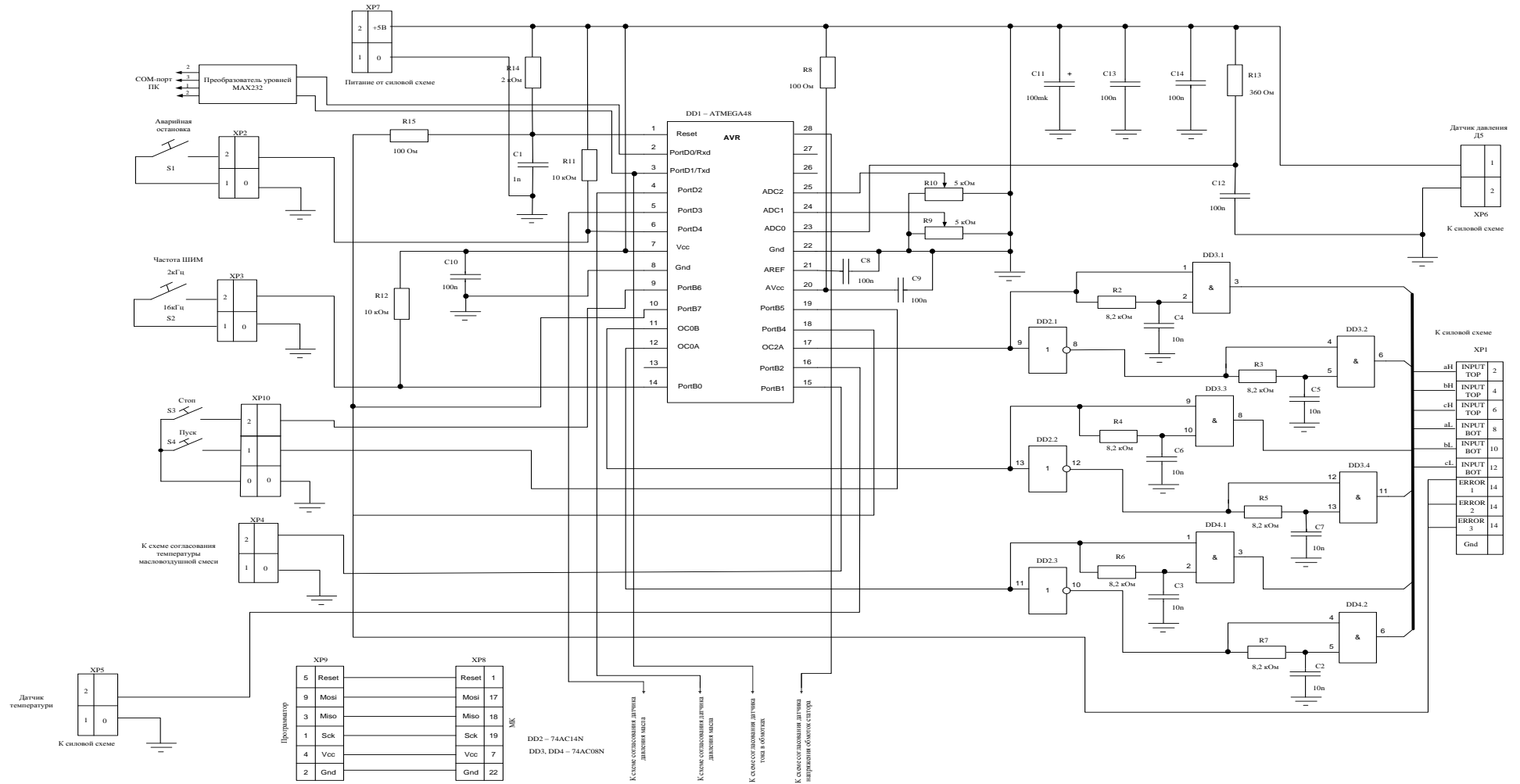
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Выходные данные для корреляционного анализа

Количество вагонов за смену, шт	Прогноз темпер.	Расход эл. энергии за смену, кВт/ч	1Ф+1Ф	1Фидер	2Фидер
1183	12	23	12880	7680	5200
1242	7	27	12907	7696	5211
1190	8	26	12933	7712	5221
1380	7	27	12960	7728	5232
1111	8	24	12984	7744	5240
1000	7	24	13008	7760	5248
1875	6	38	13046	7779	5267
950	10	11	13057	7795	5262
1195	9	22	13079	7811	5268
1141	10	23	13102	7828	5274
1250	9	23	13125	7844	5281
1189	8	23	13148	7858	5290
1147	9	22	13170	7868	5302
1200	9	21	13191	7877	5314
990	10	18	13209	7888	5321
1000	8	23	13232	7900	5332
1646	7	27	13259	7909	5350
1186	6	26	13285	7923	5362
1100	7	26	13311	7937	5374
1125	6	25	13336	7950	5386
1150	6	25	13361	7963	5398
1240	7	23	13384	7974	5410
1228	6	28	13412	7989	5423
1280	5	26	13438	8003	5435
1192	4	28	13466	8018	5448
1050	6	22	13488	8028	5460
1100	6	25	13513	8040	5473
1329	5	26	13539	8053	5486
1262	5	25	13564	8066	5498
1365	6	30	13594	8080	5514
1241	4	21	13615	8092	5523
1105	4	26	13641	8105	5536
1325	3	27	13668	8120	5548
1182	5	25	13693	8132	5561
1217	4	25	13718	8144	5574
1234	3	27	13745	8160	5585
1202	4	24	13769	8176	5593
1180	3	24	13793	8193	5600
1319	4	24	13817	8212	5605
1220	2	31	13848	8234	5614
1265	4	23	13871	8250	5621
1706	2	35	13906	8279	5627
1055	4	28	13934	8301	5633
1214	3	27	13961	8321	5640
1448	2	30	13991	8345	5646
1080	4	23	14014	8362	5652
1214	3	28	14042	8382	5660
1110	4	23	14065	8400	5665
1220	4	25	14090	8419	5671

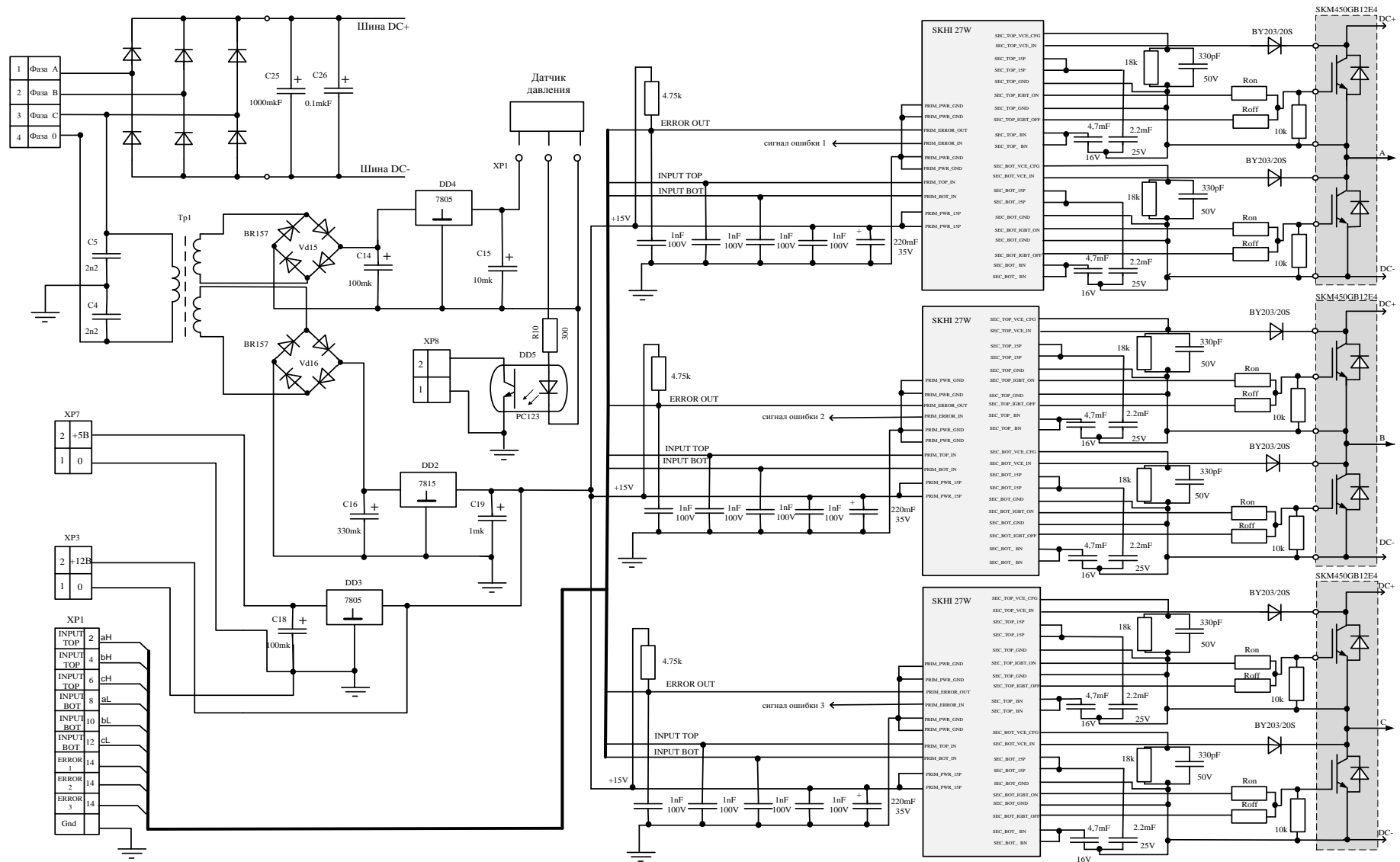
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Принципиальная схема микропроцессорной части системы управления приводным двигателем КУ



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Принципиальная схема силовой части системы управления приводным двигателем КУ



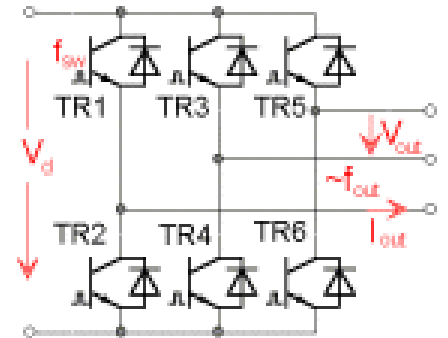
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Листинг программы SemiSel: результаты расчета тепловых режимов для трехфазного инвертора на базе модулей SKM450GB12E4

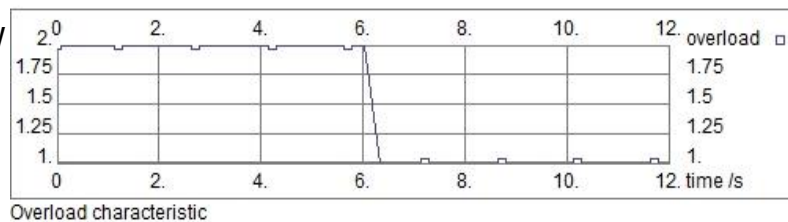
Project:

Topology DC/AC
 Circuit Inverter 3 Phases
 E-Mail satsuk@i.ua
 Application Inverter sistemi ORPCV KU

Description disser project

**Circuit:**

V_d 650 V
 V_{out} 380 V
 I_{out} 345 A
 P_{out} 200 kW
 f_{out} 50 Hz
 $\cos(\phi)$ 0.88
 f_{sw} 8 kHz
 $V_{min out}$ 52 V
 $f_{min out}$ 2 Hz
 Overload factor 2
 Overload duration 6 sec

**Device :**

Product line **SEMITRANS**
 Device **SKM450GB12E4**
 Use maximum values Yes
 Max. junction temperature 175°C

Transistor

$E_{tr} = 92 \text{ mJ (@600V)}$
 $V_{CE0.150} = 0.8 \text{ V}$
 $r_{C.150} = 3.635 \text{ mOhm}$
 $V_{CE.sat} = 2.44 \text{ V}$
 $I_c = 450.00 \text{ A}$
 $R_{th(j-c)} = 0.062 \text{ K/W}$
 $R_{th(c-s)} = 0.038 \text{ K/W}$

Diode

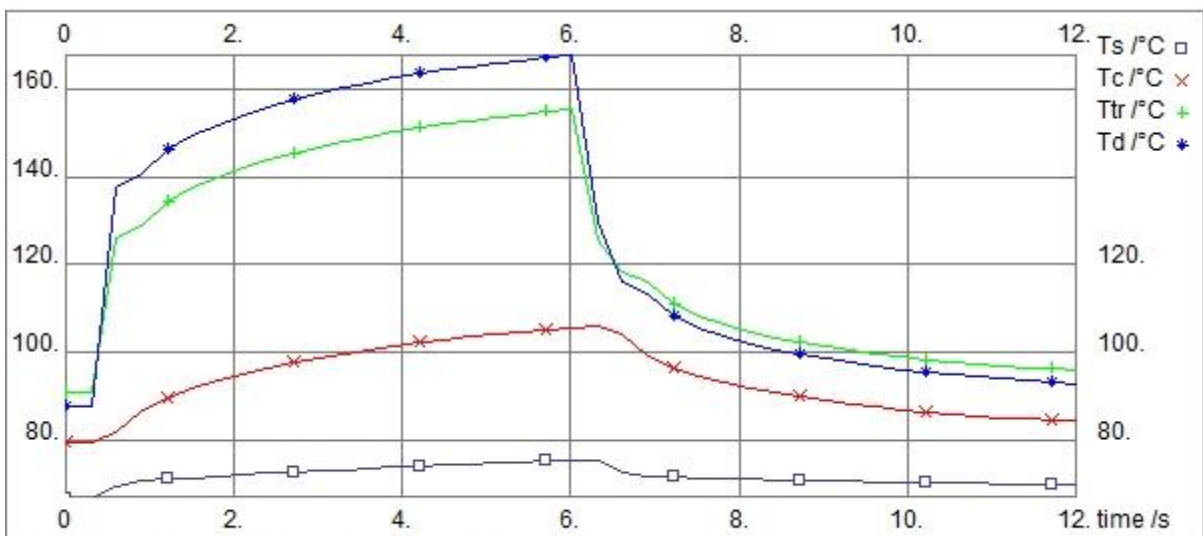
$E_d = 28 \text{ mJ}$
 $V_{T0.150} = 1.1 \text{ V}$
 $r_{T.150} = 3.4475 \text{ mOhm}$
 $V_f = 2.65 \text{ V}$
 $I_f = 450.00 \text{ A}$
 $R_{th(j-c)} = 0.14 \text{ K/W}$

Cooling:

Ambient temperature	35°C
Number of switches per heat sink	2
Number of parallel devices on the same heat sink	3
Additional power source at this heat sink	0 W
Predefined SK-Heat Sink	P16_300_16B
Correction factor	1
Forced Air Cooling, Flow Rate:	295 m ³ /h
R _{th(s-a)}	0.031 K/W

Calculated losses and temperatures with rated current, at overload and at f_{min out}:

	Rated current	Overload	f _{min} and Overload
P _{cond tr}	54 W	148 W	96 W
P _{sw tr}	75 W	173 W	172 W
P _{tr}	129 W	321 W	268 W
P _{cond d}	14 W	33 W	94 W
P _{sw d}	27 W	55 W	60 W
P _d	41 W	89 W	155 W
P _{tot}	1024 W	2459 W	2535 W
	Average Values	Average Values	Maximum Values
T _s	67 °C	75 °C	76 °C
T _c	80 °C	105 °C	106 °C
T _{tr}	88 °C	124 °C	156 °C
T _d	85 °C	117 °C	168 °C



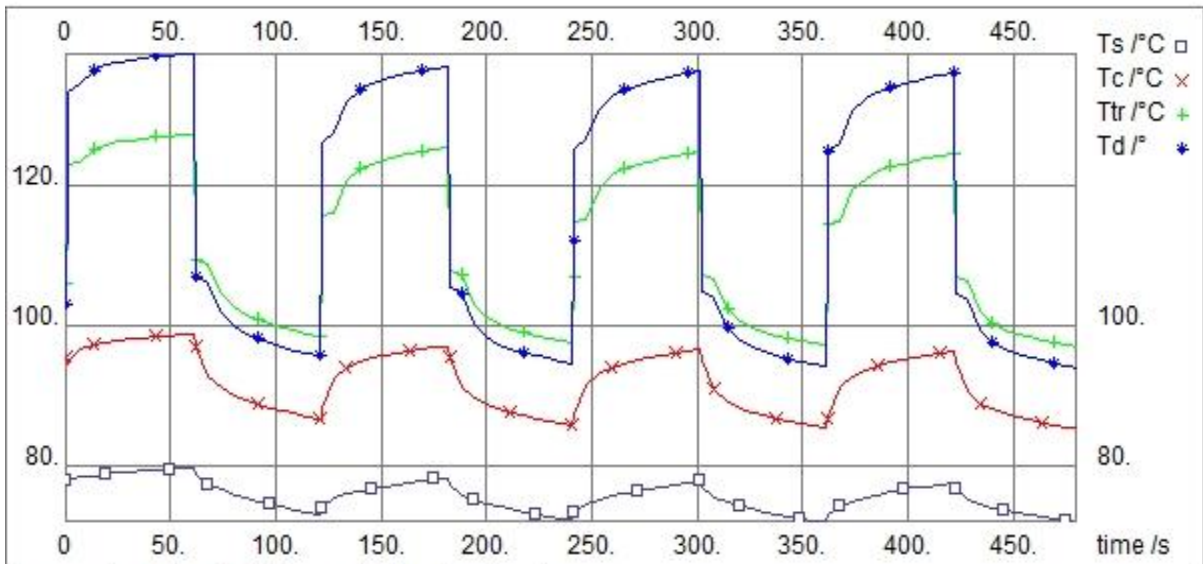
Temperature characteristic overload current during fmin



Calculated losses and temperatures with User defined load cycle:

Temperatures

T_s max	80 °C	T_s min	72 °C
T_c max	99 °C	T_c min	85 °C
T_{tr} max	128 °C	T_{tr} min	97 °C
T_d max	139 °C	T_d min	94 °C

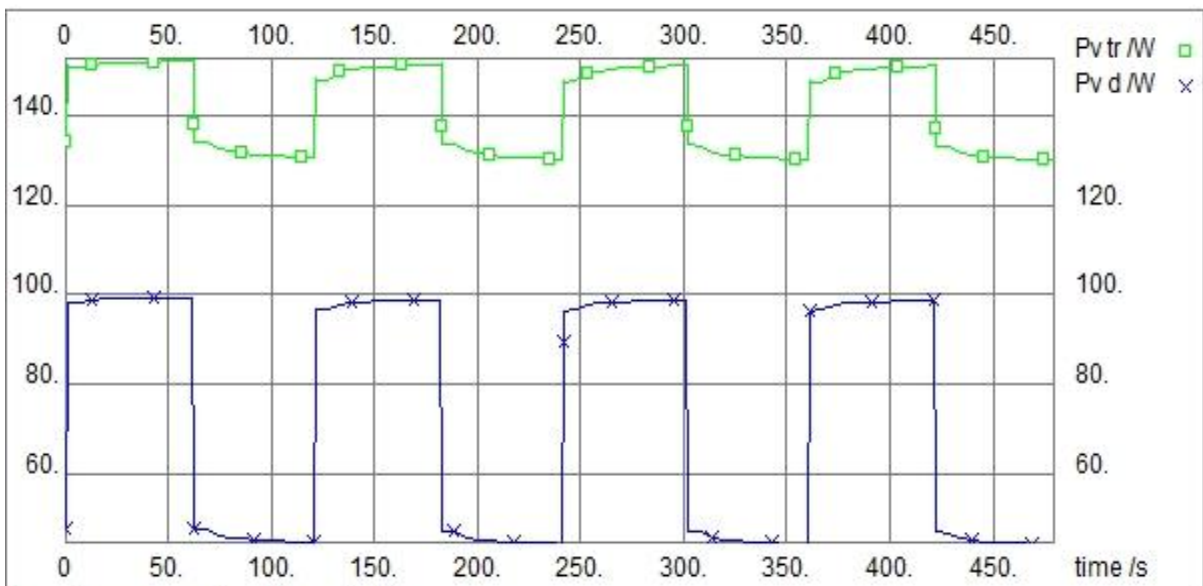


Temperature characteristic user defined load cycle



Power losses

P_{tr} av	142 W	P_d av	72 W
PV_{Tr} max	153 W	PV_{Tr} min	130 W
PV_D max	100 W	PV_D min	44 W



Power losses user load characteristic



Evaluation:

Recommendation by SEMIKRON: Do not use SEMIKRON devices over 150 °C

Device driver suggestion

Name	I _{out(av)} /mA	I _{out} /A	V _{isol} /kV	V _{ce max} /V	R _{gmin} / Ohm	Channels
1x SKYPER 42 LJ R ⁽¹⁾	120	20	5.0	1200	1.0	2

Additional Characteristics at given nominal operation conditions with one free parameter - X:

None selected

Note

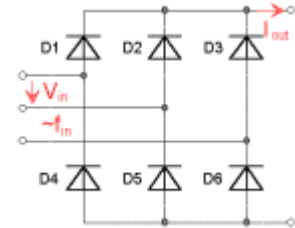
- 1) Low Jitter driver

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Листинг программы SemiSel: результаты расчета тепловых режимов для выпрямительного каскада на базе модулей SKKD380

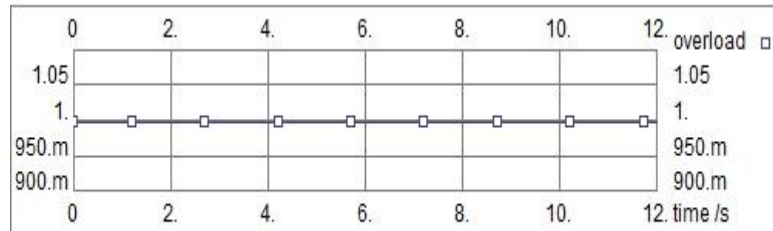
Project:

Topology AC/DC
 Circuit B6U
 E-Mail satsuk@i.ua
 Application Inverter 3 Phases
 Description disser project



Circuit:

V_{in} 650 V
 I_{out} 380 A
 $I_{out\ rms}$ 380 A
 f_{in} 50 Hz
 Form Factor 1.7321
 Overload factor 1
 Overload duration 6sec



Overload characteristic

Device :

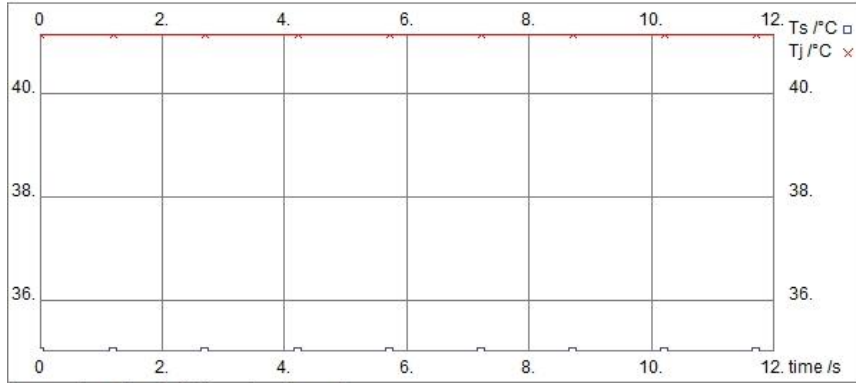
Product line **SemiPack**
 Device **SKKD380**
 Recommended voltage 2000V
 Max. junction temperature 150 °C
 Use maximum values Yes
 $V_{T0.25} = 0.95V$ $V_{T0.125} = 0.82V$
 $r_{T.25} = 0.33\ mOhm$ $r_{T.125} = 0.35\ mOhm$
 $R_{th(j-s)} = 0.15\ K/W$
 Data set Not set
 from: No Comment

Cooling:

Ambient temperature 35 °C
 Number of switches per heat sink 2
 Number of parallel devices on the same heat sink 3
 Additional power source at this heat sink 0 W
 Predefined SK-Heat Sink P16_200_16B
 Correction factor 1
 Natural air cooling, flow rate: 5 m³/h
 $R_{th(s-a)}$ 0 K/W

Losses and temperatures:

	Steady State	Overload
Losses_{device}	41 W	41 W
Losses_{tot}	246 W	246 W
Heat Sink Temperature	35 °C	35 °C
Junction temperature	41 °C	41 °C



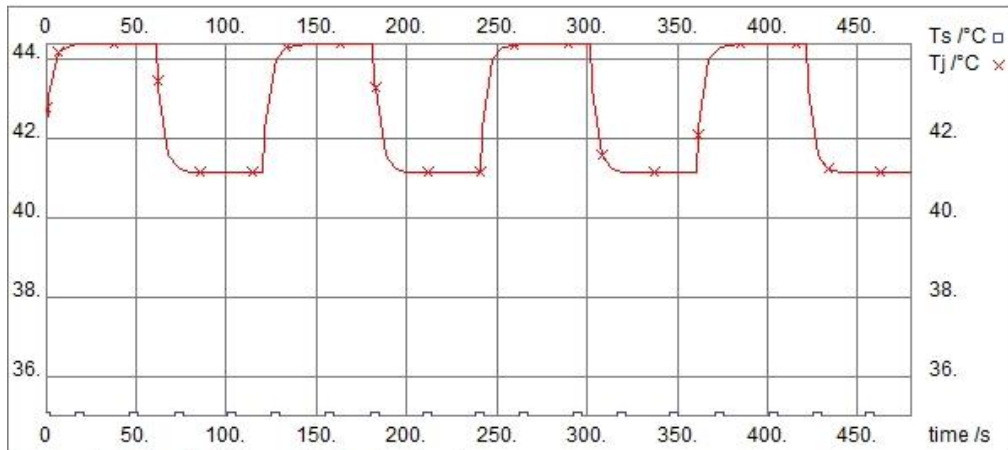
Temperature characteristic overload current



Calculation with user defined overload

$T_{S_{max\ ov}}$ 35 °C
 $T_{d_{max\ ov}}$ 44 °C

$T_{S_{min\ ov}}$ 35 °C
 $T_{d_{min\ ov}}$ 41 °C

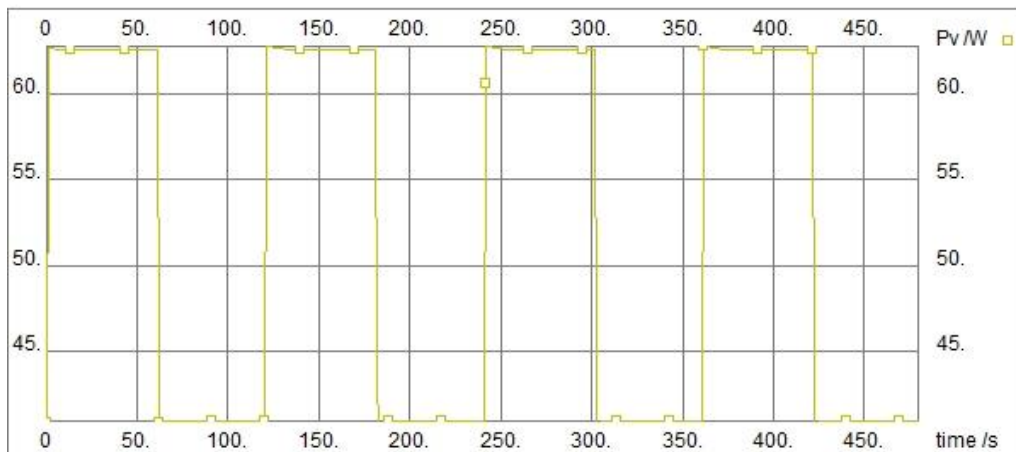


Temperature characteristic user defined load cycle



$P_{V_{max}}$ 63 W

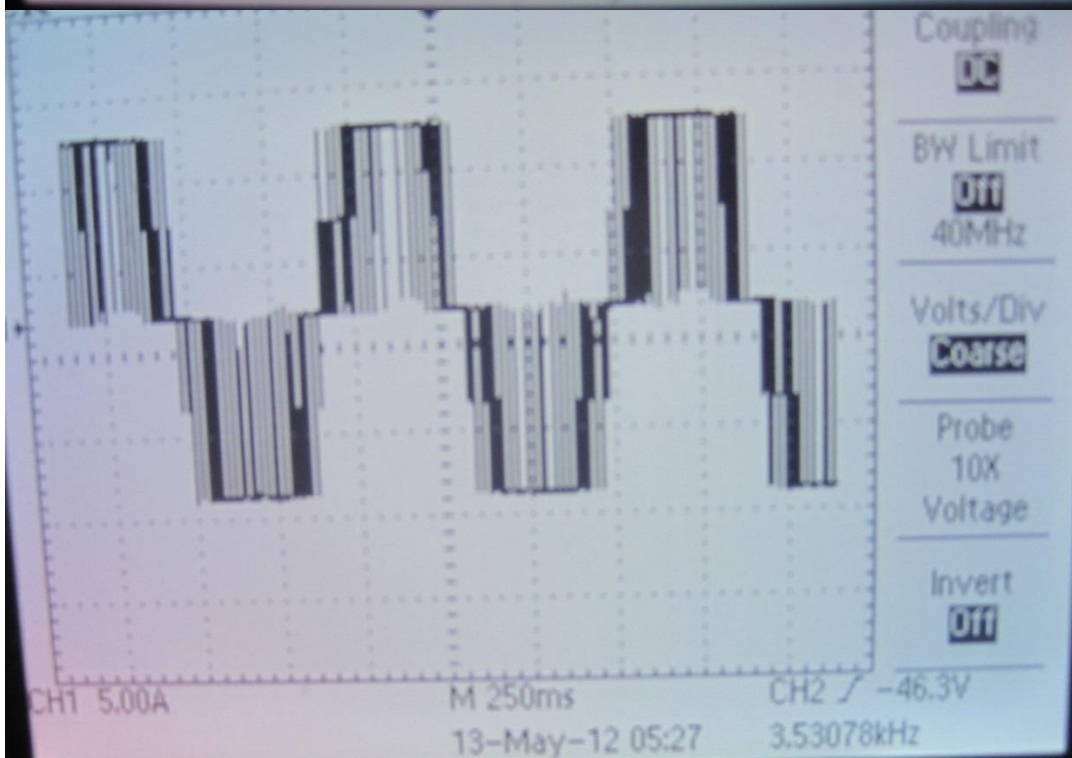
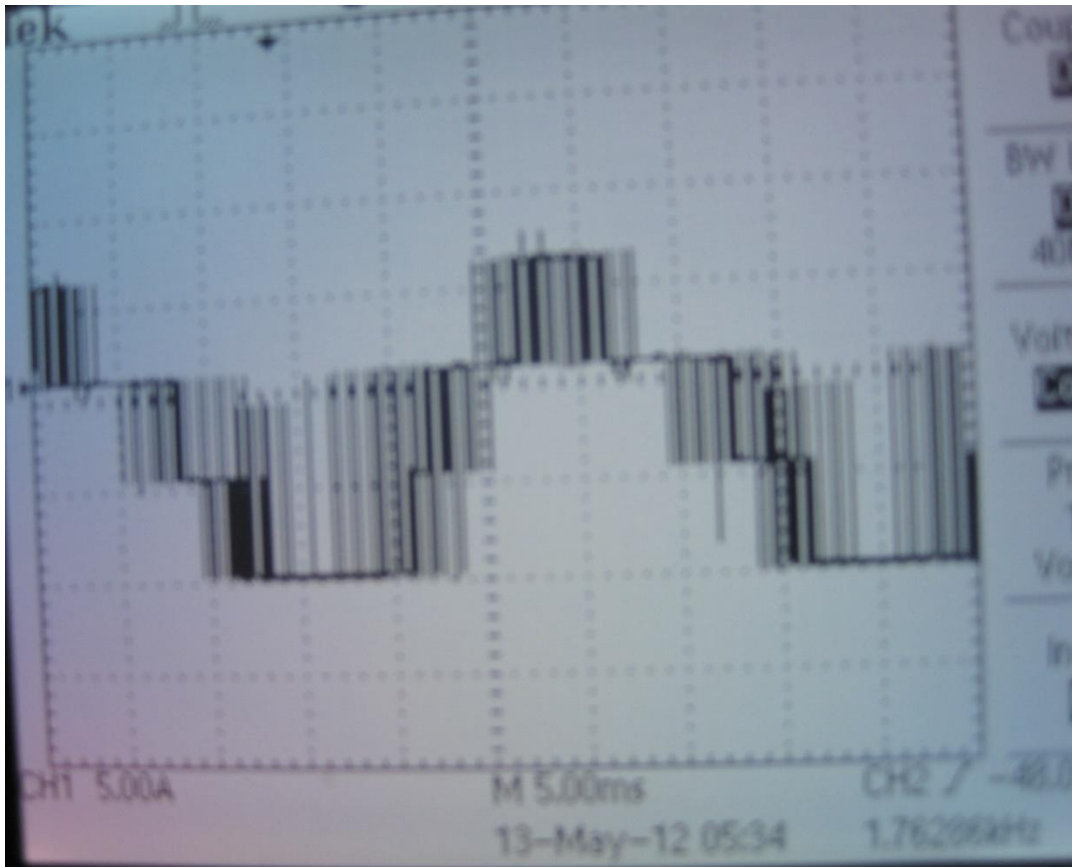
$P_{V_{min}}$ 41 W

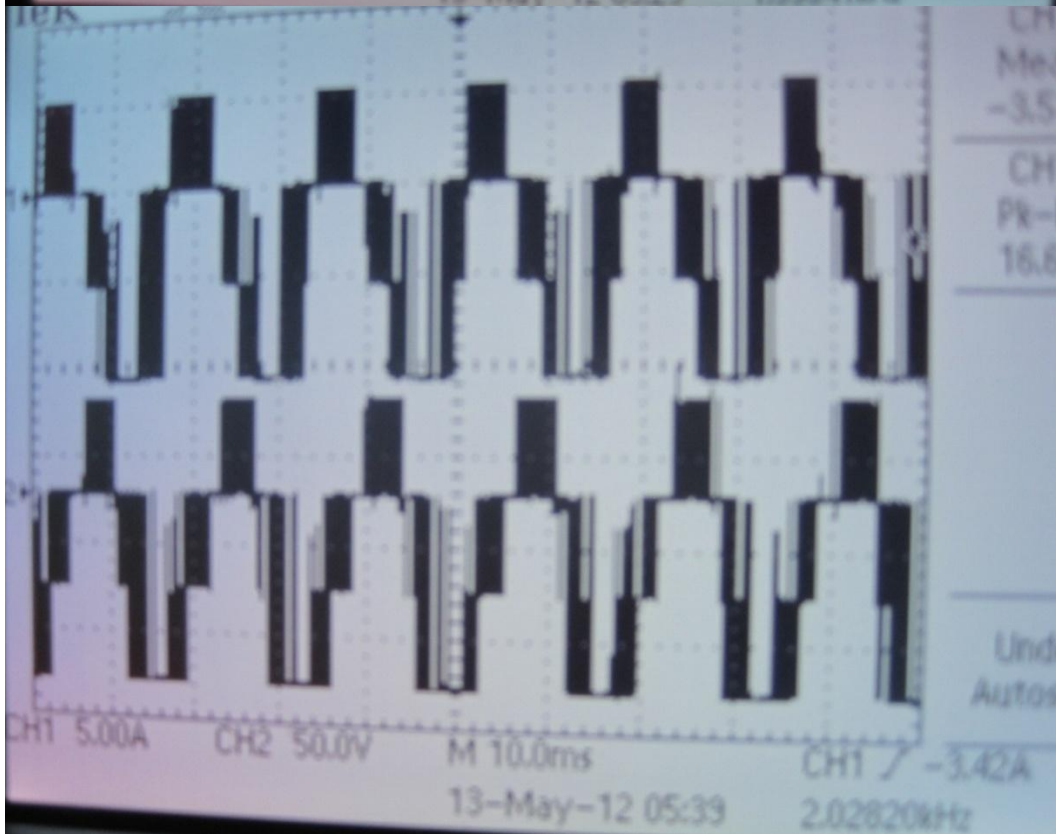
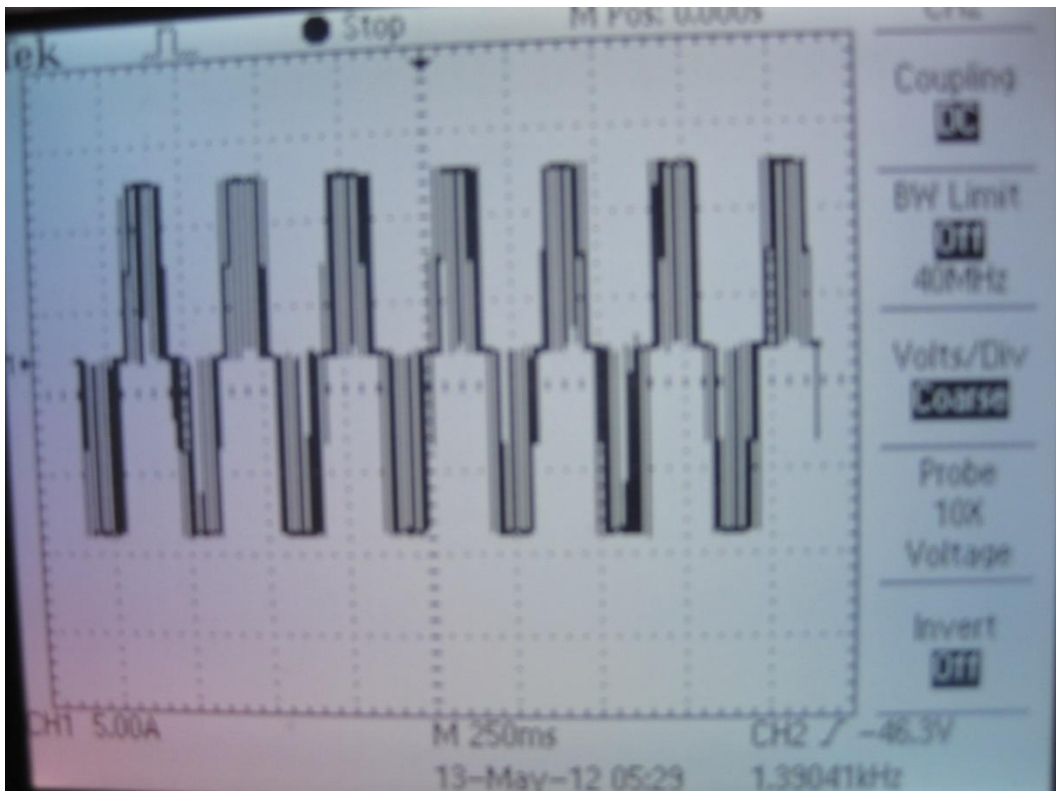


Power losses user load characteristic

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Осциллограммы пуска АД. Выходной управляющий сигнал





ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Исходный код программы на языке ассемблер для микропроцессорного контроллера системы автоматического регулирования произвольности компрессорной установки

```
.include "m48def.inc" ; подключение библиотеки ATmega48
.list
.def TEMP=R16
.def VIBORKA=R17
.def nom=R18
.def A=R19
.def B=R20
.def K=R21
; настройка ячеек памяти и таблиц прерывания
.CSEG ; программный код располагается в сегменте памяти программ
.ORG 0x0000 ; процессор стартует с нулевого адреса, а дальше пойдут вектора прерывания
RJMP Reset ; прерывания по сбросу. Прыгаем на метку Reset
;-----
.org 0x0001 ;External Interrupt0
reti
.org 0x0002 ;External Interrupt1
reti
.org 0x0003 ;Pin Change Interrupt0
reti
.org 0x0004 ;Pin Change Interrupt1
reti
.org 0x0005 ;Pin Change Interrupt2
reti
.org WDTaddr ;Watchdog Timeout
reti
.org OC2Aaddr ;Timer/Counter2 Compare Match Interrupt
reti
.org OC2Baddr ;Timer/Counter2 Compare Match Interrupt
reti
.org OVF2addr ;Overflow2 Interrupt
reti
.org ICP1addr ;Input Capture1 Interrupt
reti
.org OC1Aaddr ;Output Compare1A Interrupt
reti
.org OC1Baddr ;Output Compare1B Interrupt
reti
.org OVF1addr ;Overflow1 Interrupt
reti
.org OC0Aaddr ;Timer/Counter0 Compare Match Interrupt
reti
.org OC0Baddr ;Timer/Counter0 Compare Match Interrupt
reti
.org OVF0addr ;Overflow0 Interrupt
reti
.org SPIaddr ;SPI Interrupt
reti
.org URXCaddr ;USART Receive Complete Interrupt
```

```

reti
.org   UDREaddr   ;USART Data Register Empty Interrupt
reti
.org   UTXCaddr   ;USART Transmit Complete Interrupt
reti
.org   ADCCaddr   ;ADC Conversion Complete Handle
reti
.org   ERDYaddr   ;EEPROM write complete
reti
.org   ACIaddr    ;Analog Comparator Interrupt
reti
.org   TWIaddr    ;TWI Interrupt Vector Address
reti
.org   SPMRaddr   ;Store Program Memory Ready Interrupt
reti

```

;------ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ПЕРЕФЕРИЙНЫХ УЗЛОВ МК-----

;инициализациястека

Reset:

```

    ldi temp,high(RAMEND)
    out SPH,temp
    ldi temp,low(RAMEND)
    out SPL,temp

```

;настройка портов на выходы. 3 канала ШИМ, канал АЦП (для регулировки оборотов)

```

sbi DDRD,5      ;фаза С
sbi DDRD,6      ;фаза В
sbi DDRB,3      ;фаза А
cbi DDRC,0      ;вход регулировки оборотов (аналоговый датчик)

```

;инициализация таймеров ШИМ T/C0 и T/C1 в три канала OCSR0A,OCSR0B и OCSR1B

```

ldi temp,(1<<COM0A1)|(0<<COM0A0)|(1<<COM0B1)|(0<<COM0B0)|(0<<WGM01)|(1<<WGM00)
out TCCR0A,temp      ;смена выводов на противоположное, ШИМ с точной фазой
ldi temp,(0<<FOC0A)|(0<<FOC0B)|(0<<WGM02)|(0<<CS02)|(0<<CS01)|(1<<CS00)
out TCCR0B,temp      ;частота ШИМ 1000000/256=3906
ldi temp,(1<<COM2A1)|(0<<COM2A0)|(0<<COM2B1)|(0<<COM2B0)|(0<<WGM21)|(1<<WGM20)
sts TCCR2A,temp      ;смена выводов на противоположное, ШИМ с точной фазой
ldi temp,(0<<FOC2A)|(0<<FOC2B)|(0<<WGM22)|(0<<CS22)|(0<<CS21)|(1<<CS20)
sts TCCR2B,temp      ;частота ШИМ 1000000/256=3906

```

;инициализация АЦП

```
ldi temp,(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(1<<ADATE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(0<<ADPS0)
```

;начать преобразование циклическое

```
sts ADCSRA,temp
```

```
ldi temp,(0<<REFS1)|(1<<REFS0)|(1<<ADLAR)|(0<<MUX3)|(0<<MUX2)|(0<<MUX1)|(0<<MUX0)
```

;выровнять результат влево, источник опорного напряжение внутренний Vcc, 0-канал

```
sts ADMUX,temp
```

; инициализация протокола RS-232

```
ldi temp,0x19      ; скорость передачи данных 9600бод при частоте кварца 4МГц
out UBRRL,temp     ; установка скорости передачи данных
ldi temp,0x00      ; скорость передачи данных 9600бод при частоте кварца 4МГц
out UBRRH,Temp     ; установка скорости передачи данных

```

```
ldi temp,(1<<RXEN)|(1<<TXEN)|(0<<RXCIE)|(0<<TXCIE)
```

```
out UCSRB,temp     ; разрешение приёма-передачи данных, запрет прерываний
```

```
                ; установка формата кадра: 8 бит данных, 1 стоповых бита
```

```
ldi temp,(1<<URSEL)|(0<<USBS)|(1<<UCSZ0)|(1<<UCSZ1)
out UCSRC,temp ; отправка данных длиной 8 бит
```

-----ПОДПРОГРАММА ПЛАВНОГО ПУСКА АД-----

```
ldi A,36 ; это коэффициент разгона. С него начинается минимальная частота 1Гц ;(A=254).
; Затем он декрементируется до такой величины, при которой частота равна 50 ;Гц
; (A=6)
```

Push:

```
ldi ZL,low(2*TABLICA)
ldi ZH,high(2*TABLICA)
ldi nom,58;27;
dec A
dec A
dec A
dec A
cpi A,6
brlo Nachalo
```

S:

```
lpm viborka,Z+
out OCR0A,viborka
adiw Z,57;26;
lpm viborka,Z
out OCR0B,viborka
adiw Z,57;26;
lpm viborka,Z
sts OCR2A,viborka
sbiw Z,57;26;
nop
sbiw Z,57;26;
nop
rcall Deley
dec nom
cpi nom,0x0
breq Push
```

rjmp S ;окончание подпрограммы плавного пуска

-----ГЛАВНАЯ ЧАСТЬ В ПРОГРАММЕ: УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТОЙ-----

Priem_koda_Start:

```
sbisUCSRA,RXC ;прием данных с ПК
rjmp Priem_koda_Start
in temp,UDR
```

cpi temp,0x31 ;сравнения кода

breq main1

rjmp Priem_koda_Start

main1:

```
rcall nachalo
```

```
d1: rcallds
rcallbcd_convert
ldiwreg, 3
rcallds_longdelay
rcall display
```

```
d2: rcall ds2
rcallbcd_convert
ldiwreg, 3
rcallds_longdelay
rcall display
```

```
d3: rcallds3
```

```

        rcall bcd_convert
        ldi wreg, 3
        rcall ds_longdelay
        rcall display
d4:     rcall ds4
        rcall bcd_convert
        ldi wreg, 3
        rcall ds_longdelay
        rcall display
d5:     rcall ds5
        rcall bcd_convert
        ldi wreg, 3
        rcall ds_longdelay
        rcall display
d6:     rcall ds6
        rcall bcd_convert
        ldi wreg, 3
        rcall ds_longdelay
        rcall display
ldi wreg,0x00
out portc,wreg
rjmp main

```

Nachalo:

```

        ldi ZL,low(2*TABLICA)
        ldi ZH,high(2*TABLICA)
        ldinom,58
        lds A,ADCh ; при таком коэф, частота на фазах 50Гц
        cpi A,6
        brlo MM
M:     lpm viborka,Z+
        out OCR0A,viborka
        adiw Z,57
        lpm viborka,Z
        out OCR0B,viborka
        adiw Z,57
        lpm viborka,Z
        sts OCR2A,viborka
        nop
        sbiw Z,57
        nop
        sbiw Z,57
        rcall Deley
        dec nom
                cpi nom,0x0
        breq Nachalo

```

rjmp M

;------ПОДПРОГРААМАЗАДЕРЖКИ-----;

Deley:

```

        push A
        push B

M1:     dec A
        cpi A,0
        breq M3

```

ldi B,6 ; изменяя этот коэффициент,изменяется нижний и верхний предел частоты

```

M2: dec B          ; чем меньше B тем выше частота напряжения на фазах
    cpi B,0
    breq M1
    rjmp M2
M3:  popB
     popA
     ret

```

```

MM: ldi A,6       ; меньше этого значения нельзя: очень большая частота фазных напряжений
    rjmp M

```

```

;-----ОПРОС ДАТЧИКОВ-----

```

```

Ds:
    rcall ds_reset          ; вызов обнуления линии
    ldi ds_command, 0xCC   ; пропуск идентификации
    rcall ds_write
    ldi ds_command, 0x44   ; начало преобразования
    rcall ds_write
    rcall ds_reset        ; вызов обнуления линии
    ldi ds_command, 0xCC
    rcall ds_write
    ldi ds_command, 0xBE   ; чтение блокнота, получение результата
    rcall ds_write
    ldi wreg, 5
    rcall ds_delay
    rcall ds_read          ; принять 8 бит
ret

```

```

ds_delay:
    ldi duration, 2       ; 2,75uS*wreg
cycle:
    nop
    dec duration
    brne cycle
    dec wreg
    brne ds_delay
ret

```

```

ds_longdelay:
    mov ds_counter, wreg  ; 0,7ms*wreg
Label:
    ldi wreg, 0xFF
    rcall ds_delay
    dec ds_counter
    brne Label
ret

```

```

ds_reset:
    cbi PORTC, 0
    ldi wreg, 0xFF       ; Portb выход
    out DDRC, wreg
    ldi wreg, 220        ; обнуление 600мкс
    rcall ds_delay
    ldi wreg, 0xFE       ; Portb.0 вход
    out DDRC, wreg
    ldi wreg, 220        ; принятие импульса присутствия 600мкс
    rcall ds_delay
ret

```



```

ds_write:
    ldi    wr_counter,8
Label1:
    lsr    ds_command           ; логсдвиг 0 бит -> CF
    brcs  one_wr               ; переходесли CF=1
    rjmp  zero_wr

one_wr:
    cbi    PORTC, 0
    ldi    wreg, 0xff
    out    DDRC, wreg           ; PORTB - ВЫХОД
    ldi    wreg, 1              ; 2,7мкс
    rcall  ds_delay
    ldi    wreg, 0xFE           ; PORTB - ВХОД
    out    DDRC, wreg
    ldi    wreg,20              ; 60мкс - продление "1"
    rcall  ds_delay
    rjmp  Label2

zero_wr:
    cbi    PORTC, 0
    ldi    wreg, 0xff
    out    DDRC, wreg           ; PORTB - ВЫХОД
    ldi    wreg, 26             ; 70мкс
    rcall  ds_delay
    ldi    wreg, 0xFE           ; PORTB - ВХОД
    out    DDRC, wreg

Label2:
    ldi    wreg, 1              ; задержки между посылками битов 2,7мкс
    rcall  ds_delay
    dec    wr_counter
    brne  Label1               ; проверкасчетчика
ret

ds_read:
    ldi    wr_counter, 9
    ldilbyte, 0x0 ; конецсекции

    cbi    PORTC,0
    ldi    wreg, 0xFF           ; PB0 - output
    out    DDRC, wreg
    ldi    wreg,2
    rcall  ds_delay             ; синхроимпульс 2,7мкс
    ldi    wreg, 0xFE           ; PB0 - input
    out    DDRC, wreg
    ldi    wreg, 3
    rcall  ds_delay             ; проверка через 8мкс
    ldi    wreg, 22             ; 60мкс
    rcall  ds_delay
    ; 2
    cbi    PORTC,0
    ldi    wreg, 0xFF           ; PB0 - output
    out    DDRC, wreg
    ldi    wreg,2
    rcall  ds_delay             ; синхроимпульс 2,7мкс

```

```

ldi wreg, 0xFE ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
; 3
cbi PORTC,0
ldi wreg, 0xFF ; PB0 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0xFE ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
; конецсекции

label3:
cbi PORTC,0
ldi wreg, 0xFF ; PB0 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0xFE ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
cpi wr_counter, 1
br eq sign
sbis PINC, 0 ; проп. следкомесли PB0=1
rjmp zero_r
one_r:
lsr lbyte
ori lbyte, 0x80
rjmp label4
zero_r:
lsr lbyte
pop

label4:
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
dec wr_counter
br ne label3 ; переходесли ds_counter > 0

sign:
ldi hbyte, 0xFF
sbis PINC, 0 ; проп. следкомесли PB0=1
ldi hbyte, 0x00
pop
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
ldi digit1, -3 ; отобразить "-"

ret

```

```

;----- BCD -----
bcd_convert:
    clr digit1
    clr digit2
    clr digit3
    clr digit4
    cpi    hbyte, 0x00
    breq   plus
    com lbyte
    inc lbyte
    ldi digit1, -3

plus:
    mov wreg, lbyte
    lsr wreg
    M1:
    cpi wreg, 0b01100100          ; проверка на 100
    brge M2
    rjmp M3
    M2:
    inc digit1                    ;
    subi wreg, 0b01100100
    rjmp M1
    M3:
    cpi wreg, 0b00001010        ; проверка на 10
    brge M4
    rjmp M5
    M4:
    inc digit2
    subi wreg, 0b00001010      ;
    rjmp M3
    M5:
    cpi wreg, 0b00000001        ; проверка на 1
    brge M6
    rjmp M7
    M6:
    inc digit3
    dec wreg
    rjmp M5

;----- десятые -----
    M7:
    mov wreg, lbyte
    andi wreg, 0b00000001
    sbrs wreg, 0                ; проверка на 0,5
    rjmp M8
    subi digit4, -5              ; прибавляем 5

;----- преобразования -----
    M8:
    cpi digit1, 0
    brne M9
    ldi digit1, 0x60             ; не печатаем 0
    cpi digit2, 0
    brne M9
    ldi digit2, 0x60            ; не печатаем 0
    M9:
    cpi digit1, -3
    brne M10
    cpi digit2, 0

```



```

        ldi    wreg, 220                ; обнуление 600мкс
        rcall ds_delay

        ldi    wreg, 0b11111101        ; Portb.1 вход
        out    DDRC, wreg
        ldi    wreg, 220                ; принятие импульса присутствия 600мкс
        rcall ds_delay
ret

ds2_write:
        ldi    wr_counter,8
Label12:
        lsr    ds_command                ; логсдвиг 0 бит -> CF
        brcs  one2_wr                    ; переходесли CF=1
        rjmp  zero2_wr

one2_wr:
        cbi    PORTC, 1
        ldi    wreg, 0xff
        out    DDRC, wreg                ; PORTB - выход
        ldi    wreg, 1                    ; 2,7мкс
        rcall ds_delay
        ldi    wreg, 0b11111101        ; PORTB1 - вход
        out    DDRC, wreg
        ldi    wreg,20                    ; 60мкс - продление "1"
        rcall ds_delay
        rjmp  Label22

zero2_wr:
        cbi    PORTC, 1
        ldi    wreg, 0xff
        out    DDRC, wreg                ; PORTB - выход
        ldi    wreg, 26                    ; 70мкс
        rcall ds_delay
        ldi    wreg, 0b11111101        ; PORTB - вход
        out    DDRC, wreg

Label22:
        ldi    wreg, 1                    ; задержки между посылками битов 2,7мкс
        rcall ds_delay
        dec    wr_counter
        brne  Label12                    ; проверка счетчика
ret

ds2_read:
        ldi    wr_counter, 9
        ldi    lbyte, 0x00

        ; новая секция

        cbi    PORTC,1
        ldi    wreg, 0xFF                ; PB1 - output
        out    DDRC, wreg
        ldi    wreg,2
        rcall ds_delay                    ; синхроимпульс 2,7мкс
        ldi    wreg, 0b11111101        ; PB0 - input

```

```

out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay           ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22            ; 60мкс
rcall ds_delay

;2

cbi PORTC,1
ldi wreg, 0xFF          ; PB0 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay          ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b1111101    ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay          ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22            ; 60мкс
rcall ds_delay

;3

cbi PORTC,1
ldi wreg, 0xFF          ; PB0 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay          ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b1111101    ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay          ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22            ; 60мкс
rcall ds_delay

; конецсекции

label32:
cbiPORTC,1
ldi wreg, 0xFF          ; PB1 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay          ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b1111101    ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcallds_delay           ; проверкачерез 8мкс
cpi wr_counter, 1
breq sign2
sbis PINC, 1            ; проп. следкомесли PB1=1
rjmp zero2_r
    one2_r:
        lsr lbyte
        ori lbyte,0x80
        rjmp label42
    zero2_r:
        lsr lbyte
        nop

```

```

label42:
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
dec wr_counter
brne label32 ; переходесли ds_counter > 0
sign2:
ldi hbyte, 0xFF
sbis PINC, 1 ; проп. следкомесли PB0=1
ldi hbyte, 0x00
nop
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
ldi digit1, -3 ; отобразить "-"
ret

;-----третийдатчик-----
Ds3: ldi wreg, 0x00 ; input
out DDRC, wreg
rcall ds3_reset ; вызовобнулениялинии
ldi ds_command, 0xCC ; пропуск идентификации
rcall ds3_write
ldi ds_command, 0x44 ; началопреобразования
rcall ds3_write
rcall ds3_reset ; вызовобнулениялинии
ldi ds_command, 0xCC
rcall ds3_write
ldi ds_command, 0xBE ; чтение блокнота, получение результата
rcall ds3_write
ldi wreg, 5
rcall ds_delay
rcall ds3_read ; принять 8 бит
ret

ds3_reset:
cbi PORTC, 2
ldi wreg, 0xFF ; PortCвыход
out DDRC, wreg
ldi wreg, 220 ; обнуление 600мкс
rcall ds_delay
ldi wreg, 0b11111011 ; Portb.2 вход
out DDRC, wreg
ldi wreg, 220 ; принятиемпульсаприсутствия 600мкс
rcall ds_delay
ret

ds3_write:
ldi wr_counter, 8
Label13:
lsr ds_command ; логсдвиг 0 бит -> CF
brcs one3_wr ; переходесли CF=1
rjmp zero3_wr
one3_wr:
cbi PORTC, 2

ldi wreg, 0xff
out DDRC, wreg ; PORTC - выход
ldi wreg, 1 ; 2,7мкс

```

```

        rcall ds_delay
        ldi wreg, 0b1111011 ; PORTB2 - вход
        out DDRC, wreg
        ldi wreg, 20 ; 60мкс - продление "1"
        rcall ds_delay
        rjmp Label23

zero3_wr:
        cbi PORTC, 2
        ldi wreg, 0xff
        out DDRC, wreg ; PORTB - выход
        ldi wreg, 26 ; 70мкс
        rcall ds_delay
        ldi wreg, 0b1111011 ; PORTB - вход
        out DDRC, wreg
Label23:
        ldi wreg, 1 ; задержки между посылками битов 2,7мкс
        rcall ds_delay
        dec wr_counter
        brne Label13 ; проверка счетчика

ret

ds3_read:
        ldi wr_counter, 9
        ldi lbyte, 0x00

        ;новая секция

        cbi PORTC, 2
        ldi wreg, 0xFF ; PB1 - output
        out DDRC, wreg
        ldi wreg, 2
        rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
        ldi wreg, 0b1111011 ; PB2 - input
        out DDRC, wreg
        ldi wreg, 3
        rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
        ldi wreg, 22 ; 60мкс
        rcall ds_delay

        ;2

        cbi PORTC, 2
        ldi wreg, 0xFF ; PB0 - output
        out DDRC, wreg
        ldi wreg, 2
        rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
        ldi wreg, 0b1111011 ; PB0 - input
        out DDRC, wreg
        ldi wreg, 3
        rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
        ldi wreg, 22 ; 60мкс
        rcall ds_delay

        ;3

        cbi PORTC, 2

```



```

ldi wreg, 0xFF ; PB0 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg, 2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b1111011 ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay

; концецсекции

label33:
cbi PORTC, 2
ldi wreg, 0xFF ; PB2 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg, 2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b1111011 ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcallds_delay ; проверка через 8мкс
cpi wr_counter, 1
breq sign3
sbis PINC, 2 ; проп. следкомесли PB1=1
rjmp zero3_r
    one3_r:
        lsr lbyte
        ori lbyte, 0x80
        rjmp label43
    zero3_r:
        lsr lbyte
        nop

label43:
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
dec wr_counter
brne label33 ; переходесли ds_counter > 0

sign3:
ldi hbyte, 0xFF
sbis PINC, 2 ; проп. следкомесли PB0=1
ldi hbyte, 0x00
nop
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
ldi digit1, -3 ; отобразить "-"

ret

;-----четвертыйдатчик-----
Ds4: ldi wreg, 0x00
out DDRC, wreg
rcall ds4_reset ; вызовобнулениялинии
ldi ds_command, 0xCC ; пропуск идентификации
rcall ds4_write
ldi ds_command, 0x44 ; началопреобразования
rcall ds4_write

```

```

rcall ds4_reset ; вызов обнуления линии
ldi ds_command, 0xCC
rcall ds4_write
ldi ds_command, 0xBE ; чтение блокнота, получение результата
rcall ds4_write
ldi wreg, 5
rcall ds_delay
rcall ds4_read ; принять 8 бит
ret

ds4_reset:
cbi PORTC, 3
ldi wreg, 0xFF ; PortC выход
out DDRC, wreg
ldi wreg, 220 ; обнуление 600 мкс
rcall ds_delay
ldi wreg, 0b11110111 ; PortB.2 вход
out DDRC, wreg
ldi wreg, 220 ; принятие импульса присутствия 600 мкс
rcall ds_delay
ret

ds4_write: ldi wr_counter, 8
Label14: lsr ds_command ; логсдвиг 0 бит -> CF
brcs one4_wr ; переход если CF=1
rjmp zero4_wr

one4_wr:
cbi PORTC, 3
ldi wreg, 0xff
out DDRC, wreg ; PORTB - выход
ldi wreg, 1 ; 2,7 мкс
rcall ds_delay
ldi wreg, 0b11110111 ; PORTB2 - вход
out DDRC, wreg
ldi wreg, 20 ; 60 мкс - продление "1"
rcall ds_delay
rjmp Label24

zero4_wr:
cbi PORTC, 3
ldi wreg, 0xff
out DDRC, wreg ; PORTB - выход
ldi wreg, 26 ; 70 мкс
rcall ds_delay
ldi wreg, 0b11110111 ; PORTB - вход
out DDRC, wreg

Label24:
ldi wreg, 1 ; задержки между посылками битов 2,7 мкс
rcall ds_delay
dec wr_counter
brne Label14 ; проверка счетчика
ret

ds4_read:

```

```
ldi wr_counter, 9
ldi lbyte, 0x00
```

```
;новаясекция
```

```
cbi PORTC,3
ldi wreg, 0xFF ; PB1 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b11110111 ; PB2 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
```

```
;2
```

```
cbi PORTC,3
ldi wreg, 0xFF ; PB0 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b11110111 ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
```

```
;3
```

```
cbi PORTC,3
ldi wreg, 0xFF ; PB0 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b11110111 ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
```

```
; конецсекции
```

```
label34:
```

```
cbi PORTC,3
ldi wreg, 0xFF ; PB2 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс

ldi wreg, 0b11110111 ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
```

```

rcallds_delay ; проверка через 8 мкс
cpi wr_counter, 1
breq sign4
sbis PINC, 3 ; проп. следком если PB1=1
rjmp zero4_r
    one4_r:
        lsr lbyte
        ori lbyte, 0x80
        rjmp label44
    zero4_r:
        lsr lbyte
        nop
label44:
ldi wreg, 22 ; 60 мкс
rcall ds_delay
dec wr_counter
brne label34 ; переход если ds_counter > 0

sign4:
ldi hbyte, 0xFF
sbis PINC, 3 ; проп. следком если PB0=1
ldi hbyte, 0x00
nop
ldi wreg, 22 ; 60 мкс
rcall ds_delay
ldi digit1, -3 ; отобразить "-"
ret

;-----пятый датчик-----
Ds5:    ldi    wreg, 0x00 ; input
        out    DDRC, wreg
        rcall  ds5_reset ; вызов обнуления линии
        ldi    ds_command, 0xCC ; пропуск идентификации
        rcall  ds5_write
        ldi    ds_command, 0x44 ; начало преобразования
        rcall  ds5_write
        rcall  ds5_reset ; вызов обнуления линии
        ldi    ds_command, 0xCC
        rcall  ds5_write
        ldi    ds_command, 0xBE ; чтение блокнота, получение результата
        rcall  ds5_write
        ldi    wreg, 5
        rcall  ds_delay
        rcall  ds5_read ; принять 8 бит
ret

ds5_reset:
cbi    PORTC, 4
ldi    wreg, 0xFF ; PortC выход
out    DDRC, wreg
ldi    wreg, 220 ; обнуление 600 мкс
rcall  ds_delay
ldi    wreg, 0b11101111 ; Portb.2 вход
out    DDRC, wreg
ldi    wreg, 220 ; принятие импульса присутствия 600 мкс
rcall  ds_delay
ret

```

```

ds5_write:
    ldi    wr_counter,8
Label15:
    lsr    ds_command           ; логсдвиг 0 бит -> CF
    brcs  one5_wr              ; пререходесли CF=1
    rjmp  zero5_wr
one5_wr:
    cbi   PORTC, 4
    ldi   wreg, 0xff
    out   DDRC, wreg           ; PORTB - ВЫХОД
    ldi   wreg, 1              ; 2,7мкс
    rcall ds_delay
    ldi   wreg, 0b11101111     ; PORTB2 - ВХОД
    out   DDRC, wreg
    ldi   wreg, 20             ; 60мкс - продление "1"
    rcall ds_delay
    rjmp  Label25
zero5_wr:
    cbi   PORTC, 4
    ldi   wreg, 0xff
    out   DDRC, wreg           ; PORTB - ВЫХОД
    ldi   wreg, 26             ; 70мкс
    rcall ds_delay
    ldi   wreg, 0b11101111     ; PORTB - ВХОД
    out   DDRC, wreg

Label25:
    ldi   wreg, 1              ; задержкимеждупосылкамибитов 2,7мкс
    rcall ds_delay
    dec   wr_counter
    brne  Label15             ; проверкасчетчика

ret

ds5_read:
    ldi   wr_counter, 9
    ldi   lbyte, 0x00

    ;новаясекция

    cbi   PORTC,4
    ldi   wreg, 0xFF           ; PB1 - output
    out   DDRC, wreg
    ldi   wreg,2
    rcall ds_delay             ; синхроимпульс 2,7мкс
    ldi   wreg, 0b11101111     ; PB2 - input
    out   DDRC, wreg
    ldi   wreg, 3
    rcall ds_delay             ; проверкачерез 8мкс
    ldi   wreg, 22             ; 60мкс
    rcall ds_delay

    ;2

    cbi   PORTC,4
    ldi   wreg, 0xFF           ; PB0 - output

```

```

out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b11101111 ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
;3

```

```

cbi PORTC,4
ldi wreg, 0xFF ; PB0 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b11101111 ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcall ds_delay ; проверка через 8мкс
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
; конецсекции

```

label35:

```

cbi PORTC,4
ldi wreg, 0xFF ; PB2 - output
out DDRC, wreg
ldi wreg,2
rcall ds_delay ; синхроимпульс 2,7мкс
ldi wreg, 0b11101111 ; PB0 - input
out DDRC, wreg
ldi wreg, 3
rcallds_delay ; проверкачерез 8мкс
cpi wr_counter, 1
breq sign5
sbis PINC, 4 ; проп. следкомесли PB1=1
rjmp zero5_r
one5_r:
    lsr lbyte
    ori lbyte,0x80
    rjmp label45
zero5_r:
    lsr lbyte
    nop
label45:
ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
dec wr_counter
brne label35 ; переходесли ds_counter > 0

```

sign5:

```

ldi hbyte, 0xFF
sbis PINC,4 ; проп. следкомесли PB0=1
ldi hbyte, 0x00
nop

```

```

ldi wreg, 22 ; 60мкс
rcall ds_delay
ldi digit1, -3 ; отобразить "-"
ret
;-----ТАБЛИЦА ТОЧЕК ОТРИСОВКИ СИГНАЛА СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ-----
ТАБЛИЦА: ; таблица выборок трех фаз А,В,С синусоидального сигнала по 62 точки со
;сдвигом фаз
.db
1,2,5,8,12,16,22,30,40,50,60,80,100,120,140,160,180,200,210,220,228,234,238,246,250,252,253,254,255,255,2
54,253,252,250,246,238,234,228,220,210,200,190,170,150,130,110,90,70,50,40,30,22,16,12,8,5,2,1
.db
220,228,234,238,246,250,252,253,254,255,255,254,253,252,250,246,238,234,228,220,210,200,190,170,150,13
0,110,90,70,50,40,30,22,16,12,8,5,2,1,1,2,5,8,12,16,22,30,40,50,60,80,100,120,140,160,180,200,210
.db
200,190,170,150,130,110,90,70,50,40,30,22,16,12,8,5,2,1,1,2,5,8,12,16,22,30,40,50,60,80,100,120,140,160,180
,200,210,220,228,234,238,246,250,252,253,254,255,255,254,253,252,250,246,238,234,228,220,210

```

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Разработка принципиальных решений в технической реализации системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки.

Выбор силовых ключей

Силовая часть системы ОРСВ КУ служит для согласования управляющих низковольтных уровней микропроцессора с приводами компрессоров. Основным развязывающим компонентом могут быть транзисторные или тиристорные сборки с различной номенклатурой топологий. Выбор топологии зависит от типа, марки двигателя и имеют следующие структуры: чоппер, ключ, полумост, мост, трехфазный мост (Рисунок И.1).

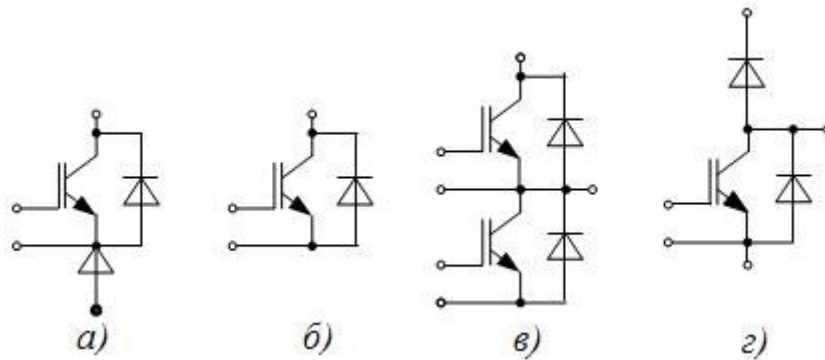


Рисунок И.1 - Типовые транзисторных сборок в модулях IGBT

Как видно с рисунка, для уменьшения количества дополнительных внешних компонентов в состав IGBT-транзисторов вводят диоды? А также выпускают модули, состоящие из нескольких компонентов.

С учетом того, что на компрессорных станциях сортировочных горок используются трёхфазные асинхронные и синхронные двигатели, топология инверторной схемы силовой части выбрана структура полного трехфазного моста (Рисунок И.2).

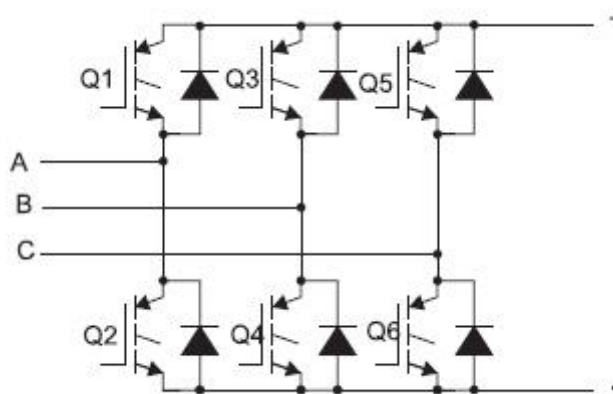


Рисунок И.2 – Схема трехфазного инвертора на IGBT

Марка модуля выбирается исходя из электрических характеристик двигателя. Так для асинхронного двигателя марки 5АН315А2С, который устанавливается в винтовых компрессорах имеет следующие основные характеристики:

- трехфазное питание с напряжением 380В (при соединении обмоток звездой);
- номинальная частота 50Гц;
- номинальная скорость вращения вала 2925 об/мин;
- номинальный ток 373А;
- сопротивление статора 0,021Ом;
- номинальная мощность 200кВт.

Для построение системы управления такой нагрузкой инвертор должен иметь трехфазную структуру, выдерживать максимальный ток двигателя ($4 \cdot I_{cm}$) и коммутировать 650В напряжения постоянного тока.

С учетом того, что пусковые токи двигателя при частотном алгоритме управления [33, с.76], не превышают $1,5 \cdot I_{cm}$ требования к IGBT модулям по показателям мощности могут быть снижены. Однако в следствие импульсного питания при коммутации индуктивной составляющей в нагрузке, необходимо учесть некоторый запас на перенапряжение и предусмотреть защитный встроенный диод.

Стоит заметить, что современные IGBT модули трехфазных инверторов не способны удовлетворить выше перечисленным требованиям. В этом случае применяют отдельные чеперные или полумостовые топологии преобразователей. Например, модуль SKM450GB12E4 (Рисунок И.3) фирмы SEMIKRON способен выдерживать ток до 1000А в импульсном режиме при напряжении коммутации 1200В. При компоновки трех таких модулей можно получить трехфазный инвертор с необходимыми электрическими параметрами



Рисунок И.3 – внешний вид модуля SKM450GB12E4

Следует отметить, что главной задачей при разработке преобразователя напряжения и частоты (ПНЧ) на основе модуля SKM450GB12E4 является задачи теплоотвода и задачи надежного и безопасного управления ключом [44, с.127]. Ввиду того, что затвор этого транзистора имеет достаточно высокую емкость, дифференциальный ток будет иметь соответствующие значение, что накладывает некоторые требования к схеме управления ключом. Поэтому наиболее ответственным узлом, который определяет надежность работы ПНЧ является драйверные схемы.

Выбор и расчет драйверной схемы.

Драйвер затвора предназначен для управления отпиранием и запирающим IGBTили MOSFET транзисторов. Для этого драйвер выполняет, либо заряд затвора силового полупроводника до конечного отпирющего напряжения V_{GE_ON} , либо разряжает его вплоть до достижения напряжения на затворе запирающего уровня V_{GE_OFF} [45]. Переход между двумя уровнями напряжений на затворе требует рассеивания определенного уровня мощности, называемой мощностью управления P_{DRV} (И.1). Поэтому драйвер выбирается исходя из электрических параметров силового модуля.

$$P_{DRV} = Q_{GATE} \cdot f_{IN} \cdot \Delta V_{GATE} \quad (И.1)$$

Основные величины, которые влияют на процесс выбора драйвера являются:

Q_{GATE} – заряд затвора, определяется по данным технической документации ключа к транзистору;

f_{IN} – частота управляемого входного сигнала;

ΔV_{GATE} – размах напряжения на выходе драйвера.

Стоит заметить, что в случае применения внешнего затворного конденсатора и резистора (Рисунок И.4) в формуле (И.1) необходимо учесть его емкость при проектировании драйвера [46, с.56].

$$P_{DRV} = Q_{GATE} \cdot f_{IN} \cdot \Delta V_{GATE} + C_{GE} \cdot f_{IN} \cdot \Delta V_{GATE}^2 \quad (И.2).$$

Важно учесть тот факт, что показатель Q_{GATE} в документации к транзистору может быть указан с учетом размаха затворного напряжения, который не предусмотрен в проекте [46, с.13]. Так например, нельзя точно определить заряд затвора для $V_{GA} = -10 \dots +15$, если значение Q_{GATE} приведено для $V_{GA} = 0 \dots +15$.

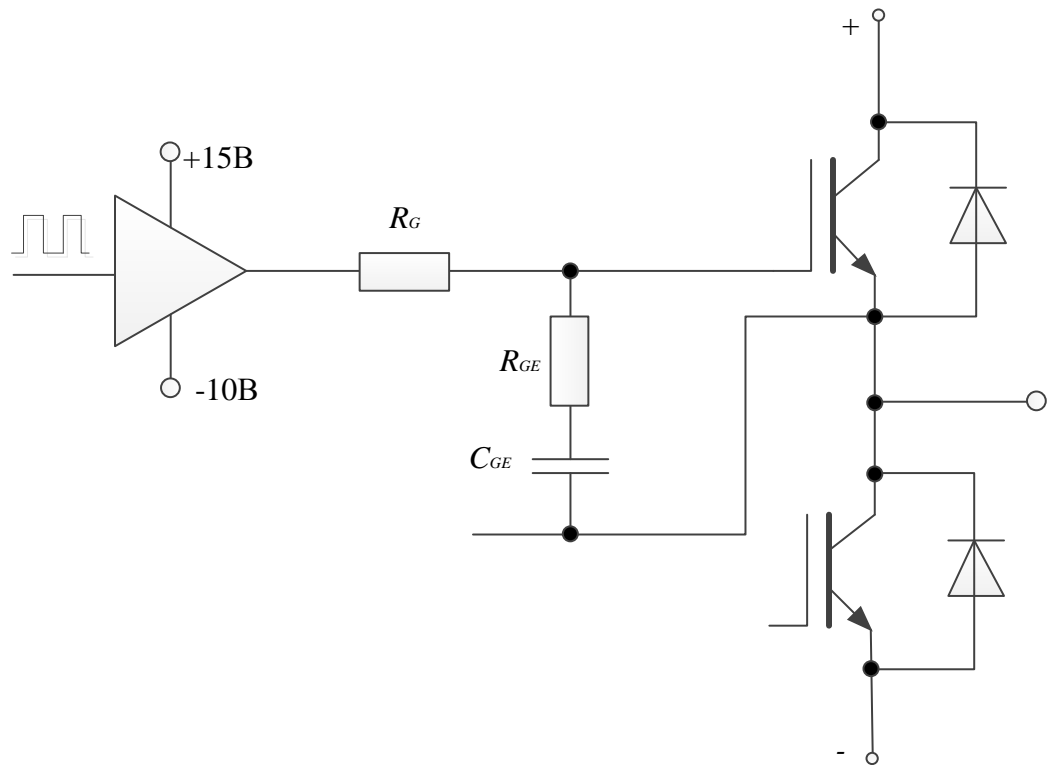


Рисунок И.4 – Управления затвором с дополнительной RC- цепью

В разрабатываемом инверторе с IGBT-модулем SKM450GB12E4 при затворном напряжении $V_{GA} = -8 \dots +15$ заряд составляет 2500нК [47, с.123]. При этом предполагается, что частота управления затвором составит 8кГц. Тогда необходимая мощность драйвера без учета дополнительных затворных цепей составит

$$P_{DRV} = 2500 \cdot 10^{-9} \cdot 8000 \cdot 23 = 0,46 \text{ Вт}$$

На этом этапе уже понятно, что для надёжной работы SKM450GB12E4 необходимо подобрать драйвер верхнего и нижнего плеча, мощностью 0,46 Вт и с затворным напряжением не более минус 8В (при закрытии) и не менее 15 В (при отпирании) [49].

Также необходимо учесть пиковый динамический ток затвора. В данном случае в документации [50] приведен график (Рисунок И.5), который позволяет выбрать необходимый затворный резистор.

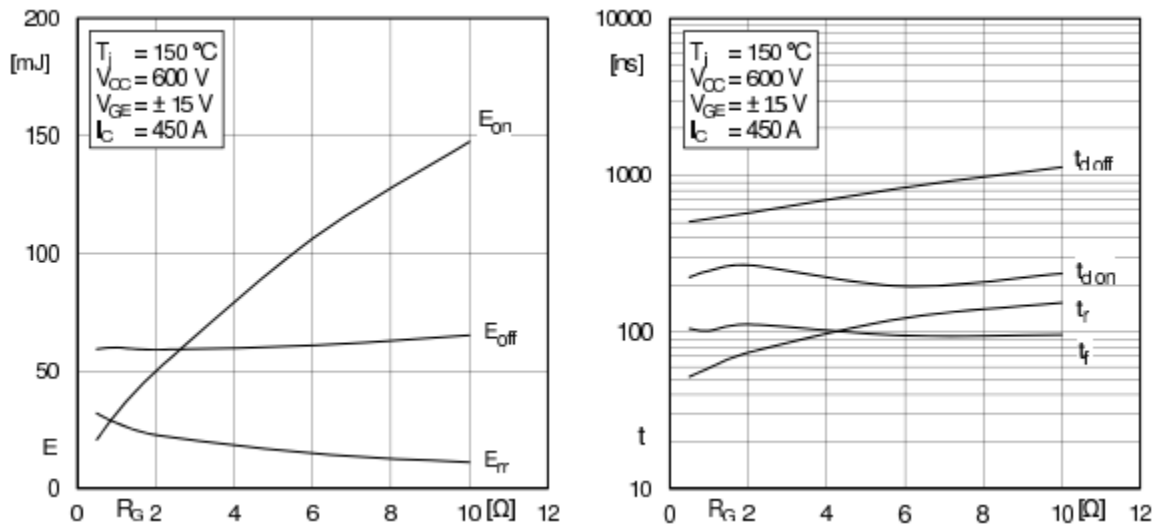


Рисунок И.5 – Зависимость энергии и периода коммутации от величины затворного резистора

Как видно из первого приведенного графика, меньшие выделения энергии сопровождаются при уменьшении R_G . В пользу уменьшения затворного резистора также говорит второй график. На частоте коммутации 8кГц, при уменьшении значения R_G включение ($t_{d_{on}}$) и выключение ($t_{d_{off}}$) ключа заметно ускоряются. Таким образом наиболее предпочтительным является наименьшее сопротивление в цепи затворов модуля SKM450GB12E4.

Однако в этом случае может возникнуть эффект осцилляции, который обусловлен суммарной емкостью затворных цепей [51,62] и паразитной индуктивностью. На практике используют условие (И.3), при выполнении которого осцилляции не возникают или имеют быстро затухающий характер.

$$R_G \geq 2 \sqrt{\frac{L_G}{C_{GG}}}, \quad (\text{И.3})$$

где L_G – паразитная индуктивность цепи затвора модуля;

C_{GG} – суммарная емкость затворной цепи (емкость затвора, внешний конденсатор). Для модуля SKM450GB12E4 емкость затвора – 27нФ [65,68].

Если учесть, что внешняя емкостная цепь отсутствует $2 \frac{\overline{L_G}}{C_{GG}} \approx 1,72$.

То есть, при условии, что $R_G \geq 1,72$. Таким образом в качестве затворного резистора выбран номинал $R_G = 2 \text{ Ом}$. Тогда максимально возможный ток драйвера для управления затвором модуля SKM450GB12E4 [53] составит

$$I_G = \frac{\Delta U_{GA}}{R_G} = 11,5 \text{ А.}$$

Таким образом для надежного управления модулем SKM450GB12E4 драйвер должен соответствовать следующим требованиям:

- наличие как минимум двух каналов для управления верхним и нижним ключами;
- мощность одного канала управления должна быть не менее 0,46 Вт;
- управляемое напряжение должно быть двухполярным с амплитудой от минус 8, до +15 В;
- ток управления не менее 11,5 А.

Кроме перечисленных требований, необходимо учесть возникновения сквозных токов. Современные драйверы со встроенной функцией генерации паузы «мертвого времени», решают этот вопрос. Кроме того драйвер должен иметь встроенные функции защиты от перегрузок, короткого замыкания и перенапряжения выходных цепей.

Наиболее функционально полными и соответствующие выше перечисленным требованиям, являются драйвер SKHI 27W фирм Semikron. На рисунке 6 приведен внешний вид драйвера и его монтаж на силовой модуль IGBT.

Драйверы серии SKHI выполнены в виде печатных плат с разъемами для подключения к системе управления и управляемым транзисторам с установленными на них необходимыми элементами и с возможностью установки настроечных элементов потребителем. Драйвер SKHI 27W имеет следующие характеристики [54] :

- управления нижним и верхним ключом полумоста;

- максимальное напряжение на выходе ключей 1700В;
- размах напряжения на затворах от -8В до +15В;
- максимальный импульсный ток 30А;
- максимальный заряд затвора 30мкК;
- частота коммутации до 10 кГц.

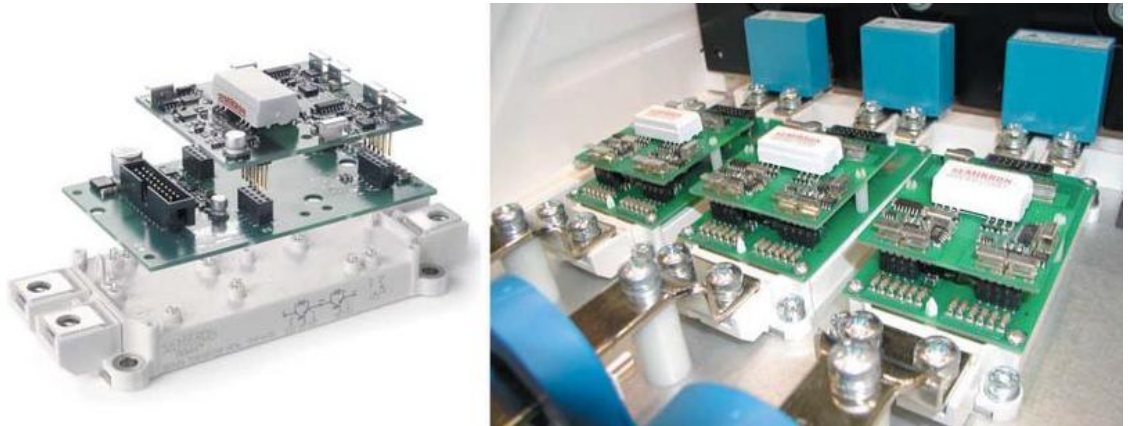


Рисунок И.6 – Драйвер SKHI 27W фирмы Semikron его монтаж на IGBTмодуль

Принципиальная схема подключения драйвера к силовому модулю представлена в приложении В.

Выбор и расчет снабберных цепей.

Поскольку нагрузкой в трехфазном инверторе является асинхронный двигатель, а его управление осуществляется частотным методом, то выходных цепях ПНЧ будут протекать переходные токи. Их основное воздействие на силовую часть схемы является выброс обратного напряжения при спаде импульса управления [55,56,57]. Это приводит к электрическому пробое ключей и драйверных схем.

Основным методом борьбы с переходными процессами в инверторных схемах является построения снабберных цепей. Современная номенклатура снабберных конденсаторов дает возможность подойти к этому вопросу без лишних

усилий. В простейшем случае снабберные цепи работают как обычный фильтр низких частот. Но когда речь идет о больших мощностях, то необходимы некоторые усложнения схем и их расчет.

Дополнительной положительной стороной применения снабберных цепей является снижения динамических потерь в силовых ключах [58,59]. В этом случае с помощью снабберных цепей формируется траектория переключения: параллельные емкости снижают скорость нарастания напряжения, индуктивности в цепях ограничивают скорость нарастания тока. Наиболее распространенные виды снабберных цепей приведены на рисунке И.7 [60].

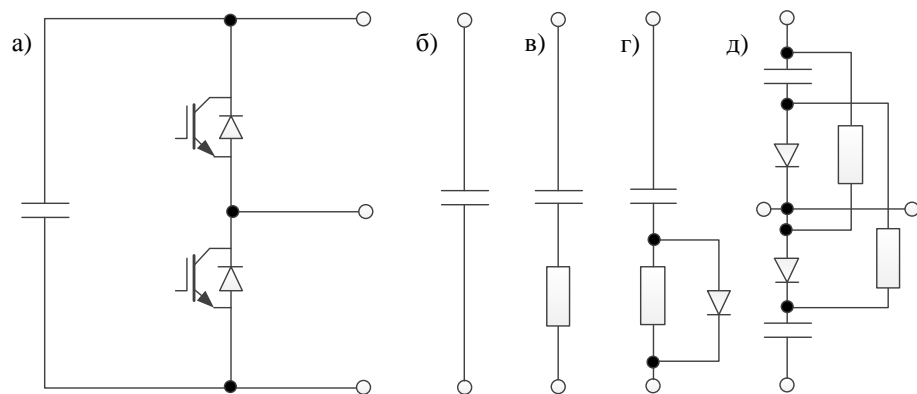


Рисунок И.7–Виды снабберных цепей их подключение к полумостовой схеме

На рисунке приведены типовые схемы снабберных цепей. Обычно эти схемы имеют низкоиндуктивный терминал со специальным креплением для подключения к существующим модулям IGBT (Рисунок И.8).



Рисунок И.8 – Снабберные конденсаторы с выводами терминалами под IGBT модули

Каждая из предложенных типовых схем (Рисунок И.7) имеет свою дополнительную направленность. В мощных инверторах, где паразитная индуктивность может появиться даже в снабберных цепях предлагается использовать схему [61] изображённую на рисунке И.7д.

В рамках диссертационной работы были проведены испытания, результате которых представлены осциллограммы IGBT ключей работающих под нагрузкой без снабберной и со снабберной цепью (Рисунок И.9).

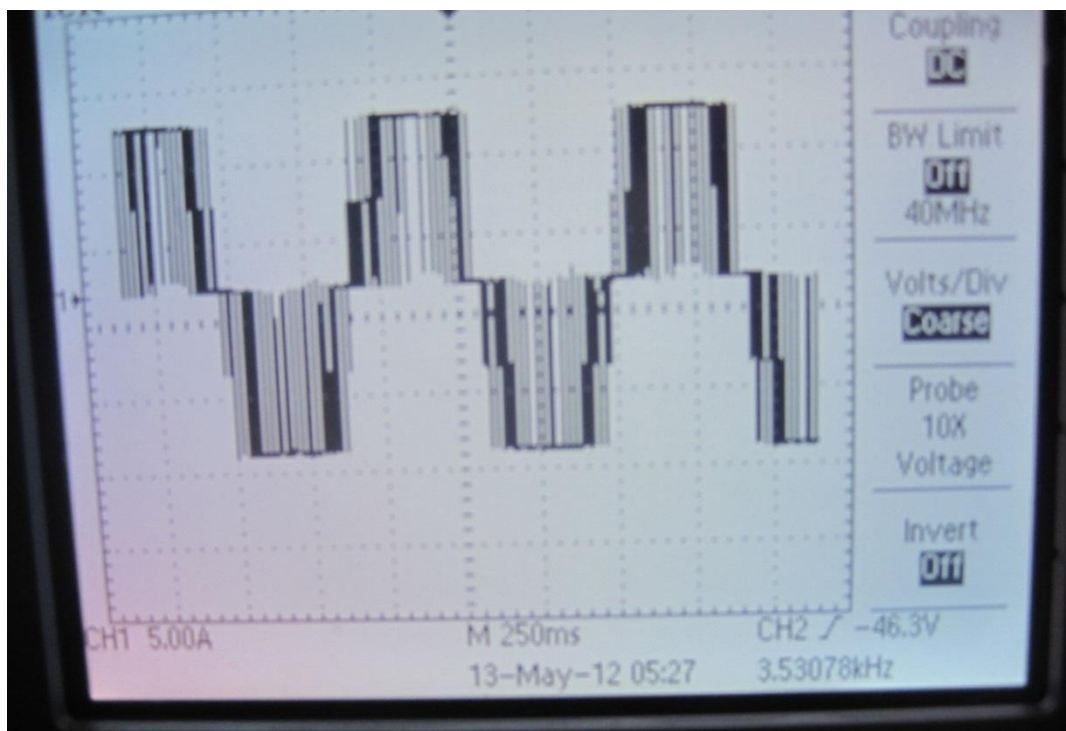


Рисунок И.9 - Осциллограммы работы инвертора со снабберной цепью

На осциллограмме всплеск вызванный наличием паразитной индуктивностью цепей коммутации вычисляются по формуле:

$$\Delta U = \sum L_s \cdot \frac{di_c}{dt}, \quad (\text{И.4})$$

где $\sum L_s$ – суммарная паразитная индуктивность выводов IGBT модуля (L_C, L_E) и DC – шины (L_{DC}) $\sum L_s = L_C + L_E + L_{DC}$;

$\frac{di_c}{dt}$ – скорость нарастания тока в коллекторной цепи.

Это формула может быть полезной для вычисления снабберной емкости C_S . Следует учитывать, что величина C_S должна быть прямопропорциональна величине $\sum L_s$. Таким образом, корректируя топологию силового каскада, обеспечивая минимальное значение L_{DC} , позволяет снизить требования к снабберным цепям [62].

При выборе конденсатора необходимо учитывать следующие его характеристики:

- допустимое напряжение постоянного тока;
- максимальную величину напряжения или тока пульсаций;
- величину емкости и эквивалентной последовательной индуктивности;
- срок службы компонента.

Обычно на практике бывает достаточным снабберная емкость номиналом 0,1-1 мкФ. И зачастую, его увеличение не оказывает положительных влияний на схему [63,64]. Излишняя емкость снаббера может привести к повышению осцилляций в коллекторной цепи ключей. Максимальная амплитуда и частота этих колебаний определяется по формулам (И.5) и (И.6) соответственно.

$$\Delta U_{osc} = \sqrt{\frac{L_{DC} \cdot I_C^2}{C_S}} \quad (\text{И.5})$$

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{DC} \cdot C_S}} \quad (\text{И.6})$$

Выражения (И.4, И.5, И.6) дают возможность с достаточной точностью определить необходимые параметры снабберного конденсатора. Исходя из этого, для силовой схемы управляющей двигателем 5АН315А2С был выбран

снабберный конденсатор марки МКР81 емкостью 2,2мкФ и напряжением 630В (Рисунок И.10).



Рисунок И.10- снабберный конденсатор марки МКР81

При правильной топологии DC-шин данный конденсатор способен поглотить до 95% переходных бросков, вызванных паразитной индуктивностью и индуктивностью нагрузки [65, с.35].

Оптимизация тепловых параметров инвертора.

Один из важнейших вопросов экономии, который необходимо решить при проектировании ПНЧ, это обеспечение работы на максимально возможном ресурсе модуля не снижая надежности и соблюдая его тепловые режимы [66, 67, 68]. Для этого необходимо провести расчет тепловых параметров инвертора системы оптимального регулирования производительностью на КУ. Эта задача облегчается благодаря появлению специальных программных приложений. Так например, фирма STEMIKRON предлагает свою программу SemiSel для расчета тепловых показателей модулей IGBT. По сравнению со своими аналогами, эта программа полностью автоматизирована и имеет высокую точность расчетов.

Программа SemiSel поддерживает большинство существующих практических схем инверторов [69, 70]. Она позволяет оптимально выбрать режимы работы и условия охлаждения. Пользователю необходимо лишь ввести числовые исходные величины.

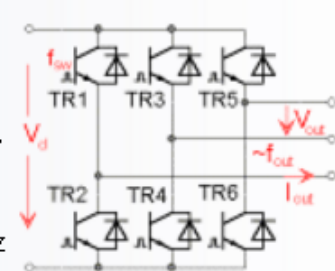
Для выбора оптимальных тепловых режимов работы инвертора на базе модуля SKM450GB12E4 в диссертационной работе была применена методика автоматизированного расчета SemiSel [71,72].

На первом этапе расчета была выбрана схема трехфазного инвертора с указанием основных исходных электрических величин (Рисунок И.11):

- напряжение питания на шинах DC: $V_{(d)}=650\text{В}$;
- напряжение на выходе между фазами: $V_{\text{out}}=380\text{В}$;
- выходная мощность нагрузки: $P_{\text{out}}=200\text{кВт}$;
- $\cos\varphi=0,88$;
- выходной ток нагрузки: $I_{\text{out}}=345\text{А}$;
- частота коммутации ключей: $f_{\text{sv}}=8\text{кГц}$;
- выходная частота инвертора: $f_{\text{out}}=50\text{Гц}$;
- степень перегрузки: двойная на протяжении 6 секунд;
- минимальная выходная частота: $f_{\text{minout}}=2\text{Гц}$;
- минимальное выходное напряжение: $V_{\text{minout}}=52\text{В}$.

DC/AC Inverter

Circuit parameter	
Input voltage	$V_{(d)}$ 650 V
Output voltage	V_{out} 380 V
$\cos(\phi)$	$\cos(\phi)$ 0.88
Output power	P_{out} 200 kW
Output current	I_{out} 345 A
Switching frequency	f_{sw} 8 kHz
Output frequency	f_{out} 50 Hz
Overload parameter	
factor	2
duration	6 s
User defined load cycle	<input type="checkbox"/>
min. output frequency	$f_{\text{min out}}$ 2 Hz
min. output voltage	$V_{\text{min out}}$ 52 V



Back
Next
Calculate

Рисунок И.11- Выбор схемы и ввод исходных данных в среде SemiSel

На втором этапе программа SemiSel предлагает выбрать тип и марку модуля (Рисунок И.12). Тут же, указывается необходимый метод расчета: при номинальных или при максимальных значениях. Для системы СОРСВ КУ был выбран модуль SKM450GB12E4, а расчет проводился при предельных электрических параметрах [49,с.32 ,50,с.54, 51,с.121, 73,74,75].

Рисунок И.12 – Выбор марки модуля в среде SemiSel

Третий этап включает в себя выбор тепловых параметров и метода охлаждения модулей (Рисунок И.13). Ниже указаны основные исходные данные этапа:

- температура окружающей среды: $T_a = 35^\circ\text{C}$ (выбрано наиболее неблагоприятное значение);
- количество ключей в модуле: 2 (полумостовая схема);
- число модулей на радиаторе: 3;
- метод охлаждения: принудительное воздушное охлаждение;
- радиатор для модулей Semitrans марки P16-300-16B.

DC/AC - Cooling

Ambient and heat sink parameter

Ambient temperature T_a °C

elements mounted

number of switches per heat sink

number of parallel devices on the same heat sink

Additional power source at this heat sink W

Cooling:

predefined type

Cooling method ▾

SK model ▾

Correction factor

flow rate m³/h (air) or l/min (liquid)

$R_{th(s-a)}$ kW

$R_{th(s-a)}$ * correction kW

Self defined heat sink

	τ_{th}	R_{th}
1	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
2	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
3	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
4	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
5	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
6	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>

fixed heat sink temperature °C

Back **Calculate**

Рисунок И.13 – Ввод тепловых параметров инвертора и выбор метода охлаждения

В результате расчета программа Semisel генерирует листинг, на основании которого:

– был выбран радиатор P16-200-16B с активным охлаждением, обеспечивающий оптимальный температурный режим инвертора при максимальной нагрузке модуля;

– был предложен наиболее подходящий драйвер SKYPER 42 LJ R для управления инвертором;

– был продемонстрирован температурный и динамический режим работы транзисторных ключей.

Полный результат листинга приведен в приложении Г.

Главным результатом листинга является график, показывающий температурные режимы всех узлов силовой части (Рисунок И.14).

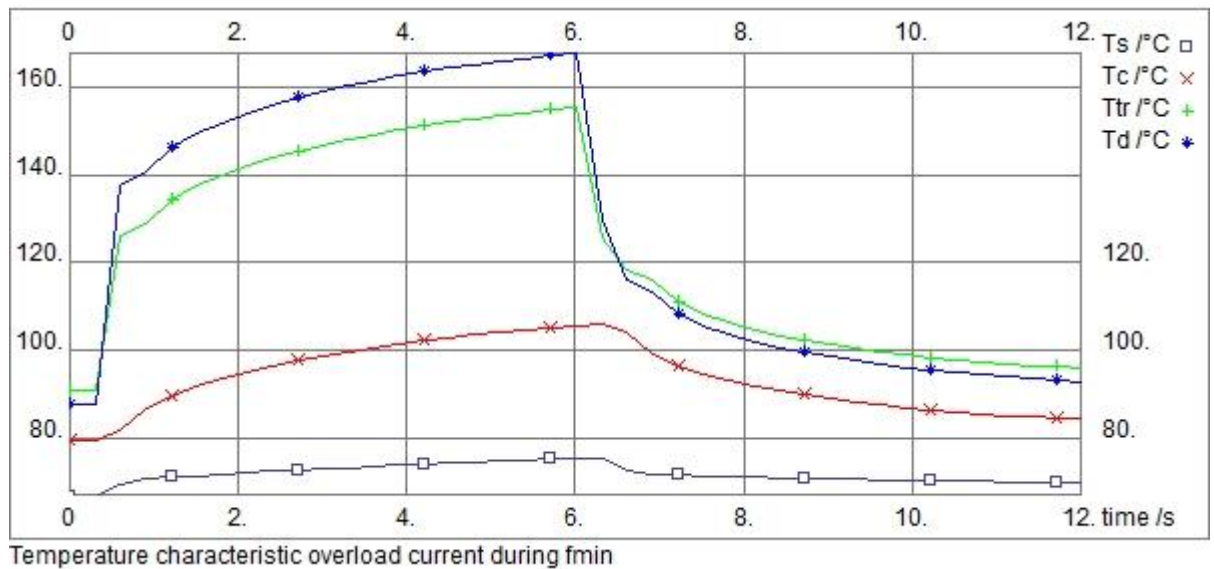


Рисунок И.14 – Графики температурных режимов модуля SKM450GB12E4.

Ниже приведены основные выходные величины используемые на графиках в приложении Г:

$P_{cond tr}$ – потери проводимости, Вт;

$P_{sw tr}$ – потери в транзисторах на переключение, Вт;

P_{tr} – потери на нагрев кристалла транзистора, Вт;

$P_{cond d}$ – потери проводимости, Вт;

$P_{sw d}$ – потери в диоде на переключение, Вт;

P_d – потери на нагрев кристалла диода, Вт;

P_{tot} – общая мощность потерь всех элементов на общем радиаторе;

T_s – температура радиатора, °C;

T_c – температура корпуса модуля, °С;

T_{tr} – температура кристалла IGBT, °С;

T_d – температура кристалла диода, °С.

Как видно, при максимальной нагрузке модуля $T_{tr}=124^{\circ}\text{C}$, при пуске инвертора с минимальной частотой $f_{\min}=2\text{Гц}$ $T_{tr}=156^{\circ}\text{C}$, при работе в номинальном режиме $T_{tr}=88^{\circ}\text{C}$. В любом случае кристалл не достигает своего пикового значения температуры $T_{tr\max}=175^{\circ}\text{C}$. При это температура радиатора в трех режимах имеет следующие значения $T_s=75/76/67^{\circ}\text{C}$.

Общий вид модулей, размещенных на радиаторе с активным охлаждением представлен на рисунке И.15.



Рисунок И.15 – Размещение SKM450GB12E4 на радиаторе P16-300-16B

Также в работе был проведен расчет тепловых параметров при работе инвертора в цикле длительностью 500 секунд. В результате получены графики, которые приведены на рисунке рисунке И.16. Как видно из графиков, исходно было задано 4 цикла, которые состоят из трех нагрузочных режимов:

- режим снижения частоты вращения двигателя (условие $f_{\min\text{out}}=2\text{Гц}$; $V_{\min\text{out}}=52\text{В}$);
- режим запуска под нагрузкой нагрузки;
- номинальный режим работы.

Полное описание цикла приведена в таблице И.1

Таблица И.1 – Описание цикла работы инвертора в SemiSel

	Время/сек	Выходной ток/ относ ед.	Выходное напряжение/ относ ед.	power factor	Выходная частота/ Гц	Частота ШИМ /кГц
1	0	1	1	0.85	50	8
2	1	1.5	0.1	0.95	2	8
3	61	1.5	0.1	0.95	2	8
4	62	1	1	0.85	50	8
5	120	1	1	0.85	50	8

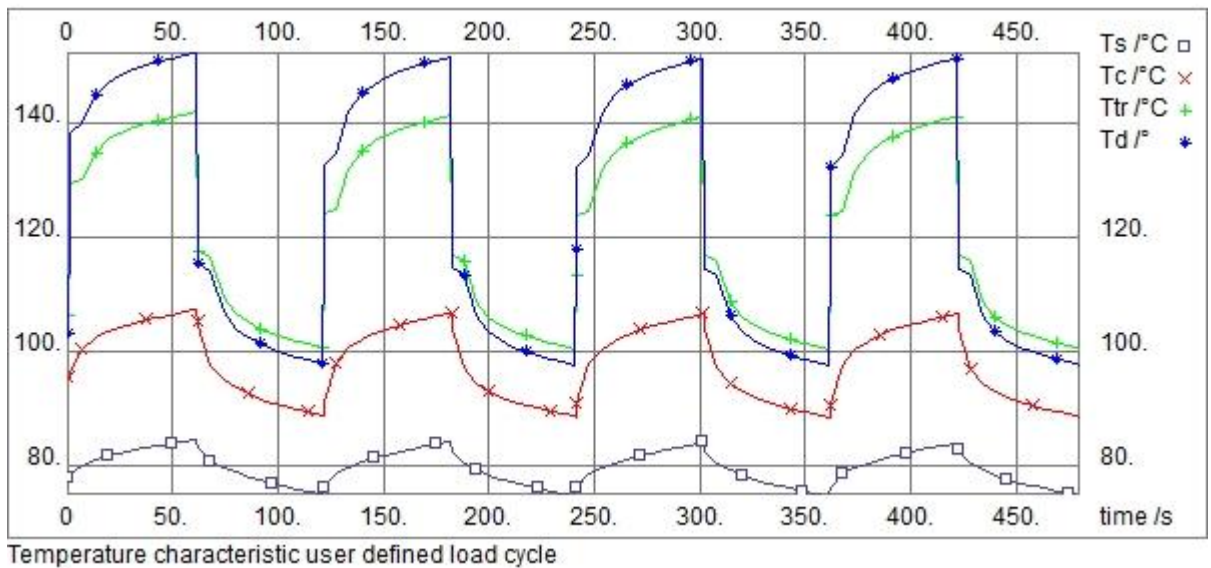


Рисунок И.16 – Температурные режимы модуля SKM450GB12E4 на радиаторе R16-300-16В. Работа в четырех циклах

В начальный момент времени инвертор работает в номинальном режиме, частота напряжения на выходе 50 Гц. Начиная с первой секунды частота управления двигателя снижается до 2 Гц. Инвертор испытывает перегрузку по току превышающее номинальное значение в 1,5 раза. В этом режиме инвертор работает 60 секунд. Следовательно, температура растет, пока не сменятся условия его работы. На 62 секунде частота повышается до 50Гц и система работает в номинальном режиме. До начала следующего цикла система охлаждения успевает снизить температуру радиатора до некоторого значения. Как видно из графика температурный режим модуля не превышает предельно допустимый $T_{trmax}=175^{\circ}C$

[76,77]. Результаты этого испытания приведены на графике (Рисунок И.16) и в приложении Г.

Очевидно, что запас по перегреву модулей SKM450GB12E4 на радиаторе P16-300-16B не большой. Максимальная температура в цикле работ составляет $T_{tr}=154^{\circ}\text{C}$ (запас 21°C) [78,79]. Поэтому размещения модуля трехфазного выпрямителя на этом радиаторе исключается. Для него необходимо проводить отдельный расчет и подбор радиатора.

Разработка выпрямительной схемы и оптимизация ее тепловых параметров

Известно, что в традиционных системах управления КУ, для питания приводов используется трехфазное напряжение 380В частотой 50Гц. При проектировании новой системы с частотным регулированием ПНЧ должен получать постоянное напряжения с амплитудным значением, достаточным, чтобы на выходе инвертора можно было получить 380В и 50Гц переменного тока [80, 81]. Для этого в системе ОРПСВ предусмотрен силовой выпрямитель. Он должен иметь трехфазную структуру, а его характеристики должны превышать пиковые значения тока и напряжения нагрузки. Современные трехфазные модули в большинстве своем соответствуют этим характеристикам. Однако, в условиях перегрузок для данной системы, тепловой режим модулей превышает номинальные показатели. Этот вопрос решается оборудованием мощных радиаторов с активным охлаждением. Но анализ показал, что экономичнее использовать комбинацию полумостовых структур из трех модулей SKKD380/12 компании SEMIKRON [82]. Дополнительным преимуществом этого подхода является повышения допустимого максимального тока, как следствие повышения надежности выпрямителя в целом.

Ниже приедены структура сборки и внешний вид модуля SKKD380/12 (Рисунок И.17) .

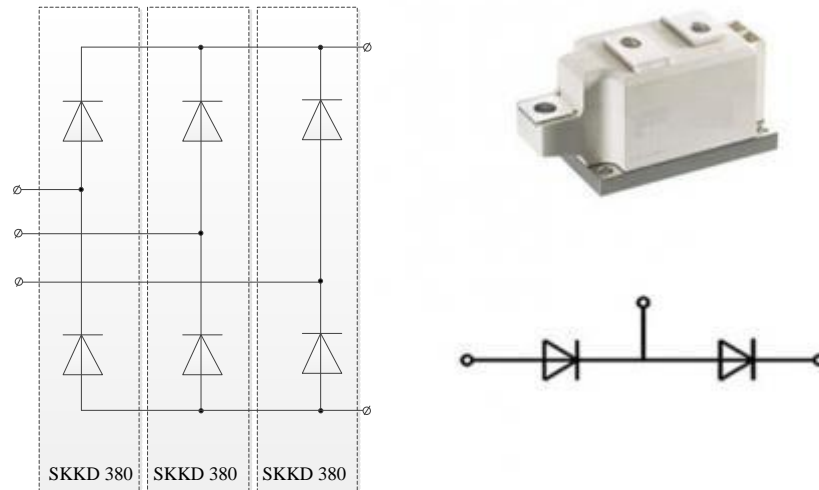


Рисунок И.17 –схема трехфазного мостана базе модулей SKKD380/12

Основные характеристики:

- максимальная температура эксплуатации: $-40 / 150^{\circ}\text{C}$;
- максимальный ток при температуре 100°C : 380A ;
- максимальный импульсный ток (10 мс): 1000A ;
- максимальное напряжение сигнала: 1200V .

Далее был проведен тепловой расчет для модулей SKKD380/12 в среде SemiSe. На основании этого расчета получен листинг (Приложение Д).

Таблица И.2–Листинг SemiSel параметры выпрямителя

Параметры	Номинальный режим	Режим перегрузки
Потери кристалла	41 W	41 W
Полные потери	246 W	246 W
Температура радиатора	35°C	35°C
Температура кристалла	41°C	41°C

Согласно полученным данным, для обеспечения нормальной работы выпрямительного каскада применяется радиатор марки P16-200-16B без принудительного охлаждения. При такой системе охлаждения модули находятся в пределах номинальных значений температур, не превышая 41°C (режим

перегрузок). При чем, в цикле перегрузок (Рисунок И.18) температура не превышает 44 °С.

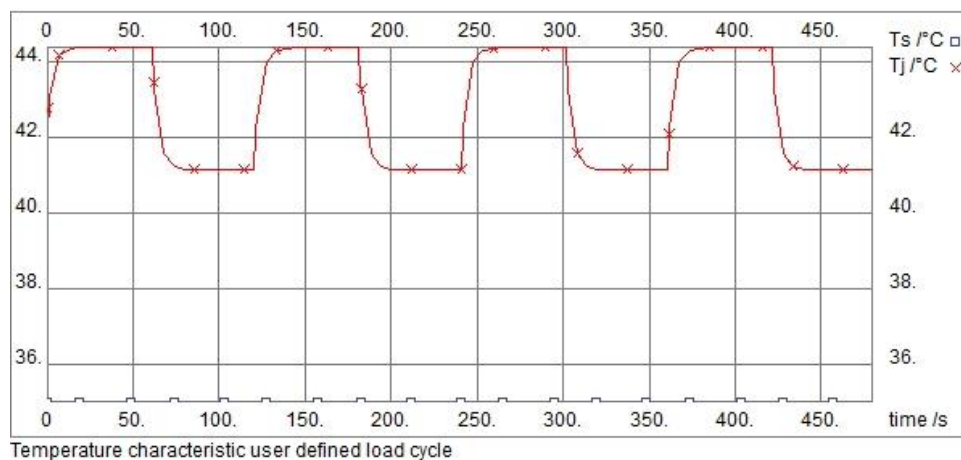


Рисунок И.18- Температурные режимы выпрямителя в цикле перегрузок

Таким образом, на одном радиаторе SKKD380/12 размещается три полумостовых диодных модуля SKKD380/12, которые способны обеспечить питания силовому инвертору на базе модулей SKM450GB12E4 с запасом на перегрузку.

Конструкционные особенности силовой схемы

Проектирования систем управления мощностью свыше 100кВт в значительной степени отличаются от средних и маломощных установок. Особенностью их является явное проявление паразитной индуктивности и хрупкость мощных силовых модулей. Так, например, следует учесть, что внутрисхемна структура силовых полупроводников имеют паяные соединения между кристаллами, платами и основанием [83,84]. В связи с этим значительное механическое воздействие на корпус или основание модуля может привести к появлению трещин в кристаллах транзисторов и диодов. Кроме того, в конструкции модулей применяются детали из хрупких материалов (керамика Al₂O₃ или AlN, композиционный материал AlSiC), поэтому с модулями необходимо обращаться осторожно, особенно после распаковки из транспортной

тары. Запрещается ронять модули, наносить какие-либо удары по корпусу и основанию [85]. Особенно опасны концентрированные удары по основанию модуля и по охладителю с закрепленными на нем модулями. Ударная волна передается от охладителя на основание, в результате чего создаются условия для появления трещин в кристаллах и платах модуля [86,88].

Для снижения переходного теплового сопротивления модули-охладители оснований модулей многих производителей имеют выпуклую форму [89]. Перед креплением модуля к охладителю на основание наносится тонкий слой теплопроводящей пасты, которая заполняет пустоты, вытесняя при этом воздух. Слой пасты должен иметь минимальную толщину, так как ее теплопроводность все же относительна [90].

При креплении модуля к охладителю с помощью винтов основание прижимается к охладителю со значительным усилием, поэтому вся лишняя нанесенная паста выдавливается наружу. Применение паст с очень высокой вязкостью может привести при монтаже модуля к охладителю к недопустимому изгибу медного основания и появлению трещин в металлокерамических платах и кристаллах.

Монтаж силовых шин к IGBT-модулям должен производиться с точным соблюдением технологии сборки, а также с учетом требований к конструкции и свойствам силовых шин. Силовые выводы модулей имеют внутренние демпферы, которые предназначены для компенсации различий в температурных коэффициентах расширения деталей и практически исключают механические нагрузки в паянных контактах, возникающие при монтаже внешних шин. [91,92] Тем не менее превышение допустимых механических нагрузок к выводы в процессе монтажа может привести к повреждению прибора.

Внешние силовые шины сделаны, как правило, из твердой меди и имеют высокую жесткость. При больших зазорах между выводами модуля и шиной существует вероятность сильной деформации выводов и нарушения внутреннего контакта в модуле [93].

В этом случае при завертывании крепежных винтов одновременно с упругим изгибом силовой шины происходит вытягивание вывода из корпуса у модуля, что приводит обрыву силового вывода внутри модуля.

Также модули не должны использоваться в качестве опор для крепления массивных силовых шин, особенно с учетом ударных и вибрационных нагрузок. Наилучшим решением будет крепление силовых шин на специальные опоры-изоляторы, которые принимают на себя основную механическую нагрузку.

Сами силовые шины должны выдерживать максимальные токи инвертора и иметь минимальную паразитную индуктивность. Наибольшую популярность в построении DC- шин являются многослойные плоские шины. Такие шины применяют для силовой импульсной техники с большой мощностью и высокой скоростью переключения. Диапазон токов, при которых целесообразно использовать такие шины составляет 25-2500А. [94] Основные требования предъявляемые к этим проводникам являются минимальные значения паразитной индуктивности и активного сопротивления, а также высокий уровень плотности тока при относительно высоком уровне напряжения изоляции. Для данного решения оптимальная плотность тока в плоском проводнике должна составлять 5 А/мм² [95]. При необходимости повышения тока, добавляют слои. Формула (И.7) позволяет рассчитать необходимую площадь сечения и количество слоев шины при заданном максимальном токе.

$$A=0,2I_{max}(1+0,05(N-1)), \quad (\text{И.7})$$

где N – количество слоев шины;

I_{max} – максимальный токи инвертора, А.

Исходя из этого, площадь сечения шины составляет 84мм². По этим данным производители силовой предполагают готовые решения DC. Кроме того на этих шинах уже оснащены батареи конденсаторов, что значительно облегчает проектирования таких систем, сопровождая свой продукт соответствующей

документацией. Пример конструкции трехфазного инвертора приведен на Рисунок И.19.

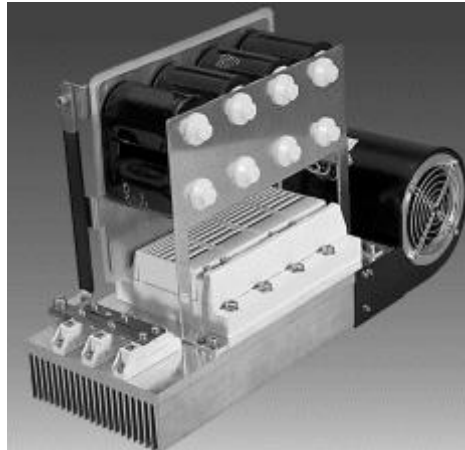


Рисунок И.19- Пример конструктивно законченного трехфазного преобразователя частоты и напряжения

Разработка микропроцессорной части

Основной задачей микропроцессорного схемы управления (микропроцессорного контроллера) является опрос датчиков и генерация сигналов управления по установленному алгоритму. Разработка микропроцессорного контроллера для ПНЧ СОПСВ КУ включает в себя два этапа:

- разработка аппаратной части;
- разработка программной части.

Разработка аппаратной части

Разработка аппаратной части включает в себя выбор электронных компонентов и разработка схемы.

Главным узлом схемы является микроконтроллер (МК). Для системы управления КУ достаточным является применения восьмиразрядного микроконтроллера с широкой базой периферийных узлов [96].

Ниже приведены основные требования к функционалу МК, которые необходимо учесть при разработке аппаратной части платы управления:

- наличие, по меньшей мере, 8 каналов дискретных портов ввода- вывода, для подключения органов управления и дискретных датчиков;
- наличие, по меньшей мере, 8 каналов аналоговых портов ввода, для подключения датчиков температуры и давления;
- наличие достаточного объема памяти данных и памяти программ;
- наличие трех каналов широтно-импульсно-модулированного сигнала (ШИМ);
- наличие встроенного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП);
- наличие блоков стандартных протоколов обмена данными для связи с АРМ электромеханика.

Таким требованиям отвечает восьмибайтный микроконтроллер ATmega48 фирмы ATMEL . Процессор AVR данной микросхемы выполняет одну операцию за такт, что делает его лидером среди 8 разрядных МК. Основные характеристики Atmega48pu [53,с144,97]:

- 130 команд, большинство которых выполняется за один тактовый цикл;
- 32 8- битных рабочих регистра общего применения;
- полностью статическая архитектура;
- производительность до 16 MIPS при тактовой частоте 16 МГц;
- встроенный двухцикловый умножитель;
- 4 КБ внутрисистемной программируемой Flash памяти программы, способной выдержать 10 000 циклов записи/стирания [98,99];
- вспомогательная секция загрузочной программы с независимым битом защиты;
- 256 байта EEPROM, способной выдержать 100 000 циклов записи/стирания [100];
- 512 байта встроенной SRAM памяти (статическое ОЗУ);
- программируемая защита программы от считывания;

- два 8- разрядных таймера/счетчика с отдельным предделителем и режимом сравнения;
- один 16- разрядный таймер/счетчик с отдельным предделителем и режимом сравнения и режимом захвата;
- счетчик реального времени с отдельным генератором;
- пять ШИМ каналов;
- 8- канальный АЦП;
- программируемый последовательный USART;
- ведущий/ведомый SPI интерфейс;
- 2- проводной интерфейс 1-Wire;
- программируемый сторожевой таймер со встроенным генератором;
- встроенный аналоговый компаратор;
- внешние и внутренние источники прерывания;
- сброс при включении питания и детектор кратковременных пропаданий питания;
- встроенный откалиброванный генератор;
 - Пять режимов пониженного потребления: Idle, ADC Noise Reduction, Power-Save, Power-down и Standby[101,102];
- 23 программируемых линии портов ввода-вывода;
 - диапазон напряжения питания от 1.8 до 5.5 В;
 - сверх низкое потребление:
 - активный режим: 300 мкА при частоте 1 МГц и напряжении питания 1.8 В, 20 мкА при частоте 32 кГц и напряжении питания 1.8 В;
 - режим пониженного потребления: 0.5 мкА при напряжении питания 1.8 В.

Внутренняя структура микроконтроллера приведена на рисунке 20.

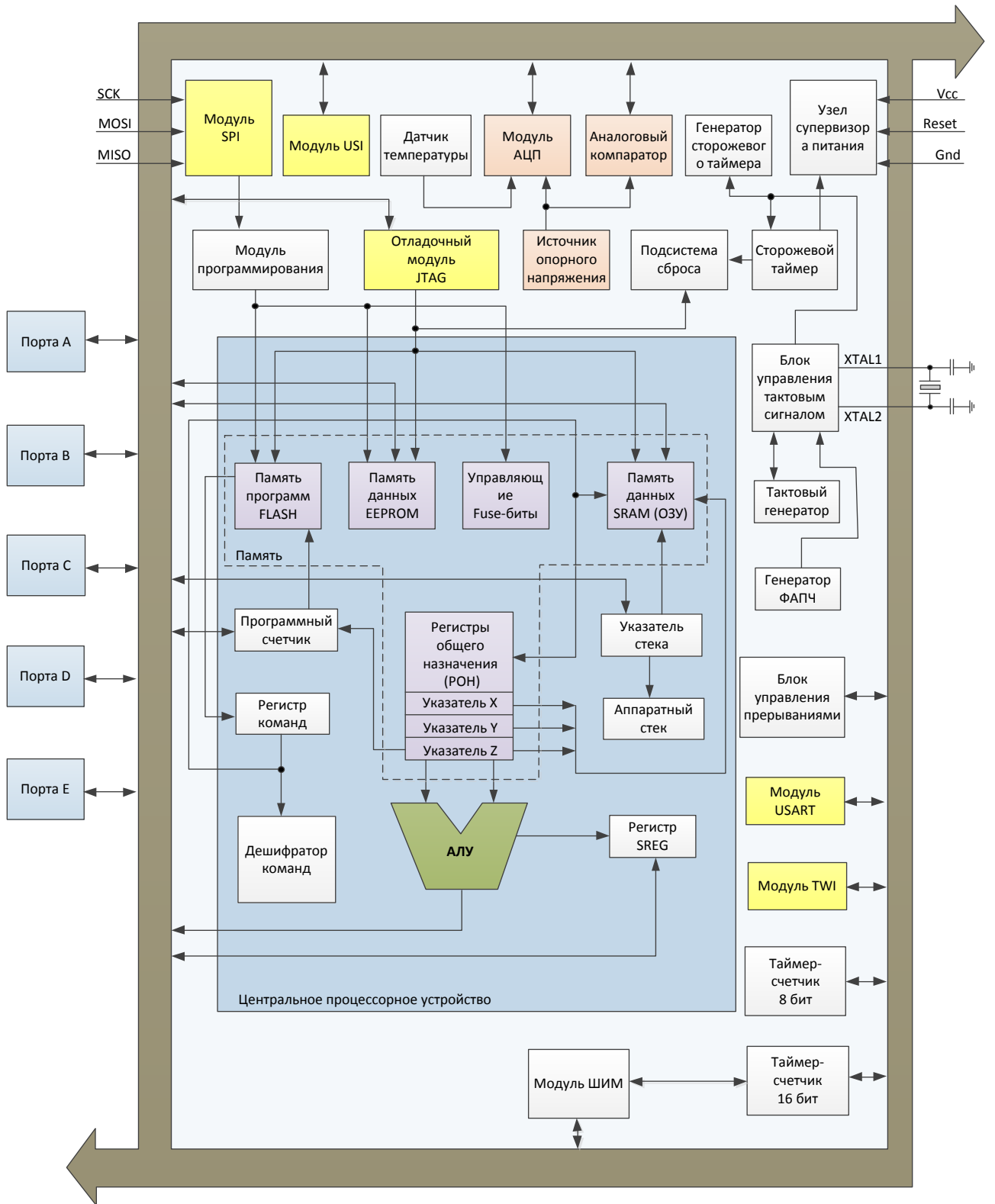


Рисунок И.20 – Структура микроконтроллера Atmega48

В рамках диссертационной работы, была разработана принципиальная схема микропроцессорного контроллера (приложение Б).

Выходы микроконтроллера OC2A, OC0B, OC0A через схему согласования, построенной на логических элементах «И» (микросхема 74AC08N) и «ИЛИ-НЕ» (микросхема 74AC14N) и разъем XP1 подключены к драйверной схеме (приложение В). Эти три выхода образуют управляющие ШИМ-каналы. Реализованная схема согласования инвертирует импульсный сигнал на входе верхнего ключа, относительно нижнего. Это связано с тем, что для управления 6 транзисторами инвертора используется всего 3 канала ШИМ. Кроме того, схема дополняет функции драйвера по задержки «мертвого времени» для защиты от возникновения сквозных токов в полумостовой схеме [103,104].

Датчики температуры воздушной системы и двигателя подключается через разъемы XP4, XP5. В качестве датчиков температуры могут применяться, как цифровые, типа DS18B20 так и аналоговые датчики. В первом случае микроконтроллер обращается к устройству посредством протокола 1-Wire. Во втором случае информация от датчиков поступает непосредственно на канал АЦП МК. В обоих случаях используется один канал порта ввода/вывода имеющий несколько альтернативных функций.

Для управления микропроцессорным контроллером предусмотрены два варианта:

- посредством персонального компьютера (АРМ электромеханика);
- непосредственно с платы контроллера.

Первый вариант осуществляется через последовательный интерфейс RS-232 (Рисунок И.21) [105]. В этом случае к устройству можно обратиться через виртуальные органы управления и контроля.

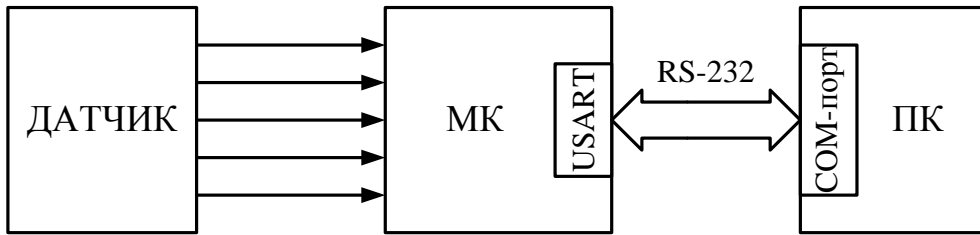


Рисунок И.21 – Структура согласования ПК с микропроцессорным контроллером

Принципиально физический уровень протокола RS-232 реализован посредством микросхемы преобразователя MAX232 [54, с.12, 106,107] (Рисунок И.22) и внутреннего модуля USART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Этот протокол прост в реализации и достаточно надежный на расстояниях в пределах небольшого цеха.

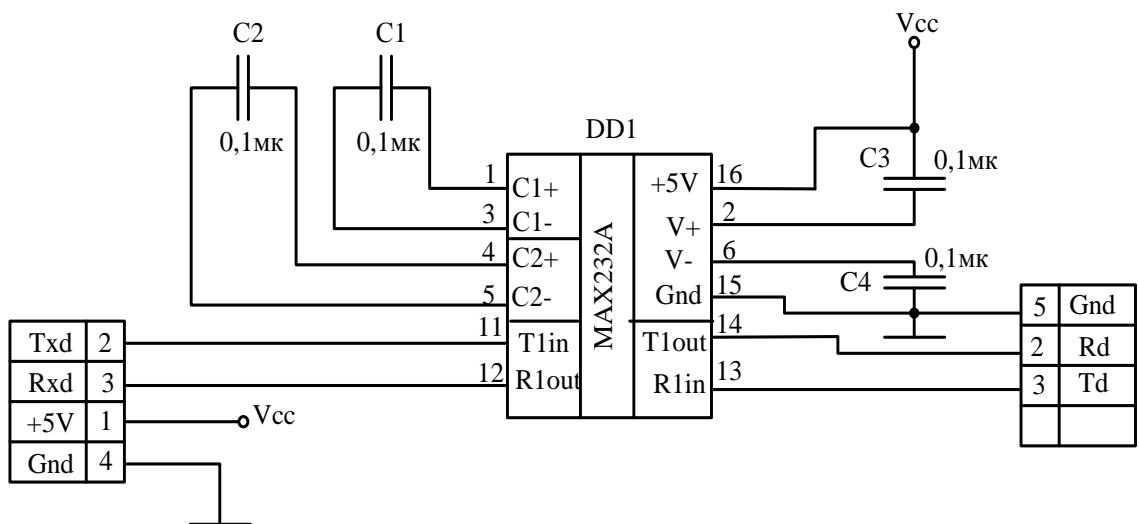


Рисунок И. 22 – Схема аппаратной реализации интерфейса RS-232

Кроме управляющих команд, по протоколу RS-232 осуществляется передача контрольной информации о состоянии датчиков и сервисных функций МП. Эта информация отображается на мониторе ПК в режиме реального времени.

Вторым способом управления работой микропроцессорного контроллера является управление с платы. Этот режим ограничен по своему функционалу и имеет следующие команды управления:

–кнопки «Пуск» и «Стоп» подключены к разъему ХР10 и дискретному порту МК. Команда «Пуск» - переводит контроллер в режим мягкого пуска приводного двигателя. Команда «Стоп» переводит контроллер в режим плавного останова двигателя.

–кнопка задачи частоты модуляции. При нажатии МП формирует ШИМ сигнал частотой 16кГц, при отжатой- 2кГц. Эта функция может быть полезной при силовых быстродействующих ключах.

– кнопка аварийного останова. При нажатии этой кнопки МП программно отключается от инвертора, переводя его в нерабочий режим. При этом опрос датчиков и передача информации продолжается.

Все остальные функции МП выполняет автоматически.

Монтаж платы микропроцессорного контроллера выполнен на двухстороннем стеклотекстолите согласно нормативным требованиям ГОСТ 2.123-93, ГОСТ 2.417-91,ГОСТ Р 53386-2009,ГОСТ Р 53429-2009,ГОСТ 23752-79. [108,109].

С целью ремонтпригодности микросхемы применяются в DIP-корпусах, которые вставляются в специальные панели. Пассивные электронные компоненты рассчитаны с двойным запасом по мощности и напряжению. Для уменьшения влияния электромагнитных наводок, микропроцессорная плата располагается в непосредственной близости от инвертора. При этом длина сигнальных проводов максимально укорочена. Интерфейсный кабель экранирован и по краям оснащен ферритовыми кольцами.

Разработка программной части

Как и любая разработка программного продукта, эта часть включает в себя процесс написания исходного кода, его компиляцию, отладку внутрисхемную и отладку системную [110].

В рамках диссертационного проекта компиляция и внутрисхемная отладка осуществляется с использования среды разработки AVRstudio (Рисунок 23). Лицензию этого приложения компания ATMEL предоставляет бесплатно.



Рисунок И.23 – Окно приветствия программы AVRstudio

Алгоритм программного кода рассмотрен в главе 2 данной диссертации. А исходный код программы на языке assembler приведен в приложении Ж. После внутрисхемной отладки, программа переносится в микроконтроллер посредством протокола SPI (serial peripheral interface) [111]. Для этого в диссертации был разработан программатор поддерживающий этот функционал.

Подключение программатора к МК приведено в приложении Е, а его принципиальная схема приведена на рисунке И.24

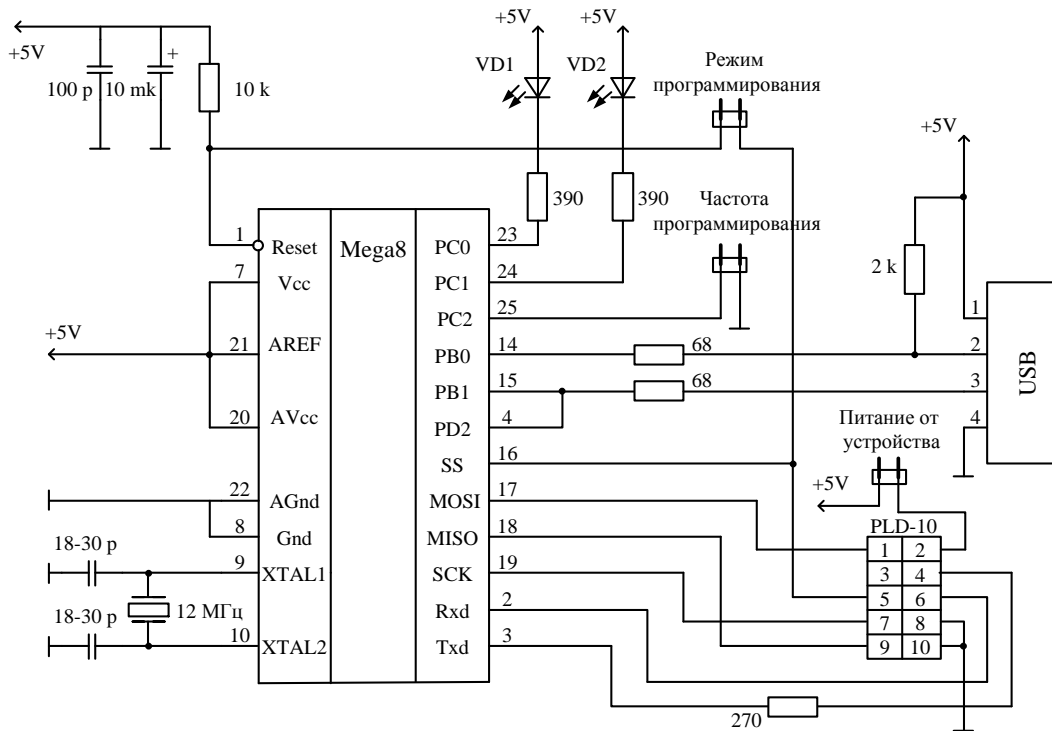


Рисунок И.24 – Принципиальная схема программатора

Данная схема согласуется с программой AVRstudio. При этом, программа воспринимает его, как STK-500 (программатор от ATMEL).

Разработанный программатор поддерживает весь функционал лицензированных устройств, кроме внутрисхемной отладки в режиме реального времени, поскольку не поддерживает протокол JTAG.

Исходный код программы (приложения Ж) состоит из следующих структурных блоков:

- блок определения сегмента памяти программ и обозначения векторов прерывания;
- инициализация процессора и периферийных узлов: портов ввода/вывода (PORTD, PORTB, PORTC) стека (SP), АЦП, таймеров/счетчиков (T/C0 и T/C1), приемопередатчика USART;
- блок подпрограммы пуска;
- блок подпрограммы частотного регулирования;
- блок инициализации 1-Wire;

- блоки подпрограмм считывания данных с датчиков температуры и давления;
- блоки подпрограммы передачи/ приема данных;
- блок подпрограммы преобразования результатов HEX-кодов в десятичные значения;
- блок преобразования чисел со знаком и десятичной частью;
- блок задержки;
- таблица значений формы сигнала.

Таблица значений формы сигналов представляют собой выборки скважностей, которые определяют напряжения на выходе инвертора в данный момент времени. Эти значения сформированы с учетом максимальной корреляции с идеальной синусоидой. Три строки таблицы по 57 выборок каждая, образуют трехфазную систему выходных значений скважностей (Рисунок И.25).

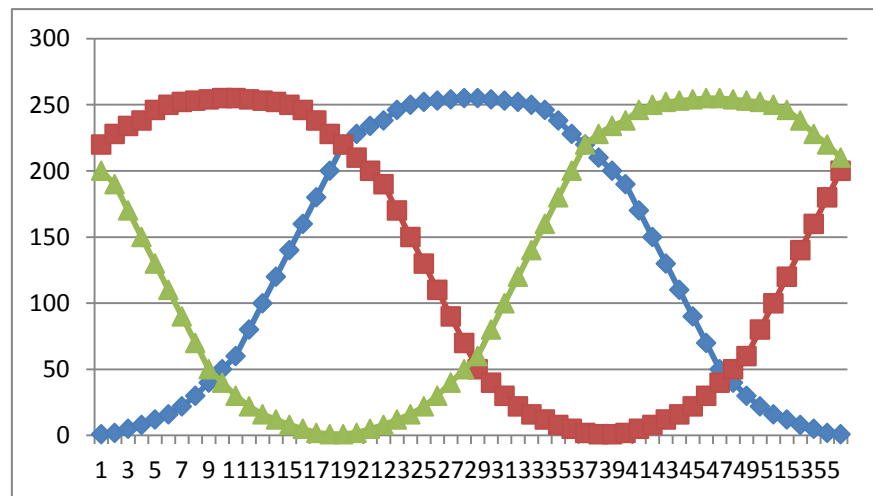


Рисунок И.25 – Подбор выборок в среде Excel для использования в ассемблере

В программе табличные значения выборок уточняются поправочными коэффициентами, в зависимости от показаний с датчиков давления. Выбор поправочных коэффициентов осуществляется с учетом постоянности отношения напряжения к частоте во всем диапазоне частот. Выбор этого коэффициента рассмотрен в главе 2. Различная частота выходного сигнала в программе реализуется за счет интервалов между выборками в подпрограмме задержки.

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Копии документов о внедрении результатов исследований

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ДОНЕЦКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА»
СЛУЖБА СИГНАЛИЗАЦИИ И СВЯЗИ**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 68

тел. 2-41-78, факс 2-46-75

22.07.2019№ 2005/ 1209

Диссертационный совет Д 01.024.04 при
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Сацюк Александра Владимировича на тему: «Совершенствование системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки на сортировочной станции», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) на ГП «Донецкая железная дорога».

Результаты диссертационных исследований Сацюка А.В., а именно: методы управления производительности компрессорных установок, в виде рекомендаций внедрены на ГП «Донецкая железная дорога» для улучшения эффективности функционирования компрессорных установок.

Начальник службы



Калашников М.Н.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
 ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
 ГОСУДАРСТВЕННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО
 ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
 «ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА» (ДОНИЖТ)
 ул. Артема, 184, г. Донецк, 283122
 E-mail: institut-transporta@mail.ru, тел./факс (062)319-08-31

От 19.07.2019 г. № 529/01
 На № _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.024.04 при ГОУВПО
 «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
 УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Сацюк Александра Владимировича на тему: «Совершенствование системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки на сортировочной станции», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА»

Результаты диссертационных исследований Сацюка А.В., а именно: динамическая математическая модель скатывания отцепа с горба горки; алгоритмы управления производительности компрессорной установки на сортировочной станции; структура и комплекс технических средств системы автоматического регулирования производительности компрессорной станции на основе современных микропроцессорных устройств внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций по дисциплинам «Стационарные системы автоматизации», «Электрические машины», «Микропроцессорные информационные управляющие системы», для студентов направления подготовки 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Ректор, д.т.н., профессор



М.Н. Чепцов

Начальник учебного отдела

Н.В. Селютина

Заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика,
 связь и вычислительная техника», к.т.н., доцент

С.А. Радковский