

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

*На правах рукописи*

**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)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Донецк – 2019

Работа выполнена в ГООВПО «ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА», г. Донецк

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Чепцов Михаил Николаевич,**  
ГООВПО «ДОНИЖТ»,  
ректор

**Официальные оппоненты:**

**Ведущая организация:**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. \_\_, ауд. \_\_\_\_. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensovet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.024.04  
кандидат технических наук

Т.В. Завадская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Каждый сегмент транспортной отрасли имеет свои особенности, связанные с природно-географическими характеристиками, технологическими процессами, а так же 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., Одикадзе 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 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. Подтверждается внедрением результатов исследования диссертационной работы в виде рекомендаций по улучшению эффективности функционирования компрессорных установок на ГП «Донецкая железная дорога» (справка о внедрении № 1209 от 22.07.19 г. выдана службой сигнализации и связи ГП «Донецкая железная дорога»), а также в учебный процесс ГОУ ВПО ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА (справка №529/01 от 19.07.19 г. принята к внедрению в учебный процесс при чтении лекций и проведении практических занятий 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.

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

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

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

5. 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.

6. Результаты диссертационных исследований, а именно: динамическая математическая модель скатывания отцепы 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 (направления 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% 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. Донецк, 2012г.; IV міжвузівської науково-технічної конференції викладачів, молодих вчених та студентів: «Основні проблеми та сучасні методивирішення задач енерго- і ресурсозбереження при експлуатації машин та устаткування», г. Донецк, 2012г.; материалы Второй международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты комплексного развития транспортной отрасли», ДААТ, 25-26 мая, Донецк, 2016г.; Третья международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта», г. Донецк, 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 19 научных работах, в том числе: 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, 6 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, АСТПП 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 54 источников на 6 страницах и 9 приложений на 65 страницах. Основной текст, изложенный на 123 страницах, иллюстрируется 80 рисунками (включая рисунки приложения) и содержит 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первом разделе** работы «Анализ работы компрессорных установок на сортировочной станции» проведен анализ систем автоматизации сортировочных процессов, анализ методов регулирования производительности сжатого воздуха, а также методов управления двигателями.

На основе анализа сортировочных процессов выявлено, что основным объектом, в рассматриваемом комплексе технологических работ и существенно влияющими на энергозатраты сортировочной горки является компрессорная станция (КС).

Компрессорная станция потребляет свыше 70% электроэнергии отводимой на сортировочную горку. В структуру КС входят 3-4 параллельно работающих компрессора мощностью до 200кВт каждый. Основное назначение КС обеспечить работу пневмоузлов, которые участвуют в технологическом процессе на сортировочной станции (СС). 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. Таким образом, потребление электрической энергии СС очень тесно связано с операцией расформирования состава. Поэтому разработка ресурсосберегающей модели работы в условиях сортировочного процесса является актуальной задачей.

В результате анализа энергозатрат приходящихся на функционирование КС выявлено, что единственный фактор, который поддается корректировке во время роспуска вагонов – это режим работы КУ  $R_{Ку}$ . Причем данный показатель может зависеть от остальных показателей технологического процесса и погодных условий. Регулировка этих параметров существенно могут влиять на энергозатраты системы в целом.



Для более детального понимания процессов в КУ, в разделе проведен анализ методов регулирования производительности компрессорных установок на сортировочной горке. Рассмотрены существующие методы регулирования производительности КУ: пуск/останов приводного двигателя, подключение «мертвого объема», перевод компрессора на холостой ход, дросселирование, частотный метод. Также рассмотрены современные системы регулирования производительности КУ.

Установлено, что наиболее экономичным методом управления компрессорами является частотный метод, который сводится к регулированию приводным двигателем компрессора. Поэтому в данном разделе рассмотрены существующие методы управления приводными двигателями переменного тока.

Показано, что наиболее актуальными методами управления двигателями переменного тока в КУ являются частотный скалярный и частотный векторный методы.

Однако, для компрессорных станций, в которых в качестве приводов применяют синхронные и асинхронные двигатели мощностью выше 100кВт, наиболее оптимальным решением является применение скалярного метода управления. В сравнении с векторным этот метод прост и экономичен. Он позволяет в широком диапазоне регулировать скорость вращения вала при постоянном уровне электромагнитного момента. При этом скольжение не 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. С учетом характера нагрузки на валу двигателя выбран пропорциональный закон (1) изменения напряжения.

$$U_1/f_1 = const. \quad (1)$$

Кроме того, в разделе проведен анализ научных работ отечественных и зарубежных авторов, посвященным автоматическому управлению компрессорными установками и вопросам энергосбережения на СС. В этом направлении работали следующие ученые: 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., Одикадзе В.Р., Тартынский В.А., Карасев С.В., Ольгейзер И.А., Козубенко В.Г., Похилко С.П. и др.

В результате анализа методов, подходов и систем управления КУ в первом разделе сформулирован вывод: на сегодняшний день вопрос обеспечения экономии электроэнергии на сортировочной станции не решен. Поэтому цель диссертационной работы – разработать структуру, модель и алгоритм функционирования системы автоматического управления компрессорной установки в зависимости от технологического процесса и погодных условий на станции.

Во втором разделе «Многофакторная математическая модель энергетических затрат на компрессорной станции» методами статистического анализа данных установлены факторы влияющие на затраты электроэнергии компрессорной установки. Для этого проведен корреляционный анализ данных: расход электроэнергии на СС  $E_i$  и количество вагонов, переработанных за  $i$ -тый дискретный период времени (смену)  $N_{вi}$ . В результате корреляционного анализа установлена тесная связь между двумя функциями (Рисунок 1), что дает возможность говорить о функциональной зависимости двух величин.

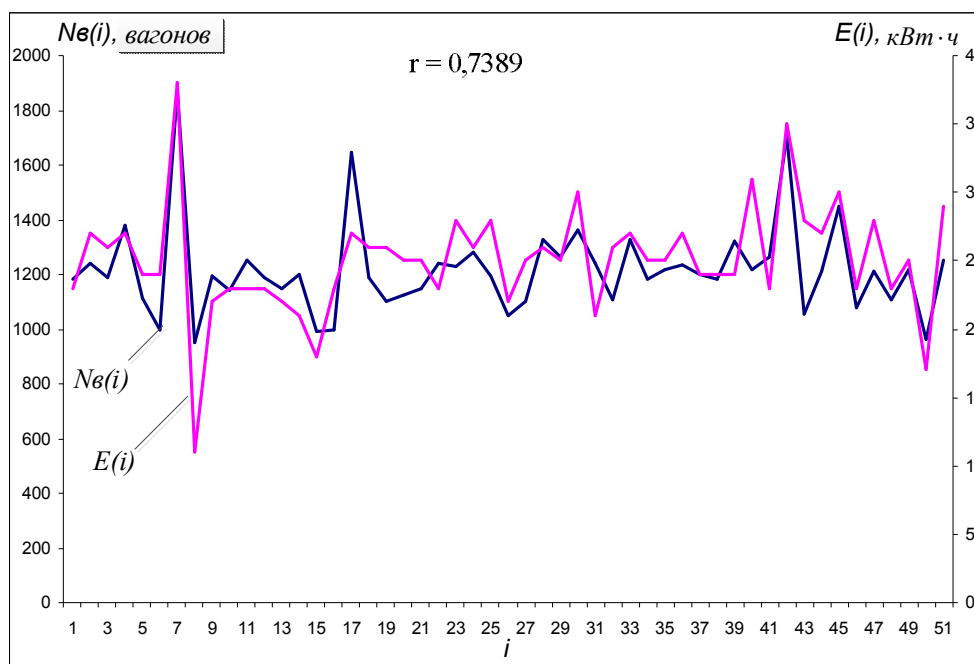


Рисунок 1 – Диаграмма распределения количества вагонов  $N_{вi}$  и потребление электроэнергии за смену  $E_i$ .

На основе регрессионного анализа установлена линейная зависимость, что между значением потребление электроэнергии за смену  $E_i$  и фактором количества вагонов  $N_{вi}$  (Рисунок 2).

Дальнейший анализ статистических данных затрат электроэнергии на СС и факторов погодных условий: температура, сила и направления ветра показал умеренную корреляционную связь, что отображено на рисунках 3 и 4.

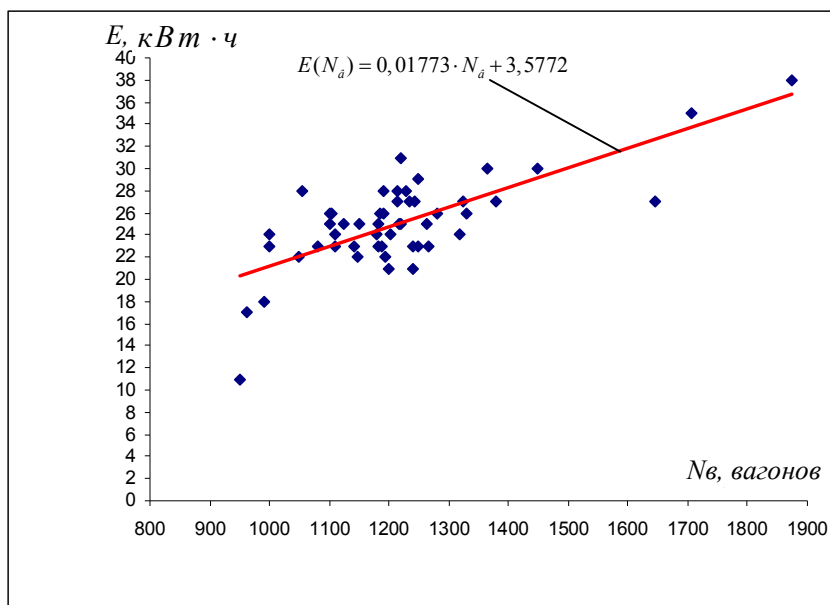


Рисунок 2 – График линейной зависимости потерь электроэнергии от количества распущенных вагонов,  $E(N_{в})$ .

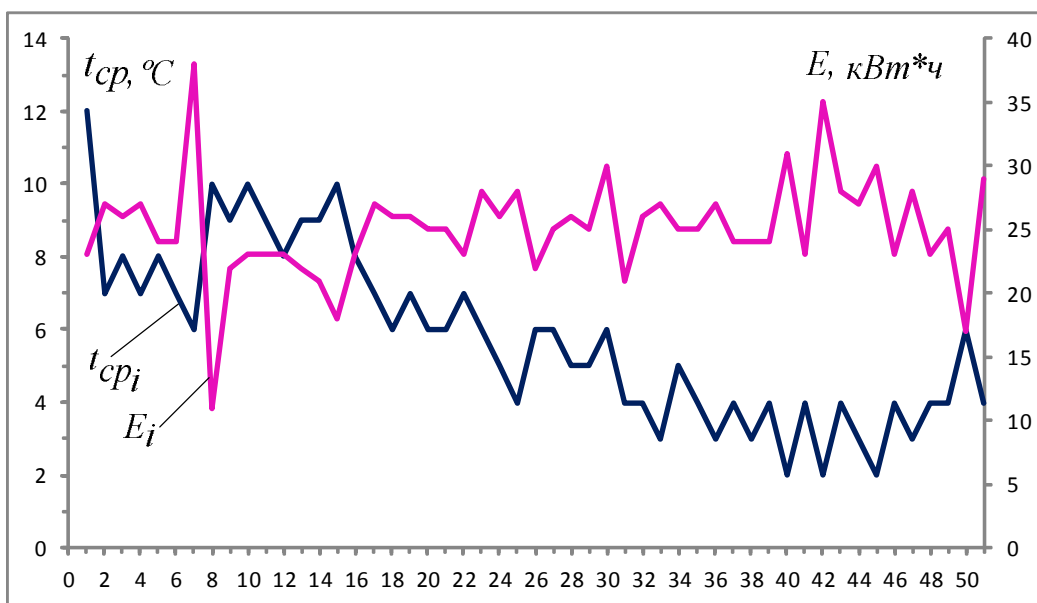


Рисунок 3 – Диаграмма распределения средних значений прогнозных температур  $t_{срi}$  и потребление электроэнергии за смену  $E_{и}$ .

Результаты анализа показали, что на затраты электрической энергии СС влияют факторы технологического процесса и погодных условий. Это дало возможность детальнее исследовать эти факторы и на их основе разработать динамическую модель энергозатрат КУ.

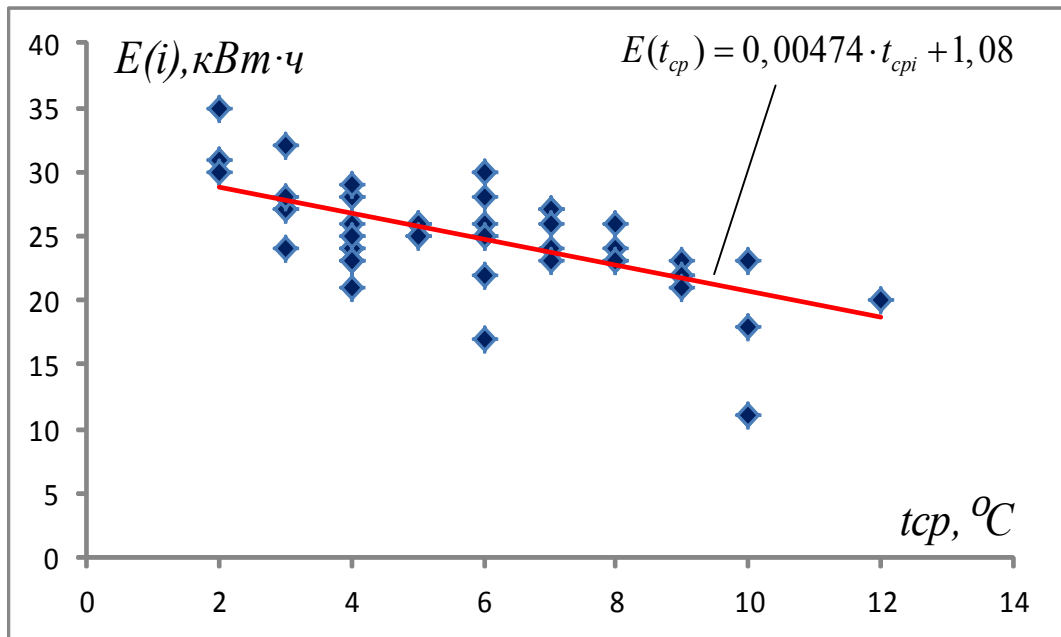


Рисунок4 – График линейной зависимости потерь электроэнергии от количества распущенных вагонов,  $E(t_{cp})$ .

Для построения динамической модели энергозатрат КУ применялось выражение, описывающее затраты энергии на переработку одного вагона:

$$H_{Tj} = H_{\Gamma} + h_{0j} - h_{wj} - h_{нзj}, \quad (2)$$

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.

На рисунке 5 приведены распределения энергетических высот (2) по участкам горки во время скатывания вагона.

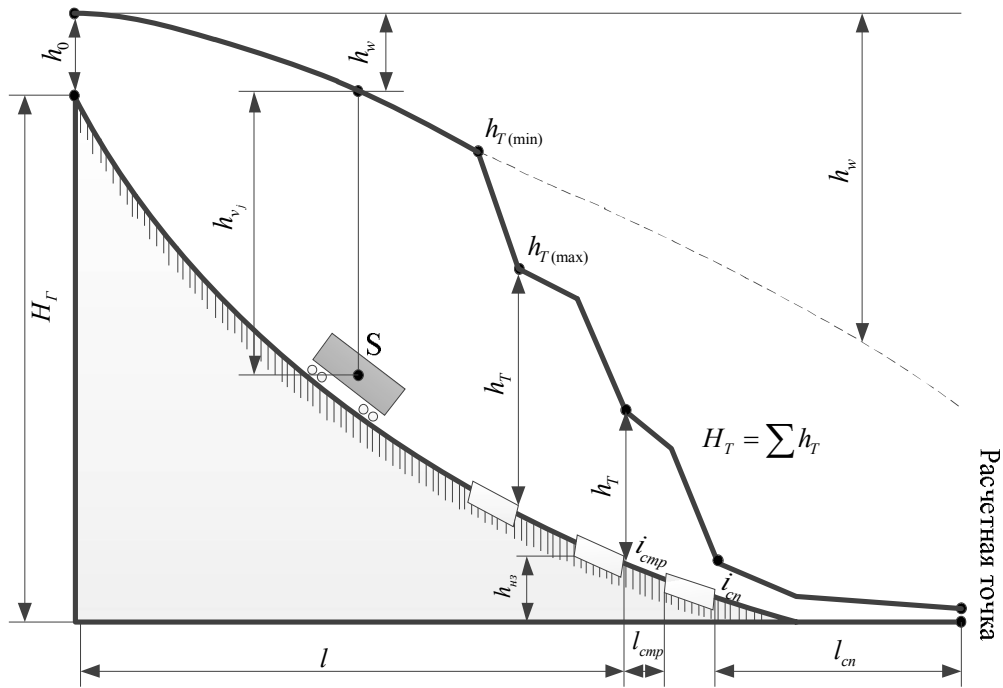


Рисунок 5 – Распределение энергетических высот

Разработана математическая модель (3) заполнения приемных путей СС, которая позволяет рассчитать необходимое усилие прикладываемое замедлителями для торможения отцепка идущего на заданный путь.

$$L_{свij} = L_{св(i,j-1)} - B_{ji}, \quad (3)$$

где  $L_{свj} = \{l_{св1}, l_{св2}, \dots, l_{свn}\}$  - одномерный массив данных свободы участков путей;

$n$  – количество путей;

$j$  – порядковый номер вагона.

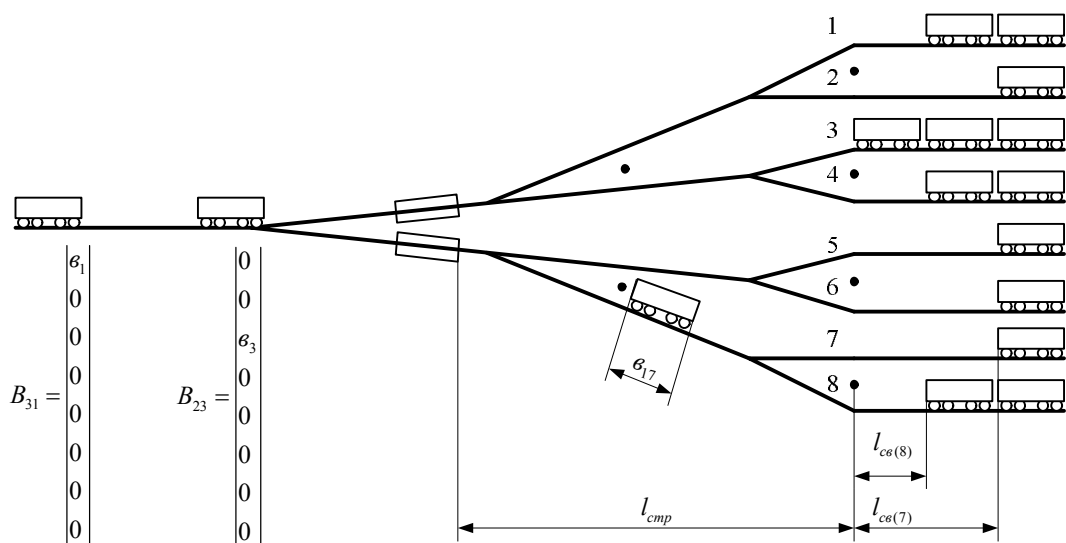


Рисунок 6 – Схема заполнения путей вагонами в процессе роспуска

На основании уравнений (2) - (3), учитывая статические, динамические характеристики вагонов, их направление и особенности профиля сортировочной горки, разработана динамическая модель энергетических затрат, которые приходится на торможение одного вагона:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_B = \{m_{Bj}, m_{B(j+1)}, \dots, m_{Bm}\} \\ L_{свij} = L_{св(i, j-1)} - B_{ji} \\ H_{Tj} = H_r + h_{0j} - h_{wj} - h_{H3j} \\ h_{0j} = \frac{(1 - 420n_j / 100m_j)V_0^2}{2g} \\ h_{wj} = 10^{-3}[(w_{0j} \pm w_{срj})l + 9 \sum_i^m \alpha_{снi} + 20n_{снi}] \\ h_{H3j} = 10^{-3}(i_{ср}l_{ср} + i_{св}l_{свj}) \end{array} \right. \quad (4)$$

Система (4) может быть применена, как прогнозная модель (ПМ) расхода энергии, которая приходится на торможение одного вагона. Для этого должны быть известны весовые характеристики вагонов и их пути назначения.

Работоспособность математической модели (4) апробирована, на примере роспуска состава из 28 вагонов. В результате этого получен расчетный прогноз затрат энергии на замедлителях при расформировании подвижного состава (Рисунок 7).

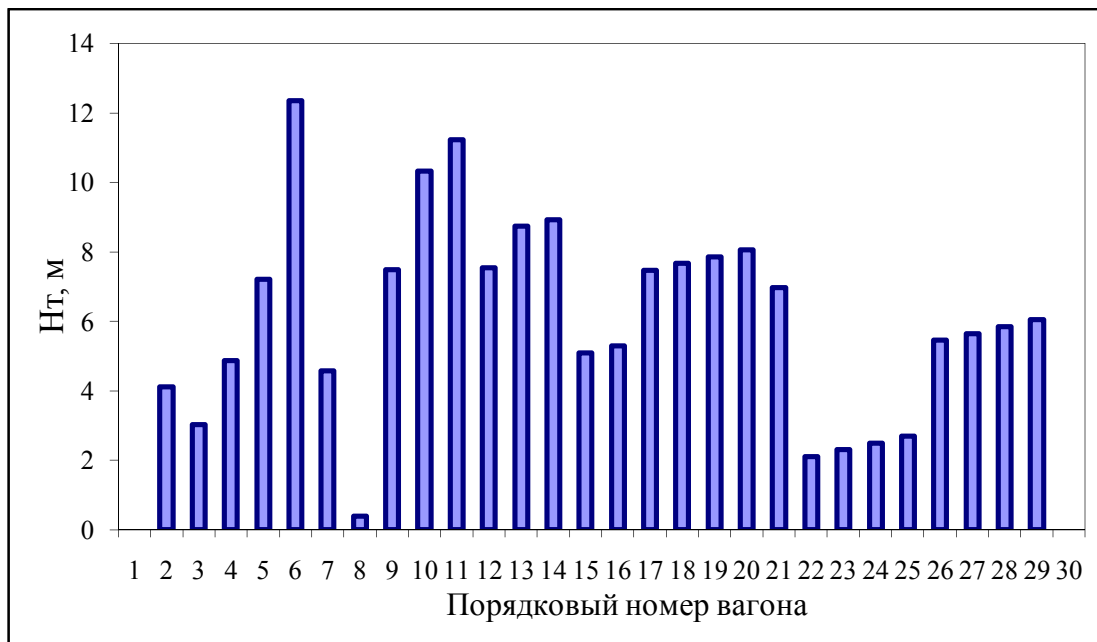


Рисунок 7 – Расчетный прогноз затрат энергии на замедлителях при расформировании подвижного состава

Результаты модели дают возможность прогнозировать энергетические затраты КУ в предстоящем роспуске состава.

Установлено, что влияние погодных условий на скатывающийся отцеп является существенным. Поэтому в данном разделе детально исследованы скорость и направления ветра, как основной погодный фактор, влияющий на расход электроэнергии СС.

В диссертационной работе впервые исследовано влияние воздушных масс на скатывающийся с горба горки вагон/отцеп. Для этого применены принципы, термины и величины аэронавигации (Рисунок 8).

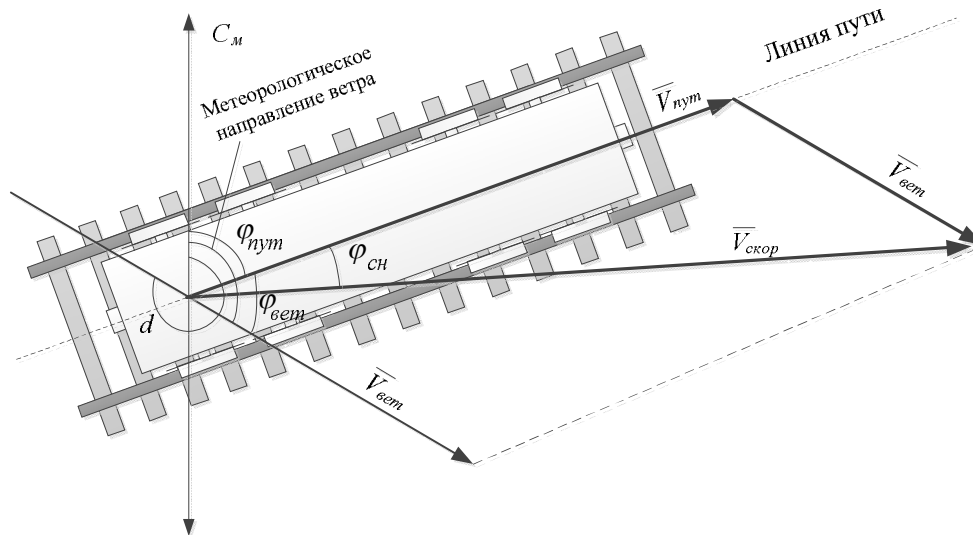


Рисунок 8 – Треугольник скоростей и его элементы

Так основными элементами в навигационном треугольнике скоростей (Рисунок 8) являются: вектор путевой скорости  $\bar{V}_{пут}$  (м/с), вектор скорости ветра  $\bar{V}_{вет}$  (м/с), вектор скорректированной скорости  $\bar{V}_{скор}$  (м/с), угол сноса  $\varphi_{сн}$ , угол ветра  $\varphi_{вет}$ , магнитный путевой угол  $\varphi_{пут}$ .

Между элементами навигационного треугольника скоростей определена следующая зависимость:

$$\bar{V}_{вет} = V_{вет} \cdot \cos(\varphi_{вет}); \quad (5)$$

$$\bar{V}_{скор} = V_{вет} \cdot \cos(\varphi_{вет}) + V_{пут} \cdot \cos(\varphi_{пут}); \quad (6)$$

$$\varphi_{вет} = d \pm 180^\circ - \varphi_{пут}, \quad (7)$$

$$\bar{V}_{скор} = V_{скор} \cdot \cos(\varphi_{сн}), \quad \varphi_{сн} = \arccos \frac{\bar{V}_{скор}}{V_{скор}}, \quad (8)$$

Выражения (5)-(8) дали возможность провести детальный анализ:

- зависимости угла сноса и результирующей скорости от путевой скорости;

- зависимости угла сноса и результирующей скорости от скорости ветра;

- зависимости угла сноса и результирующей скорости от угла ветра;

- влияния угла съезда и воздушных масс на отцеп по маршруту движения.

В результате анализа влияния воздушных масс на скатывающийся вагон/отцеп получена полная динамическая модель энергетических затрат

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

Система уравнений (9) позволила разработать функциональную модель системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки.

В результате функционирования модели установлено, что на каждый процент снижения производительности, потребляемая мощность снижается на 2%. То есть при производительности 80% от  $Q_{\text{max}}$  мощность установки снижается на 40%. Результатом такой модели стал график (Рисунок 9) сравнения энергозатрат предложенной и традиционной системы управления производительности КУ.

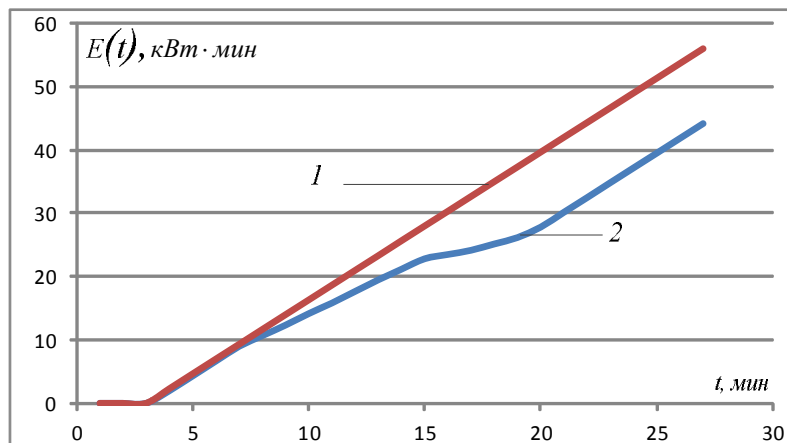


Рисунок 9 – Затраты электроэнергии КУ: 1- при традиционной системы управления; 2 – при частотном методе управления.



В третьем разделе «Синтез системы автоматического регулирования производительностью компрессорной установки на сортировочной горке» рассмотрены задачи разработки структуры и определения параметров системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки в соответствии с требованиями технологического регламента.

На основе модели функционирования системы автоматического управления КУ разработана структурно-функциональная схема системы автоматического регулирования производительности компрессора (САПКУ) (Рисунок 10).

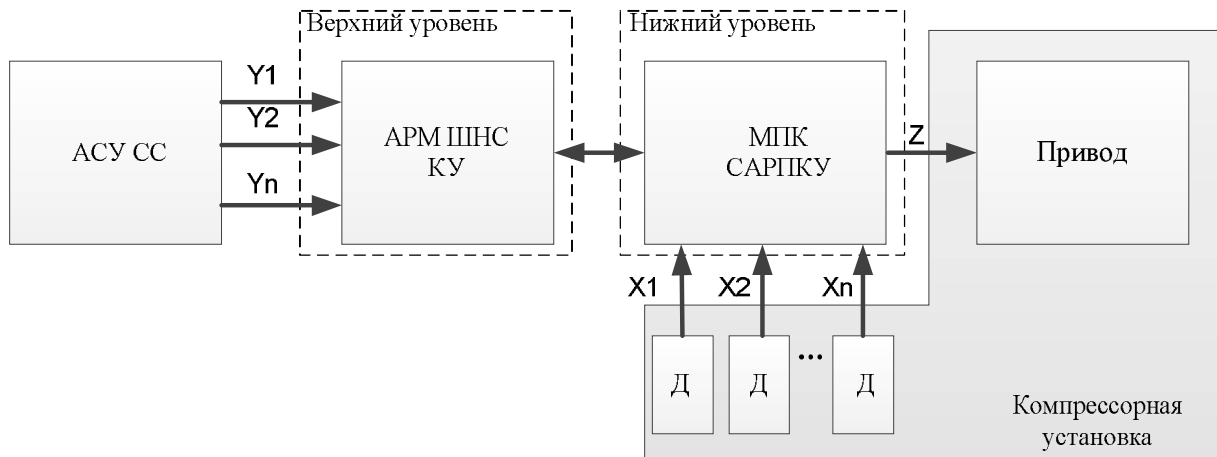


Рисунок 10 – Обобщённая структурная схема САПКУ

Данная структура позволила сформулировать принцип работы предложенной системы и провести анализ динамических характеристик САПКУ. Для этого разработаны структурные схемы (Рисунки 11 и 12)

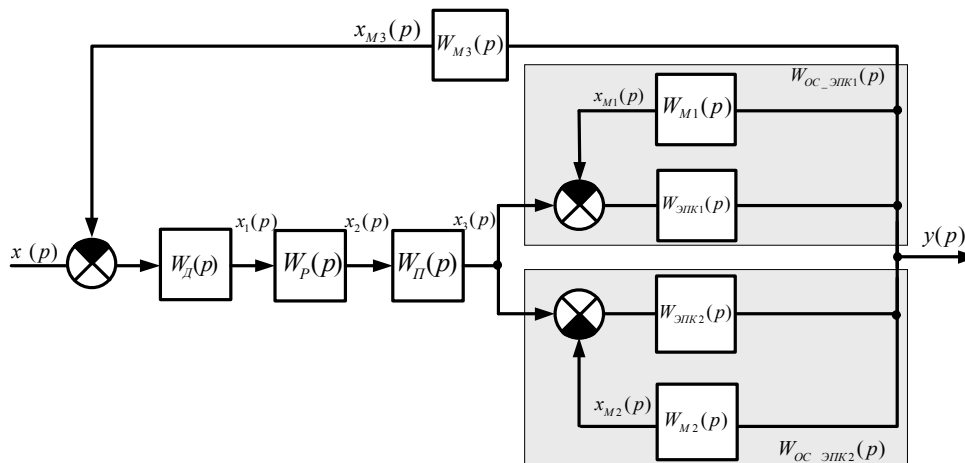


Рисунок 11 – Структурная схема существующей системы управления компрессорной установкой.

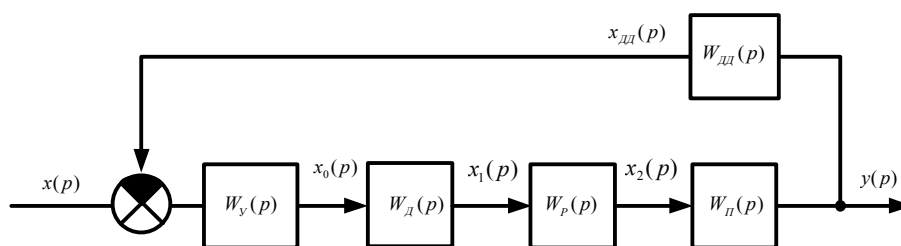


Рисунок 12 – Структурная схема предложенной системы управления производительности компрессорной установки.

Представлена передаточная функция модели существующей (10) и предложенной (11) САПКУ:

$$W(p) = \frac{W_d(p) \cdot W_p(p) \cdot W_{\Pi}(p) \cdot \left( \frac{W_{\text{ЭПК1}}(p)}{1 + W_{\text{ЭПК1}}(p) \cdot W_{M1}(p)} + \frac{W_{\text{ЭПК1}}(p)}{1 + W_{\text{ЭПК1}}(p) \cdot W_{M1}(p)} \right)}{1 + W_{M3}(p) \cdot (W_d(p) \cdot W_p(p) \cdot W_{\Pi}(p) \cdot \left( \frac{W_{\text{ЭПК1}}(p)}{1 + W_{\text{ЭПК1}}(p) \cdot W_{M1}(p)} + \frac{W_{\text{ЭПК1}}(p)}{1 + W_{\text{ЭПК1}}(p) \cdot W_{M1}(p)} \right))}, \quad (10)$$

$$W(p) = \frac{k(T_1 p + 1)}{T_2^2 p^4 T_0 + T_2^2 p^3 + 2T_1^3 T_0 \zeta p + 2T_1^2 \zeta p^2 + T_0 p^2 + p + k_d k T_1 p + k_d k}. \quad (11)$$

На основе полученной модели (11) разработана компьютерная имитационная модель в программной среде VisSim (Рисунок 13).

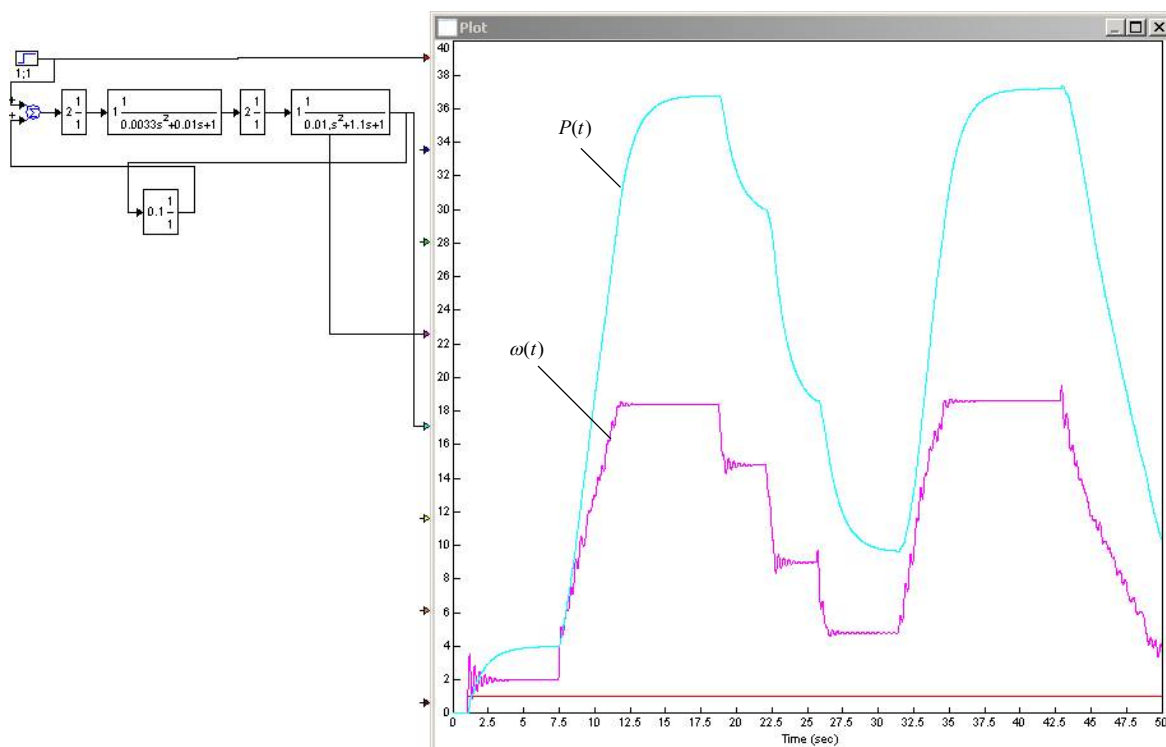


Рисунок 13 – Имитация работы системы при изменении давления на выходе

Применяя принципы подобия, сопоставлены результаты имитационных значений пуска и регулирования системы с реальной моделью САРПКУ. Эти результаты подтверждают соответствие качественного поведения модели основным характеристикам исследуемого технического процесса, а также данных, приведенных в литературных источниках.

На основе прогнозно-динамической модели (9) предложен алгоритм вычисления задающего значения производительности и алгоритм корректирующего значения производительности. Данные значения применяются для регулирования производительности КУ по отклонению давления в магистрали, которые сводятся к управлению скоростью вращения вала приводного двигателя.

Для реализации имитационной компьютерной модели разработана математическая модель управления двигателем

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{pwmA}(t) = K \frac{M}{2} \cos(\omega_1 t) + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 \left( K \frac{m\pi M}{2} \right) \sin \frac{m\pi}{2} \cos(m(\omega_c t + \theta_c)) + \\ \quad + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{2}{m\pi} J_n \left( K \frac{m\pi M}{2} \right) \sin \frac{(m+n)\pi}{2} \cos(m(\omega_c t + \theta_c) + n(\omega_1 t)) \\ u_{pwmB}(t) = K \frac{M}{2} \cos(\omega_1 t + 120) + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 \left( K \frac{m\pi M}{2} \right) \sin \frac{m\pi}{2} \cos(m(\omega_c t + \theta_c)) + \\ \quad + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{2}{m\pi} J_n \left( K \frac{m\pi M}{2} \right) \sin \frac{(m+n)\pi}{2} \cos(m(\omega_c t + \theta_c) + n(\omega_1 t + 120)) \\ u_{pwmC}(t) = K \frac{M}{2} \cos(\omega_1 t + 240) + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{2}{m\pi} J_0 \left( K \frac{m\pi M}{2} \right) \sin \frac{m\pi}{2} \cos(m(\omega_c t + \theta_c)) + \\ \quad + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{2}{m\pi} J_n \left( K \frac{m\pi M}{2} \right) \sin \frac{(m+n)\pi}{2} \cos(m(\omega_c t + \theta_c) + n(\omega_1 t + 240)) \\ \omega_1 = 2\pi f \\ f \in [5; 50] \end{array} \right. \quad (12)$$

Кроме плавного регулирования производительности КУ выражение (12) позволит мягко организовывать пуск/останов асинхронных двигателей (Рисунок 14), что значительно увеличит срок службы и уменьшит финансовые затраты на их обслуживание.

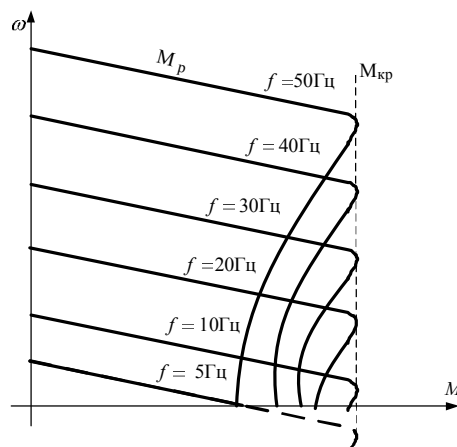


Рисунок 14 – Механическая характеристика АД при частотном регулировании по закону  $\frac{U_1}{f_1} = M = const$ .

На базе модели (12) в среде MathLabSimulink синтезирована имитационная компьютерная модель системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки (Рисунок 15).

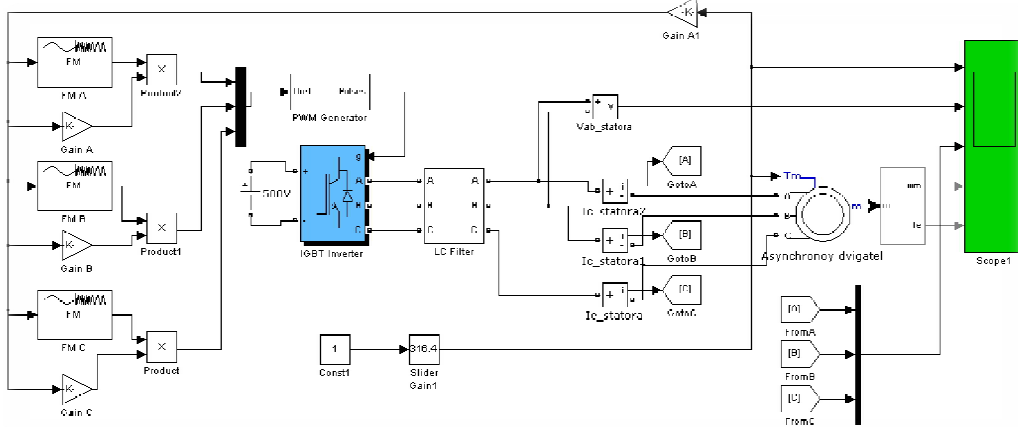


Рисунок 15 – Компьютерная модель системы автоматического регулирования приводным двигателем компрессорной установки

Результатом работы этой модели стали временные диаграммы зависимости момента на валу, тока статора и скорости вращения двигателя от давления в воздушной магистрали.

Для сравнительного анализа рассмотрен процесс пуска двигателей КУ с традиционной системой автоматического управления и системой частотного управления. Для этого проведен опыт двух систем (Рисунок 16), работающих на одинаковую нагрузку 300Нм.

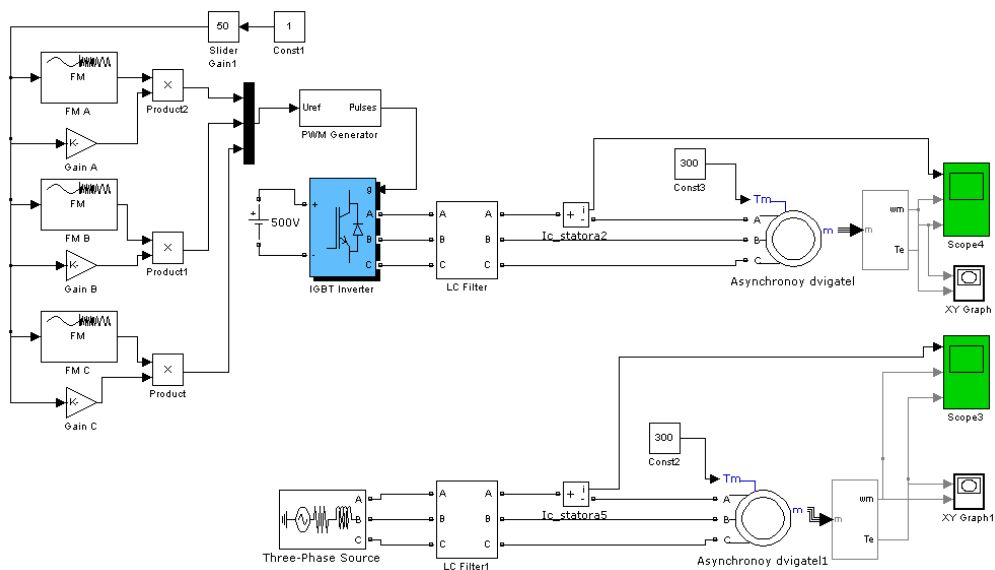


Рисунок 16 – Сравнительный опыт работы двух систем управления компрессорной установкой

Результаты сравнительного анализа представлены на рисунке 17.

Таким образом, разработанная модель системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки позволит:

- осуществлять плавный пуск и плавный останов приводов, тем самым устранять опасные последствия механических и электрических переходных процессов;
- подготавливать необходимый уровень давления в воздушной магистрали посредством задающего коэффициента производительности за минимальные интервалы времени;
- корректировать производительность КУ на протяжении длительности технологической работы на станции.

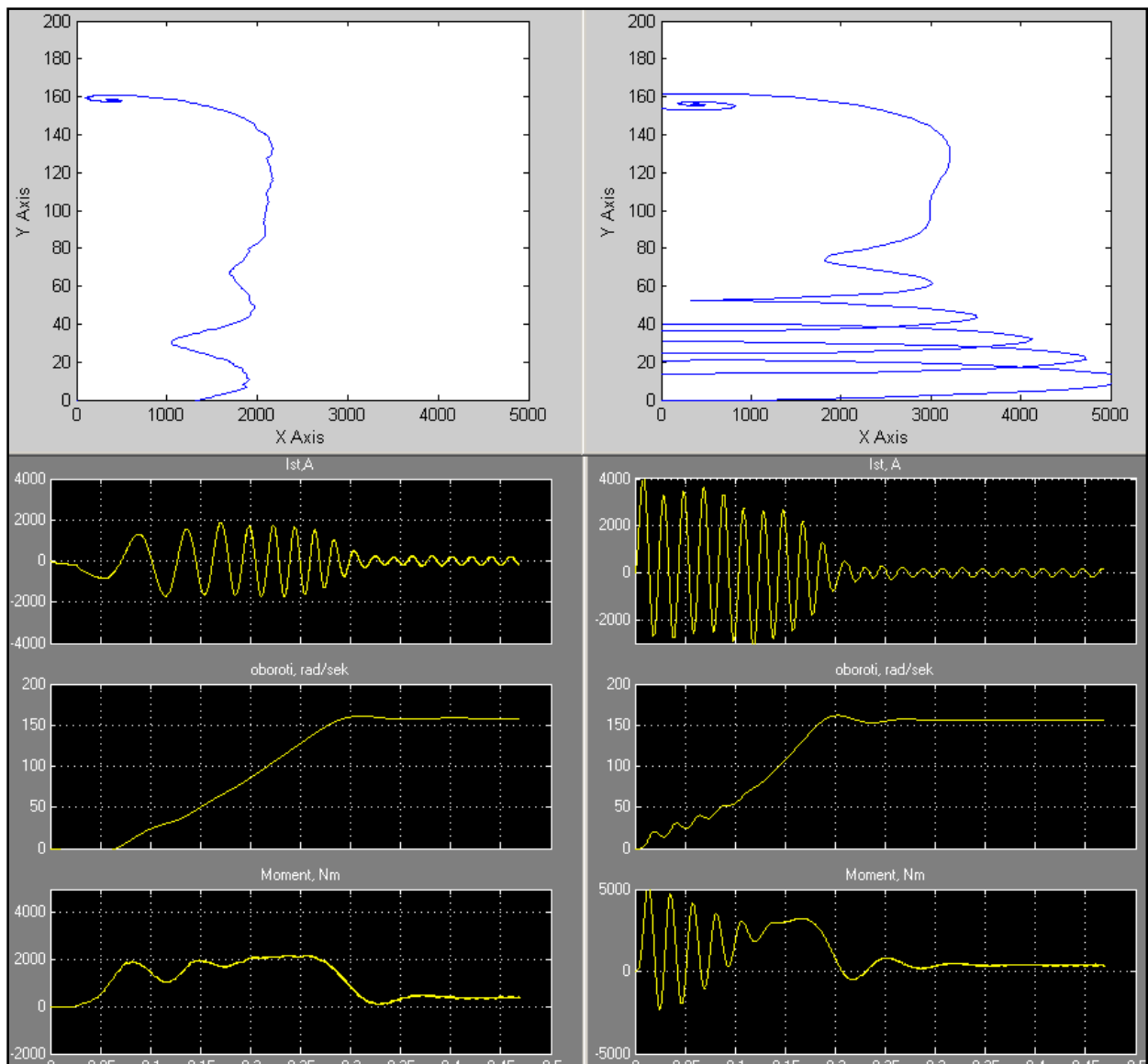


Рисунок 17 – Сравнительные диаграммы пуска систем частотного управления КУ и традиционной системы управления КУ

В четвертой главе «Разработка структуры технической реализации модернизированной системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки на сортировочной станции» была предложена структура технических средств системы и ее подключения к автоматизированной системе управления сортировочной станцией АСУ СС (Рисунок 18).

Разработана структура технических средств микропроцессорного контроллера управления одной компрессорной установкой (Рисунок 19). Ее принципиальная реализация и результаты испытания представлены в приложениях Б, В, Г, Д, Е, Ж, К.

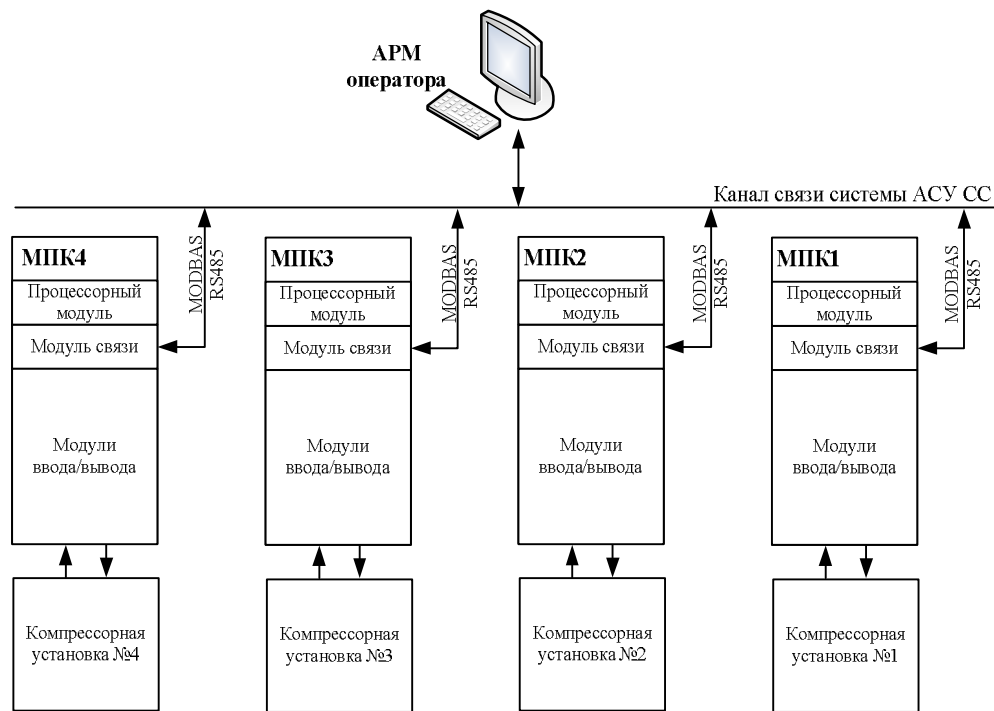


Рисунок 18 – Структура организации связи между МПК и АСУ СС

Аналитическим методом была установлена экономическая эффективность модернизированной и традиционной системы управления производительности КУ. Результатом расчетов получены математические выражения (13-14) и сравнительные графики (Рисунок 20), показывающие эффективность системы с частотно-регулируемым приводом по сравнению с методом дросселирования.

$$\frac{\Delta P_{op}}{P_{max}} = \left(1 - \frac{P_{min}}{P_{max}}\right) \frac{\Delta Q}{Q_{max}}, \quad (13)$$

$$\frac{\Delta P_{cp}}{P_{max}} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta Q}{Q_{max}}\right)^3. \quad (14)$$

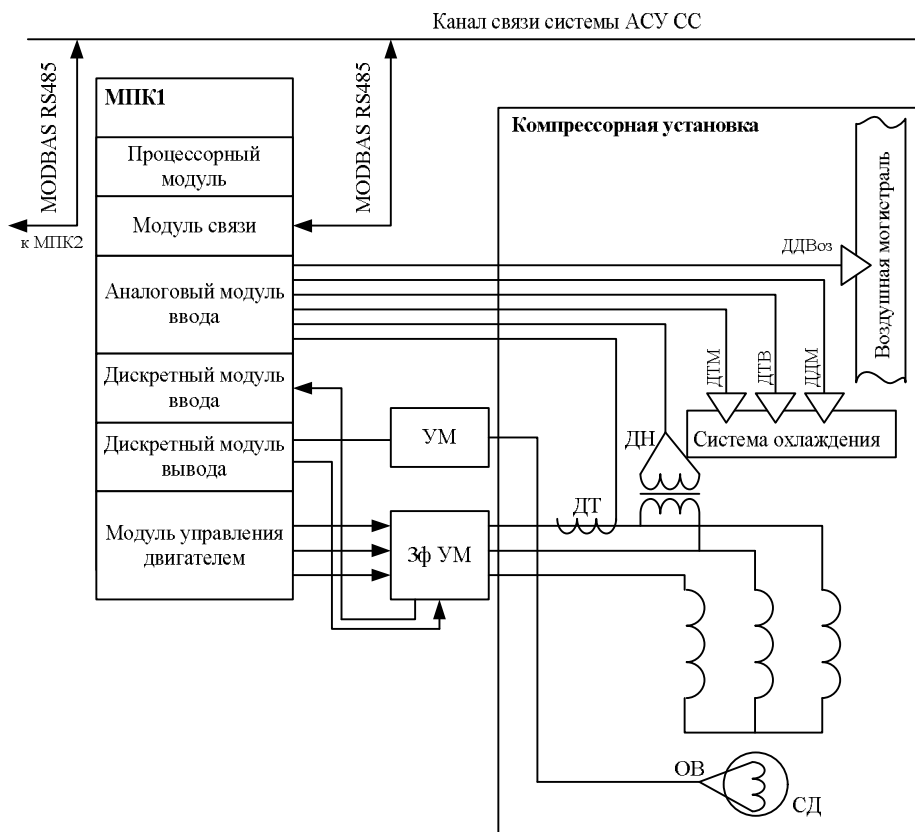


Рисунок 19 – Структурная схема подключения МПК к КУ

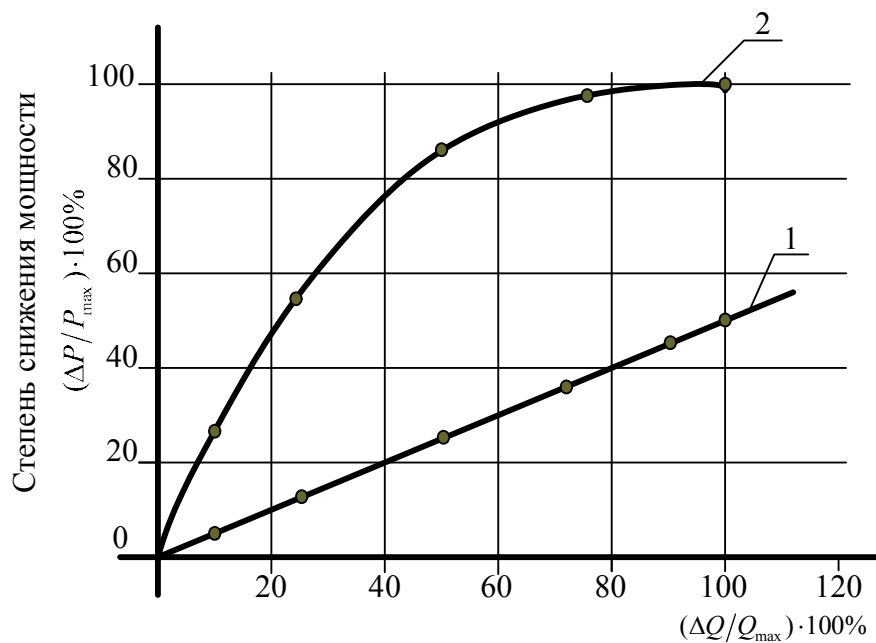


Рисунок 20 – Изменения потребляемой мощности компрессора при регулировании ее производительностью: 1 – методом дросселирования; 2 – частотным методом.

Доказано, что 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

$$\frac{\Delta P_{\text{чр}}}{P_{\text{max}}} - \frac{\Delta P_{\text{др}}}{P_{\text{max}}} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta Q}{Q_{\text{max}}}\right)^3 - \left(1 - \frac{P_{\text{min}}}{P_{\text{max}}}\right) \frac{\Delta Q}{Q_{\text{max}}}. \quad (15)$$

График сравнительной функции, построенный по уравнению (15) при принятом значении  $\Delta P_{\text{min}}/P_{\text{max}}$  равном 0,5, показан на рисунке 21.

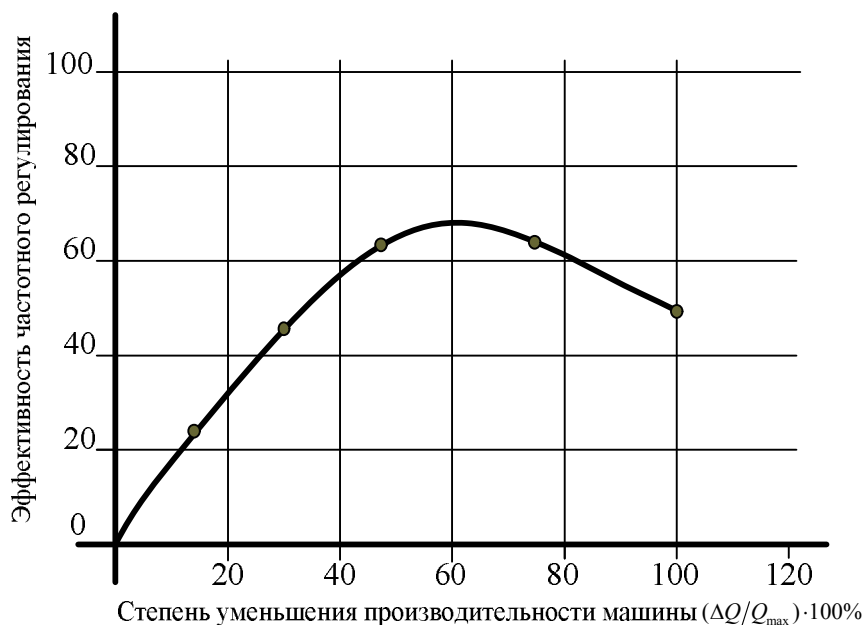


Рисунок 21 – Сравнительная эффективность частотного регулирования производительностью машины по сравнению с регулированием методом дросселирования

Из проведенного расчёта видно, что эффективность системы регулирования КУ с ЧРП во всем диапазоне выше, по сравнению с 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%.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и получено решение научно-практической задачи совершенствования системы регулирования производительности компрессорной установки на сортировочной станции, позволяющее понизить энергозатраты 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 корреляционную 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 ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССРЕТАЦИИ**

### **- в рецензируемых научных изданиях ВАК ДНР:**

1. **Сацюк, А.В.** Анализ влияния воздушных масс на затраты энергии сортировочной станции [Текст]/ А.В. Сацюк. Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта, Выпуск №40, Донецк: ДОНИЖТ, 2016г, С. 4-14.

2. **Сацюк, А.В.** Разработка модели оптимального управления двигателем компрессорной станции на сортировочной горке [Текст]/ А.В. Сацюк. Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта, Выпуск №44, Донецк: ДОНИЖТ, 2017г, С.9-23.

### **- в рецензируемых научных изданиях ВАК РФ:**

3. **Сацюк, А.В.** Экономическая эффективность частотно – регулируемого электропривода компрессорной установки на сортировочной станции [Текст]/ **А.В. Сацюк**, А.М. Гушин. Труды Ростовского государственного университета путей и сообщений. Научно технический журнал. Выпуск №3(32), Ростов-на – Дону, 2015г, С. 56-61.

4. **Сацюк, А. В.** Прогнозное динамическое моделирование энергетических затрат при расформировании подвижного состава на сортировочной горке [Текст]/ **А.В. Сацюк**, С.В. Бушуев, М.Н. Чепцов. Научно-технический журнал. Транспорт Урала Выпуск №4, Екатеринбург: УГУПС, 2015 г октябрь-декабрь, с.69-74

5. **Сацюк, А.В.** Разработка динамической имитационной модели системы регулирования производительностью компрессорной установки на сортировочной горке [Текст]/ **А.В. Сацюк**, Л.Ф.Риполь-Сарагоси, Т.Л. Риполь–Сарагоси, М.Н.Чепцов. Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. Выпуск №2 (70), Новочеркасск, 2015г., С.168-178.

6. **Сацюк, А.В.** Оптимизация энергозатрат компрессорной установки в условиях сортировочного процесса [Текст]/ **А.В. Сацюк**, С.П. Похилко, А.В.Петрушина, М.Н. Чепцов, Л.Ф. Риполь-Сарагоси, Т.Л.Риполь-Сарагоси. Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. Выпуск №4 (78), Новочеркасск, 2017г., С.28-37.

7. **Сацюк, А.В.** Метод расчета силовых каскадов при проектировании системы управления тяговыми электродвигателями [Текст]/ А.В. Сацюк. Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-

конструкторского института электровозостроения. Выпуск №1-2 (79), Новочеркасск, 2018г., С.126-135.

**- в рецензируемых научных изданиях ВАК Украины:**

8. **Сацюк, А.В.** Прогнозне динамічне моделювання енергетичних витрат при розформуванні рухомого складу на сортувальній гірці [Текст] / **А.В. Сацюк.** Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Выпуск №31. Донецьк: ДОНИЖТ, 2012. С.42-47.

9. **Сацюк, А.В.** Экономическая эффективность частотно-регулируемого электропривода машины по перекачки газожидкостных смесей [Текст] / **А.В. Сацюк, А.М. Гуцин, В.И. Дорошко.** Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Выпуск №32. Донецьк: ДОНИЖТ, 2012. С.195-200.

10. **Сацюк, А.В.** Аналіз залежностей електроспоживання компресорної установки від кількості оброблених вагонів на сортувальній гірці [Текст] / **А.В. Сацюк, М.М. Чепцов, В.Й. Поддубняк.** Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Выпуск №29. Донецьк: ДОНИЖТ, 2012. С.85-89.

11. **Сацюк, А.В.** Моделювання динамічних характеристик компресорної установки на сортувальній гірці [Текст] / **А.В. Сацюк, М.М. Чепцов, В.Й. Поддубняк.** Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Выпуск №30. Донецьк: ДОНИЖТ, 2012. С.51-58.

12. **Сацюк, А.В.** Аналіз роботи привідного двигуна компресорної установки на сортувальній гірці при частотному управлінні [Текст] / **А.В. Сацюк.** Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Выпуск №35. Донецьк: ДОНИЖТ, 2013. С.37-47.

13. Система регулювання роботою поршневого компресора. Патент на корисну модель № 79317. Заявка № u 2012 08067 від 02.07.2012. **В.Й. Поддубняк, М.М. Чепцов, В.І. Дорошко, Ю.В. Кривошея, А.М. Гуцин, А.В. Сацюк.**

**- в других изданиях**

14. **Сацюк, А.В.** Автоматизация управления двигателем компрессорной установки на сортировочной станции [Текст] / **А.В. Сацюк, М.Н. Чепцов.** Безопасность и электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте, Тезисы V Международной научно-практической конференции. Днепропетровск, ДУЖТ, 2012., с. 65

15. **Сацюк, А.В.** Моделювання динамічних характеристик компресорної установки на сортувальній гірці. [Текст] / **А.В. Сацюк, М.Н. Чепцов.** Международная научно-техническая конференция: «Перспективные компьютерные управляющие телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины», г. Алушта, 2012. с.101.

16. **Сацюк, А.В.** Прогнозна модель енергетичних витрат компресорної установки в залежності від технологічного процесу на сортувальній гірці [Текст] /

А.В. Сацюк. Тези конференції. Международная научно-техническая конференция: Основні проблеми та сучасні методи вирішення задач енерго- і ресурсозбереження при експлуатації машин та устаткування. Донецьк, 2012..с.59.

17. **Сацюк, А.В.** Обоснование необходимости регулирования частоты вращения электродвигателей переменного тока [Текст]/ **А.В. Сацюк, В.И. Дорошко.** Тези конференції. 4-ої міжвузівської науково-технічної конференції викладачів, молодих вчених та студентів. Основні проблеми та сучасні методивирішення задач енерго- і ресурсозбереження при експлуатації машин та устаткування. Донецьк, 2012. С. 132.

18. **Сацюк, А.В.** Оптимизация энергозатрат компрессорных установок, применяемых в сортировочном процессе железнодорожной станции [Текст]/ **А.В. Сацюк, С.П. Похилко, А.В.Петрушина.** Материалы Второй международной научно-практической конференции «Научно- технические аспекты комплексного развития транспортной отрасли». 25-26 мая, 2016г, Донецк, ДААТ, с70-74.

19. **Сацюк, А.В.** Метод расчета силовых каскадов при проектировании систем управления тяговыми электродвигателями [Текст]/ А.В. Сацюк. Третья Международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта», Донецк, 25 мая, 2017.

20. **Сацюк, А.В.** Анализ вибрационных характеристик поршневых компрессоров на сортировочной станции. V Международная Научно-практической конференции «Научная технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта», 21-23 мая, 2019г., Донецк, ДОНИЖТ.

**Личный вклад соискателя в публикациях:** [1,8,15] – разработана прогнозно-динамическая модель затрат электроэнергии на сортировочной станции; [2,5,6,13] – анализ работы частотно регулируемого привода компрессорных установок; [3] – разработка регрессионной модели зависимости затрат электроэнергии от количества распушенных вагонов; [4,8,14] разработка структурной схемы динамической системы управления компрессорной установкой, построения передаточных функций звеньев; [9] – разработка моделей влияния воздушных масс на энергетические затраты компрессорной установки; [6] разработана модель управления двигателем, построена имитационная модель регулирования скоростью вращения двигателя; [11,17] – анализ работы компрессорной установки в условиях роспуска состава, разработана функциональная модель системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки; [12,18] – анализ существующих методов расчетов силовых каскадов; [19] – разработана структурная модель системы автоматического регулирования производительности компрессорной установки, разработан принцип работы системы.