

Министерство образования и науки Украины
Государственное высшее учебное заведение
«Национальный горный университет»

На правах рукописи

ПРОКУДА Владимир Николаевич

УДК 621.316:622.647.2

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГИСТРАЛЬНОГО
КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА УГОЛЬНЫХ ШАХТ С УЧЕТОМ
ДИНАМИКИ ГРУЗОПОТОКОВ**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Разумный Ю.Т.

Днепропетровск – 2015

Содержание

Введение.....	3
1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	9
1.1 Характеристика систем конвейерного транспорта.....	9
1.2 Анализ состояния вопроса	12
1.3 Выводы.....	26
1.4 Постановка задач исследования	27
2 ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНВЕЙЕРНЫХ УСТАНОВОК БЕЗ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕНТЫ.....	28
2.1 Обоснование критерия энергоэффективности работы конвейерного транспорта.....	28
2.2 Анализ методов определения электропотребления магистральных конвейерных установок	37
2.3 Определение минутных значений грузопотока из очистного забоя	41
2.4 Закономерности распределения вероятных значений электропотребления.....	50
2.5 Выводы.....	60
3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ КОНВЕЙЕРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕНТЫ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	62
3.1 Влияние регулируемого привода на статистические характеристики грузопотоков в узлах транспортной сети	62
3.2 Повышение энергоэффективности транспортирования груза магистральным конвейерным транспортом при использовании регулируемого привода	74

3.3 Определение мест установки преобразователей частоты в шахтной транспортной сети.....	88
3.4 Выводы.....	95
4 РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЙ	97
4.1 Алгоритмы определения энергоэффективности.....	97
4.2 Программная реализация моделей определения энергоэффективности	106
4.3 Экономическая оценка дополнительного снижения электропотребления при регулировании скорости движения конвейерных лент	119
4.4 Выводы.....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
Литературные источники.....	130
Приложение А. Акт о промышленном внедрении результатов диссертационной работы.....	141
Приложение Б. Акт о промышленном внедрении результатов диссертационной работы.....	143
Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс.....	145
Приложение Г. Расчетные значения удельного электропотребления конвейеров в линии при различных параметрах грузопотока	147
Приложение Д. Расчетные значения удельного электропотребления конвейеров при различных параметрах их установки	149
Приложение Е. Экспериментальные данные	153
Приложение Ж. Программа расчета вероятностей уровней грузопотоков в узлах схемы конвейерного транспорта.....	159

ВВЕДЕНИЕ

Состояние и актуальность проблемы. Начиная с середины 70-х годов 20-го столетия на угольных шахтах основным видом транспорта является конвейерный, который вследствие особенностей технологического процесса добычи полезного ископаемого загружается неравномерно. При этом, вследствие сложности пуска с углем и высокой степени готовности к принятию груза конвейерный транспорт не должен останавливаться. Наблюдениями установлено, что конвейерный транспорт за период рабочей смены загружается не полностью, а иногда работает без нагрузки т. е. в режиме холостого хода. Такое положение обуславливает значительные непроизводительные расходы электроэнергии, которые превышают нормативный в три раза[13].

Для решения проблемы снижения расхода электроэнергии в последние несколько лет на угольных шахтах Украины применяют частотные преобразователи для регулирования скорости движения лент магистрального конвейерного транспорта, что обеспечивает более полное их заполнение в условиях переменного грузопотока и снижение удельных затрат электроэнергии на транспортирование угля. Скорость движения ленты системой регулирования устанавливается пропорциональной грузопотоку, однако в периоды отсутствия угля конвейер движется с минимальной скоростью без остановки, что обусловлено сложностями пуска с грузом и требованиями к постоянной готовности к принятию груза.

Вопросами повышения энергоэффективности системы внутришахтного магистрального конвейерного транспорта занимались такие известные ученые как проф. Заика В.Т., который предложил модели определения энергоэффективности при нерегулируемой скорости движения конвейерной ленты, проф. Ткачев В.В. занимался автоматизацией нерегулируемых конвейерных линий, проф. Разумный Ю.Т. работал над применением шахтных аккумуляторных бункеров, проф. Шахмейстер Л.Г. и Кариман С.А. установили законы поступления угольной массы из очистного забоя, проф. Стадник Н.И. изучал вопросы использования самовентилируемых двигателей, проф. Монастырский В.Ф., который определил электропотребление

одиначного конвейера с изменением скорости движения ленты пропорционально грузопотоку.

По обобщенным данным общий потенциал снижения расхода электроэнергии на конвейерном транспорте составляет 40-50 %. Расчеты показывают, что внедрение преобразователей частоты и систем регулирования скорости движения ленты позволяют снизить расход на 28-35 % [13]. Изменившиеся условия режимов работы конвейерного транспорта позволяют установить, что регулирование скорости движения ленты отдельного конвейера изменяет статистические характеристики грузопотока после него, что приводит к изменению скорости транспортирования последующих конвейеров и влияет на их электропотребление.

Влияние различного характера зависимости электропотребления от загрузки конвейера, а также расход электроэнергии при использовании асинхронного регулируемого привода не исследованы. Также не исследовались методы определения грузопотоков из очистных забоев без использования дополнительных технических средств, таких как конвейерные весы и ультразвуковые датчики.

Исследование указанных задач и их реализация позволяют дополнительно снизить расход электроэнергии на конвейерном транспорте до 8-10 %.

Таким образом, научная задача диссертационной работы состоит в установлении закономерностей влияния адаптированной к динамике грузопотоков скорости движения лент всего комплекса разветвленной конвейерной системы с учетом технологических условий (узлов перегрузки, длины конвейеров и углов их установки) на расход электроэнергии магистрального конвейерного транспорта, что создает условия дополнительного повышения энергоэффективности.

Связь с научными программами, темами Исследование по теме диссертации выполнено в соответствии с планами научно исследовательских работ Государственного ВУЗ "Национальный горный университет": «Розробка ресурсо- і енергозберігаючих технологій та устаткування підприємств гірничо-металургійного і паливно-енергетичного комплексу України» (Госрегистрационный номер №0112U000873); "Обоснование способа

энергоэффективного управления грузопотоками на магистральном конвейерном транспорте ПСП «шахта «Павлоградская» ОАО "Павлоградуголь" (№0301107).

Цель работы. Снижение удельного расхода электроэнергии магистральным конвейерным транспортом угольных шахт с учетом динамики грузопотоков.

Для достижения цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Установить закономерности поступления грузопотоков из добычного забоя за период его автокорреляции в зависимости от электропотребления очистного комплекса.

2. Установить закономерности изменения расхода электроэнергии магистрального конвейерного транспорта при нелинейной зависимости электропотребления от массы угля на конвейере.

3. Разработать математическую модель изменения угольного потока с учетом регулирования скорости движения ленты конвейера.

4. Исследовать режимы работы магистрального конвейерного транспорта угольной шахты при регулируемой скорости движения ленты конвейеров и определить такое сочетание параметров, при которых обеспечивается минимальный удельный расход электроэнергии.

Объект исследования: технологические процессы работы магистрального конвейерного транспорта угольных шахт.

Предмет исследования: динамика изменения режимов электропотребления с учетом применения регулируемого привода магистрального конвейерного транспорта.

Методы исследования. Для решения научной задачи использованы: элементы теории вероятности и математической статистики – при описании процессов работы очистного забоя, экспоненциальная аппроксимация – при определении характера зависимости величин, математическое моделирование – при описании моделей электропотребления конвейеров, элементы нелинейной алгебры – при моделировании стационарных процессов, регрессионный анализ – при определении скорости подачи очистного комбайна, симплекс-метод – при определении мест установки средств повышения энергоэффективности.

Идея работы: применение регулируемого привода шахтных конвейеров для выравнивания грузопотоков и снижения расхода электроэнергии.

Основные научные положения и результаты исследований, их новизна:

Научные положения:

- Удельное потребление электрической энергии конвейерной линии, состоящей из нескольких последовательных конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты, является убывающей экспоненциальной функцией по направлению движения грузопотока.
- Удельный расход электроэнергии бремсбергового конвейера без регулируемого привода с углом установки более -6° снижается прямо пропорционально увеличению времени поступления грузопотока, при условии поступления угольного потока из конвейера с регулируемой скоростью движения ленты.

Научные результаты:

- разработана математическая модель определения вероятностных характеристик угольных потоков в узлах транспортной схемы, которая, в отличие от существующих, позволяет оценивать энергоэффективность системы шахтного транспорта для конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты;

- предложена математическая модель установления зависимости минутных значений грузопотока из очистного комплекса от электропотребления всего комплекса, позволяющая определять электропотребление конвейеров при его нелинейной зависимости от загрузки;

- предложена математическая модель, описывающая распределение грузопотока после конвейера с регулируемой скоростью движения ленты, позволяющая определять расход электроэнергии системы шахтного транспорта;

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, предложенных в работе, подтверждается: корректностью допущений и начальных условий, принятых в математических моделях, их соответствием заданиям моделирования и условиям фактических режимов

работы магистрального конвейерного транспорта, экспериментальными исследованиями грузопотоков и электропотребления магистрального конвейерного транспорта угольной шахты; результатами сопоставления теоретических и экспериментальных исследований; положительным опытом внедрения результатов работы.

Практическое значение:

1. Разработан и запатентован способ определения поступления минутных значений угольной массы из очистного забоя в режиме реального времени по косвенным показателям, который является базовой составляющей для определения энергоэффективности конвейерного транспорта угольных шахт.

2. Определена последовательность выбора мест установки преобразователей частоты для повышения энергоэффективности при ограниченных ресурсах на модернизацию системы транспорта. Предложенные принципы размещения средств повышения энергоэффективности в системе магистрального конвейерного транспорта позволяют снизить расход электроэнергии сборного бремсбергового конвейера без регулируемого привода с углом установки более -6° до 20 %.

3. Предложено использование регулирования скорости движения конвейерной ленты пропорционально грузопотоку на всех последовательно установленных конвейерах, что дает дополнительный эффект снижения расхода электроэнергии до 5 %.

Результаты работы внедрены на шахте "Павлоградская" ПАО ДТЭК "Павлоградуголь", в Научно-проектный центр ДТЭК (НПЦ ДТЭК), в учебный процесс ГВУЗ "Национальный горный университет"

Личный вклад соискателя состоит в формировании цели и основных задач исследования, обработке и анализе информации относительно динамики грузопотоков, разработке алгоритма определения минутных значений грузопотоков по данным электропотребления очистных комплексов, разработке математической модели определения характеристик грузопотоков после конвейера с регулированием скорости движения ленты и в узлах транспортной

системы, разработке алгоритма определения мест установки преобразователей частоты к существующим конвейерам.

Апробация результатов диссертации: Основной материал и результаты, полученные в диссертационной работе, докладывалась и были одобрены на 5 научно-технических конференциях: Первая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Научная весна" 2010, (г. Днепропетровск 2010 г), Международная конференция "Форум горняков – 2011" (г. Днепропетровск 2011 г.); Четвертая научно – техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых НГУ "Научная весна - 2013" (г. Днепропетровск); Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "КРЕС-2013" (г. Донецк – 2013 г.), Первая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодежь: наука и инновации" 2010, (г. Днепропетровск 2010 г)

Публикации. Основные положения и результаты работы опубликованы в 9 печатных работах, из них 6 – статьи в профессиональных изданиях (из них одно в издании, которое включено в международную наукометрическую базу Scopus), 3 – материалы научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, списка литературных источников из 83 наименований, на 10 страницах, приложений на 18 страницах. Полный объем диссертации – 160 страниц, из которых основной текст – 140 страниц, рисунков – 33 (из них 7 на 7 полных листах), таблиц 18 (из них 1 на полном листе).

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Характеристика систем конвейерного транспорта

Подземный транспорт угольной шахты относится к разветвленной системе, предназначенной для выполнения различных транспортных технологических задач, а именно для транспортирования угля от очистных забоев до околотвального двора или поверхности (при наличии наклонного ствола) шахты. Также для транспортирования угля, породы или горной массы от подготовительных забоев до околотвального двора или поверхности шахты или до места их перегрузки на средства транспорта для угля из очистных забоев с целью дальнейшего совместного транспортирования, а также материалов и оборудования до очистных и подготовительных забоев.

До начала 50-х годов рельсовый локомотивный транспорт выполнял практически весь объем перевозок на внутришахтном транспорте. Однако этому виду транспорта свойственны существенные недостатки: дискретность (прерывистость) действия, невозможность с помощью локомотива преодоления наклонных межгоризонтных выработок, сложность автоматизации (и, как следствие, сложность обеспечения ритмичной работы), высокая трудоемкость, необходимость прокладки рельс, проходки дополнительных выработок для депо, места для зарядных камер, погрузочных кранов [1].

В литературе [2] приводятся результаты исследований потребления электроэнергии бесконтактным электровозом с индукционной передачей энергии. Снижение годового расхода электроэнергии электровозом достигало 45 % по сравнению с аккумуляторным. Однако область его применения главным образом на шахтах с круто падающими пластами при отработке их этажным способом.

По мере совершенствования техники и концентрации очистных работ процесс угледобычи становился все более интенсивным и непрерывным. Отрицательное влияние перечисленных недостатков дискретного транспорта стало все более ощутимым. Преодоление этого недостатка стало возможным

при выделении транспортирования угля в отдельную специфическую систему, оснащенную непрерывным видом транспорта — конвейерным. Более 70% объемов транспортирования полезного ископаемого в шахтах с пологим залеганием пластов приходится на конвейерный транспорт.

Конвейерный транспорт представляет собой технологическую цепь последовательных звеньев участкового и магистрального транспорта, объединенных единым грузопотоком. В узлах между звеньями происходит пересып груза с конвейера на конвейер. В некоторых узлах происходит суммирование динамически изменяющихся грузопотоков из нескольких очистных забоев – в этом случае конвейер, следующий по направлению грузопотоков, называется сборным.

Магистральных ленточных конвейеров в шахте, как правило, насчитывается от десяти до тридцати. Структура их расположения может быть самой разнообразной и обуславливается технологическим процессом добычи угля. При одном вертикальном шахтном стволе, структура расположения конвейеров представляет собой древовидный граф, корень которого находится у главного ствола. Конвейеры бывают уклонными, транспортирующими груз вверх и бремсберговыми, транспортирующими груз вниз.

На рисунке 1.1 представлена схема подземного конвейерного транспорта шахты "Павлоградская" ПАО «ДТЭК Павлоградуголь», со следующими обозначениями: 1 – магистральные конвейеры, 2 – узел транспортной схемы, в котором пересыпается поток угля из одного очистного забоя, 3 - узел транспортной схемы, в котором сходятся угольные потоки из нескольких очистных забоев.

Достоинства конвейерного транспорта: поточность перемещения горной массы; высокая производительность конвейерного транспорта (на угольных шахтах 250-1200 т/ч при ширине ленты 800-1200 мм); возможность повышения на 25-30% и больше производительности очистных комплексов; большая длина транспортирования (до 3-15 км одним ставом конвейера и 20-100 км конвейерной линией); возможность перемещения горной массы под углом до $\pm 18^\circ$. Кроме того, конвейерный транспорт характеризуется положительными условиями для автоматизации и централизованного управления, удобством сопряжения с очистными забоями, высокой надежностью, повышением безопасности и улучшением условий труда [1].

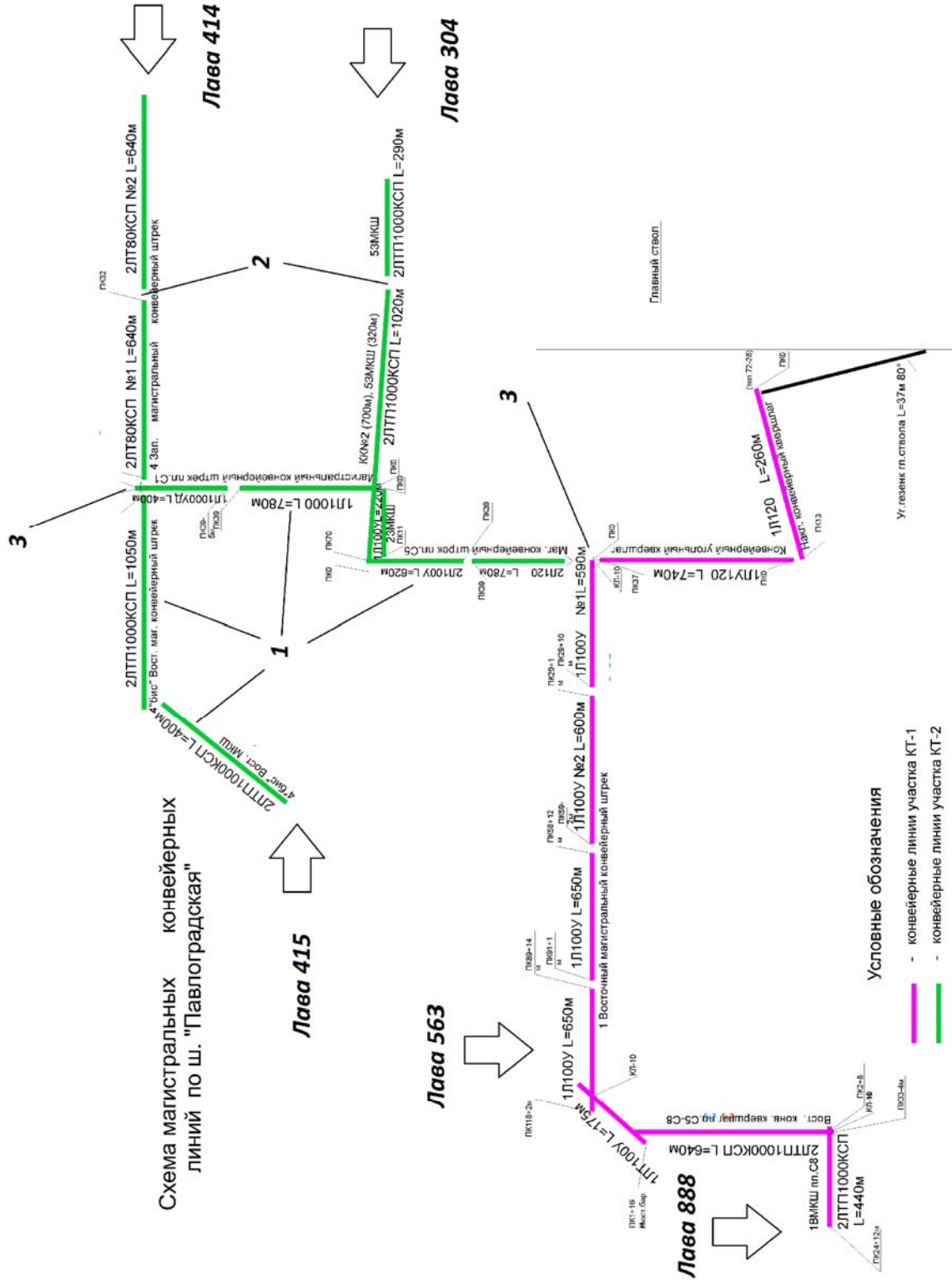


Рисунок 1.1 Схема магистральных конвейерных линий шахты Павлоградская. 1 – магистральные конвейеры, 2, 3 – узлы транспортной схемы, в которых пересыпается поток угля из одного или нескольких очистных забоев, соответственно

С 50-х годов прошлого столетия, первоочередной задачей угольной промышленности нескольких пятилеток, стояла полная конвейеризация угольных шахт. Целесообразность этого решения подтверждалась многими исследованиями [3,4,5,6]. Однако конвейерный транспорт, несмотря на все его преимущества, оказался в последствии проблемным в части расхода электроэнергии. Увеличилась длина лав (достигает 300 м), мощность добычного оборудования, увеличились расстояния транспортирования до нескольких километров, как следствие возросло удельное электропотребление магистрального конвейерного транспорта; появились новые средства повышения энергоэффективности, которые устанавливают новый уровень минимума расхода электроэнергии технологическими звеньями угольных предприятий [7,8,9,10,11].

1.2 Анализ состояния вопроса

По данным исследований [12] мощными звеньями технологического комплекса угольной шахты, на которых выявлены резервы снижения электропотребления, выступает не только подземный транспорт, но и машины и механизмы очистных работ, подъемные установки, вентиляторы главного проветривания, и водоотливные установки. Каждый из названных объектов имеет определенные резервы повышения энергоэффективности при изменении режимов их работы. Однако по данным работы [12] для шахт Западного Донбасса с пологими пластами, которые относятся к «ПАО ДТЕК Павлоградуголь», потребление электроэнергии подземным магистральным конвейерным транспортом угольной шахты составляет около 15 % от общешахтного, а резервы снижения электропотребления достигают 57 %. Другие энергоемкие объекты имеют долю в общешахтном электропотреблении 15-25 % каждый, однако их резервы энергоэффективности значительно меньше и составляют 10-25%, т. е. конвейерный транспорт обладает самыми большими резервами (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 Расход электроэнергии технологическими звеньями угольной шахты [12]

Энергоемкие технологические звенья и установки на подземных горных работах	Расход ЭЭ на процесс, в % к общешахтному	Резерв электро-сбережения, в % от фактического расхода ЭЭ на процесс	Снижение непроизводительного расхода ЭЭ на 50...70%, в % к общешахтному
Добычные и проходческие участки	10,9	13...19 (в среднем – 15)	0,82...1,14
Магистральный конвейерный транспорт	15,4	12...57 (в среднем – 34)	2,62...3,67
Водоотливной комплекс в зависимости от Н.О	21,0	2,5...8 (в среднем – 3)	0,32...0,44
Итого	46,3	–	3,76...5,25

Резервы снижения электропотребления на магистральном конвейерном транспорте существуют по причине определенных особенностей его функционирования как звена в совокупном технологическом процессе добычи и перемещении полезного ископаемого. Потенциал увеличения энергоэффективности связан с неравномерностью поступления угля из очистного забоя и существует на всех конвейерах транспортной сети. До 60 % времени конвейеры работают незагруженными, а при поступлении грузопотока их загрузка составляет 30-70 % [13]. В тоже время значительный объем электроэнергии расходуется на перемещение движущихся частей самого конвейера. Эти исследования также подтверждаются в фундаментальных работах проф. Кузнецова Б.А. (Днепропетровский горный институт (ДГИ)) [14,15], проф. Шахмейстера Л.Г. (Московский горный университет (МГУ)) [16,17,18], проф. Каримана С.А. (Институт горной динамики (ИГД) им. Скочинского) [19]. Технологическую подоснову для исследования этой проблемы и соприкасающихся с ней положили исследователи проф. Спиваковский А.О., проф. Гончаревич И.Ф., проф. Дмитриев В.Г. (МГУ), проф. Монастырский В.Ф., проф. Кирия Р.В. (Институт геотехнической механики

(ИГТМ) НАН Украины), проф. Биличенко Н.Я. (Национальная горная академия Украины (НГАУ)), Лейтес З.М., Сысоева В.А., Гудалов В.П. (ИГД им. Скочинского) и др.

В подавляющем большинстве случаев производительность ленточных конвейеров не соответствует суммарной производительности очистных комплексов и является завышенной, что связано с изменением топологии системы шахтного конвейерного транспорта. Загрузка конвейера при этом становится несущественной, что снижает коэффициент использования конвейеров по производительности [20]. Известно [17, 21], что для достижения минимального удельного расхода электроэнергии необходимо, чтобы транспортирующая установка была загружена близко к номинальной производительности, что фактически не выполняется.

Анализ литературных источников [22-39] указывает лишь на две группы средств, которые могут обеспечить снижение электропотребления до 50 % (если не брать во внимание замену физически изношенных деталей конвейеров) на шахтном магистральном конвейерном транспорте: установка дополнительных подвижных или стационарных бункеров и изменение скорости движения конвейерной ленты пропорционально входному грузопотоку. Другие способы снижения электропотребления конвейерных установок, такие как повышение КПД электропривода, замена муфт на более современные, улучшение пусковых режимов путем внедрения устройств плавного пуска, использование новых типов ленты и др., увеличивают срок службы движущихся частей конвейера, однако снижают потребление электроэнергии всего лишь на 1-5 % [16].

Строительство нового дополнительного стационарного горного бункера, который не предусмотрен проектом при отработке пласта, является весьма трудоемким и затратным мероприятием, что предусматривает расширение штрека, проходку дополнительных выработок, переноса и дополнительный монтаж конвейеров. Установка подвижного бункера предусматривает расширение штрека, применение нового оборудования, смещение существующих конвейеров. В этом случае для извлечения резервов снижения

электропотребления от таких изменений необходимо предусмотреть систему автоматизации, которая будет отслеживать загрузку бункера и передавать соответствующую команду на включение/отключение конвейера, установленного в бункере, что вызовет увеличение количества пусков магистрального конвейера и необходимость установки устройства плавного пуска. При этом скорость движения ленты конвейера в процессе эксплуатации не изменяется. Эти решения так же требуют дополнительных капиталовложений и квалифицированного обслуживания соответствующих систем. Проблеме использования бункеров для повышения энергоэффективности транспортировки горной массы посвящены работы [12,27,28]. В них приведены методики расчета усредняющих, аккумулирующих емкостей, автоматизация и автоматическое управление питателями бункеров. Исследованы законы распределения горной массы после выхода из бункера и при слиянии потоков из нескольких конвейеров и очистных забоев.

Другим средством повышения энергоэффективности магистрального ленточного конвейерного транспорта является изменение скорости движения конвейерной ленты, которое возможно реализовать несколькими способами. Первый – дискретное изменение скорости при помощи установки коробки передач к приводу двигателя. При этом необходимо добавлять элементы плавного разгона до текущей установленной скорости для увеличения срока службы движущихся частей конвейера. Этот способ снижает электропотребление на 20-40 % и сопровождается сложностью автоматизации [16]. Второй – плавное изменение скорости движения конвейерной ленты (Рисунок 2.1), которое можно реализовать при помощи установки преобразователя частоты питающего напряжения к асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором или замена его асинхронным двигателем с фазным ротором и установкой вентильного каскада. Двигатели с фазным ротором на угольном предприятии не находят применения исходя из объективных причин – необходимость частого планового обслуживания и замена щеток, что требует резервов времени и снижает надежность работы установки. Поэтому в угольной шахте широко используются двигатели с короткозамкнутым ротором и применение асинхронного регулируемого привода является весьма

рациональным вариантом для повышения энергоэффективности. Использование асинхронного регулируемого привода позволяет не использовать бункера и устройства плавного пуска.

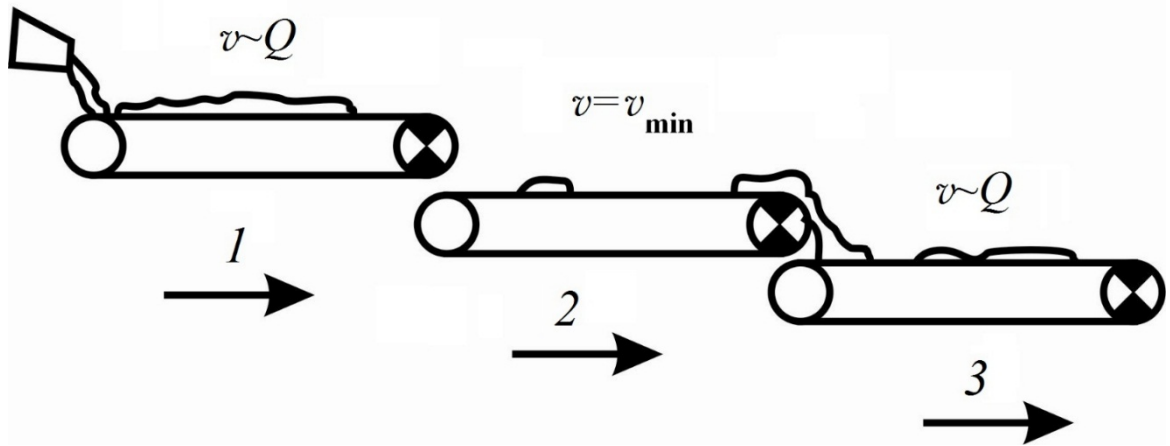


Рисунок 1.2 Процесс регулирования скорости движения ленты конвейеров транспортной цепи пропорционально входному грузопотоку;

1, 2, 3 – последовательно установленные магистральные конвейеры конвейера;

v , v_{\min} – текущая и минимальной скорость конвейера, м/с; Q – грузопоток, т/ч.

При плавном изменении скорости движения конвейерной ленты пропорционально входящему грузопотоку даже завышенная производительность конвейерной установки не отражается на удельном расходе электроэнергии. Объясняется это тем, что соотношение энергии, расходуемой на транспортирование груза к энергии, расходуемой на перемещение движущихся частей конвейера остается постоянными. При отсутствии регулирования скорости движения ленты активная энергия, которая расходуется на перемещение конвейера с грузом определяется согласно выражению (1.1), кВт·ч:

$$W = W_{xx} + W_{конв} = \frac{F_{xx} \cdot v \cdot t}{\eta} + \frac{F_{конв} \cdot v \cdot t}{\eta} = \frac{(F_{xx} + q_{насп} \cdot l \cdot g \cdot \omega \cdot K_3) \cdot v \cdot t}{\eta} \quad (1.1)$$

где ω - коэффициент сопротивления продольному движению ленты конвейера; W_{zp} - электроэнергия, необходимая для транспортирования груза на ленте, кВт·ч, W_{xx} - электроэнергия, необходимая для перемещения движущихся частей самого конвейера, кВт·ч; F_{zp} - сила, необходимая для транспортирования груза на ленте, Н, F_{xx} - сила, необходимая для перемещения частей самого конвейера; L - длина конвейера, м; g - ускорение свободного падения, м/с²; η - КПД электропривода; $q_{наcn}$ - паспортная приемная способность конвейера кг/м; K_3 - коэффициент заполнения, учитывающий фактическую загрузку конвейера. При регулировании скорости движения ленты пропорционально грузопотоку расход электроэнергии определяется выражением (1.2):

$$W = W_{xx} + W_{конв} = \frac{F_{xx} \cdot (v \cdot K_3) \cdot t}{\eta} + \frac{F_{конв} \cdot (v \cdot K_3) \cdot t}{\eta} = \frac{(F_{xx} + q_{наcn} \cdot l \cdot g \cdot \omega) \cdot v \cdot t \cdot K_3}{\eta} \quad (1.2)$$

В выражении (1.1) коэффициент K_3 отражает уменьшение слагаемого расхода электроэнергии на перемещения движущихся частей конвейера, а в выражении (1.2) уменьшение полного расхода электроэнергии, что обосновывает целесообразность регулирования скорости движения конвейерной ленты пропорционально грузопотоку [16].

Анализ ресурсосбережения при внедрении частотного регулируемого привода [16] показывает возможность увеличения срока служба роликкоопор до 3,5 раз, ленты по критерию износа обкладок – до 4,5 раз.

Техническими средствами, позволяющими регулировать скорость движения конвейерной ленты, являются преобразователи частоты со звеном постоянного тока. Выпускаются УКРНИИВЭ [40], а также БАРТЕК [41]

Преобразователи частоты взрывозащищенные ПЧВ-К У5 предназначены для регулирования скорости и защиты асинхронных короткозамкнутых двигателей приводов горных машин суммарной мощностью до 500 кВт.

Преобразователи предназначены для работы в комплекте с аппаратурой управления ленточными конвейерами в угольных шахтах, в том числе опасных по газу (метану) и пыли и обеспечивают:

- плавный запуск и регулирование частоты вращения приводного двигателя;
- автоматическое поддержание заданной производительности конвейера путем снижения скорости движения ленты с целью экономии электроэнергии.

Преобразователи частоты взрывозащищенные DYNAVERT VSD-1140V служит для непрерывного регулирования скорости трехфазных электродвигателей в горной угольной промышленности при подземной добыче угля. Рассчитаны на номинальную мощность подключаемых электродвигателей 250 – 500 кВт. Преобразователь применяется преимущественно для индивидуального привода с электрическим торможением и изменением направления вращения. Преобразователь рассчитан на работу в сети с напряжением 1140 В. Преобразователи упомянутых производителей по паспортным данным обеспечивают КПД 98 % и изменение частоты питающего напряжения двигателя в пределах от 10 % до 100 %. Они находят применение на шахтах Украины и Германии.

Таким образом, суть решения для повышения энергоэффективности состоит во внедрении средств регулирования скорости движения конвейерной ленты – преобразователей частоты со звеном постоянного тока. Дополнительными техническими средствами выступают приборы идентификации грузопотока: конвейерные весы, ультразвуковые или механические датчики, соединёнными с системой управления скоростью движения конвейерной линии. Система управления устанавливает скорость движения конвейерной ленты пропорционально поступающему грузопотоку в периоды работы очистного забоя и лента заполняется на максимально возможный уровень по длине.

Однако, регулирование скорости движения конвейерной ленты при имеющихся паузах в поступлении угля из очистного забоя не позволяет

реализовать весь потенциал снижения расхода электроэнергии. Особенностью режимов работы конвейерного транспорта является безостановочная работа конвейеров: транспортная система всегда должна быть готова к принятию груза, а запуск конвейеров осуществляется в порядке обратном направлению транспортирования груза [42,43]. Скорость движения ленты конвейера можно лишь снижать. Поэтому при отсутствии входящего грузопотока система регулирования устанавливает минимальную скорость, равную 10-25 % от номинальной. Предел минимальной скорости обуславливается режимом самообдува взрывозащищенного двигателя [44,45]. При таком принципе регулирования скорости движения конвейерной ленты энергия, затрачиваемая на перемещение груза за длительный период времени, остается неизменной, а энергия, необходимая для перемещение движущихся частей конвейера, снижается, причем величина снижения зависит от характеристик входного грузопотока: длительности интервалов его отсутствия и наличия, объемов поступления и минутных значений. В то же время при установке средств регулирования скорости движения ленты на нескольких конвейерных установках, посредством которых транспортируется один и тот же грузопоток, каждый конвейер с регулируемой скоростью движения ленты изменяет статистические характеристики потока (Рисунок 1.3). Это происходит вследствие переменной транспортной задержки перемещению груза при регулировании скорости движения ленты по описанным принципам, что влияет на расход электроэнергии при нелинейном характере зависимости электропотребления от загрузки [17, 46] последующих конвейеров. Рисунок 1.3 получен на имитационной модели, разработанной в 4-ом разделе, однако вывод об изменении статистических характеристик потока конвейером с регулируемой скоростью движения ленты приведен в литературе [16].

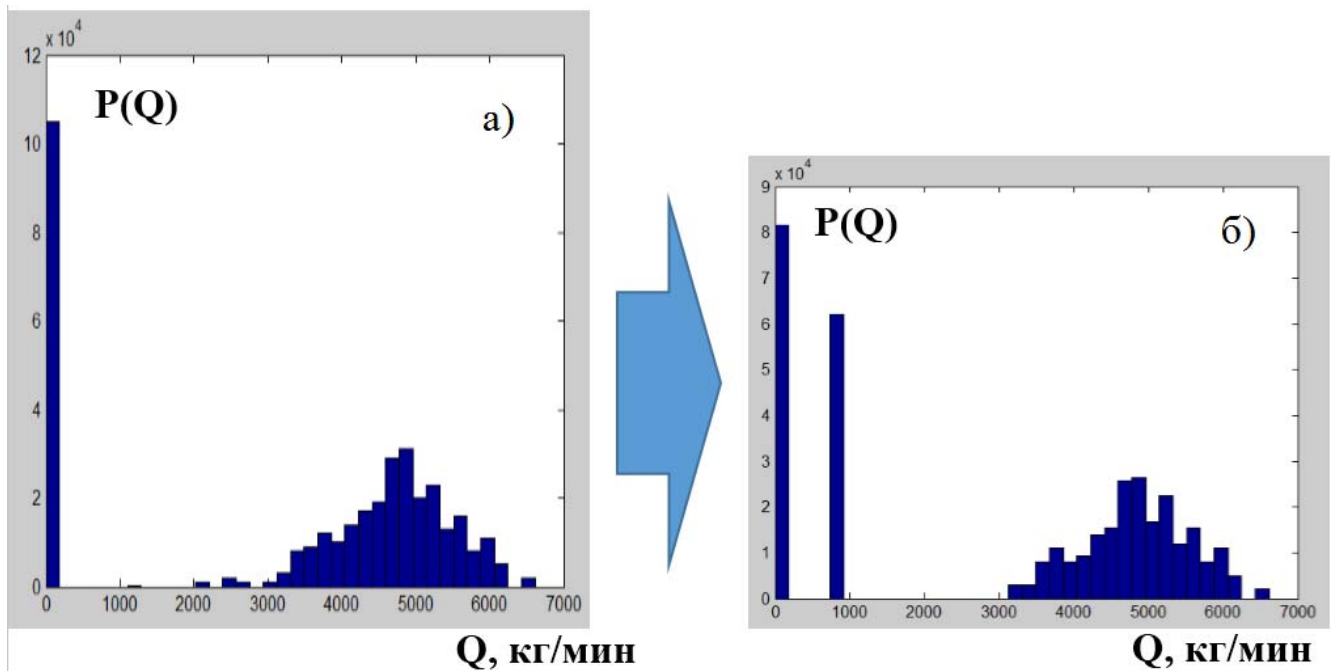


Рисунок 1.3 Плотность вероятности грузопотока до конвейера с регулируемой скоростью движения ленты а) и после него б).

Исследованию повышения энергоэффективности конвейеров путем регулирования скорости движения конвейерной ленты посвящены многие работы.

В работах [23, 30] рассмотрены вопросы расхода электроэнергии при транспортировке насыпных грузов ленточными конвейерами. Для случая горизонтального конвейера показано, что при регулировании скорости движения ленты в случае уменьшения производительности конвейера в 2 раза потребляемая приводом мощность уменьшается примерно на 26 %. Однако, зависимость электропотребления от грузопотока для ленточного конвейера при регулируемой скорости движения ленты не установлена.

В работе [47] представлены результаты анализа факторов, влияющих на динамику транспортирования грузов ленточным конвейером. Обоснована методика определения транспортной задержки и предложен алгоритм ее расчета, который может быть использован при моделировании работы ленточных конвейеров, а также при разработке цифрового адаптивного регулятора для системы автоматической стабилизации нагрузки

электропривода. Определение транспортной задержки ленточного конвейера так же выполняется в работе [48].

В работах [44,49] проанализированы возможности использования самовентилируемых двигателей при эксплуатации ленточных конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты. Показано, что наиболее эффективным техническим решением, обеспечивающим адаптацию скорости движения ленты конвейера под фактические грузопотоки, является применение регулируемого привода. Пределы изменения диапазона регулирования скорости – от 3,2:1 до 6,3:1, при этом нижняя граница регулирования – «ползучая» скорость 0,5 м/с. В то же время указывается, что при достаточном запасе мощности двигателя диапазон регулирования можно увеличивать. Возможно применение электродвигателей серий 2ВР, 3ВР и ВАО2 для комплектации частотно-регулируемого электропривода. Работа [45] так же подтверждает исследование [44].

Динамика грузопотоков является фактором, влияющим на завышенный, в более чем два раза, расход электроэнергии конвейеров по причине низкой эффективности использования конвейерных линий [50,51]. В литературе [16,18,19] приведены статистические характеристики процесса поступления угля из очистного забоя $Q(t)$, и сделано заключение о стационарности процесса $Q'(t)$, в котором исключены промежутки, соответствующие отсутствию груза. Непрерывная часть грузопотока, поступающего из очистного забоя на транспортную систему, аппроксимируется случайной функцией с распределением мгновенных значений производительности по близкому к нормальному или логарифмически нормальному закону. В литературе [18] приведен алгоритм расчета на ЭВМ реализаций процесса поступления угля из очистного забоя. Выполненный анализ позволил установить, что существующие модели и методики для определения вероятностных законов распределения грузопотоков в узлах системы конвейерного транспортной не

приемлемы для использования при условии применения регулирования скорости движения ленты для магистрального конвейерного транспорта.

Приведенные исследования в части установления законов статистического распределения грузопотока выполнены для условий работы конвейеров без преобразователей частоты питающего напряжения. Следует отметить, что на очистных комплексах применяют преобразователи частоты, что может также вносить некоторые изменения в грузопоток из очистных забоев.

В работе [52] приведен статистический анализ результатов измерения сотрудниками института Донгипроуглемаш грузопотока и расхода электроэнергии ленточным конвейером современной шахты на примере конвейера 2ЛУ120, установленного горизонтально. В результате доказана адекватность линейной регрессионной зависимости мощности привода от массы материала на конвейере, что подтверждает отсутствие зависимости коэффициента сопротивления движению ленты от погонной массы груза на ленте при работе в представительных шахтных условиях для горизонтальных конвейеров.

Однако представляет сложность получить данные расхода электроэнергии магистральных конвейеров шахт Западного Донбасса. Сегодня применяются либо находятся в разработке системы, позволяющие осуществлять измерение и учет электроэнергии: УТАС, БЗУ-2, САУКЛ, СЕУПЕШ.

Система УТАС – унифицированная телекоммуникационная система диспетчерского контроля и автоматизированного управления горными машинами и технологическими комплексами. Сигналы о состоянии горных машин, механизмов, оборудования и о параметрах рудничной атмосферы поступают на программируемые контроллеры Системы от датчиков, установленных как в шахте, так и на поверхности. Программируемые контроллеры принимают и анализируют сигналы датчиков. При превышении показаний датчиков значений, заданных уставок контроллера, подаются

команды на включение сигнализации, отключение ГШО (горно-шахтного оборудования) и электроэнергии, также передается текущая информация о состоянии ГШО и о параметрах рудничной атмосферы по цифровому каналу связи в диспетчерскую. В зависимости от ситуации, диспетчер выдает управляющие команды, которые передаются на контроллеры ГШО, установленного как под землей, так и на поверхности для выполнения функций управления [53]. Однако, система сейчас находится в состоянии доработки.

Блок управления и защиты БЗУ-2-05-О предназначен для управления высоковольтными выключателями ячеек КРУВ-6ВМ-ОВ, КРУРН-6А или аналогичными по назначению для отходящих линий, индикации реального времени, величины напряжения на вводе, величины потребляемого нагрузкой тока, мощности, расхода электроэнергии (некоммерческий учёт), осуществления функций защиты [54]. Однако, блоки БЗУ-2 имеют низкие надежность показатели, и должным образом не откалиброваны в местах установки.

Система автоматизированного управления разветвленными конвейерными линиями (САУКЛ) обеспечивает управление конвейерными линиями с числом конвейеров до 60 и неограниченным количеством ответвлений. В составе конвейерной линии могут быть ленточные и скребковые конвейеры с числом двигателей до четырех и с нерегулируемой скоростью рабочего органа [55]. Система САУКЛ позволяет получать информацию о расходе электроэнергии конвейерных линий, однако на шахтах Западного Донбаса пока что не применяется.

Система СЕУПЕШ. Система энергомониторинга и управления электроснабжением, которая разрабатывается учеными ГВУЗ «НГУ», создается на базе современных компьютерных технологий с использованием опыта, основных ключевых моментов и идей предыдущих разработок - системы КТС СОЭ и системы автоматизированного управления конвейерными линиями (САУКЛ). Система СЕУПЕШ обеспечивает энергоконтроль и

автоматизированное управление высоковольтными КРУ типа КРУВ-6 (УК-6) [56]. Система находится в процессе разработки.

Исходя из текущего состояния использования систем учета расхода электроэнергии на магистральном конвейерном транспорте, делаем вывод что получить достоверную информацию о электропотреблении магистральных конвейерных установок угольных шахт не представляется возможным.

Расход электроэнергии магистральным ленточным конвейером также возможно получить в результате выполнения тягового расчета в соответствии с [14] с учетом технологических особенностей ленточного конвейера. Однако, в методике упрощенного тягового расчета используют обобщенный коэффициент сопротивления движению конвейерной ленты и роликов ω . Согласно литературе [12, 17] он варьируется в широких пределах от 0,04 до 0,08. В литературе [17] приводятся результаты экспериментов определения коэффициентов сопротивления движению частей конвейера при разном грузопотоке. Доказано, что составляющие коэффициента ω – это сопротивление качению роликов, сопротивление вдавливания роликов в ленту и сопротивление от изменения натяжения ленты, – принимают различные значения в зависимости от скорости движения ленты, однако стабильны до скоростей менее 3,15 м/с. Приводится зависимость коэффициента сопротивления движения конвейерной ленты от натяжения, которое, в свою очередь имеет сложную зависимость от многих факторов [17]. Из анализа литературы следует, что для конвейера с конкретными условиями установки (угол установки, длина става, масса ленты, масса движущихся частей, условия запыленности среды) коэффициент сопротивления движению верхней ветви ленты незначительно меняется в зависимости от погонной нагрузки, а коэффициент сопротивления движению нижней ветви постоянен. В работе [57] доказано, что коэффициент сопротивления движению ленты с грузом с увеличением натяжения ленты конвейера уменьшается, а с увеличением жесткости, скорости и вязкости ленты и груза увеличивается. При этом

коэффициент сопротивления не зависит от погонной нагрузки и мало зависит от расстояния между роlikоопорами.

При исследовании энергоэффективности конвейерных линий отдельный интерес представляют бремсберговые конвейера, способные при достижении определенной загрузки переходить в рекуперативный режим работы [46]. В [46] угол установки конвейера -6° определяется как предельный, более которого привод конвейера может переходить в рекуперативный режим работы. При этом КПД в области рекуперации является определяет нелинейную зависимость мощности конвейера от массы груза на нем. Так как шахтные магистральные конвейера имеют большую протяженность и время транспортирования, как правило, больше времени автокорреляции грузопотока, то время работы конвейеров в тяговом и рекуперативном режимах требует дополнительного анализа учитывая изменение характеристик грузопотока конвейерами с регулируемой скоростью движения ленты.

В работе [12] установлено, что удельное электропотребление конвейера может варьироваться в широких пределах: разброс индивидуальных значений достигает 20 % при одном и том же сменном грузопотоке. Это вызвано неравномерностью поступления груза из очистного забоя. Так, к примеру, в [58] экспериментально получено, что удельное электропотребление бремсбергового конвейера 1л100к (шахта "им. Н.И. Сташкова") изменялось от 0,75 до 0,92 кВт·ч/т·км при суточном грузопотоке 2000 т. Таким образом, характеристики процесса поступления горной массы из очистного забоя непосредственно влияют на энергоэффективность процесса ее транспортировки системой магистральных ленточных конвейеров, что подтверждается в работах [59, 33]. Для получения точных оценок расхода электрической энергии необходим инструмент определения значений грузопотоков за короткий период времени, близкий к одной минуте – что обосновывается периодом автокорреляции грузопотока [16]. Автокорреляция — статистическая взаимосвязь между последовательностями величин одного ряда, взятыми со сдвигом по времени для случайного процесса. Для этого в блок вводятся

значения математического ожидания и дисперсии грузопотока во время его поступления, а также коэффициент машинного времени очистного забоя. При нелинейной зависимости электропотребления от массы груза на конвейере доказано [17], что при размещении угля на ленте, который поступил за несколько периодов автокорреляции, необходимо учитывать интегральную массу груза на конвейере для определения расхода электроэнергии. Для адекватности оценки энергоэффективности конвейеров необходимо разработать модель, что учитывает минутные значения грузопотоков.

Однако существуют сложности в получении точных данных по каждому конвейеру и применяемых типах роlikоопор и лент. В работах проф. Заикой В.Т. на основании данных натуральных экспериментов [58] были установлены регрессионные модели определения зависимости потребления электроэнергии от грузопотока при нерегулируемой скорости движения конвейерной ленты [12]. Переходя от удельного электропотребления к коэффициенту сопротивления, можно распространить и использовать этот коэффициент для подобных (с идентичными массами движущихся частей, углами установки и условиями запыленности среды) конвейеров в условиях шахт Западного Донбасса.

1.3 Выводы

Анализ состояния проблемы эффективного использования электрической энергии на шахтном магистральном конвейерном транспорте и возможных путей повышения энергоэффективности позволил заключить следующее.

1. Средства учета расхода электроэнергии в подземной шахтной сети отсутствуют либо не откалиброваны, что не представляет возможности выполнить оценку энергоэффективности шахтных конвейеров.

2. Электропотребление нелинейно зависит от массы груза на бремсберговом конвейере. Для определения текущего расхода электроэнергии конвейером, а также установления вероятного его значения за длительный период времени, необходима идентификация массы груза, поступающего на конвейер за интервал времени близкий к периоду автокорреляции грузопотока.

Это диктует необходимость разработки подходов для определения значений грузопотока из очистного забоя.

3. Отсутствуют модели определения статистических характеристик грузопотоков в узлах разветвленной транспортной системы, а также определения ее энергоэффективности при использовании асинхронного регулируемого привода.

4. Имеются предпосылки к уточнению законов распределения грузопотоков при использовании частотных преобразователей электроэнергии на магистральных конвейерах с последующей разработкой моделей определения электропотребления конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты.

1.4 Постановка задач исследования

Диссертационная работа является дальнейшим развитием подходов для определения и повышения энергоэффективности работы конвейерного транспорта угольных шахт. Целью работы является снижение расхода электроэнергии магистральным конвейерным транспортом угольных шахт с учетом динамики поступления грузопотоков. С учетом изложенного сформулированы следующие задачи исследования:

1. Установить закономерности поступления грузопотоков из добычного забоя за период его автокорреляции в зависимости от электропотребления очистного комплекса.

2. Установить закономерности изменения расхода электроэнергии магистрального конвейерного транспорта при нелинейной зависимости электропотребления от массы угля на конвейере.

3. Разработать математическую модель изменения угольного потока с учетом регулирования скорости движения ленты конвейера.

4. Исследовать режимы работы магистрального конвейерного транспорта угольной шахты при регулируемой скорости движения ленты конвейеров и определить сочетание параметров энергоэффективных по критерию минимального удельного расхода электроэнергии.

ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНВЕЙЕРНЫХ УСТАНОВОК БЕЗ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕНТЫ

2.1 Обоснование критерия энергоэффективности работы конвейерного транспорта

Эффективность работы конвейерного транспорта определяется несколькими параметрами: углом установки, массой движущихся частей и ленты, условиями работы (запылённостью среды) и массой перевезенного угля. Перечисленные механические характеристики определяются согласно отраслевых стандартов Украины (СОУ и ОСТ) [60,61] и могут оказывать влияние на энергоэффективность на стадии выбора конвейера. Масса и законы поступления угля влияют на энергоэффективность в процессе эксплуатации.

Критерием энергоэффективности полезной работы, совершаемой конвейером по перемещению массы на расстояние, рекомендуется принимать удельное электропотребление $\text{кВт}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{км})$. Однако этот критерий не отражает особенности функционирования конкретной конвейерной линии: к примеру, если один конвейер работает на уклон, а другой на бремсберг, то удельный расход у них соответственно будет отличаться при одном и том же объеме перевезенного груза и условиях запыленности среды. Поэтому при определении эффективности расхода электроэнергии тем или иным конвейером, необходимо приводить их к общим условиям работы и учитывать особенности эксплуатации.

В литературе [62] приводятся удельные нормы потребления электроэнергии конвейерным транспортом на уровне $0,4-0,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}\cdot\text{км}$. При этом нормы не учитывают угол установки конвейеров, запыленность среды и неравномерность грузопотока. Анализ фактических данных [13], полученных в результате проведенного эксперимента для типовой шахты Западного Донбасса, позволили установить, что приведенные нормативные показатели

удельного расхода электроэнергии являются правомерными при соблюдении следующих условий: постоянное поступление угля на конвейер (заполнение ленты близко к 100 %), угол установки конвейера равен 0° , запыленность среды соответствует значениям коэффициента сопротивления движению частей конвейера находится в диапазоне 0,04-0,06.

Однако, в реальных условиях грузопоток поступает дискретно, а конвейер работает без остановки и снижения скорости, вследствие чего удельный расход электроэнергии возрастает с увеличением количества и продолжительности пауз в процессе поступления угля. Например, для конвейера 2ЛТП1000КСП удельный расход электроэнергии при скорости движения 2 м/с увеличится в 1,5 раза, если грузопоток будет отсутствовать около 50 % времени, и в два раза, если поток угля будет отсутствовать 70 % от общего времени работы конвейера.

Для оценки энергоэффективности конвейеров приведем условия их работы к общим с целью определения резерва снижения электропотребления. Используем тяговый расчет, в котором учитываются технические параметры работы конвейера и условия его установки.

Тяговый расчет конвейера согласно литературе [18]:

$$F_{полн} = F_{1-2} + F_{3-4} = l \cdot g \cdot (q_{сп} + q_{л}) (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta) + l \cdot g \cdot q'_{п} \cdot \omega + \\ + l \cdot g \cdot q_{л} \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta - \sin \beta) + l \cdot g \cdot q''_{п} \cdot \omega = l \cdot g \cdot q_{сп} \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta) + \\ + 2 \cdot l \cdot g \cdot q_{л} \cdot c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + l \cdot g \cdot \omega \cdot (q'_{п} + q''_{п}) = F_{сп} + F_{хх}, \quad (2.1)$$

где $q''_{п}, q'_{п}, q_{л}$ – погонная масса нижних, верхних роlikоопор и ленты, т/км; c' – коэффициент, учитывающий дополнительные сопротивления в местах загрузки; ω – коэффициент сопротивления продольному движению ленты конвейера; β – угол установки конвейера, $^\circ$; $F_{полн}$ – сила, необходимая для перемещения ленты конвейера с грузом, Н; F_{3-4} – сила, необходимая для

перемещения верхней ветви, Н; F_{1-2} – сила, необходимая для перемещения нижней ветви, Н; $F_{гр}$ – сила, необходимая для транспортирования груза на ленте, Н; F_{xx} – сила, необходимая для перемещения частей самого конвейера, Н. В выражении (2.1) первая часть суммы относится к определению усилия на транспортирование груза, вторая – к определению усилия на перемещение движущихся частей конвейера.

Введем понятие минимально достижимого холостого хода конвейера: это отношение усилия, которое необходимо для перемещения движущихся частей самого конвейера, к суммарному усилию, необходимому для перемещения движущихся частей и груза на конвейере. При расчете этого показателя принимаем, что груз заполняет ленту полностью согласно паспортной приемной способности. Обозначим минимально достижимый холостой ход конвейера $E_{конв}$. Тогда:

$$E_{конв} = \frac{F_{xx}}{F_{гр_макс} + F_{xx}} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

где $F_{гр_макс}$ – усилие, необходимое для транспортирования груза на конвейере, заполненного максимально исходя из его габаритов, Н. Отметим, что минимально достижимый холостой ход не зависит от скорости движения ленты конвейера. $E_{конв}$ определяем при $\beta = 0^\circ$, так как в этом случае $E_{конв}$ не зависит от сопротивлений движению ленты

Рассмотрим три типа конвейеров, характеризующиеся различными значениями ширины ленты и массой движущихся частей. Для расчета принимаем начальные условия $l = 1000$ м, $\beta = 0^\circ$, $c' = 1,1$, $\omega = 0,08$. Определим для каждого типа $E_{конв}$ и сведем результаты в таблицу:

Таблица 2.1. Определение минимально достижимого холостого хода для трех типов конвейеров

Тип	Параметры конвейера			Погонная приемная способность	Расчетные усилия			
	q_L , кг/м	q_p' , кг/м	q_p'' , кг/м		q , кг/м	$F_{гр}$, Н	F_{1-2} , Н	F_{3-4} , Н
2ЛУ120	18	26,7	12,5	133,3	86328	19747,5	28919,9	48667,4
2ЛТП1000КСП	15	20,0	9,2	94,4	61149	15647,0	22661,1	38308,1
2ЛТ80КСП	12	20,0	9,2	56,7	36689,4	13704,6	20718,7	34423,3

Таблица 2.1. Продолжение

Тип	Холостой ход		Удельный расход электроэнергии	
	Минимально достижимый	Фактический	Минимально достижимый	Фактический
	$E_{конв}$, %	%	$w_{уд}$, кВт·ч/т·км	$w_{уд}$, кВт·ч/т·км
2ЛУ120	36	43	0,42	0,59
2ЛТП1000КСП	39	68	0,44	1,58
2ЛТ80КСП	48	70	0,54	1,37

Из таблицы 2.1. следует, что усилие холостого хода в % от номинального при максимальном заполнении ленты меньше у конвейера с большими габаритами и приемной способностью. При этом фактический удельный расход электроэнергии может превышать минимально достижимый более чем в два раза (см. 2ЛТП1000КСП, 2 ЛТ80КСП), что вызвано влиянием динамики грузопотоков.

Расход электроэнергии, необходимый для перемещения соответственно движущихся частей конвейера W_{xx} и груза W_{gp} определяется:

$$W_{xx} = \frac{F_{xx} \cdot v \cdot t}{\eta}, \quad (2.3)$$

$$W_{gp} = \frac{F_{gp} \cdot v \cdot t}{\eta}, \quad (2.4)$$

где v – скорость движения ленты конвейера, м/с, t – интервал времени определения расхода электроэнергии W_{gp} и W_{xx} , с, η – механический КПД, учитывающий КПД привода.

За время t конвейер транспортирует груз массой:

$$Q_{y\partial_t} = l \cdot q_{zp} \cdot t \cdot v, \quad (2.5)$$

где l – длина конвейера, м, q_{zp} – погонная масса груза, т/км.

Удельное электропотребление транспортирования груза конвейером, определяется как:

$$w_{y\partial} = (W_{zp} + W_{xx}) / Q_{y\partial_t} \quad . \quad (2.6)$$

Из выражений (2.1–2.5) определим удельные энергозатраты на транспортирование груза без учета веса ленты и роlikоопор:

$$w_{zp_y\partial} = W_{zp} / Q_{y\partial_t} \quad , \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} w_{zp_y\partial} &= \frac{F_{zp} \cdot v \cdot t}{\eta} / Q_{y\partial_t} = \frac{l \cdot g \cdot q_{zp} \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta) \cdot v \cdot t}{\eta} / (l \cdot q_{zp} \cdot v \cdot t) = \\ &= \frac{g \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta)}{\eta \cdot 3,6} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Из (2.8) следует, что удельное электропотребление зависит от сопротивления движению частей (условий работы и запыленности среды ω) и угла установки конвейера.

Определим зависимость удельного расхода электроэнергии конвейера от минимально достижимого холостого хода и удельных энергозатрат на транспортирование груза:

$$\frac{F_{полн}}{F_{zp}} = \frac{w_{y\partial}}{w_{zp_y\partial}} \rightarrow w_{y\partial} = \frac{F_{полн}}{F_{zp}} \cdot w_{zp_y\partial}$$

$$\begin{aligned}
 w_{y\delta} &= \frac{F_{\text{полн}}}{F_{zp}} \cdot w_{zp_y\delta} = \frac{F_{\text{полн}}}{F_{zp} + F_{xx} - F_{xx}} \cdot w_{zp_y\delta} = \frac{F_{\text{полн}}}{F_{\text{полн}} - F_{xx}} \cdot w_{zp_y\delta} = \\
 &= \frac{F_{\text{полн}} / F_{\text{полн}}}{F_{\text{полн}} / F_{\text{полн}} - F_{xx} / F_{\text{полн}}} \cdot w_{zp_y\delta} = \frac{1}{1 - E_{\text{конв}}} \cdot w_{zp_y\delta}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

$E_{\text{конв}}$ – величина, характеризующая минимально достижимый холостой ход для определенного типа конвейера. $E_{\text{конв}}$ учитывает массу движущихся частей конвейера. К примеру, $E_{\text{конв}} = 39\%$ для 1ЛТП1000КСП, что определяется массами $q_l=15$ кг/м, $q_p'=20$ кг/м, $q_p''=9,2$ кг/м и погонной приемной способностью $q=94,4$ кг/м. Такое допущение правомерно при $\beta=0^\circ$, так как в этом случае величина $E_{\text{конв}}$ не зависит от сопротивлений движению c' и ω . Величина $w_{zp_y\delta}$ характеризует параметры установки конвейера и зависит от β , c' , ω .

Частная зависимость $w_{y\delta}$ (при $w_{zp_y\delta} = 0,28$ кВт*ч/т*км, которое определено по (2.8) полагая $\beta=0^\circ$, $c'=1,1$, $\omega=0,08$, $\eta=0,85$, $g=9,81$ м/с²) от минимального достижимого холостого конвейера рассчитанная, используя отношение (2.9), приведена на рис 2.1:

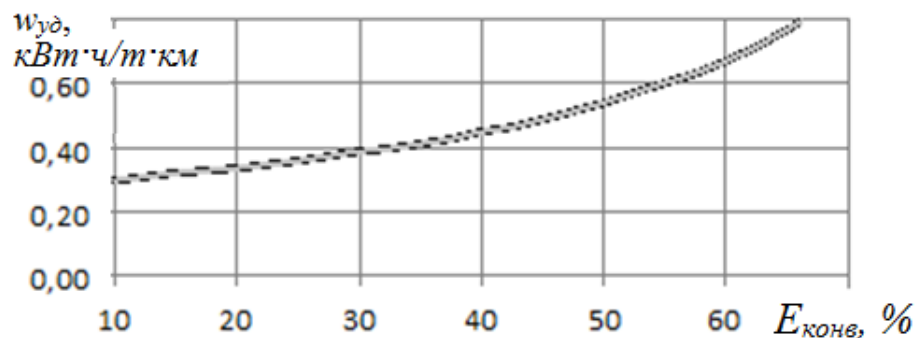


Рис 2.1. Зависимость удельного расхода электроэнергии от минимально достижимого холостого хода конвейера при $\beta = 0^\circ$, $c'=1,1$, $\omega=0,08$

Для установления обобщающей зависимости удельного электропотребления от минимально достижимого холостого хода необходимо ввести поправочный коэффициент, учитывающий снижение холостого хода конвейера при увеличении угла установки:

$$K_{\beta} = \frac{2 \cdot c' \cdot \omega}{2 \cdot c' \cdot \omega + \sin \beta} \quad (2.10)$$

Тогда, обобщенная зависимость удельного расхода электроэнергии конвейеров от минимально достижимого холостого хода примет вид:

$$W_{y\delta} = \frac{1}{1 - E_{конв} \cdot K_{\beta}} \cdot W_{zp_y\delta} \quad (2.11)$$

Зависимость (2.11) с точностью $\pm 10\%$ правомерна при изменении величин в диапазонах: $\beta \in [0^{\circ}; 18^{\circ}]$, $c' \in [1; 1,6]$, $\omega \in [0,02; 0,08]$, $E_{конв} \in [0,1; 0,6]$. Расчетные значения удельного электропотребления, полученные используя тяговый расчет и зависимость (2.11), приведены в приложении Д в табличном виде. На рисунках 2.2 и 2.3 даны зависимости удельного потребления электроэнергии конвейером от минимально достижимого холостого хода, определённые по соотношению (2.11) при различных параметрах установки (рисунок 2.2):

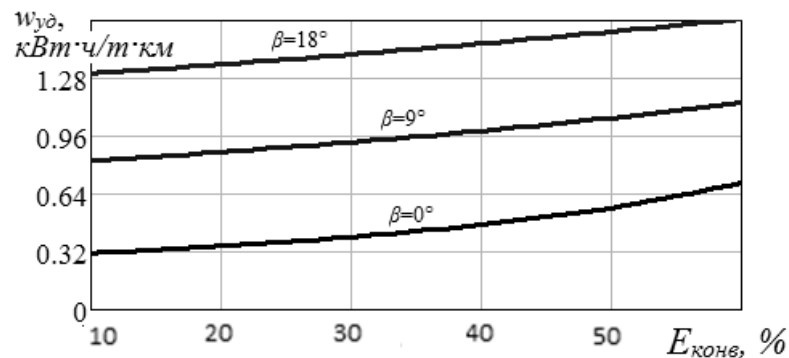


Рисунок 2.2. Зависимость удельного расхода электроэнергии от минимально достижимого холостого хода конвейера при $\beta=0^{\circ}, 9^{\circ}, 18^{\circ}$; $c'=1,1$; $\omega=0,08$.

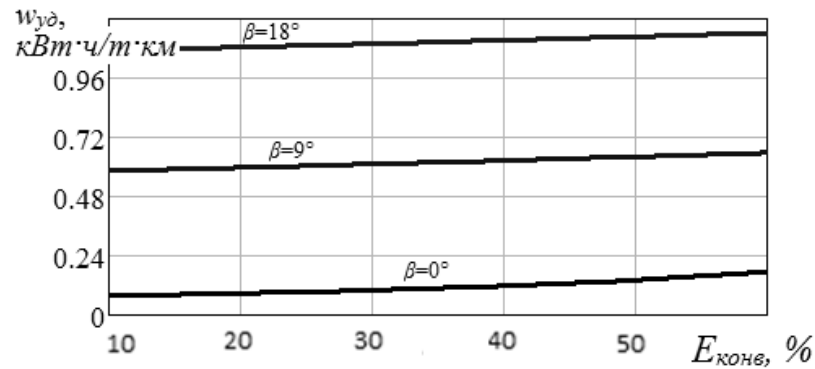


Рисунок 2.3. Зависимость удельного расхода электроэнергии от минимально достижимого холостого хода конвейера при $\beta=0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$; $c'=1,1$; $\omega=0,02$.

Зависимости, приведенные на рисунках (2.1-2.3), используется для определения резерва возможного снижения электропотребления ленточных конвейеров любого типа, рассчитав для него величину $E_{конв}$. Для конкретных условий эксплуатации конвейера по (2.11) возможно определить минимальный удельный расход электроэнергии. Например, приведенный в таблице 2.1 конвейер 2ЛУ120 при горизонтальной установке и сильной запыленности среды ($\omega=0,08$), имеет значение минимально достижимого холостого хода конвейера $E_{конв}=36\%$. По кривой на рис 2.1 для этого конвейера минимальное удельное электропотребление составит $0,42 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}\cdot\text{км}$.

Из анализа кривых, приведенных на рисунках (2.1-2.3), также следует, что нормированные пределы удельного расхода электроэнергии для ленточных конвейеров, указанные в литературе [62] соблюдаются при минимально достижимом холостом ходе конвейера от 30% до 56% , что соответствует всем типам ленточных шахтных конвейеров с углом установки равным $\beta = 0^\circ$, однако при увеличении угла установки до значений $\beta > 9^\circ$, нормативных значений удельного электропотребления невозможно достичь даже при низкой запыленности среды ($\omega=0,02$).

Также анализ кривых на рисунке 2.2 позволяет утверждать, что на расход электроэнергии конвейера при сильной запыленности среды ($\omega=0,08$) оказывает

весомое влияние минимально достижимый холостой ход: изменение $E_{конв}$ с 30% до 55% влечет такое же увеличение удельного расхода электроэнергии как и изменение угла установки β от 0° до 5° .

Проведенная оценка электропотребления правомерна на конвейерах с длиной более 200 м – коэффициент c' , учитывающий сосредоточенные сопротивления на более коротких конвейерах, принимает значения более 1,6. Также невозможно оценить с помощью зависимости (2.11) минимально достижимое удельное электропотребление бремсберговых конвейеров, которые могут переходить в рекуперативный режим работы, что более детально будет рассмотрено в п. 2.3.

При использовании технических средств снижения расхода электроэнергии, возможна задача сравнения резервов повышения энергоэффективности двух различных конвейеров с разными условиями установки. Например, наблюдаемый в ходе эксперимента удельный расход электроэнергии конвейера 2ЛУ120 с $E_{конв}=36\%$ (табл 2.1) $\beta = 1^\circ$, составил 0,8 кВт*ч/т*км, и удельный расход конвейера 2ЛТ80КСП с $E_{конв}=48\%$ $\beta = 0^\circ$, составил 0,8 кВт*ч/т*км. По рисунку 2.2 находим минимально возможный удельный расход электроэнергии для конвейера 2ЛТ80КСП: 0,52 кВт*ч/т*км. Для 2ЛУ120 с $\beta = 1^\circ$ этот же параметр составляет 0,477 кВт*ч/т*км (на рисунке прямая для $\beta = 1^\circ$ не приведена, определяем расчетным путем по зависимости (2.11)). Следовательно, резерв повышения энергоэффективности для 2ЛУ120 составляет 0,323 кВт*ч/т*км, а для 2ЛТ80КСП составляет 0,28 кВт*ч/т*км. Такая небольшая разница в 0,053 кВт*ч/т*км при длине конвейера в 1 км и суточном грузопотоке 5000 т составляет разность в годовом электропотреблении 95400 кВт*ч.

Для выявления резерва энергоэффективности конвейера также необходимо определить его фактический расход электроэнергии. Однако существующие методы определения электропотребления конвейерных установок недостаточно адекватны и требуют более глубокого анализа.

2.2 Анализ методов определения электропотребления магистральных конвейерных установок

Электропотребление конвейерных установок можно определить несколькими способами:

1. Методом прямого измерения объемов потребленной электроэнергии:

- а) конвейерной установки;
- б) участка конвейерного транспорта в целом.

2. Расчетными методами:

- а) математическая модель, предложенная в [63];
- б) точный тяговый расчет с использованием уточненных технологических коэффициентов [17];
- в) приближенный тяговый расчет с использованием коэффициентов полученных путем обработки статистических данных [14];
- г) при помощи регрессионных моделей [12].

Проанализируем каждый из перечисленных методов и определим их точность.

1. а) Погрешность метода определения энергоэффективности (электропотребления) путем измерения объемов потребленной электроэнергии в точке подключения привода конвейера определяется погрешностью измерительных трансформаторов тока и другого измерительного оборудования. Реализуется путем применения оборудования автоматизации САУКЛ либо УТАС, а также использованием микропроцессорного блока учета электроэнергии в подстанциях типа ТВПШ.

1. б) Погрешность метода определения энергоэффективности (электропотребления) путем измерения объемов потребленной электроэнергии, если точки учета находятся в КРУВ 6 кВ, определяется погрешностью на включение другого вспомогательного оборудования участка конвейерного транспорта. Возможно реализовать с помощью аппаратуры САУПЕШ, а также БЗУ-2. По данным, полученным на шахте "Павлоградская" ПАО "ДТЭК

Павлоградуголь", установленные номинальные мощности вспомогательного оборудования участка конвейерного транспорта (УКТ) не превышают 10-20 %. В эксплуатационных режимах двигатель конвейера имеет коэффициент загрузки <1 и пределы погрешности расширяются до 30-50 %.

Методы 1. а) и 1. б) являются самыми точными так как являются методами прямого измерения. Однако на данном этапе автоматизации конвейерного транспорта на шахтах Западного Донбасса учет электроэнергии конвейерных установок осуществляется с помощью БЗУ-2, которые не откалиброваны должным образом. Поэтому необходимо рассмотреть методы косвенного определения электропотребления.

2. а) Определение электропотребления с помощью модели приведенной в ДСТУ 3224-95. Согласно Приложению В.4 [63] расход электроэнергии ленточными магистральными конвейерами (кВт · ч) за расчетный период определяется:

$$W_{кл} = 0,013 L_k \omega \left[C_c v t_p + 0,28 Q_p \left(1 \pm \frac{\sin \beta}{\omega} \right) \right], \quad (2.12)$$

где L_k – длина конвейера, м; ω – коэффициент сопротивления движению, равный 0,02-0,03 для стационарных конвейеров, 0,04–0,06 – установленных в пределах выемочных участков, 0,08–0,12 – работающих в особо тяжелых условиях; C_c – масса 1 м движущихся частей конвейера, кг/м; v – скорость движения ленты, м/с; t_p – время работы конвейера за расчетный период, ч; Q_p – расчетная производительность (масса транспортируемого груза) конвейера за время t_p , т; β – угол установки конвейера, град. Точность определения зависит от адекватности принятого параметра ω . В работе [12] проведен анализ адекватности фактическим условиям величины коэффициента сопротивления движению скребкового конвейера: погрешность составляет $\pm 35\%$ при доверительной вероятности 0,95. Если провести аналогичный анализ для

коэффициента сопротивления движению частей ленточного конвейера, то получим погрешность $\pm 80\%$ при доверительной вероятности 0,95 без учета условий работы конвейерных линий, и погрешность $\pm 24\%$ при доверительной вероятности 0,95 с учетом условий работы последних. При расчете принимался диапазон изменения величины $\omega = 0,02-0,08$, нормальное распределение ω в пределах диапазона.

2. б) Определение электропотребления с помощью приближенного тягового расчета приведено в разделе 2.1 зависимости (2.1)-(2.5).

Погрешность определения расхода электроэнергии аналогична предыдущему методу, так как сила перемещения движущихся частей конвейера и массы угля на нем прямо пропорциональна коэффициенту сопротивления движению частей конвейера.

2. в) Определение электропотребления с помощью уточненного тягового расчета. В литературе [17] приводится зависимость коэффициента сопротивления движения конвейерной ленты от ее натяжения. Натяжение, в свою очередь, зависит от многих факторов, которые учтены в выражении при помощи эмпирических коэффициентов и в явном виде:

$$\omega_z(q_c) = C_z''(q_c) + \frac{\varepsilon(q_c)}{q_c \cdot L} \cdot \ln \left(1 + \frac{C_z'(q_c)}{C_z''(q_c)} \cdot e^{\frac{-S}{\varepsilon(q_c)}} \cdot e^{\frac{-(q_1+q_2) \cdot L \cdot \sin(\beta)}{\varepsilon(q_c)}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-C_z'(q_c) \cdot L \cdot q_c}{\varepsilon(q_c)}} \right) \right) \quad (2.13)$$

$$\omega_n(q_c) = C_n''(q_c) + \frac{\varepsilon'(q_c)}{q_c \cdot L} \cdot \ln \left(1 + \frac{C_n'(q_c)}{C_n''(q_c)} \cdot e^{\frac{-S}{\varepsilon'(q_c)}} \cdot e^{\frac{-(q_1) \cdot L \cdot \sin(\beta)}{\varepsilon'(q_c)}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-C_n'(q_c) \cdot L \cdot q_c}{\varepsilon'(q_c)}} \right) \right) \quad (2.14)$$

где ε , ε' – постоянные натяжения груженой и порожняковой ветви соответственно, кг, q_c – весовая погонная нагрузка, кг, C_z' , C_z'' , C_n' , C_n'' – константы, полученные из экспериментальных графиков, L – длина конвейера, S – начальное натяжение ветви, Н, β – угол установки конвейера, град.

Однако данные зависимости трудно применимы в условиях эксплуатации по причине отсутствия информации о фактических значениях величин, таких

как константы, начальные натяжения ветви, полученные для определенных условий проведенного эксперимента. Поэтому, точность приведенных моделей сомнительна в случае отличия условий работы оборудования от тех, что послужили основанием для разработки.

2. г) Использование регрессионных моделей

Согласно действующему стандарту по энергоаудиту для горнодобывающих предприятий Украины [64], удельный расход электроэнергии конвейерным транспортом однозначно определяется согласно приведенной на рисунке 2.1 кривой зависимости удельного электропотребления от сменного грузопотока. Однако в соответствии с положениями, приведенными в работе [12], приходим к выводу, что такой подход является некорректным, так как коэффициенты модели удельного энергопотребления зависят от многих факторов, таких как угол установки, вес движущихся частей, КПД установки и т.д., которые необходимо определять с учетом реальных условий работы оборудования. В работе [12] приведены регрессионные модели электропотребления с учетом условий работы и типов конвейеров, и такой подход является корректным. При этом погрешность прогнозирования удельного расхода электроэнергии при помощи полученных моделей для условных средних во всем диапазоне (500-2500 т·км/сут) грузопотоков из очистных забоев находится в пределах 2,9...14,7%. В таком случае возможна оценка среднего электропотребления за период не менее рабочей смены.

Однако при отсутствии регрессионной модели электропотребления конвейера от грузопотока, определенной при условиях, аналогичных фактическим требуемым, прогноз расхода электроэнергии конвейера будет не корректным. Поэтому существует необходимость определять электропотребление конвейера за интервал осреднения, равный периоду автокорреляции грузопотока, расчетным путем, учитывающим особенности функционирования конвейера. Так как в расчетных методах необходима информация о значениях грузопотока за период его автокорреляции, существуют предпосылки для разработки алгоритма идентификации минутных значений грузопотока из очистного забоя.

2.3. Определение минутных значений грузопотока из очистного забоя.

Выявление значений грузопотока из очистного забоя за период его автокорреляции необходимо для определения электропотребления шахтных конвейерных установок расчетными методами. Учет динамики грузопотока целесообразен при определении электропотребления конвейера в реальном времени, а также при прогнозировании среднего расхода электроэнергии бремсберговых конвейеров.

В работе [65, 66] в качестве измерителей угольной массы выступают конвейерные весы. В работе [67] для идентификации значений потока угля предлагается использовать ультразвуковой датчик. Однако эти способы требуют дополнительных технических средств дооборудования конвейерных линий, что сопровождается снижением надежности системы определения грузопотока из очистного забоя. Способов определения значений грузопотока из очистного забоя без применения дополнительных технических средств выявлено не было.

В [68] предложен способ определения времени функционирования очистного комбайна в режиме выемки полезного ископаемого косвенно по уровню и скорости нарастания активной мощности добычного комплекса. Учет электрической энергии осуществляется в ячейках КРУВ 6 кВ при питании от каждой ячейки одной ПУПП. Описанный способ позволяет определить интервалы времени поступления и отсутствия груза на скребковом конвейере. Однако, для определения интервалов времени наличия и отсутствия грузопотока в месте выгрузки из лавы и его минутных значений необходимо реализовать алгоритм, представленный на рис 2.4 [69,70].

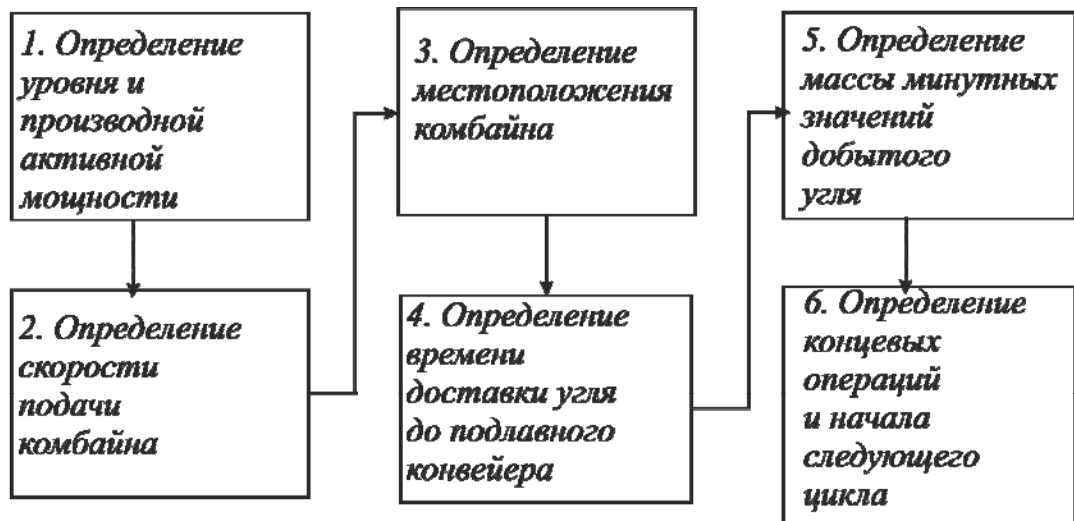


Рисунок 2.4 Блок-схема алгоритма определения минутных значений грузопотока из очистного забоя

Блок-схема включает:

1. Определение уровня активной мощности и скорости ее нарастания (как показано в работе [68]) осуществляется программным способом по предварительно полученным графикам электрических нагрузок (ГЭН) очистного комплекса. По минутным значениям скорости подачи добычного комбайна либо, составу и мощности электрооборудования комплекса рассчитываются нижний и верхний порог мощности при выемке угля и модуль величины знакопеременной производной. Эти данные используются для получения информации в оперативном режиме.

2. Определение скорости подачи комбайна осуществляется по регрессионной модели, установленной по ГЭН очистного комплекса и замерам соответствующих значений скорости подачи либо данным о добыче. Скорость подачи прямо пропорционально зависит от мощности, которую потребляет очистной комплекс во время выемки полезного ископаемого (см рис. 2.7).

3. Местоположение комбайна в лаве определяется путем интегрирования значений скорости подачи за время выемки и отсчитывается от начала лавы.

4. Рассчитывается время перемещения угля до начала лавы по значениям скорости движения скребкового конвейера.

5. Скорость подачи однозначно определяет объем добытого угля: с учетом времени его доставки скребковым конвейером находятся минутные значения потока угля из очистного забоя.

6. Используя ГЭН, определяется время, затрачиваемое на концевые операции и начало следующего цикла.

Рассмотрим работу приведенного алгоритма (Рис 2.4) при использовании экспериментальных данных, полученных в условиях шахты «им. Н.И. Сташкова» [68]. В очистном комплексе установлено следующее оборудование: комбайн МК-67 (установленная мощность двигателя 115 кВт), насос местного орошения НУМС (32 кВт), маслостанция (30 кВт), конвейер СП-46 (3x22 кВт), насосная станция СНУ-4 (2,2 кВт), лебедка ЛГД2 (4,5 кВт), аппарат пусковой АП-3,5 (3,5 кВт).

В ходе эксперимента установлено, что потребляемая комплексом активная мощность при выемке превышает 81 кВт, при этом модуль производной мощности превышает значение 60 кВт/мин во время пуска/остановки комбайна. Графики активной мощности и ее производной представлены на рисунках 2.5 и 2.6

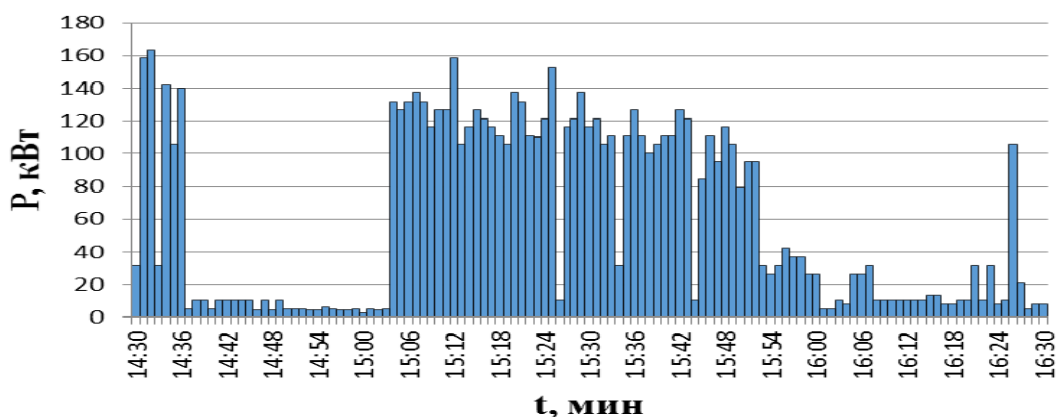


Рисунок 2.5 График электрических нагрузок очистного комплекса

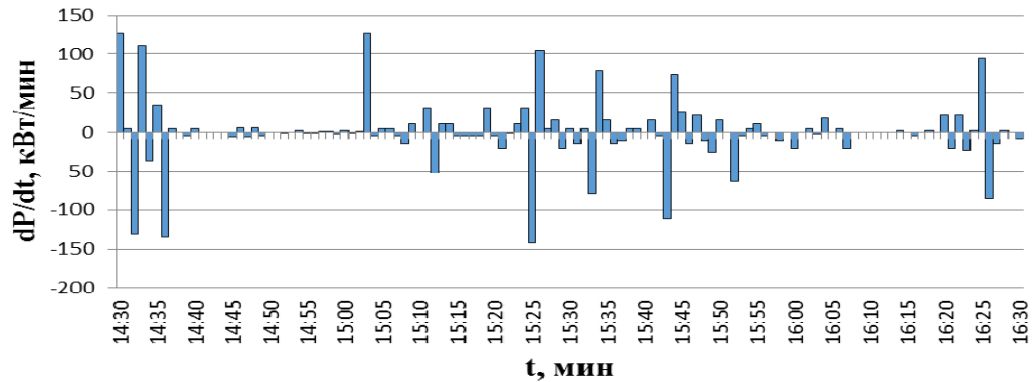


Рисунок 2.6 График зависимости производной активной мощности очистного комплекса от времени

Для определения местоположения комбайна необходимо иметь корреляционную зависимость его скорости подачи от мощности в периоды работы с учетом пороговых значений P . Зависимость определяем в виде полинома, принимая линейный вид из теоретических соображений [71]:

$$v(P) = a_1 + a_2 \cdot P, \quad (2.15)$$

где $v(P)$ – скорость подачи комбайна, м/с; P – мощность, которая потребляется добычным комплексом, кВт; a_1, a_2 – коэффициенты модели.

Для выбранной модели аппроксимацию эмпирических данных (Приложение Е, Рис. 2.5) будем осуществлять при помощи метода наименьших квадратов (МНК). Предварительно определим корреляционное отношение, которое является мерой зависимости (тесноты связи) между искомыми величинами и записываются так:

$$\eta_{v/P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{v}_{Pi} - \bar{v})^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}}, \quad (2.16)$$

где \tilde{v}_{P_i} – скорость подачи очистного комбайна, определяемая по уравнению регрессии $\tilde{v} = f(P)$ для i -го значения потребляемой мощности;

\bar{v} – среднее выборочное значение скорости подачи очистного комбайна;

v_i – i -е значение скорости подачи очистного комбайна в рассматриваемой выборке.

Для рассматриваемого случая корреляционное отношение численно равно $\eta_{v/P} = 0,68$.

Полученные данные указывают, что в условиях эксплуатации связь между скоростью подачи угольных комбайнов и потребляемой мощностью проявляется существенно.

Очередность определения параметров теоретической линии регрессии рассмотрим на примере сглаживания экспериментальных данных с помощью линейной модели. Коэффициенты a_1 , a_2 найдем с помощью метода наименьших квадратов (МНК) по экспериментальным данным, полученным для нормального процесса работы угледобывающих комплексов. Коэффициенты модели вычисляются по зависимостям [12]:

$$\tilde{a}_1 = \bar{v} - \tilde{a}_2 \bar{P}, \quad (2.17)$$

$$\tilde{a}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(v_i - \bar{v})}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}. \quad (2.18)$$

где \bar{P} – математическое ожидание мощности; P_i – i -е значения мощности, \bar{v} – математическое ожидание скорости подачи комбайна, v_i – i -е значения скорости подачи комбайна. Значения \bar{P} , P_i , \bar{v} , v_i , приведены в приложении Е.

Для рассматриваемого случая линейная регрессия имеет следующий вид $v(P) = 0,376 + 0,011 \cdot P$ (Рис 2.7)

Величина отклонения эмпирической регрессии $\tilde{v} = \tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 P$ от истинной $v = a_1 + a_2 P$ может быть оценена для любого заданного значения $P = P_x$ выражением

$$\tilde{v} \pm \frac{t_{q,n-2} s}{\sqrt{n-2}} \sqrt{1 + \frac{n^2 (P_x - \bar{P})^2}{n \sum_{i=1}^n P_i - (\sum_{i=1}^n P_i)^2}}, \quad (2.20)$$

где $s = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2 / n}$ – остаточная дисперсия; $d_i = v_i - \tilde{a}_1 - \tilde{a}_2 P$ – отклонение действительной скорости подачи комбайна от вычисленной по уравнению регрессии $\tilde{v} = a_1 + a_2 P$; $t_{q,n-2}$ – t -критерий для 95%-го доверительного интервала; P_x – значение мощности, для которого строится доверительный интервал.

Результаты построения доверительных интервалов для зависимости скорости подачи комбайна от расхода электроэнергии комплекса по исследуемым выборкам при граничных значениях мощности, которая наблюдалась в эксперименте, приведены в таблице 2.2 и на рис. 2.7.

Таблица 2.2

Оценка точности регрессионной моделей

Нижнее и верхнее граничные значения P , м/мин	Рассчитанные по регрессии значения \tilde{v} , кВт.ч/т	95%-ные доверительные границы для условного среднего $M(v/P)$, (м/с)/%		95%-ные доверительные границы для индивидуальных значений v_i , (м/с)/%	
		Нижняя	Верхняя	Нижняя	Верхняя
84,48	1,22	$\frac{1,15}{-8}$	$\frac{1,46}{8}$	$\frac{0,9}{-34}$	$\frac{1,87}{34}$
163,68	2,55	$\frac{1,99}{-12}$	$\frac{2,37}{12}$	$\frac{1,84}{-21}$	$\frac{2,81}{21}$

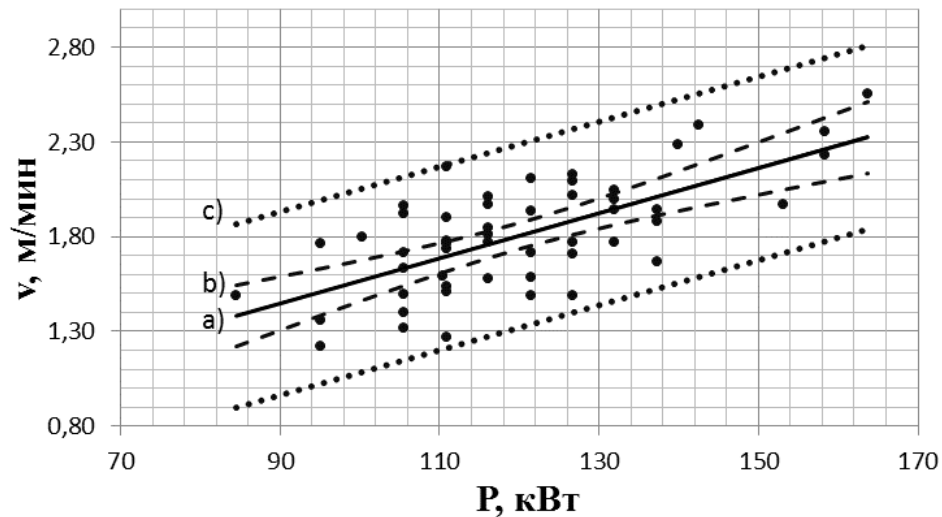


Рисунок 2.7 Линия регрессии (а) а также 95 %-е доверительные интервалы для средних(б) и индивидуальных (с) значений скорости подачи очистного комбайна

Анализ выражения (2.20) и рис. 2.7 показывает, что доверительные интервалы для условного среднего $M(v/P_x)$ зависят от того, для какого значения v_x они строятся. Эти границы наиболее близки друг к другу при $P_x = \bar{P}$. Точность определения скорости подачи комбайна, основанная на использовании регрессионных моделей, снижается по мере удаления P_x от среднего значения \bar{P} . Для крайних значений P , которые наблюдались в процессе промышленного эксперимента, точность определения условных средних $M(v/P)$ при принятой доверительной вероятности $p = 0,95$, как это следует из расчетов, лежит в пределах $\pm 8... \pm 12\%$. Для средних значений этот показатель уменьшается до $\pm 4\%$.

При отсутствии экспериментальных данных относительно скорости подачи комбайна и известном сменном объеме добычи предлагается использовать следующий способ. Объем добытого угля однозначно определяется зависимостью

$$Q_i = \gamma t \beta v_i, \quad (2.21)$$

где m – вынимаемая мощность пласта, м; β – ширина захвата исполнительного органа, м; γ – плотность угля в массе, т/м³; v_i – скорость подачи комбайна, м/мин.

Зависимость сменного объема добычи от энергопотребления запишем в виде:

$$Q_{см} = \sum(\gamma m \beta v_i) = \sum[(\gamma m \beta)(a_1 + a_2 \cdot P_i)]. \quad (2.22)$$

По достаточному для достоверного результата количеству значений $Q_{см}$, определяют коэффициенты модели a_1, a_2 .

Местоположение комбайна в лаве определяют путем интегрирования значений скорости подачи за время работы $t_k = t_2 - t_1$.

$$L_k = \int_{t_1}^{t_2} v_i dt, \quad (2.23)$$

где v_i – минутные значения скорости подачи добычного комбайна за время его работы, вычисленные по уравнению регрессии.

Для представленных на рис. 2.5 данных за время работы с 15:03 до 15:51 комбайн переместился на 75,3 м $\pm 5,6$ % с доверительной вероятностью 95 %. Естественно, при увеличении пройденного комбайном пути абсолютная ошибка определения его местоположения растет, но при достижении комбайном конца лавы ошибка обнуляется, а максимальное ее значение при длине очистного забоя 220 м составит $\pm 26,4$ м с доверительной вероятностью 95 %.

При скорости скребкового конвейера 1 м/с это повлечет за собой ошибку во времени задержки доставки угля на подлавный конвейер до 26,4 с в

конечном положении комбайна. Значение времени доставки угля до подлавного конвейера определяется как

$$t_{\text{досм}} = L_k / v_{\text{скр}}, \quad (2.24)$$

где $v_{\text{скр}}$ – постоянная скорость движения скребкового конвейера.

Для принятых условий, определяя по регрессионной зависимости минутные значения скорости подачи комбайна и учитывая время задержки доставки угольной массы скребковым конвейером, определим величину минутных значений потока угля из очистного забоя:

$$Q_i = \gamma m \beta v_{i-t_{\text{досм}}} (P_{i-t_{\text{досм}}}), \quad (2.25)$$

Учитывая доверительные интервалы определения скорости подачи, рассчитываем величину минутных значений потока угля из очистного забоя. Ошибка при идентификации времени транспортирования груза до конвейера при этом несущественна в задаче определения массы минутного значения груза.

Концевые операции, во время которых не происходит выемка полезного ископаемого, также определяются по уровню мощности и ее первой производной. В это же время обнуляется значение времени доставки угольной массы до подлавного конвейера и расчет повторяется.

После определения минутных значений потока угля из очистного забоя, используя упрощенный тяговый расчет конвейера [14], находим минутные значения электропотребления ленточных магистральных конвейеров.

Таким образом, значение электропотребления определяется за интервал, близкий к одной минуте.

2.4 Закономерности распределения вероятных значений электропотребления

Метод определения фактических минутных значений угольного потока, разработанный и представленный в п. 2.3 позволяет установить вероятные значения расхода электроэнергии конвейерами, которые принимают уголь из одного очистного забоя. Однако при слиянии нескольких потоков необходимо знать законы распределения угля в узлах конвейерной сети.

Уголь поступает потоком на транспортную конвейерную сеть из очистных забоев. Такой поток имеет случайные периоды наличия и отсутствия груза и ряд мгновенных (либо минутных) значений величины потока за время его поступления. Конвейеры, не оснащенные регулируемым приводом, создают постоянное транспортное запаздывание потока до узлов транспортной сети. С учетом названных факторов, в узлах схемы формируются минутные значения грузопотока.

Для определения энергоэффективности конвейеров с линейной зависимостью электропотребления от грузопотока установим, наиболее адекватный закон распределения минутных значений грузопотоков при суммировании нескольких грузопотоков в узлах транспортной сети.

Для определения законов распределения минутных значений грузопотока используем метод наибольшего правдоподобия [72]. При известных минутных значениях грузопотока в узлах транспортной конвейерной сети, переходим к определению законов распределения этих величин. На рисунке 2.8 представлены минутные значения грузопотоков и последующая аппроксимация разными вероятностными законами. Минутные значения грузопотоков получены путем имитационного моделирования по результатам выполненного исследования [13]. Исходные данные для анализа представлены в приложении Е.

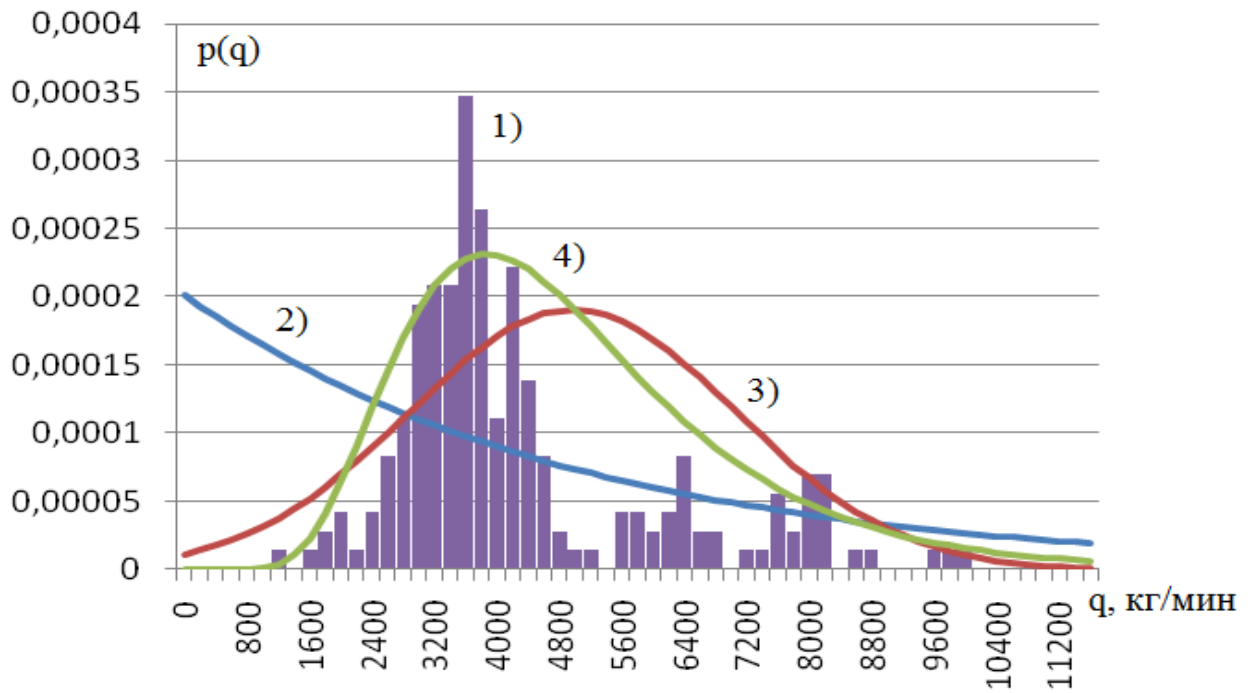


Рисунок 2.8 Минутные значения суммарного грузопотока из трех очистных забоев, аппроксимированные разными вероятностными законами: 1) экспериментальные значения; 2) экспоненциальный закон распределения; 3) нормальный закон распределения; 4) нормальный логарифмический закон распределения

Для исходной выборки (рис 2.8) применим метод наибольшего правдоподобия: останавливаемся на трех видах стандартных распределений, а именно экспоненциальном, нормальном и нормальном логарифмическом. Находим точечные оценки этих распределений – первый и второй моменты согласно литературе [72].

Функции правдоподобия для выбранных видов распределения. Экспоненциального:

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, \lambda) = \lambda^n \prod_{i=1}^n e^{-\lambda \xi_i} \quad (2.26)$$

Нормального:

$$L(a, \sigma) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, a, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(\xi_i - a)^2}{\sigma^2}\right) \quad (2.27)$$

Логнормального:

$$L(a, \sigma) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, a, \sigma) = \frac{1}{\sigma \xi_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(\ln \xi_i - a)^2}{\sigma^2}\right) \quad (2.28)$$

Логарифмируя функции (2.26 – 2.28) получим:

$$\ln L(\lambda) = n \ln \lambda - \lambda \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (2.29)$$

$$\ln L(a, \sigma) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, a, \sigma) = -n \ln \sigma - n \ln \sqrt{2\pi} - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\xi_i - a)^2 \quad (2.30)$$

$$\ln L(a, \sigma) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, a, \sigma) = -n \ln \sigma - n \ln \xi_i - n \ln \sqrt{2\pi} - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\ln \xi_i - a)^2 \quad (2.31)$$

Определив условия экстремума по первой производной параметра λ для первого распределения и a, σ для остальных, получим оценочные выборочное среднее и выборочную дисперсию.

Используя критерий согласия Пирсона, оцениваем возможность аппроксимации экспериментальных данных приведенными выше видами распределений.

Статистика критерия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - np_j)^2}{np_j} \quad (2.32)$$

где np_j - ожидаемое количество попаданий в j -й интервал, n_j - наблюдаемые величины. Результаты расчетов сведем в таблицу 2.4

Таблица 2.4

Оценочные величины распределений метода наибольшего правдоподобия

Распределение	Выборочное среднее	Выборочная дисперсия	Критерий Пирсона χ^2
Экспоненциальное	4971,73	4971,73	0,0008
Нормальное	4971,73	2094,77	0,3069
Логнормальное	4568,16	1614,12	0,8889

В результате подсчета критерия согласия Пирсона, получаем вероятности соответствия распределениям, которые приведены в таблице 2.4. Следовательно, при поступлении угля из нескольких очистных забоев, наиболее точно вероятности нахождения минутных значений угольных грузопотоков описывает нормальное логарифмическое распределение.

По установленному закону распределения угольного потока в узлах конвейерной сети определяют электропотребление конвейеров за смену или более длительный период используя точечные оценки распределения, принимая допущение о линейной зависимости расхода электроэнергии от массы груза на конвейере:

$$F(QS) = (a \cdot QS + b) / \eta_{\text{мех}}, \quad (2.33)$$

где a , b – коэффициенты, учитывающие удельную массу ленты, роликов, сцепление между лентой и барабаном, сопротивление движению ленты; QS – масса груза на конвейере, кг. Используя выражение (2.1) коэффициенты a и b определяются:

$$a = g \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta) \quad (2.34)$$

$$b = 2 \cdot l \cdot g \cdot q_n \cdot c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + l \cdot g \cdot \omega \cdot (q'_p + q''_p) \quad (2.35)$$

Масса груза на конвейере определяется:

$$QS = M[Q(t)] \cdot l \quad (2.36)$$

где $Q(t)$ – грузопоток, кг/мин;

Расход электроэнергии при $v_k = const$ за смену или сутки:

$$W = F(M[Q(t)] \cdot l) \cdot v_k \cdot t \quad (2.37)$$

где v_k – скорость движения конвейера, м/с

Отметим, что использовать оценочные характеристики распределения угольного потока для определения расхода электроэнергии возможно только при линейной зависимости энергопотребления от нагрузки, который является справедливым для горизонтальных и работающих на уклон конвейеров.

В пункте 2.1 (зависимости (2.11), рисунки 2.2-2.3) разработана модель определения минимально возможного удельного расхода электроэнергии для конвейера с конкретными условиями установки. Но для бремсберговых конвейеров, привод которых при наличии определенной массы груза переходит в генераторный режим работы, понятие минимально достижимого электропотребления отсутствует, так как осуществляется рекуперация.

Разброс электропотребления конкретного конвейера определяется изменением сопротивления движению ленты [17], переходом привода в рекуперативный режим при отрицательных углах установки [14] либо одновременно и тем, и другим. В литературе [73,14,61] называются различные предельные углы установки конвейера, меньше которых возможен рекуперативный режим: от -3° до -6° .

Все это приводит к необходимости определения законов распределения массы груза на бремсберговом конвейере, которые зависят от статистических характеристик грузопотоков из очистных забоев.

Согласно [18,19] угольный поток из очистного забоя описывается как стационарный марковский процесс с временем корреляции, равным одной минуте. Принимаем, что на протяжении минуты поток не изменяется. Согласно

проведенным исследованиям [13], в период поступления угля поток распределен нормально с математическим ожиданием M_q (кг/мин). Случайные периоды наличия и отсутствия горной массы описываются пуассоновским распределением с математическими ожиданиями T_n и T_o .

Введем параметр n (2.38), при помощи которого можно охарактеризовать вероятность степени заполнения конвейера грузом в зависимости от значений интервалов T_n и T_o , длины конвейера L и скорости ленты v . Чем больше произведение $(T_n + T_o) \cdot v$, тем больше вероятность работы конвейера в «крайних» состояниях: либо полностью пустым, либо полностью загруженным. И напротив, чем меньше произведение $(T_n + T_o) \cdot v$ тем больше вероятность работы конвейера со средней (или близкой к средней) загрузкой при одном и том же значении L .

$$n = L / (T_n + T_o) \cdot 60v \quad (2.38)$$

Для дальнейшего решения примем упрощение, округлив n до целого. Заполнение конвейера разделяем на n частей. Тогда для конвейера с длиной L и скоростью ленты v , который принимает груз из одной лавы, вероятности его заполнения на величину x/n будет определяться согласно биномиальному распределению Ньютона (2.39), где x – целое число, $x \in n$. Отношение x/n характеризует полноту загрузки конвейера. При $x/n=1$ конвейер загружен равномерно по всей длине на 100 % грузопотоком с параметрами, численно равными математическому ожиданию поступающего на конвейер потока угля. При $x/n=0,5$ конвейер загружен на 50%, при $x/n=0,2$ – на 20 %.

$$p_n(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right)^x \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu} \right)^{n-x}, \quad (2.39)$$

где $\lambda \cdot \Delta t$ – вероятность перехода от 1 к 0; $\mu \cdot \Delta t$ – вероятность перехода от 0 к 1; Δt – рассматриваемый интервал времени; $\lambda = 1/T_n$, $\mu = 1/T_o$, где T_n и T_o – математические ожидания времени поступления и отсутствия грузопотока.

Логично предположить, что если груз транспортируется конвейером за время близкое к одной минуте или меньшее, то при допущении о минутной корреляции грузопотока [16,18] работа конвейера возможна лишь в двух дискретных состояниях: загруженном на величину минутного математического ожидания грузопотока при его наличии и полностью пустым при его отсутствии. Вероятности пребывания конвейера в таких состояниях соответственно определяются вероятностями наличия и отсутствия грузопотока за интервал времени, равный одной минуте.

На рис 2.9 показана плотность вероятности частичной загрузки конвейера в зависимости от его конструктивных параметров и среднего времени наличия/отсутствия грузопотока, рассчитанная по формулам (2.38) и (2.39). Приведены два случая: а) $n=2$, б) $n=10$, демонстрирующие как параметр n влияет на вероятность заполнения конвейера до определенного уровня. Например, $n=2$: длина конвейера $L=600$ м, скорость движения ленты – 1 м/с, математические ожидания периодов поступления и отсутствия груза соответственно $T_n = 4$ мин и $T_0 = 6$ мин; $n=10$: случай длинного конвейера 1500 м, скорость движения ленты – 0,5 м/с, математические ожидания периодов поступления и отсутствия груза соответственно $T_n = 2$ мин и $T_0 = 3$ мин. По математическим ожиданиям интервалов отсутствия и наличия грузопотока не сложно подсчитать, что коэффициент машинного времени работы очистного забоя для обоих случаев составляет $K_M=40\%$

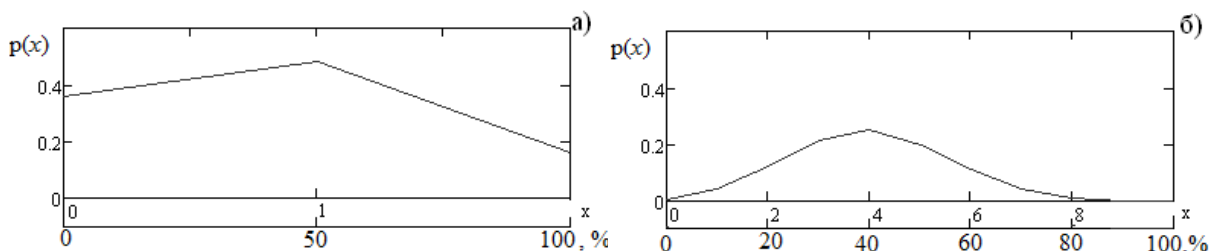


Рисунок 2.9. Плотность вероятности частичной загрузки конвейера а) $n=2$, б) $n=10$

Анализируя рис. 2.9, можем сделать вывод, что чем больше n , тем ближе математическое ожидание загрузки конвейера по массе к значению коэффициента машинного времени очистного забоя, с которого поступает

уголь, а при малых n ($n=1,2$) более вероятны режимы работы либо вхолостую, либо близким к полному заполнению конвейера.

Параметр n влияет на расход электроэнергии для бремсберговых конвейеров с углами установки менее -6^0 привод которых может переходить в генераторный режим работы. Для бремсбергового конвейера

$$F = \begin{cases} a(QS + b) / \eta_{\text{мех}} & \text{при } a(QS + b) \geq 0 \\ a(QS + b) \cdot \eta_{\text{мех}} & \text{при } a(QS + b) < 0 \end{cases} \quad (2.40)$$

Тогда при $v_k = \text{const}$ электропотребление конвейера за сутки или смену определяется как:

$$W = F(QS(Q(t_i), Q(t_{i+1}), Q(t_{i+n}))) \cdot v_k \cdot t \quad (2.41)$$

где $Q(t_i), Q(t_{i+1}), Q(t_{i+n})$ – значения процесса $Q(t)$, которые определяют массу груза на конвейере, $QS = \sum_{x=i}^{i+n} Q(t_x)$.

Например, для конвейера 1л100к с параметрами: $q''_p = 9,2$ кг/м; $q'_p = 20$ кг/м; $q_d = 15$ кг/м; $\omega = 0,06$ с' = 1,1; $L = 1000$ м; $\beta = -6^0$; $v = 2$ м/с зависимость электропотребления от массы угля на нем имеет вид (рис 2.8):

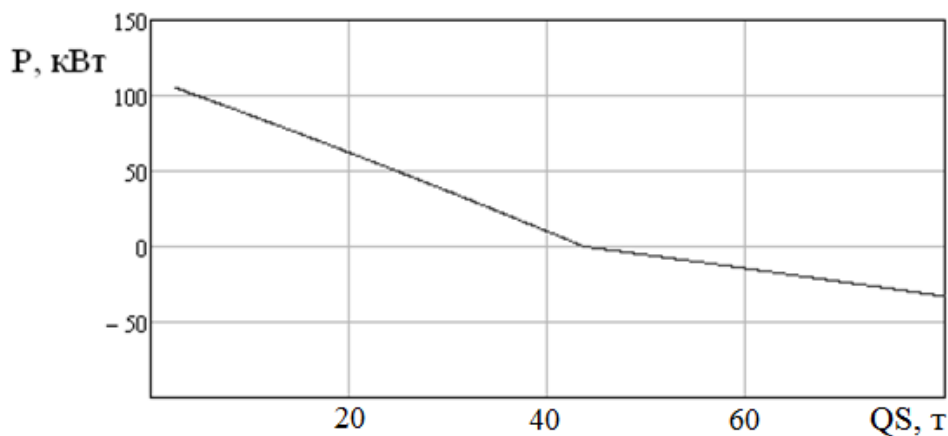


Рисунок 2.10 Зависимость мощности потребления бремсбергового конвейера длиной 1 км и углом установки -6^0 от массы угля на нем

Определим расход электроэнергии при одном и том же объеме перемещенного угля (примем $Q = 800$ т/смена), но разных n ($n=1,2,3,5,6$). При длительности смены 6 часов. Результаты расчетов приведем в таблице 2.5:

Таблица 2.5 Расход электроэнергии бремсберговым конвейером за смену в зависимости от n

Параметр n	1	2	3	4	5	6
Расход энергии конвейером W , кВт*ч	319,2	246,6	234,6	218	213,7	210,6

Так как вид кривой на рисунке 2.10 сохраняется для всех конвейеров с углами установки менее -6^0 , можно утверждать, что при увеличении n энергоэффективность конвейера увеличивается. Также можно утверждать, что величина случайного сменного (или суточного) электропотребления бремсбергового конвейера может изменяться в широких пределах (для приведенного случая от 210 до 319 кВт*ч/смена) при одном и том же объеме перевезенной горной массы. Это объясняется дисперсией величины фактических интервалов поступления и отсутствия грузопотока за определённую смену от значений их математического ожидания.

Возможные значения математического ожидания удельного расхода электроэнергии бремсберговым конвейером при определенном суточном грузопотоке рассчитываются по зависимостям (2.6, 2.36). На рисунке 2.11 приведена зависимость математического ожидания удельного расхода электроэнергии от суточного грузопотока для конвейера 1л100к со следующими параметрами: $q''_p = 9,2$ кг/м; $q'_p = 20$ кг/м; $q_l = 15$ кг/м; $c' = 1,1$; $L = 640$ м; $\beta = -6^0$; $v = 2$ м/с. В той же координатной плоскости приведены предельно возможные (в меньшую и большую стороны) расчетные значения удельного электропотребления. Большой диапазон между кривыми наибольшего и наименьшего электропотребления конвейера при одном и том же сменном грузопотоке наблюдается вследствие перехода привода конвейера

в рекуперативный режим при определенной массе груза на нем и сниженном КПД процесса рекуперации, что обусловлено дополнительными силами трения.

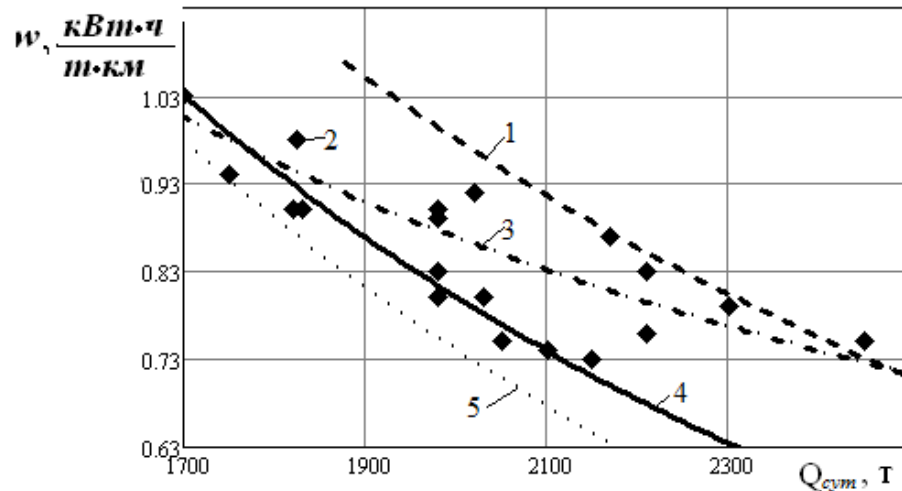


Рисунок 2.11 Аналитически-статистическая модель зависимости удельного электропотребления конвейера 1л100к от суточного грузопотока

На рисунке 2.11 кривые: 4 – математическое ожидание суточного электропотребления, 5 – минимальное возможное электропотребление, 1 – максимальное возможное электропотребление, 3 – регрессионная зависимость $w_{\text{рег}}(Q)=0,093+1551,9/Q$, построенная по экспериментальным данным [12], 2 – экспериментальные точки.

При количестве грузопотоков более одного вероятностная нагрузка на конвейер определяется с учетом вероятности соответствующих суммарных состояний от каждого грузопотока по известным законам теории вероятности [72].

К примеру, если на конвейер сходятся 2 потока, каждый с $n=3$ (при этом для результирующего потока n увеличивается до 5) и математическими ожиданиями интервалов отсутствия и наличия груза $T_n = 4$ мин и $T_0 = 6$ мин, то вероятности заполнения конвейера на определенный процент приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 Вероятность загрузки конвейера на определенный уровень

x (% загрузки)	1(0%)	2 (25%)	3 (50 %)	4 (75 %)	5 (100%)
P	0,128	0,346	0,346	0,154	0,026

Значения, приведенные в таблице 2.6 свидетельствуют о том, что при увеличении количества грузопотоков вероятность появления максимальной загрузки конвейера снижается.

Из рисунка 2.11 следует, что расход электроэнергии зависит от распределения минутных значений грузопотоков во времени: минимальное возможное электропотребление (кривая 5) наблюдается при полностью выровненном грузопотоке, а максимальное (кривая 1) – при работе конвейера в двух дискретных состояниях: пустым либо полностью заполненным. При увеличении $n = L / (T_n + T_o) \cdot 60v$ снижается удельный расход электроэнергии при одном и том же грузопотоке на бремсберговом конвейере. Также снижается удельный расход электроэнергии при увеличении количества суммируемых грузопотоков, так как при этом уменьшаются интервалы отсутствия грузопотока

2.5 Выводы

1. Для сравнения энергоэффективности режимов работы ленточных конвейеров их необходимо приводить к общим условиям работы: углу установки $\beta=0^\circ$, при этом влияние сопротивления движению частей ω можно не учитывать. Установлена зависимость (2.11) минимального удельного электропотребления конвейера с определенными условиями его установки, которая позволяет определить резервы энергоэффективности, которые достигают 40 – 60 %.

2. Предложен алгоритм (рисунок 2.4), позволяющий идентифицировать минутные значения количества угля из очистного забоя при использовании корреляционной связи скорости подачи комбайна от электрических нагрузок комплекса. Алгоритм позволяет получить математическое ожидание минутных значений грузопотока из очистного забоя с точностью $\pm 12\%$ для крайних значений и $\pm 4\%$ для средних с доверительной вероятностью 0,95. При этом точность определения индивидуальных значений составляет $\pm 34\%$ с

доверительной вероятностью 0,95. Используя разработанный алгоритм, целесообразно осуществлять определение фактических значений удельного расхода электроэнергии магистрального конвейерного транспорта. Разработанный алгоритм является основой метода установления энергоэффективности магистрального конвейерного транспорта угольных шахт.

3. Определение удельного расхода электроэнергии конвейеров близких к горизонтальным и работающих на уклон, с достаточной точностью осуществляется при учете законов распределения угольных потоков в узлах конвейерной сети. Экспериментально установлено, что при работе одного очистного забоя грузопоток распределяется по нормальному закону, а при суммировании нескольких грузопотоков распределение приближается к логарифмическому нормальному закону.

4. Фактическое значение электропотребления бремсбергового конвейера может иметь диапазон изменения математического ожидания до 30 % при грузопотоке с одним и тем же суточным объемом. Вероятный расход электроэнергии бремсберговым конвейером может быть определен с использованием параметра n (2.38) при распределении груза на конвейерной ленте по биномиальному закону. Параметр n зависит от скорости движения ленты и длины конвейера, а также математического ожидания времени поступления и отсутствия грузопотока. При одном и том же суточном объеме перемещенного конвейером угля с увеличением n удельное электропотребление снижается.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ КОНВЕЙЕРОВ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕНТЫ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Влияние регулируемого привода на статистические характеристики грузопотоков в узлах транспортной сети

Регулирование скорости движения конвейерной ленты изменяет статистические характеристики грузопотока, которые влияют на скорость движения ленты последующих конвейеров и, как следствие, на их энергоэффективность.

В общем случае грузопоток из очистного забоя представляет собой последовательность импульсов случайной длины со случайными интервалами отсутствия груза [18,19]. Грузопоток может быть описан как непрерывный случайный процесс. На рисунке 3.1 представлен смоделированный в пакете SIMULINK MATLAB грузопоток по алгоритму, приведенному в литературе [74] и данным, полученным в результате проведения натурального эксперимента [13].

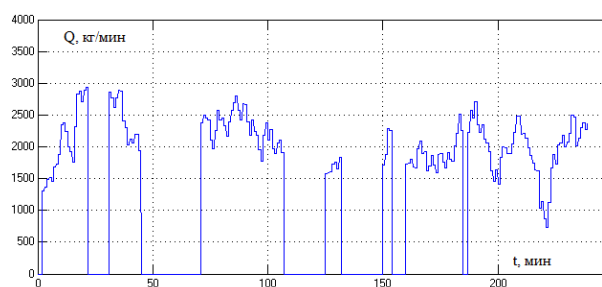


Рисунок. 3.1. Пример реализации транспортного грузопотока

Выражение для плотности вероятности распределения грузопотока из очистного забоя [18]:

$$p(Q) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda} \times \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \quad (3.1)$$

где $\delta(0)$ – дельта-функция, описывающая вероятность отсутствия грузопотока, M_Q – математическое ожидание грузопотока, $\sigma_Q = \sqrt{D_Q}$ – среднее квадратичное отклонение грузопотока, D_Q – дисперсия грузопотока.

Используя выражение (3.1) уточним закон распределения потока угля на выходе конвейера при регулируемой скорости движения ленты. Необходимость уточнения связана с изменением технологического режима работы конвейера.

Конвейер с регулируемой скоростью движения ленты является звеном запаздывания с переменной задержкой, который работает пропорционально входящему грузопотоку. При этом после достижения горной массой конца конвейера выходной поток идентичен входному, с учетом, что при постоянстве скорости движения ленты изменения поступающего объема груза от начала до конца доходят за одинаковые промежутки времени, а при регулировании скорости движения ленты передаются мгновенно, так как уровень заполнения конвейера по всей длине все время поддерживается практически постоянным. В то же время при отсутствии входного грузопотока в действующих системах такой режим нарушается, конвейер полностью не останавливается, а работает с минимально возможной скоростью, обычно в диапазоне 1/10 – 1/4 от номинальной [44].

Для изучения указанных различий введем параметр "коэффициент скорости" $K_{ск}$, учитывающий глубину регулирования скорости в период непоступления горной массы на конвейер. В качестве $K_{ск}$ принимается отношение минимально возможной скорости к скорости, которая устанавливается системой регулирования при поступлении потока равного его математическому ожиданию. Коэффициент $K_{ск}$ численно обратно пропорционален величине "D", известной в теории привода как глубина регулирования [75]. Учет коэффициента $K_{ск}$ позволяет представить известную

запись для расчета плотности вероятности закона распределения скорости движения конвейерной ленты при ее регулировании в виде:

$$p(v_k) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \delta(0) \cdot K_{ск} \cdot v_{ном} + \frac{\mu}{\mu + \lambda} \times \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \cdot v_{ном} \quad (3.2)$$

где $v_{ном}$ – скорость, которая соответствует математическому ожиданию $M_{Q'}$ потока, поступающего на конвейер.

При имеющийся плотности вероятности распределения грузопотока согласно выражения (3.1) и плотности вероятности распределения скорости ленты согласно выражения (3.2), поступающий на ленту уголь будет распределяться следующим образом: в периоды поступления горной массы конвейер заполняется равномерно на заранее выбранный уровень (назовем его "максимальный"), скорость поддерживается пропорциональной входному потоку; в периоды отсутствия поступления горной массы конвейер не заполняется, скорость поддерживается минимальной. Для описания погонного распределения груза на конвейерной ленте введем допущение, представив конвейер бесконечным, при этом среднее значение интервалов отсутствия и наличия груза на ленте будут стремиться к значениям их математических ожиданий. С вероятностью $\mu / (\mu + \lambda \cdot K_{ск})$ погонная нагрузка будет на "максимальном" уровне, а с вероятностью $\lambda \cdot K_{ск} / (\mu + \lambda \cdot K_{ск})$ погонная нагрузка будет отсутствовать.

Здесь следует обосновать длину конвейера, более которой груз на нем будет распределяться как на условно "бесконечном" с вероятностью в 95 %, что упрощает вид выражения плотности вероятности грузопотока. Как известно из математической статистики при экспоненциальном законе распределения значение вероятности 95 % соответствует значению $\ln(20)/\lambda \approx 3/\lambda$ случайной величины. Если время поступления грузопотока больше чем время его

транспортировки, то заполненный участок на конвейере ограничивается длиной конвейера (рис 3.2).

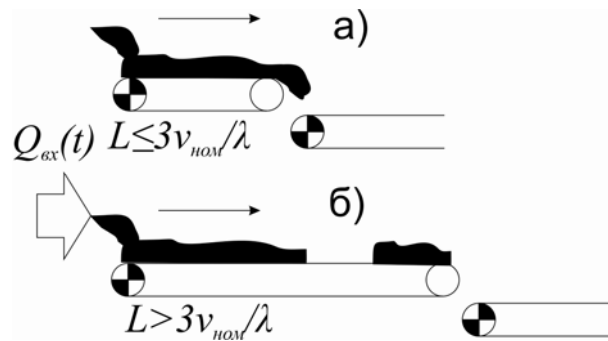


Рисунок 3.2. Распределение груза на конвейере при разных отношениях длины и скорости транспортирования к вероятности поступления груза:

а) длина конвейера $L \leq 3v_{ном}/\lambda$; б) длина конвейера $L > 3v_{ном}/\lambda$.

Изложенное означает, что если утроенное произведение математического ожидания времени поступления грузопотока на скорость транспортирования (отвечающую математическому ожиданию величины потока в период поступления) меньше длины конвейера, то с вероятностью 95% его можно считать условно "бесконечным", то есть 95 % всех периодов поступления полностью "вмещаются" на конвейер. В противном случае необходимо учитывать длину конвейера, влияющую на экспоненциальные распределения [18] величины интервалов отсутствия и наличия грузопотоков на конвейерной ленте.

Схема формирования характеристик грузопотока после конвейера с регулируемой скоростью движения ленты представлена на рисунке 3.3.

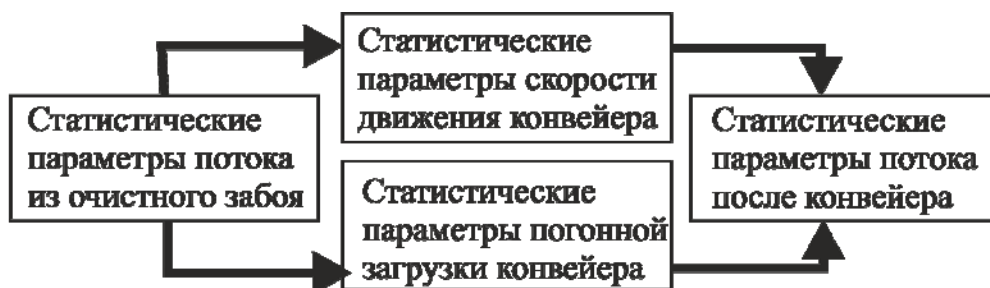


Рисунок 3.3 Схема формирования характеристик грузопотока после регулируемого конвейера

При длине конвейера $l > 3T_{\Pi} v_{ном}$ (условно бесконечный конвейер) плотность вероятности выходного грузопотока описывается выражением (3.3), что следует из композиции плотности вероятности закона распределения скорости движения ленты и закона распределения погонной нагрузки конвейера:

$$p(Q_{вых}) = \frac{\lambda \cdot K_{ск}}{\lambda \cdot K_{ск} + \mu} \cdot \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \cdot (K_{ск} \cdot M_{Q'}) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda} \cdot \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \quad (3.3)$$

В выражении (3.3) вероятность наличия погонной нагрузки на "максимальном" уровне $\frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda} + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda}$ представим двумя составляющими: $\frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda}$ и $\frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda}$, которые соответствуют вероятностям отсутствия и наличия грузопотока на входе конвейера. Таким образом, когда на входе поток отсутствует, на выходе имеется поток с минимальным уровнем $(K_{ск} \cdot M_{Q'})$, а когда поток присутствует, то на выходе имеется поток, аналогичный входному: $\frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right]$.

Анализируя выражение (3.3) можно утверждать, что математическое ожидание вероятности отсутствия грузопотока после конвейера с регулируемой скоростью уменьшилось с $\lambda / (\lambda + \mu)$ для входящего до $\lambda \cdot K_{ск} / (\lambda \cdot K_{ск} + \mu)$ для исходящего потоков. При значениях $\lambda = 0,25$ и $\mu = 0,164$ (приняв $K_{ск} = 0,1$) полученных в ходе эксперимента на шахте "Павлоградская", для потока угля из очистного забоя найдем соответствующие значения приведенных выражений $\lambda / (\lambda + \mu) = 0,604$ и $\lambda \cdot K_{ск} / (\lambda \cdot K_{ск} + \mu) = 0,132$. Представляет интерес то, что

время работы последующего конвейера с регулируемым приводом на минимальной скорости, определяемой коэффициентом $K_{ск}$, увеличится с $\lambda / (\lambda + \mu)$ до $\frac{\lambda \cdot K_{ск}}{\lambda \cdot K_{ск} + \mu} + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda}$, что для рассмотренных ранее значениях λ и μ составит 0,604 и 0,656 соответственно. Это означает, что регулирование скорости движения конвейерной ленты на последовательно установленных конвейерах обеспечивает дополнительное снижение расхода электроэнергии за счет увеличения времени работы каждого последующего конвейера с минимальной скоростью.

От случая "бесконечного" конвейера перейдем к реальному конвейеру с конечной длиной. Если конвейер не "бесконечный", математическое ожидание интервалов наличия и отсутствия груза на конвейере принимают вид:

$$T_n / \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном}}\right) \right) \quad (3.4)$$

$$T_0 / \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном} K_{ск}}\right) \right) \quad (3.5)$$

где l – длина конвейера, м, $v_{ном}$ – скорость конвейера при поступлении математического ожидания грузопотока, м/с.

Выражения (3.4, 3.5) следуют из экспоненциального распределения длительности периодов поступления и отсутствия груза из очистного забоя [18].

При длине конвейера $l \leq 3T_{II} v_{ном}$, используя выражение (3.3) и умножая соответствующие вероятности поступления и непоступления грузопотока на выражения (3.4) и (3.5), получим выражение (3.6):

$$\begin{aligned}
p(Q_{\text{вых}}) = & \frac{\lambda \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{\text{ном}} K_{\text{ск}}}\right)\right) \cdot K_{\text{ск}}}{\lambda \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{\text{ном}} K_{\text{ск}}}\right)\right) \cdot K_{\text{ск}} + \mu \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{\text{ном}}}\right)\right)} \cdot \delta(0) + \\
& + \frac{\mu \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{\text{ном}}}\right)\right)}{\mu \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{\text{ном}}}\right)\right) + \lambda \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{\text{ном}} K_{\text{ск}}}\right)\right) \cdot K_{\text{ск}}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \cdot (K_{\text{ск}} \cdot M_Q) + \\
& + \frac{\mu \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{\text{ном}}}\right)\right)}{\mu \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{\text{ном}}}\right)\right) + \lambda \left(1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{\text{ном}} K_{\text{ск}}}\right)\right) \cdot K_{\text{ск}}} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda} \cdot \frac{1}{Q \sigma_Q \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(Q - M_Q)^2}{2\sigma_Q^2}\right]
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Выражение (3.6) является общим видом плотности вероятности распределения грузопотока после конвейера с регулируемым приводом. При уменьшении отношения длины конвейера к номинальной скорости выражение (3.6) вырождается в частный случай – выражение (3.3).

При длине конвейера меньше, чем $3T_{\text{II}} v_{\text{ном}}$ (из рисунка 3.2, используя $\lambda = 1/T_{\text{II}}$) распределение погонной нагрузки на конвейере с уменьшением длины будет приближаться к аналогичному конвейеру с нерегулируемой скоростью движения ленты. Выражения (3.3, 3.6) являются моделью для определения характеристик грузопотока после конвейера с регулируемой скоростью движения ленты, который принимает уголь из одной лавы.

Используя выражение (3.3) определим плотность вероятности грузопотока после его прохождения через k конвейеров. Интервал отсутствия грузопотока уменьшается после каждого конвейера с регулируемой скоростью движения ленты в $K_{\text{ск}}$ раз. Поэтому вероятность отсутствия грузопотока после k -го подряд установленного конвейера равна $\lambda \cdot K_{\text{ск}}^k / (\lambda \cdot K_{\text{ск}}^k + \mu)$. При допущении, что последовательно установленные конвейера одинаковые, плотность вероятности грузопотока после каждого конвейера определяется следующим выражением (3.7):

$$\begin{aligned}
 p(Q_{\text{вых}}) = & \frac{\lambda \cdot K_{\text{ск}}^k}{\lambda \cdot K_{\text{ск}}^k + \mu} \cdot \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{\text{ск}}^k} \cdot p(v_{\min(k-1)}) \cdot (K_{\text{ск}} \cdot M_{Q'}) + \\
 & + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{\text{ск}}^k} \cdot [1 - p(v_{\min(k-1)})] \cdot \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

где k – порядковый номер конвейера, $p(v_{\min(k-1)})$ – вероятность движения с минимальной скоростью предыдущего по направлению движения грузопотока конвейера.

Вероятностное распределение результирующего потока в узлах транспортной схемы при суммировании n регулируемых и m нерегулируемых потоков (рисунок 3.4) определим с учетом выражений (3.3, 3.6, 3.7).

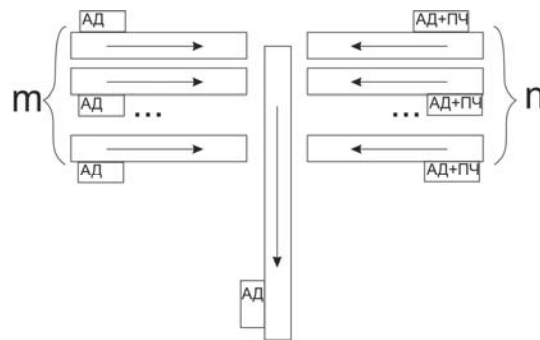


Рисунок 3.4 Схема транспортной сети при слиянии угольных потоков с n регулируемым и m нерегулируемым приводом конвейеров. АД – асинхронный двигатель, АД+ПЧ – асинхронный двигатель с преобразователем частоты.

Для определения вероятностных характеристик грузопотоков в узлах системы магистрального транспорта примем следующие допущения: после нерегулируемого конвейера, принимающего уголь из одной лавы, выходит поток, который представляется двумя дискретными состояниями:

- отсутствие потока;
- наличие потока на уровне математического ожидания и флуктуаций вокруг этого значения.

После конвейеров с регулируемой скоростью образуется грузопоток, который представляется тремя дискретными состояниями:

- отсутствие потока;
- величина математического ожидания поступления потока на конвейер (включая флуктуации);
- наличие грузопотока на уровне $(K_{ck} \cdot M_{Q'})$ в периоды отсутствия на входе и наличия на выходе конвейера горной массы.

В этом случае для определения статистических характеристик результирующего (суммарного) грузопотока можно использовать слагаемые выражений (3.3, 3.6, 3.7). Сформируем для n регулируемых грузопотоков два массива значений. В первом (3.8), по столбцам вносятся вероятности отсутствия грузопотока, наличие на минимальном уровне и на уровне математического ожидания, по строкам – номера грузопотоков. Во втором (3.9), по столбцам вносятся соответствующие математические ожидания уровней поступления грузопотоков, по строкам – то же, что и для первого массива значений. Разработаем алгоритм, необходимый для расчета произведения соответствующих вероятностей наличия результирующего грузопотока на определенном уровне или его отсутствия. Данный прием используется ввиду нелинейных зависимостей электропотребления конвейера при регулировании скорости движения ленты в зависимости от загрузки. При этом необходимо учитывать каждый уровень загрузки конвейера отдельно. Для этого использованы методы сложения и умножения вероятностей [72] (3.8, 3.9).

$$n_{вер} = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_1 \cdot K_{ck1}}{\lambda_1 \cdot K_{ck1} + \mu_1} & \frac{\mu_1}{\lambda_1 \cdot K_{ck1} + \mu_1} \cdot \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \lambda_1} & \frac{\mu_1}{\lambda_1 \cdot K_{ck1} + \mu_1} \cdot \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\lambda_i \cdot K_{cki}}{\lambda_i \cdot K_{cki} + \mu_i} & \frac{\mu_i}{\lambda_i \cdot K_{cki} + \mu_i} \cdot \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} & \frac{\mu_i}{\lambda_i \cdot K_{cki} + \mu_i} \cdot \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$n_{ур} = \begin{pmatrix} 0 & K_{ck1} \cdot M_{Q'1} & M_{Q'1} \text{ или } \left(\frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \right)^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & K_{cki} \cdot M_{Q'i} & M_{Q'i} \text{ или } \left(\frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \right)^2 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

где $\lambda_i \cdot \Delta t$ – вероятность перехода от 1 к 0 i -го потока угля; $\mu_i \cdot \Delta t$ – вероятность перехода от 0 к 1 i -го потока угля; Δt – рассматриваемый интервал времени, M_{Q_i} – математическое ожидание значений i -го грузопотока, σ_{Q_i} – среднее квадратичное отклонение i -го грузопотока.

Для конвейеров с нерегулируемой скоростью движения ленты сформируем такие же массивы, которые отличаются тем, что второй столбец в них будет равен нулю, потому что у потока после конвейера с нерегулируемой скоростью движения ленты существуют лишь два дискретных состояния. В общем случае в каждый из массивов вносятся характеристики потоков после всех конвейеров. Алгоритм, представленный на рисунке 3.5, реализует определение плотности вероятности минутных значений полезного ископаемого в узлах транспортной схемы при суммировании нескольких грузопотоков.

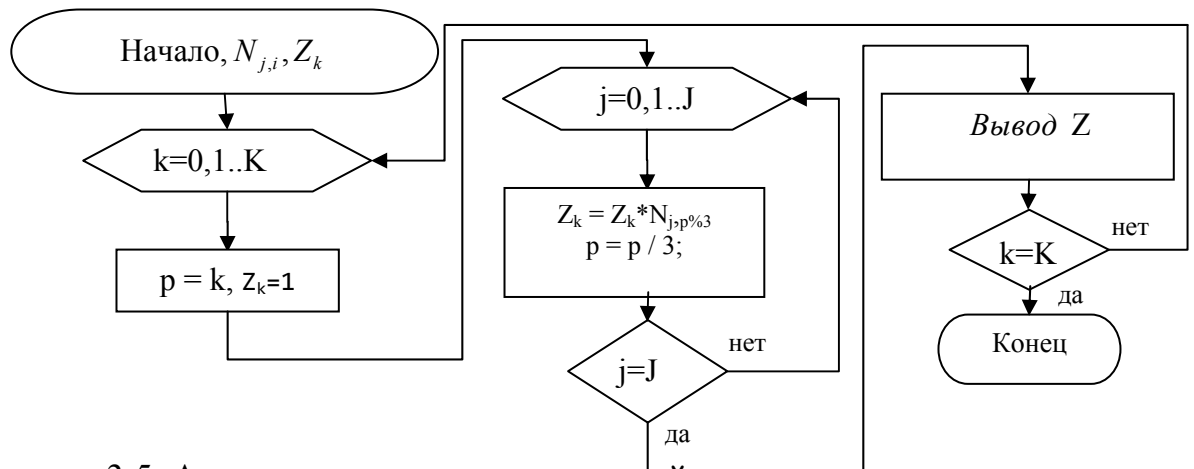


Рисунок 3.5. Алгоритм нахождения значений плотности вероятности при суммировании нескольких потоков от регулируемых и нерегулируемых конвейеров

Алгоритм работает следующим образом. Массив вероятностей нахождения грузопотоков на определенном уровне $N_{j,i}$ является исходными данными, где i – количество грузопотоков, j – количество дискретных уровней каждого грузопотока, Z_k – пустой массив вероятностей уровней суммарного

грузопотока, $k = j^i$. Для каждого значения Z_k определяют произведение k -ой вероятности результирующего потока и j -ой вероятности исходного $p\%3$ -го потока, где p принимает значения от k до 1, каждый цикл уменьшаясь в три раза. $\%$ - операция целочисленного деления.

В Приложении Ж приведена программа, написанная на языке java 7, которая соответствует приведенному на рис. 3.5 алгоритму для нахождения плотности вероятности состояний груза в узле суммирования пяти потоков.

Дискретные уровни результирующего потока Z_{yp} получены путем суммирования элементов массива n_{yp} , для которых определяются произведение соответствующих вероятностей из массива $n_{вер}$. Алгоритм обработки фактически повторяет принцип работы с массивом $n_{вер}$, но определяется не произведение определенных элементов исходного массива, а их сумма.

Для проверки точности предложенного алгоритма выполнено моделирование по разработанным в 4 главе имитационным моделям для случая из четырех регулируемых конвейеров (рисунок 3.6), на которые поступает уголь из четырех независимых очистных забоев.

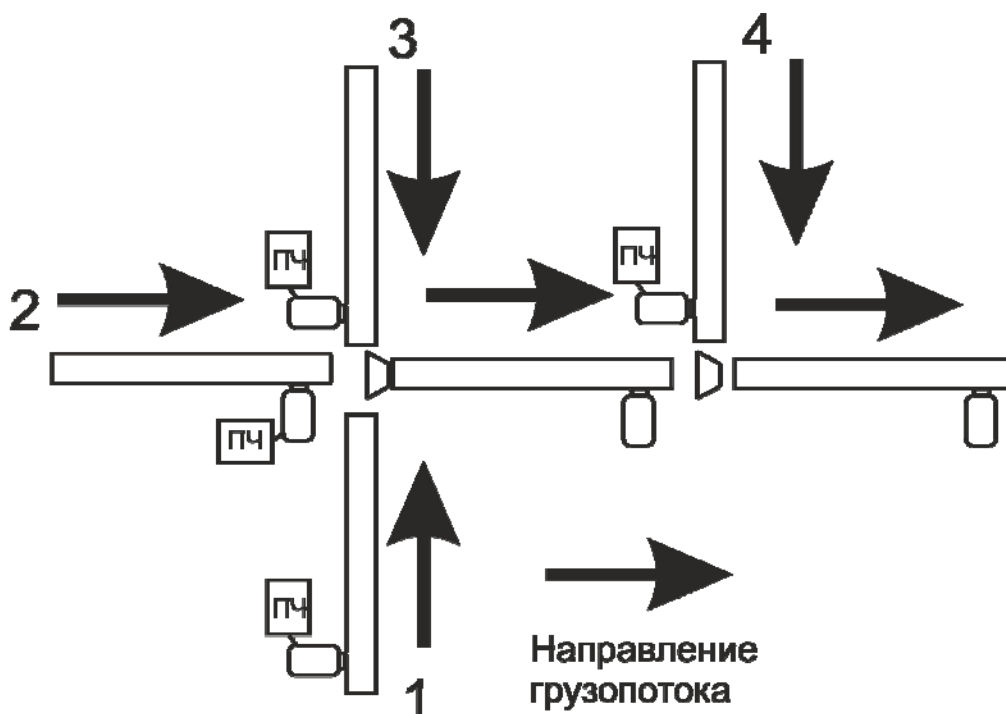


Рисунок 3.6. Расчетная схема для моделирования грузопотоков

Суммировались грузопотоки в один узел транспортной схемы. Параметры потоков одинаковы и приняты $\lambda = 0,25$, $\mu = 0,164$, $M(Q) = 3420$ кг/мин, $D(Q) = 202500$ (кг/мин)². Полученный с помощью имитационного моделирования за сутки (рисунок 3.7) грузопоток с погрешностью до 10 % совпадает с расчетным при использовании предложенного алгоритма на рисунке 3.5, что свидетельствует о приемлемости предложенного подхода.

На рисунке 3.7 представлен смоделированный суммарный поток из четырех лав за десять часов с дискретностью поступления груза в 1 мин. Каждый поток проходит через один конвейер с регулируемой скоростью движения ленты. Конвейера с нерегулируемой скоростью движения конвейерной ленты не вносят изменения в статистические характеристики грузопотоков.

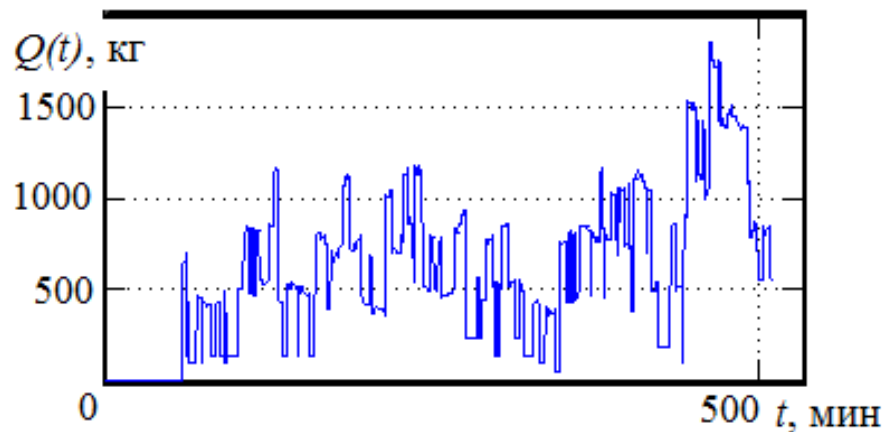


Рисунок 3.7. Смоделированный в пакете MATLAB Simulink суммарный поток из четырех лав

Таким образом, получены выражения и алгоритмы для нахождения значений плотности вероятности грузопотоков в узлах транспортной схемы при известных законах распределения угольного потока из каждого очистного забоя, которые позволят выполнить оценку электропотребления конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты.

3.2 Повышение энергоэффективности транспортировки груза магистральными конвейерами при использовании регулируемого привода

Изменение статистических характеристик грузопотоков с помощью регулируемого привода влияет на электропотребление шахтных конвейеров, что обосновано в первом разделе. Установим влияние регулируемой скорости движения ленты и характеристик поступающего грузопотока на электропотребление конвейера в связи с внедрением ЧРП на магистральном транспорте угольных шахт. Существующие модели определения электропотребления при регулируемой скорости движения ленты не учитывают характеристики поступающих на конвейер грузопотоков. Принимаем допущение, что зависимость необходимого для передвижения частей усилия от массы груза на конвейере, имеет линейный характер, что отражено в выражении (2.38). Скорость является функцией от грузопотока:

$$v_k(Q_i) = \begin{cases} K_{\Pi} \cdot Q_i(t_i) & \text{при } Q_i(t_i) > 0 \\ K_{ск} \cdot v_{НОМ} & \text{при } Q_i(t_i) = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

где K_{Π} – коэффициент пропорциональности, м/кг.

Масса груза на конвейере при регулируемой скорости движения ленты определяется численными методами [47], поскольку зависит от переменной транспортной задержки:

$$QS = f(Q(t), v_k(Q(t))) \quad (3.11)$$

Электропотребление конвейера за сутки или смену:

$$W = F(QS[Q(t_i), Q(t_{i-1}), Q(t_{i-\tau}), v_k(Q(t_i))]) \cdot v_k(Q(t_i)) \cdot t \quad (3.12)$$

где $Q(t_{i-\tau})$ – значения процесса $Q(t)$, которые отстают от $Q(t_i)$ на переменную транспортную задержку τ .

Используя выражения плотности вероятности распределения грузопотока (3.6) и скорости движения ленты конвейера (3.2) для расчета расхода электроэнергии предлагается соотношение:

$$W = F(p(QS) \cdot QS_{\text{МАКС}} \cdot l) \cdot p(v_k) \cdot v_{\text{НОМ}} \cdot t \quad (3.13)$$

где $p(QS)$ – плотность вероятности распределения погонной нагрузки, $QS_{\text{МАКС}}$ – максимально возможная масса груза на конвейере, кг.

Например, плотность вероятности распределения погонной нагрузки на конвейере при поступлении грузопотока из одного очистного забоя:

$$p(QS) = \frac{\lambda \cdot K_{\text{СК}}}{\lambda \cdot K_{\text{СК}} + \mu} \cdot \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{\text{СК}}} \cdot (QS_{\text{МАКС}}) \quad (3.14)$$

Произведем сравнение энергоэффективности ленточных конвейеров с регулируемой и нерегулируемой скоростью движения ленты при известных параметрах их установки и грузопотоков, расположенных по схеме, изображенной на рисунке 3.8 [76]. Параметры установки конвейеров одинаковы и приняты следующие: $q''_p = 9,2$ кг/м; $q'_p = 20$ кг/м; $q_l = 15$ кг/м; $c' = 1,1$; $\omega = 0,06$; $\beta = 0^\circ$; $v = 2$ м/с, $L = 1$ км. Параметры грузопотока из очистного забоя принимаем следующие: $\lambda = 0,25$, $\mu = 0,164$, $M(Q) = 3420$ кг/мин, $D(Q) = 202500$ (кг/мин)². Расчет характеристик потока в узлах линии конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты выполняем по выражению (3.8).

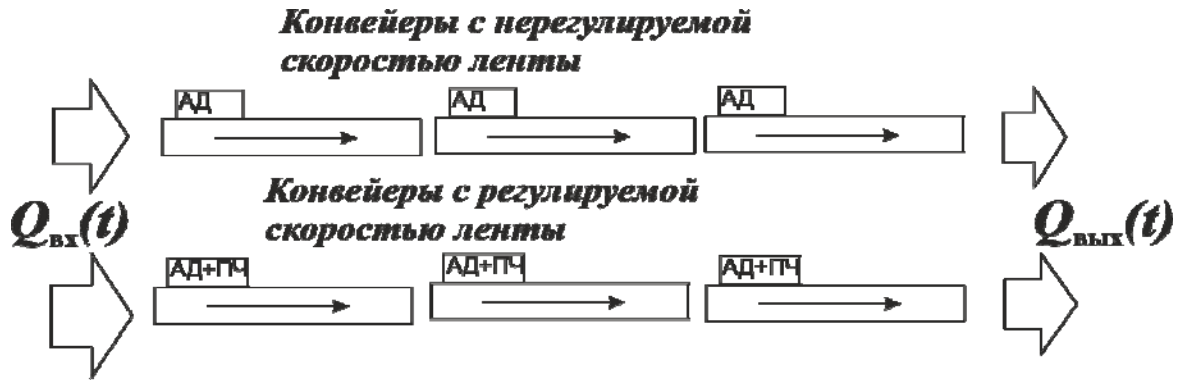


Рисунок 3.8. Схема расположения конвейеров для расчета их электропотребления: АД – асинхронный двигатель; АД+ПЧ – асинхронный двигатель с преобразователем частоты; $Q_{вх}(t)$ и $Q_{вых}(t)$ – входящий и исходящий угольный поток, зависящий от времени.

Определим характер снижения электропотребления установленных подряд конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты (рисунок 3.9) по зависимостям (3.7, 3.13). Принимаем $K_{ск} = 0,25$.

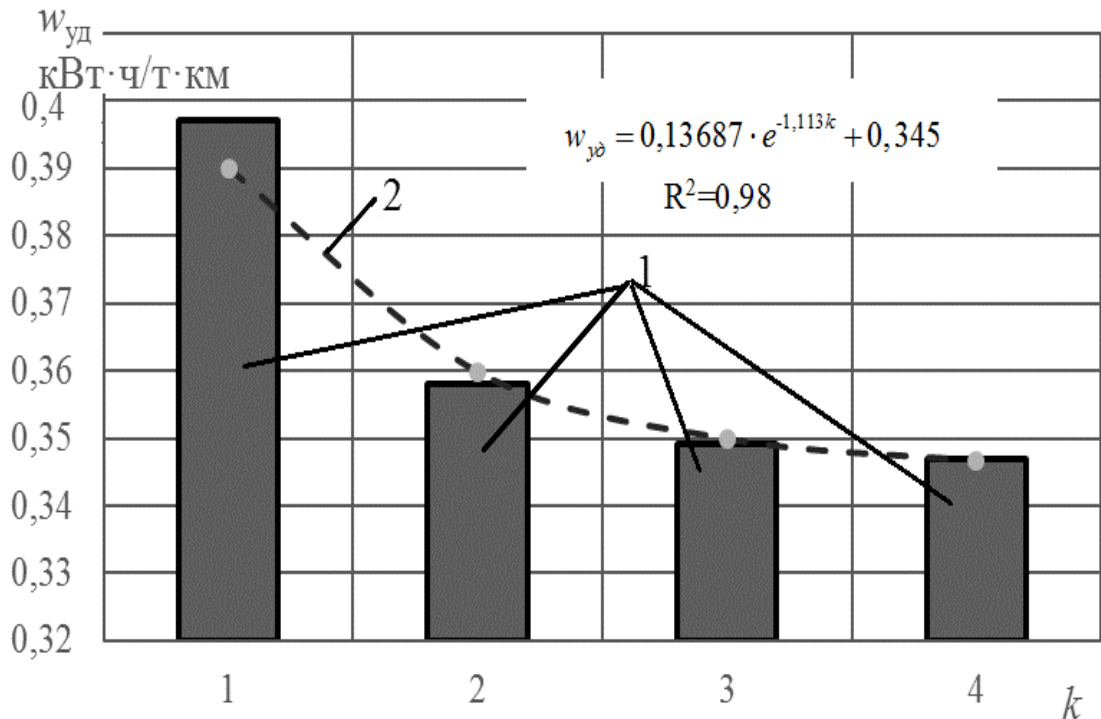


Рисунок 3.9. Зависимость удельного расхода электроэнергии k -ым конвейером в линии с регулируемой скоростью движения ленты: 1) расчетные значения; 2) аппроксимирующая кривая

Приведенные на рисунке 3.9 расчетные значения аппроксимируются кривой с коэффициентом детерминации $R^2=0,98$:

$$w_{y\partial} = 0,13687 \cdot e^{-1,113k} + 0,345 \quad (3.15)$$

Характер зависимости снижения удельного электропотребления подряд установленных конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты экспоненциальный с точностью $\pm 2\%$. Снижение расхода электроэнергии достигается за счет увеличения времени работы на минимальной скорости последующего в линии конвейера. Значения удельного расхода электроэнергии при различных параметрах грузопотоков приведены в приложении Г.

Полученный результат позволяет утверждать о более полном использовании резерва энергоэффективности при регулировании скорости движения ленты подряд установленных конвейеров. С ростом количества конвейеров в линии снижение расхода электроэнергии достигает предельного значения, которое ограничивается минимальной скоростью движения ленты.

Представленная на рисунке 3.10 гистограмма демонстрирует снижение расхода электроэнергии магистральными конвейерами при регулировании скорости движения ленты пропорционально поступающему грузопотоку, а также увеличения количества суммируемых грузопотоков, каждый из которых описывается выражением 3.1 [77,78].

Для удельного расхода электроэнергии на рисунке 3.10 параметры установки конвейеров одинаковы и приняты следующие: $q''_p = 9,2$ кг/м; $q'_p = 20$ кг/м; $q_l = 15$ кг/м; $c' = 1,1$; $\omega = 0,06$; $\beta = 0^\circ$; $v = 2$ м/с, $L = 1$ км. Параметры грузопотока из каждого очистного забоя принимаем следующие: $\lambda = 0,25$, $\mu = 0,164$, $M(Q) = 3420$ кг/мин, $D(Q) = 202500$ (кг/мин)².

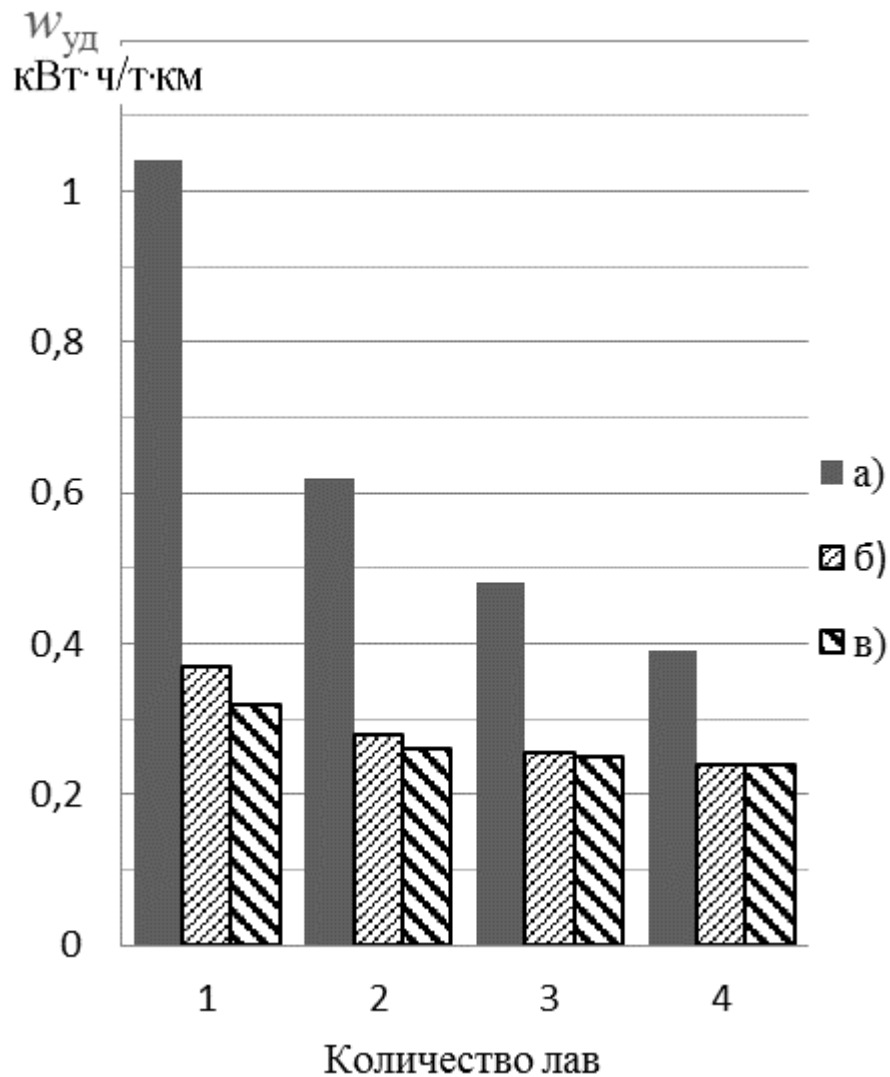


Рисунок 3.10. Зависимость удельного расхода электроэнергии на транспортирование горной массы от количества суммируемых грузопотоков и регулирования скорости движения ленты конвейеров: а) – электропотребление конвейера при отсутствии регулирования скорости движения ленты; б) – электропотребление первого в линии конвейера с регулированием скорости движения ленты; в) – электропотребление второго в линии конвейера с регулированием скорости движения ленты.

Анализируя рисунок 3.10 можно сделать вывод, что при суммировании грузопотоков эффект от регулирования скорости движения лент на последовательно установленных конвейерах снижается (разность между соседними столбцами б) и в) на рисунке 3.10).

Аналитически доказано (рисунок 3.9) и подтверждено на имитационной модели (разработанной в п. 4.2), что установка регулируемого привода в цепочке конвейеров (при пропорциональном регулировании) дает дополнительный эффект снижения расхода электроэнергии за счет работы последующего конвейера более продолжительное время на минимальной скорости. При уменьшении длины конвейеров в линии такой эффект снижается, что является следствием корреляции входящего и исходящего с конвейера грузопотоков.

Проанализируем влияние изменения характеристик грузопотоков на энергоэффективность бремсберговых конвейеров [79]. Особенностью бремсберговых конвейеров является снижение их удельного электропотребления при выравнивании поступающего грузопотока, что обосновано в п. 2.4. Как показано в п. 3.1, со стороны разгрузки конвейера с регулируемой скоростью движения ленты снижается вероятность отсутствия грузопотока, а также грузопотока, близкого к максимальному. К примеру, если исходный грузопоток имеет параметры $T_n = 4$ мин и $T_0 = 6$ мин, а математическое ожидание во время поступления $3,7$ т/мин, то после прохождения конвейера с регулируемой скоростью движения ленты грузопотоку соответствуют параметры $T_n = 12$ мин и $T_0 = 2,3$ мин, а математическое ожидание массы груза во время поступления $2,8$ т/мин. Доля времени поступления грузопотока соответственно $K_M = 0,83$. Рассчитываются эти значения по выражению (3.3). Если измененный регулируемой скоростью движения ленты грузопоток в дальнейшем будет транспортироваться бремсберговым конвейером с параметрами $q''_p = 9,2$ кг/м; $q'_p = 20$ кг/м; $q_l = 15$ кг/м; $\omega = 0,06$ с' = 1,1; $L = 1000$ м; $\beta = -6^\circ$; $v = 2$ м/с, то электропотребление бремсбергового конвейера будет снижено до 9 % по сравнению с транспортировкой исходного грузопотока, что определяется по зависимостям (2.34, 3.35, 2.40, 2.41).

Рассмотрим влияние характеристик поступающего грузопотока на электропотребление бремсбергового конвейера. Схема установки конвейеров для расчета приведена на рисунке 3.11. Используем соотношения (2.34, 3.35, 2.40, 2.41, 3.1, 3.3, 3.7).

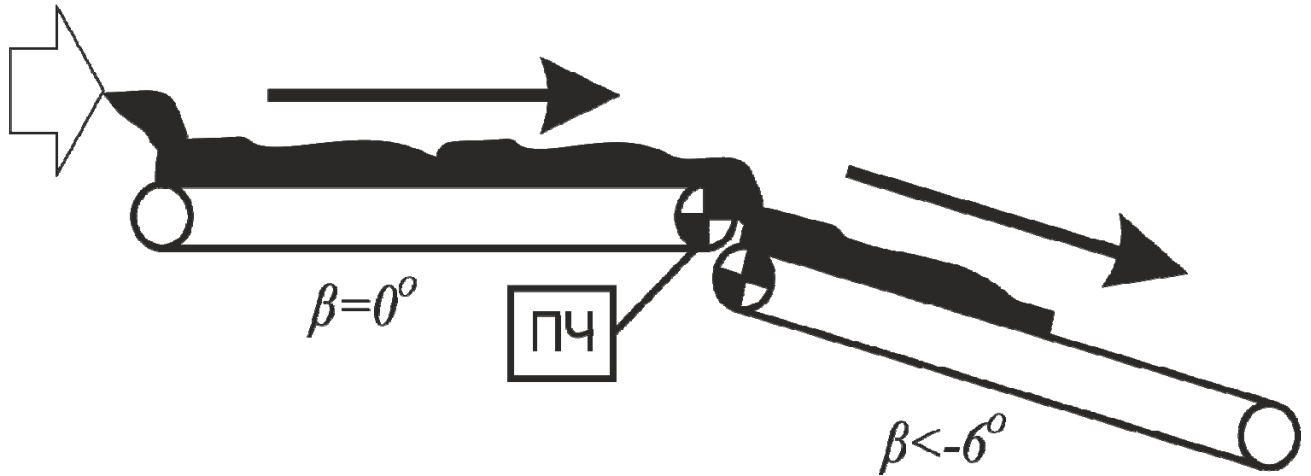


Рисунок. 3.11 Расчетная схема для определения энергоэффективности бремсбергового конвейера, который установлен после конвейера с регулируемой скоростью движения ленты.

При регулировании скорости движения конвейерной ленты пропорционально грузопотоку математическое ожидание грузопотока снижается. На рисунке 3.12 представлена зависимость математического ожидания грузопотока на выходе конвейера с регулируемой скоростью движения ленты от коэффициента скорости $K_{ск}$ для трех значений математического ожидания интервалов наличия/отсутствия грузопотока при математическом ожидании подступающего грузопотока $M(Q) = 3700$ кг/мин. Анализируя зависимости на рисунке 3.12. можно сделать вывод, что (при уменьшении $K_{ск}$) интенсивность снижения математического ожидания исходящего грузопотока выше при более длительном интервале отсутствия входящего грузопотока (большой λ).

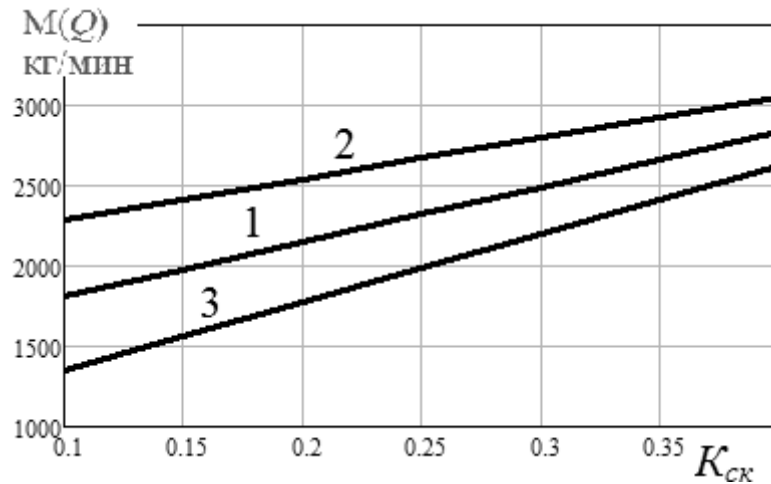


Рисунок 3.12. Зависимость математического ожидания грузопотока на выходе конвейера с регулируемой скоростью движения ленты от коэффициента скорости $K_{ск}$ 1 - $\lambda = 0,25$, $\mu = 0,164$, 2 - $\lambda = 0,175$, $\mu = 0,21$, 3 - $\lambda = 0,325$, $\mu = 0,108$.

Для параметров $\lambda = 0,25$, $\mu = 0,164$, $M(Q) = 3700$ кг/мин, $K_{ск} = 0,25$ зависимость математического ожидания минутных значений от доли времени поступления грузопотока при регулировании скорости движения ленты приведена на рисунке 3.13:

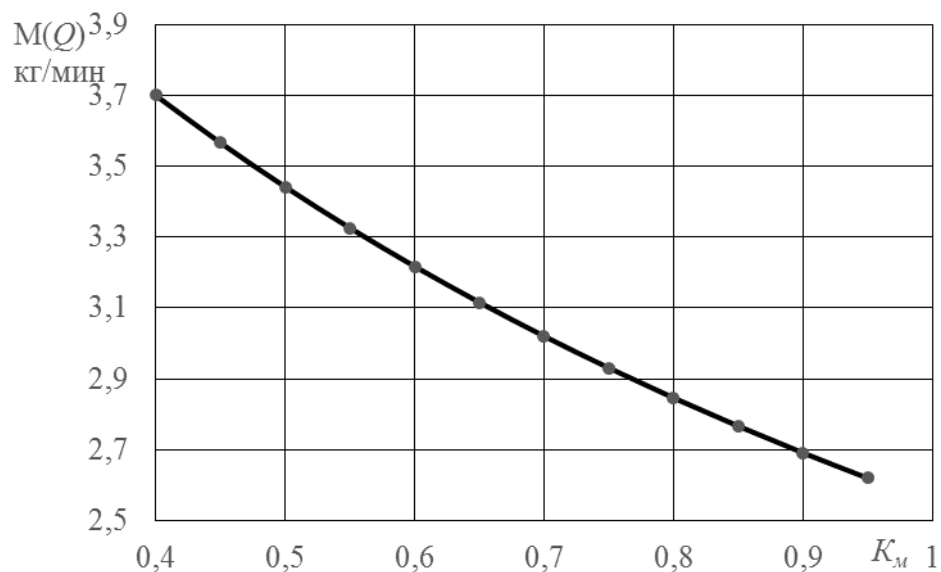


Рисунок 3.13 Зависимость математического ожидания минутных значений грузопотока от доли времени поступления грузопотока

Приведенная на рисунке 3.13 кривая свидетельствует о снижении математического ожидания грузопотока при увеличении интервалов поступления грузопотока после конвейера с регулируемой скоростью движения ленты. Зависимость удельного электропотребления бремсбергового конвейера, который установлен после конвейера с регулируемой скоростью движения ленты, от доли времени поступления грузопотока имеет вид (рисунок 3.14):

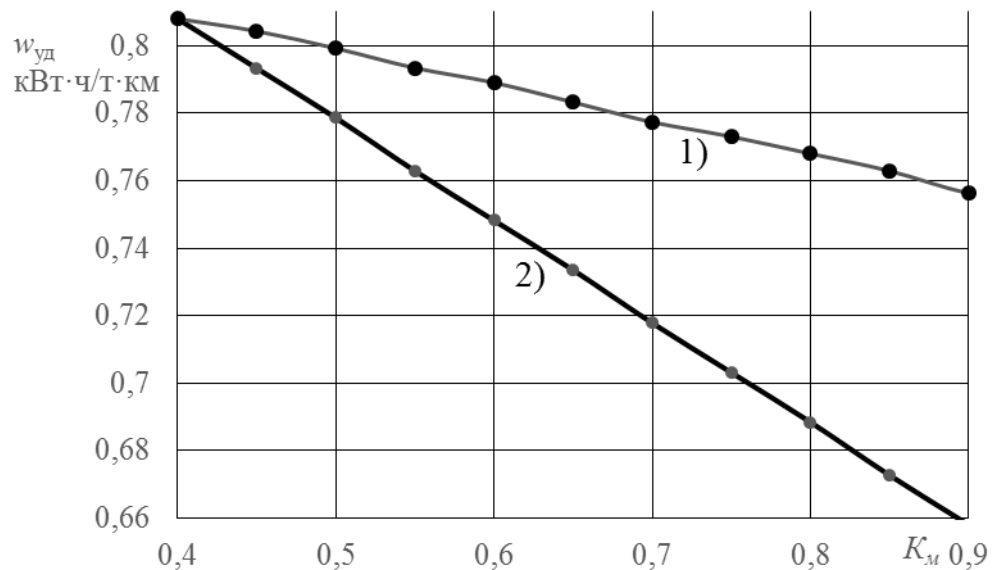


Рисунок 3.14 Зависимость удельного расхода электроэнергии бремсберговым конвейером от K_m 1) при $K_{ск}=0,1$, 2) при $K_{ск}=0,25$ конвейера с регулируемой скоростью движения ленты

Представленный на рисунке 3.14 график имеет линейный характер, что демонстрирует прямо пропорциональную зависимость снижения удельного расхода электроэнергии бремсберговым конвейером от доли времени поступления грузопотока, при условии выравнивания грузопотока конвейером с регулируемой скоростью движения ленты. Характер зависимости, в отличие от канонического гиперболического [76], объясняется лишь частичным выравниванием грузопотока: после конвейера с регулируемой скоростью движения ленты уровни минутных значений грузопотока перераспределяются.

Зависимость удельного электропотребления бремсбергового конвейера от угла его установки при поступлении грузопотока на конвейер с регулируемой скоростью с параметрами $\lambda = 0,25$, $\mu = 0,164$, $K_{ск} = 0,25$, $\omega = 0,04$ представлена на рисунке 3.15

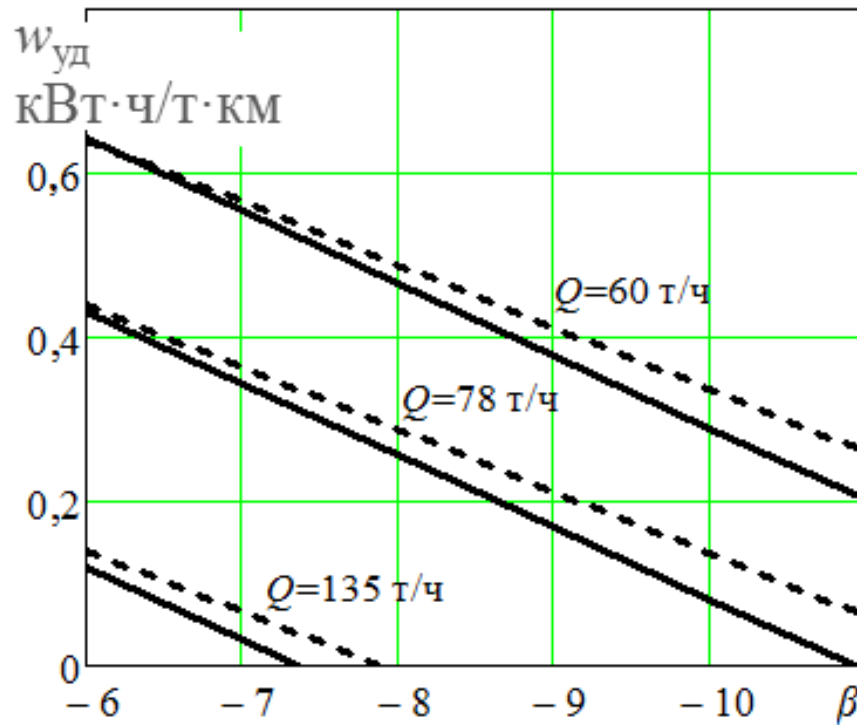


Рисунок 3.15. Зависимость удельного электропотребления бремсбергового конвейера от угла его установки при поступлении грузопотока непосредственно из очистного забоя (пунктирная линия) и по схеме, изображенной на рисунке 3.11 (сплошная линия)

Анализируя рисунок 3.15 можно сделать вывод, что при увеличении угла установки в отрицательную сторону для одного и того же объема транспортируемого угля увеличивается разность в удельном электропотреблении транспортировки груза после конвейера с регулируемой и нерегулируемой скоростью движения конвейерной ленты. При увеличении угла установки величина удельного расхода электроэнергии переходит в область отрицательных чисел, что не корректно описывает суть процесса. Поэтому такие режимы работы бремсберговых конвейеров рассматривать не будем.

На рисунке 3.16 представлена зависимость удельного расхода электроэнергии при $\beta = -6^\circ$ от часового грузопотока для трех типов конвейеров

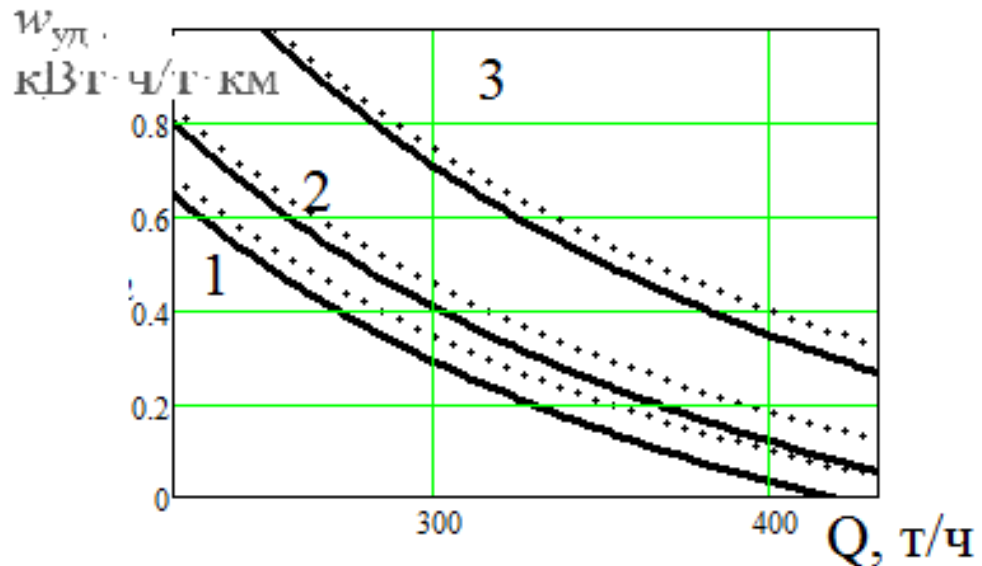


Рисунок 3.16. Зависимость удельного расхода электроэнергии при $\beta = -6^\circ$ от часового грузопотока для трех типов конвейеров: 1) 2ЛТП80КСП, 2) 2ЛТП1000КСП, 3) 1Л120 при регулируемой (сплошные линии) и нерегулируемой (пунктирные линии) скорости движения ленты предыдущего конвейера.

Анализируя зависимости, представленные на рисунке 3.16 делаем вывод, что большее снижение удельного расхода электроэнергии бремсбергового конвейера при прохождении грузопотока через конвейер с регулируемой скоростью движения ленты, наблюдается на конвейере с меньшим весом движущихся частей.

В пункте 2.4 обосновано влияние параметра n (2.38) на электропотребление бремсбергового конвейера. Влияние регулирования скорости движения ленты конвейера, установленного перед бремсберговым, на удельный расход электроэнергии бремсбергового конвейера снижается при увеличении параметра n исходного грузопотока (рисунок 3.17).

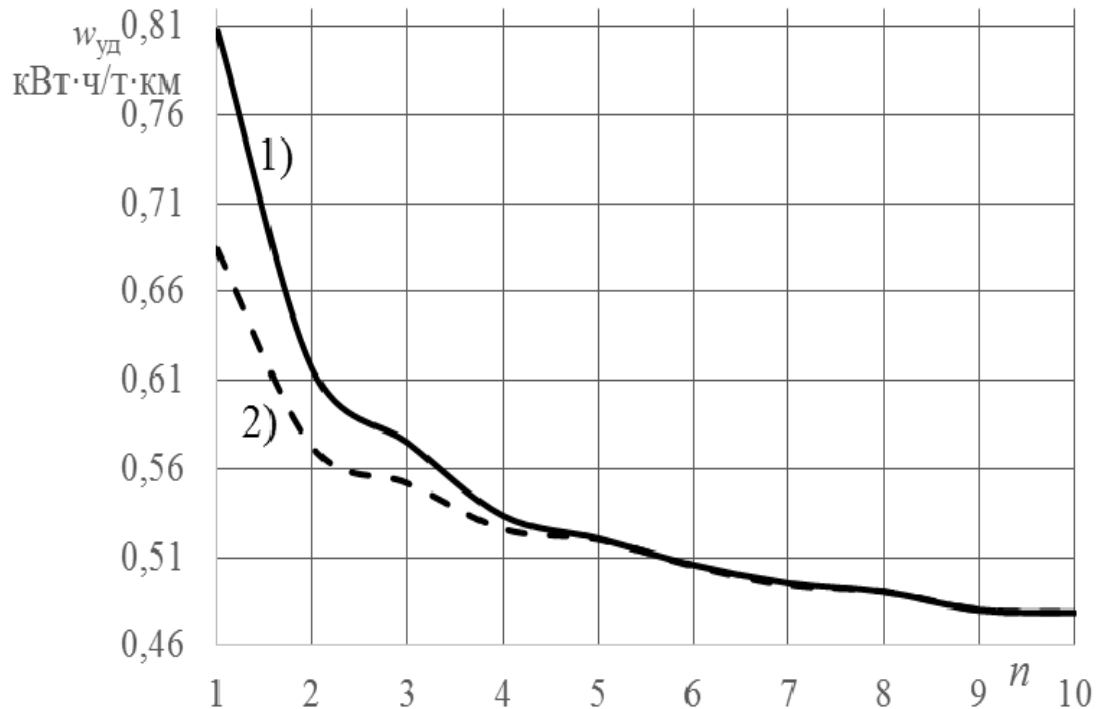


Рисунок 3.17. Зависимость удельного расхода электроэнергии бремсберговым конвейером от параметра n при поступлении грузопотока 1) непосредственно из очистного забоя 2) с конвейера с регулируемой скоростью движения ленты

Если имеются грузопотоки с одинаковыми параметрами ($T_n = 4$ мин и $T_0 = 6$ мин, а математическое ожидание во время поступления грузопотока составляет 3,7 т/мин), то минимальное удельное электропотребление бремсбергового конвейера с вероятностью 90 % достигается при слиянии более 4-х грузопотоков. При изменении вероятностных характеристик грузопотоков регулированием скорости движения ленты конвейеров, установленных до бремсбергового, для достижения минимального удельного электропотребления потребуется лишь суммирование 2-х грузопотоков.

В таблице 3.1 сопоставим изменение времени отсутствия суммарного грузопотока на приемном конвейере, если грузопотоки поступают с конвейеров с регулированием и без регулирования скорости движения ленты

Таблица 3.1 Среднее время отсутствия груза на сборном конвейере при поступлении k грузопотоков

Условия режима работы конвейеров для поступления груза на сборный конвейер:	Время отсутствия суммарного грузопотока на сборном конвейере, мин, при количестве грузопотоков, k			
	1	2	3	4
нерегулируемая скорость движения ленты	6	3,6	2,16	0,13
регулируемая скорость движения ленты	2,3	0,5	0,1	0,03

Анализируя значения, приведенные в таблице 3.1, можно резюмировать, что суммирование грузопотоков, поступающих с конвейеров с регулируемой скоростью ленты на сборный конвейер уменьшает математическое ожидание времени отсутствия поступления в большей мере, чем с нерегулируемым, и зависит от поступающих k грузопотоков.

Рассмотрим электропотребление конвейера с параметрами, принятыми к зависимости на рисунке 2.8, при значениях времени отсутствия грузопотока, представленных в таблице 3.1. Результаты расчета удельного электропотребления приведены в таблице 3.2 при скорости сборного бремсбергового конвейера пропорциональной количеству грузопотоков.

Таблица 3.2 Удельный расход электроэнергии бремсберговым конвейером при суммировании k грузопотоков

Условия режима работы конвейеров для поступления груза на сборный конвейер:	Удельный расход электроэнергии бремсберговым конвейером, кВт*ч/т*км, при количестве грузопотоков, k			
	1	2	3	4
нерегулируемая скорость движ. ленты	0,8	0,69	0,61	0,58
регулируемая скорость движ. ленты	0,74	0,536	0,527	0,522

В таблице 3.2 расчетные показатели удельного электропотребления оказались довольно низкими, по сравнению с полученными в работе [2], так как расчет выполнен для бремсбергового конвейера, у которого большая загрузка соответствует меньшему удельному расходу электроэнергии. Анализируя приведенные в таблице 3.2 значения можно утверждать, что удельное электропотребление бремсбергового конвейера с вероятностью 90 % будет

минимальным при $k=2$ после прохождения грузопотоками конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты. Удельное электропотребление при абсолютно равномерном принятом для расчетов грузопотоке для рассматриваемого бремсбергового конвейера составит $0,49 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}\cdot\text{км}$ (рассчитано по зависимости (2.41)). Не следует полагать это число минимально возможным значением электропотребления для данного конвейера приведенным в п.п. 2.1. Для бремсбергового конвейера возможен режим рекуперации, и он является наиболее рациональным.

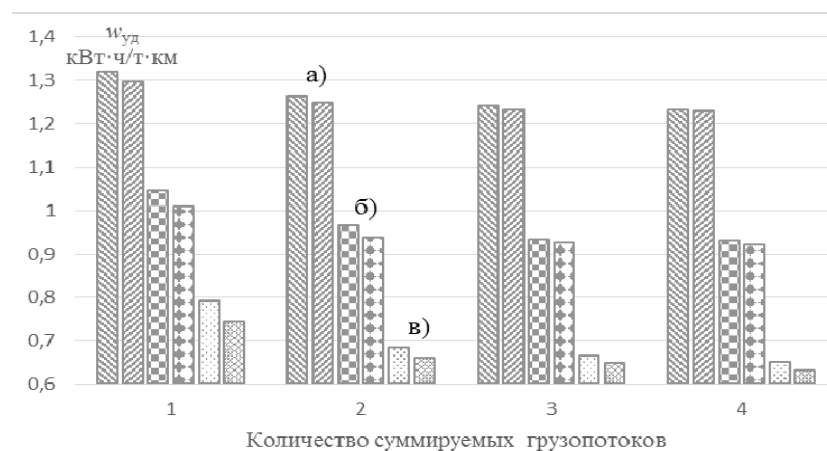


Рисунок 3.18. Значения удельного расхода электроэнергии в зависимости от количества суммируемых грузопотоков на конвейере 2ЛТП1000КСП с углом установки $\beta = -6^\circ$ и значениях интенсивности поступления груза каждого грузопотока: а) 260 т/ч б) 400 т/ч в) 620 т/ч. Рядом находящиеся столбики со сходной штриховкой приведены для режима нерегулирования/регулирования скорости движения ленты конвейеров до бремсбергового.

При транспортировке груза конвейером с нулевым или положительным углом установки зависимость его электропотребления от массы груза на нем имеет характер, близкий к прямой и не имеет излома характерного для зависимости электропотребления бремсбергового конвейера (см. рис. 2.10). Поэтому изменение динамики грузопотока, поступающего на такой конвейер при сохранении сменного (суточного) объема перевезенного угля не влияет на расход электроэнергии.

3.3 Определение мест установки преобразователей частоты в шахтной транспортной сети

При использовании средств повышения энергоэффективности на шахтном магистральном конвейерном транспорте возникает задача оптимального распределения преобразователей частоты для регулирования скорости движения конвейерных лент при ограниченном количестве финансовых ресурсов. В первой главе были проанализированы производители, которые выпускают взрывозащищенные преобразователи частоты для шахтных магистральных конвейеров, и установлено, что на напряжение 660 В, используемое в условиях Павлоградугля, выпускаются только преобразователи типа ПЧВ-К У5. Они производятся предприятием УКРНИИВЭ на мощность до 500 кВт (132 кВт, 160 кВт, 200 кВт, 315 кВт, 400 кВт, 500 кВт) [40]. По исследованиям [13] установлено, что указанная мощность удовлетворяет всем конвейерам по мощности их приводов. Для приобретения преобразователей частоты питающего напряжения необходимо:

- 1) установить целесообразность применения преобразователей частоты для каждого конвейера
- 2) определить места применения регулирования скорости движения ленты при ограниченных финансовых ресурсах
- 3) рекомендовать приобретение определённого количества преобразователей

Необходимо определить места установки средств регулирования скорости конвейерной ленты по критерию минимального электропотребления всей системы шахтного транспорта. Решение этой задачи для системы шахтного конвейерного транспорта представленной в виде древовидного графа (рисунок 1.1) приближённо методом без итераций. Принимаем, что в наличии x преобразователей частоты и k конвейеров.

Повышение энергоэффективности происходит при регулировании скорости конвейерной ленты на всех недогруженных конвейерах. Поэтому, при

достаточном объеме финансовых ресурсов, регулирование скорости целесообразно осуществлять на всех недогруженных конвейерах.

Если преобразователей частоты (или материальных ресурсов на их приобретение) ограниченное количество, действуем по следующему алгоритму для приближенного решения задачи их размещения:

1. Задается массив из x преобразователей частоты и k конвейеров. Для каждого конвейера определяются поля для ввода установочных характеристик (номинальная мощность).
2. Определяется по алгоритму (пункт 3.1, рисунок 3.4) статистические характеристики грузопотоков в узлах системы конвейерного транспорта.
3. Определяются резервы снижения удельного электропотребления каждого конвейера (в соответствии с п.п. 2.1)
4. Определяется фактическое удельное электропотребление без регулирования скорости движения ленты по зависимостям (2.40, 3.41).
5. Устанавливаем преобразователи частоты на приводы конвейеров с наибольшей разностью между фактическим и минимально достижимым удельным электропотреблением. Определяется энергоэффективность всей системы транспорта после установки преобразователей.
6. Устанавливаются преобразователи частоты на линии, состоящие из 2-3 конвейеров и имеющих наибольший резерв энергоэффективности, начиная с корней графа.
7. Определяется прирост энергоэффективности от установки преобразователей частоты на каждом конвейере либо в их цепочке. Производится установка преобразователей в места наибольшего увеличения энергоэффективности. Определяется повышение энергоэффективности всей системы магистрального конвейерного транспорта и выбор наилучшего варианта по критерию минимума удельного электропотребления.

Определим точное решение задачи размещения преобразователей частоты с целью минимизации электропотребления системы магистрального

конвейерного транспорта угольной шахты. Задача относится к классу экстремальных задач и решается с помощью методов линейного программирования, наиболее приемлемым из которых является симплексный. Сформируем начальные условия:

Задаем вещественные множества электропотребления конвейеров $W_{i,j}$, грузопотоков из очистных забоев $Q_{i,j}$, бинарное множество размещения средств повышения энергоэффективности $X_{i,j}$, причём:

$$\sum_i \sum_j X_{i,j} = const < i \cdot j; X_{i,j} = \{1;0\}; \quad (3.15)$$

Необходимо определить $X_{i,j}$ при котором

$$\sum_i \sum_j W_{i,j} \rightarrow \min \quad (3.16).$$

Грузопоток, поступающий на конвейер определяется

$$Q_{i,j} = \begin{cases} \sum_m Q_{i,j-1}, & \text{если } X_{i,j} = 0 \\ f_1 \left(Q_{i,j}, \sum_m Q_{i,j-1} \right), & \text{если } X_{i,j} = 1 \end{cases} \quad (3.17)$$

Электропотребление конвейера определяется:

$$W_{i,j} = \begin{cases} f_2(Q_{i,j}), & \text{если } X_{i,j} = 0 \\ f_3 \left(Q_{i,j}, \sum_m Q_{i,j-1} \right), & \text{если } X_{i,j} = 1 \end{cases} \quad (3.18)$$

Соотношение $f_1\left(Q_{i,j}, \sum_m Q_{i,j-1}\right)$ определяется по зависимостям (3.6, 3.7, 3.8, 3.9). Соотношение $f_2(Q_{i,j})$ определяется по зависимостям (2.32, 2.35, 2.36).

Соотношение $f_3\left(Q_{i,j}, \sum_m Q_{i,j-1}\right)$ определяется по зависимостям (3.10 – 3.14).

Решение задачи производим симплексным методом [80]. Идея симплексного метода (метода последовательного улучшения) заключается в том, что, начиная с некоторого исходного опорного решения, осуществляется последовательно направленное перемещение по опорным решениям задачи к оптимальному. Симплекс-метод является универсальным, так как позволяет решить практически любую задачу линейного программирования, заданную в каноническом виде. Значение целевой функции (3.16) при этом перемещении для задач на максимум не убывает. Так как число опорных решений конечно, то через конечное число шагов получим оптимальное опорное решение.

Находим исходное опорное решение и проверяем его на оптимальность. Для этого заполняем симплексную таблицу. Все строки таблицы 1-го шага, за исключением строки Δ_j , (индексная строка), заполняем по данным системы ограничений и целевой функции.

Симплексная таблица имеет следующий вид:

Таблица 3.3. Таблица симплекс-метода

c_i	Базисная переменная	c_1	c_2	...	c_m	c_{m+1}	...	c_n	$L(\bar{x})$
		x_1	x_2	...	x_m	x_{m+1}	...	x_n	b_1
c_1	x_1	1	0	...	0	$h_{1,m+1}$...	a_{1n}	f_1
c_2	x_2	0	1	...	0	$h_{2,m+1}$...	a_{2n}	f_2
...	
c_m	x_m	0	0	...	1	$h_{m,m+1}$...	a_{mn}	f_m
	Δ_j	0	0	...	0	Δ_{m+1}	...	Δ_n	$L(\bar{x}_1)$

Индексная строка Δ_j , для переменных находится по формуле

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^m c_j h_{i,j} - c_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3.19)$$

и по формуле

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^m c_j f_i, \quad (3.20)$$

– для свободного члена.

Возможны следующие случаи при решении задачи нахождения максимума:

- если все оценки $\Delta_j \geq 0$, то найденное решение оптимальное;
- если хотя бы одна оценка $\Delta_j < 0$, но при соответствующей переменной x_j нет ни одного положительного коэффициента, решение задачи прекращается, так как $L(\bar{x}) \rightarrow \infty$, т. е. целевая функция не ограничена в области допустимых решений;

- если хотя бы одна оценка отрицательная, а при соответствующей переменной есть хотя бы один положительный коэффициент, то нужно перейти к другому опорному решению;

- если отрицательных оценок в индексной строке несколько, то в столбец базисной переменной вводят ту переменную, которой соответствует наибольшая по абсолютной величине отрицательная оценка.

Пусть одна оценка $\Delta_k < 0$ или наибольшая по абсолютной величине $\Delta_k < 0$, тогда k -й столбец принимаем за ключевой. За ключевую строку принимаем ту, которой соответствует минимальное отношение свободных членов (b_i) к положительным коэффициентам k -го столбца. Элемент, находящийся на пересечении ключевых строки и столбца, называют ключевым элементом.

Заполняем симплексную таблицу 2-го шага:

- переписываем ключевую строку, разделив ее на ключевой элемент;
- заполняем базисные столбцы;
- остальные коэффициенты таблицы находим по правилу «прямоугольника». Оценки можно рассчитывать по приведенным ранее формулам или по правилу «прямоугольника». Получаем новое опорное решение, которое проверяем на оптимальность и т. д.

Правило «прямоугольника» состоит в следующем. Пусть ключевым элементом предыдущего шага является элемент 1-й строки $(m + 1)$ -го столбца $h_{1,m+1}$. Тогда элемент i -ой строки $(m + 2)$ -го столбца последующего шага, который обозначим $h_{i,m+2}$, по правилу «прямоугольника» определяется по формуле

$$h'_{i,m+2} = \frac{(h_{1,m+1} \cdot h_{i,m+2} - h_{i,m+1} \cdot h_{1,m+2})}{h_{1,m+1}}, \quad (3.21)$$

где $h_{i,m+2}$, $h_{i,m+1}$, $h_{1,m+1}$ — элементы предыдущего шага.

Исходные условия и результаты решения задачи для системы конвейерного транспорта шахты "Павлоградская" симплекс-методом следующие.

Количество очистных забоев $i = 4$; наибольшее количество подряд размещенных конвейеров $j = 9$. Количество преобразователей частоты, которые необходимо установить $\sum_i \sum_j X_{i,j} = 7$. Расчет ведем для среднесменных значений расхода электроэнергии, используя соотношения (3.19-3.21) и таблицу 3.3.

Полученный результат предполагает установку преобразователей частоты к приводам магистральных конвейеров шахты "Павлоградская" №1 и №2 Западного магистрального конвейерного штрека, №1 ВМКШ (Восточного магистрального конвейерного штрека), №1 и №2 53МКШ (Западного магистрального конвейерного штрека), а также 1 МКШ пл. С8 и №4 1 ВМКШ.

3.4 Выводы

1. Регулирование скорости движения конвейерной ленты позволяет осуществить выравнивание грузопотока за счет уменьшения длительности пауз при его поступлении. Установка регулируемого привода в линии конвейеров дает дополнительный эффект в части снижения расхода электроэнергии за счет работы каждого последующего конвейера в линии более продолжительное время на минимальной скорости. При уменьшении длины конвейеров в линии такой эффект снижается. Дополнительное снижение расхода электроэнергии достигает 4-5 % за счет более полного использования резерва энергоэффективности в линии, состоящей из нескольких конвейеров с регулируемой скоростью движения конвейерной ленты.

2. Разработанный алгоритм оценки эффективности внедрения ЧРП позволяет определить наиболее проблемные участки транспортной цепи, на которых в первую очередь требуется установка средств повышения энергоэффективности, что особо актуально в условиях ограничений материальных ресурсов.

3. Программная реализация предложенных алгоритмов и аналитических моделей позволяет в реальном времени производить контроль энергоэффективности транспортных линий, которые включают конвейерные установки с регулируемым приводом.

4. Зависимость удельного электропотребления бремсбергового конвейера от доли времени поступления грузопотока приобретает линейный характер, при условии выравнивания грузопотока предыдущим конвейером с регулируемой

скоростью движения ленты. Характер зависимости, в отличие от канонического гиперболического, объясняется частичным выравниванием грузопотока: после конвейера с регулируемой скоростью движения ленты уровни минутных значений грузопотока перераспределяются.

5. Регулирование скорости движения ленты в системе шахтного конвейерного транспорта дает дополнительный эффект снижения расхода электроэнергии на сборных бремсберговых конвейерах, на которых не установлены преобразователи частоты, что является следствием снижения динамики грузопотоков. Снижение расхода электроэнергии при этом на бремсберговом конвейере достигает 20 %.

6. Эффект усреднения грузопотока регулированием скорости движения ленты увеличивается при малых значениях параметра n (2.38): выровненный исходный грузопоток в меньшей степени поддается усреднению.

7. Регулирование скорости движения лент конвейеров позволяет использовать потенциал снижения расхода электроэнергии на магистральном конвейерном транспорте угольной шахты за счет выравнивания грузопотоков. Дополнительное снижение электропотребления всей системы магистрального транспорта может достигать 9%, однако точное значение индивидуально для каждой шахты и зависит от количества конвейеров, их расположения, углов установки и динамики грузопотоков.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЙ

4.1 Алгоритмы определения энергоэффективности

Определение энергоэффективности магистрального конвейерного транспорта угольных шахт с асинхронным регулируемым приводом требует проведения экспериментального подтверждения на сложно разветвленной системе конвейерного транспорта. Однако, из-за несовершенства существующих средств учета электроэнергии, эксперимент не представляется возможным. Поэтому существует необходимость разработки алгоритмов и имитационных моделей для определения электропотребления конвейерного транспорта с регулируемой и нерегулируемой скоростью движения конвейерной ленты с учетом динамики грузопотоков.

Для определения энергоэффективности режимов работы конвейеров в сложно разветвлённых транспортных системах ниже приведены алгоритмы для моделирования их электропотребления, а также для моделирования потоков из очистных забоев.

Грузопоток из очистного забоя $Q(t)$ описывается как произведение двух взаимно некоррелированных величин [18]: непрерывной – $Q'(t)$ и – дискретной – $Y_Q(t)$:

$$Q(t) = Q'(t) \cdot Y_Q(t) \quad (4.1)$$

Каждая компонента в (4.1) представляет собой временной ряд со своими характеристиками. Непрерывная составляющая грузопотока аппроксимируется случайной функцией с распределением мгновенных значений

производительности по закону, близкому к нормальному [18]. $Y_Q(t)$ описывается обобщенной функцией, которая представляет собой бесконечную сумму функций Хевисайда, взятых поочередно с положительным и отрицательным знаками. В литературе [19] автор определяет процесс $Y_Q(t)$ как поток готовности технологической цепи.

Известен алгоритм нахождения значений дискретной компоненты поступления угля, который подробно описан в литературе [18]. Отметим, что для его работы кроме значений переменных исходной реализации, необходимы дополнительные переменные времени наличия t_n и отсутствия грузопотока t_0 . Также при каждой реализации обобщенная функция $Y(t)$ (для удобства здесь и далее это обозначение используется вместо $Y_Q(t)$) является зависимой не только от ее предыдущего значения $Y(t-1)$ и флуктуирующей составляющей $Q(t)$, но и от переменных, которые на некотором промежутке неслучайно зависят от нескольких предыдущих значений. Случайными будут лишь времена переходов функции $Y(t)$ из одного дискретного состояния в другое. Поэтому был разработан новый алгоритм нахождения дискретной компоненты.

Алгоритм, приведенный на рисунке 4.1, в отличие от описанного в [18] позволяет моделировать Марковский процесс, как процесс без последствия: состояние некоторой системы в настоящий момент времени t_0 однозначно определяет распределение вероятностей будущего развития процесса при $t_0 < t$, и информация о прошлом поведении процесса до момента t_0 не влияет на это распределение. Поэтому, принимается, что события, которые произошли до момента t_0 , никак не влияют на ход процесса после него [81].

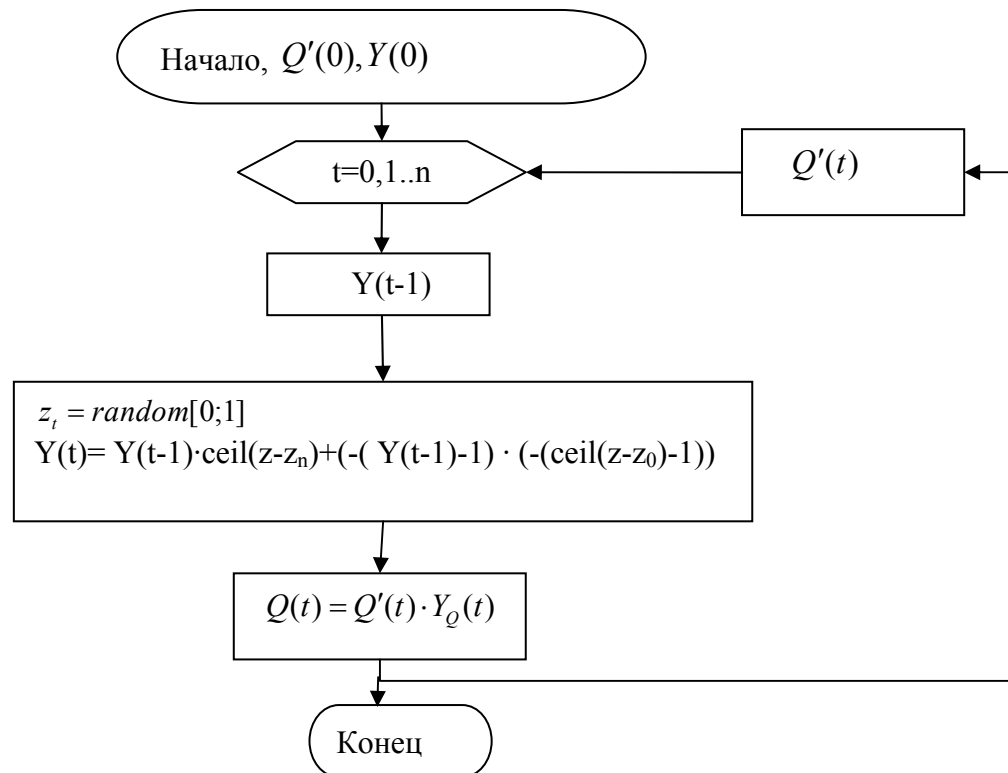


Рисунок 4.1. Алгоритм вычисления значений случайного процесса $Y(t)$

В предлагаемом алгоритме (рисунок 4.1) используется свойство линейной функции $y = - (x-1)$: $y=0$ при $x=1$ и $y=1$ при $x=0$, что позволяет уйти от условных конструкций и не вводить дополнительных переменных. Дополнительные условные конструкции усложняют модели в программном пакете MATLAB SIMULINK. Функция $Y(t)$ в каждый момент времени может быть равна либо первой части суммы $Y(t-1) \cdot \text{ceil}(z - z_n)$ либо второй $(- (Y(t-1) - 1) \cdot (- (\text{ceil}(z - z_0) - 1))$, так как множители $Y(t-1)$ и $(- (Y(t-1) - 1))$ принимают противоположные двоичные значения при одинаковом значении функции $Y(t-1)$. В первой части суммы множитель $\text{ceil}(z - z_n)$ равен единице при $z > z_n$, что определяет вероятность начала интервала отсутствия грузопотока при $z < z_n$. Множитель $(- (\text{ceil}(z - z_0) - 1))$ во второй части суммы действует противоположно, определяя вероятность начала интервала наличия грузопотока. Схема реализации предлагаемого алгоритма в программном пакете MATLAB SIMULINK приведена на рисунке 4.2.

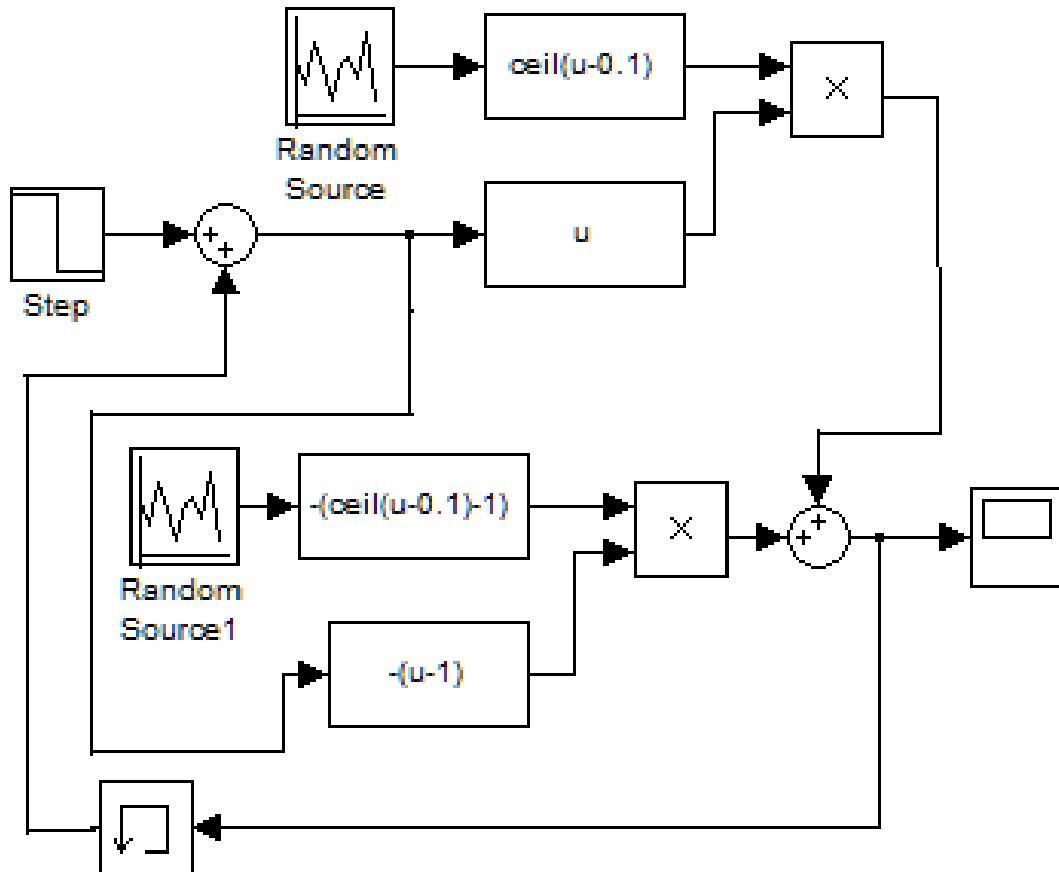




Рисунок 4.2. Реализация алгоритма в SIMULINK

Функция *ceil* (англ. *перекрывать*) позаимствована из языка программного пакета MATLAB, которая означает округление до ближайшего большего целого. Константы z_n и z_0 соответствуют вероятностям процесса $Y(t)$ что позволяет принять значение $Y(t)=0$ при $Y(t-1)=1$ и $Y(t)=1$ при $Y(t-1)=0$ соответственно, которые вычисляются по формулам [12]:

$$z_n = p(\tau_n) = \lambda \exp[-\lambda \tau] \quad (4.2)$$

$$z_0 = p(\tau_0) = \mu \exp[-\mu \tau] \quad (4.3)$$

где τ - время автокорреляции.

Блок  запоминает значение предыдущей реализации. Блок  Step задает значение $Y(0)=1$, последующие значения на выходе этого блока равны 0. Блок Random Source генерирует равномерно распределенные случайные

значения на интервале $[0;1]$. На рисунке 4.3. представлена одна из случайных реализаций процесса $Y_Q(t)$ при заданных вероятностях: начала поступления грузопотока при его отсутствии $z_n = p(\tau_n) = 0,1$ и начала отсутствия грузопотока при его поступлении $z_0 = p(\tau_0) = 0,1$.

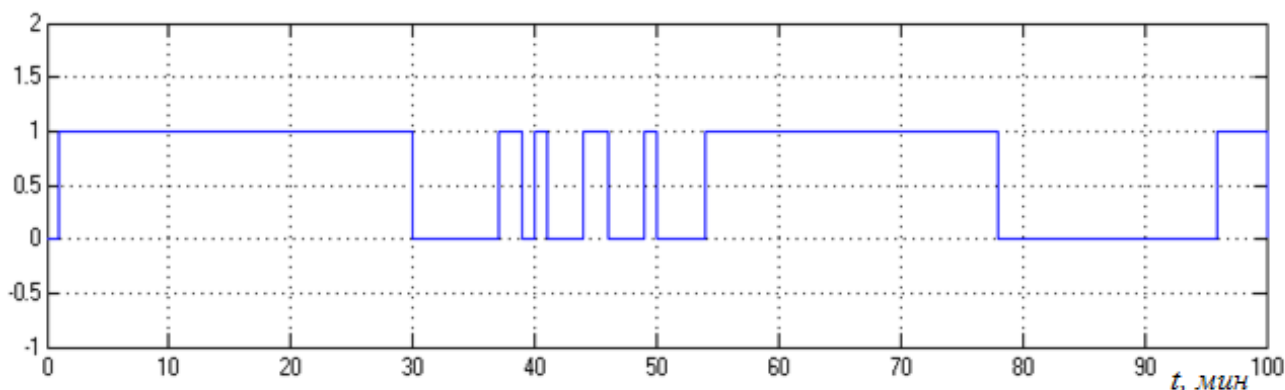


Рисунок 4.3 Реализация случайного процесса $Y_Q(t)$ для 100 одноминутных значений.

Алгоритм, приведенный на рисунке 4.1, является частью полного алгоритма моделирования поступления угля из очистного забоя. На рисунке 4.4 приведен полный алгоритм который содержит определение значений угольного потока автокоррелированных с интервалом 1 минута.

Алгоритм на рисунке 4.4 функционирует следующим образом. Задаются величины: математическое ожидание грузопотока M , кг/мин, стандартное квадратичное отклонение грузопотока от среднего D , кг/мин, машинное время работы очистного забоя K_m , вероятности отсутствия и наличия грузопотока z_n и z_0 . При каждой итерации определяется i -е значение грузопотока $Q(i)$ путем суммирования предыдущего значения процесса $Q(i-1)$ с флуктуационной составляющей $F1$, которая определяется как произведение случайного нормального процесса на промежутке $(0,1)$ с заданным квадратичным отклонением D , умноженным на коэффициент влияния $0,1*(2-0,1)$. Далее находится произведения дискретной и непрерывной компонент.

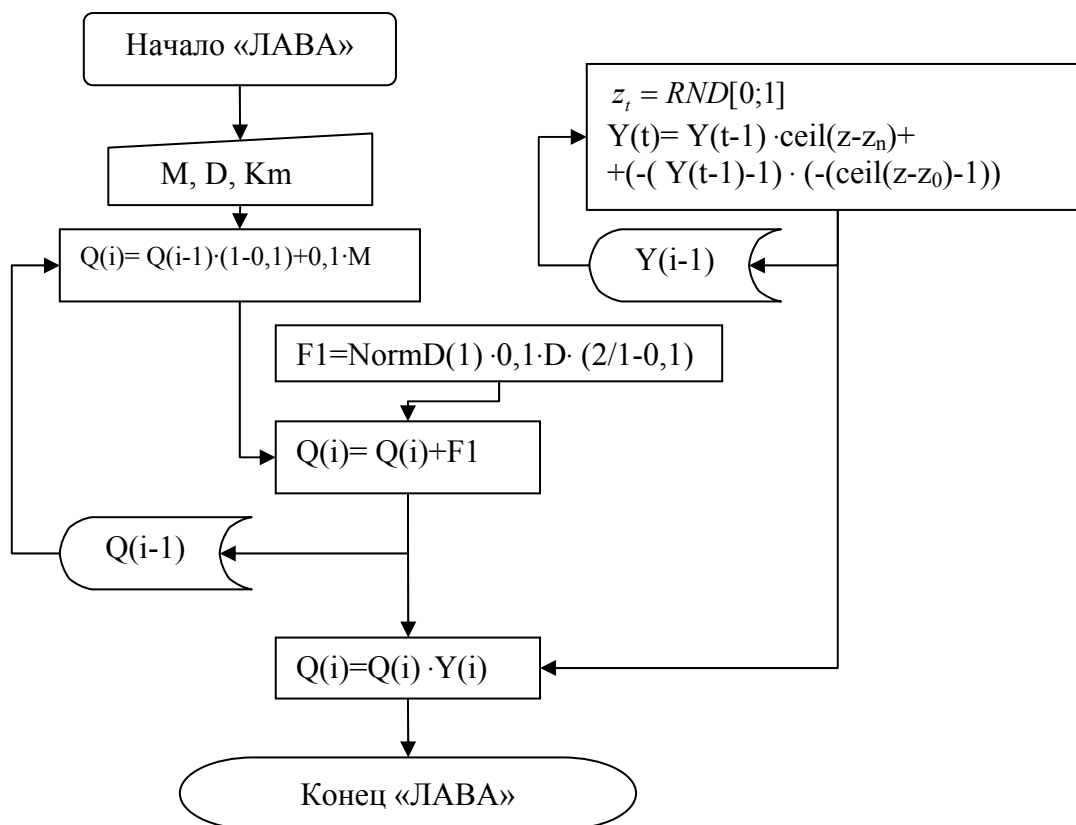


Рисунок 4.4 Алгоритм моделирования минутных значений потока горной массы из очистного забоя

Для моделирования режима функционирования системы шахтного конвейерного транспорта также необходимо разработать соответствующие алгоритмы описания работы и электропотребления единичного конвейера. Исходными данными для разработки алгоритма оценки режимов работы ленточного конвейера приняты параметры его установки, минутные значения грузопотока, полученные при реализации алгоритма, приведенного на рисунке 4.4. При этом учитывается наличие/отсутствие средств регулирования скорости движения ленты конвейера, а также его максимальная минутная приемная способность. В результате реализации алгоритма получаем выходной поток с конвейера и его минутное электропотребление.

На рисунке 4.5 приведен алгоритм расчета минутных реализаций выходного грузопотока конвейера и его электропотребления по входящим на

конвейер минутным значениям грузопотока. Часть алгоритма, представленного на рисунке 4.5, по определению расхода электроэнергии вынесен отдельно и представлена на рисунке 4.6. Алгоритм моделирования конвейера фактически реализует переменную транспортную задержку, значение которой зависит от параметров входного грузопотока при регулировании скорости движения ленты и независимо постоянно при отсутствии регулирования. Алгоритм функционирования транспортной задержки подробно описан в [82,47]. Вычисляется разность значений грузопотока до и после транспортной задержки, и ее величина интегрируется по времени для нахождения текущей массы на конвейере. Используется текущее значения массы груза на конвейере и известный погонный вес движущихся частей, по которым выполняется тяговый расчет конвейера. С учетом текущей скорости вычисляется электропотребление за интервал времени, равным одной минуте. Коэффициент сопротивлению перемещения подвижных частей конвейера и груза, а также поправка на сосредоточенные сопротивления учитываются константами ω , c . При этом модель учитывает снижение КПД привода при переходе конвейера в рекуперативный режим работы.

Алгоритмы, приведенные на рисунках 4.4 – 4.6 являются линейными с обратными связями для возможности их работы в одном цикле моделирования системы шахтного транспорта со сколь угодно большим количеством итераций. С использованием алгоритмов возможно провести i -ую реализацию процессов прохождения горной массы в точках транспортной сети и потребления электроэнергии во времени.

Приведенные алгоритмы на рисунках 4.4 – 4.6 разработаны для использования в программной среде MATLAB SIMULINK, которая предназначена для моделирования динамических систем во времени.

Общая связь отдельных блоков алгоритмов приведена на рисунке 4.7 (для случая поступления грузопотока из одного очистного забоя на один магистральный конвейер). В сложной системе конвейерного транспорта связи между блоками осуществляются в зависимости от топологии системы магистрального конвейерного транспорта.

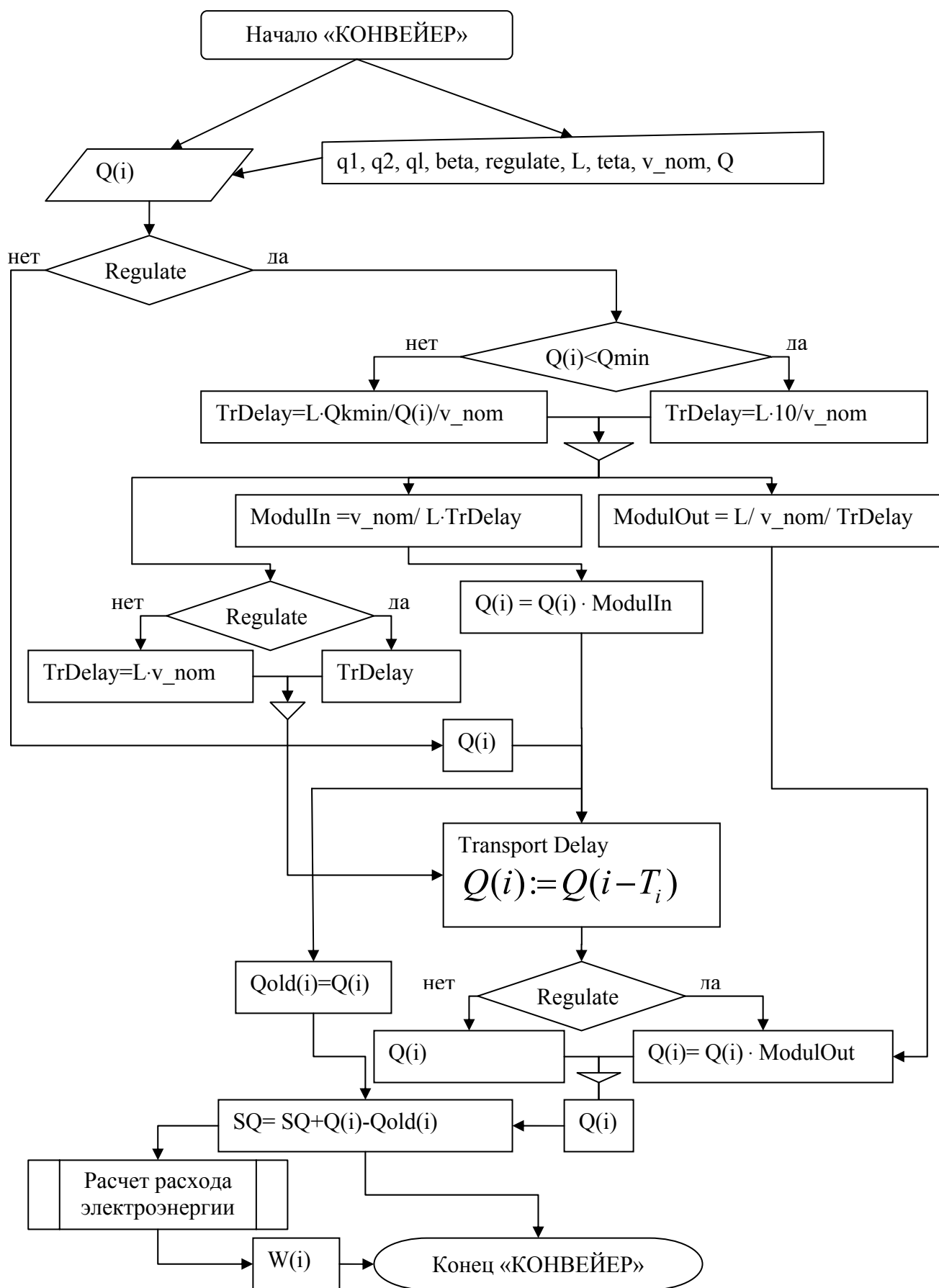


Рисунок 4.5 Алгоритм расчета минутных реализаций выходного грузопотока конвейера и электропотребления

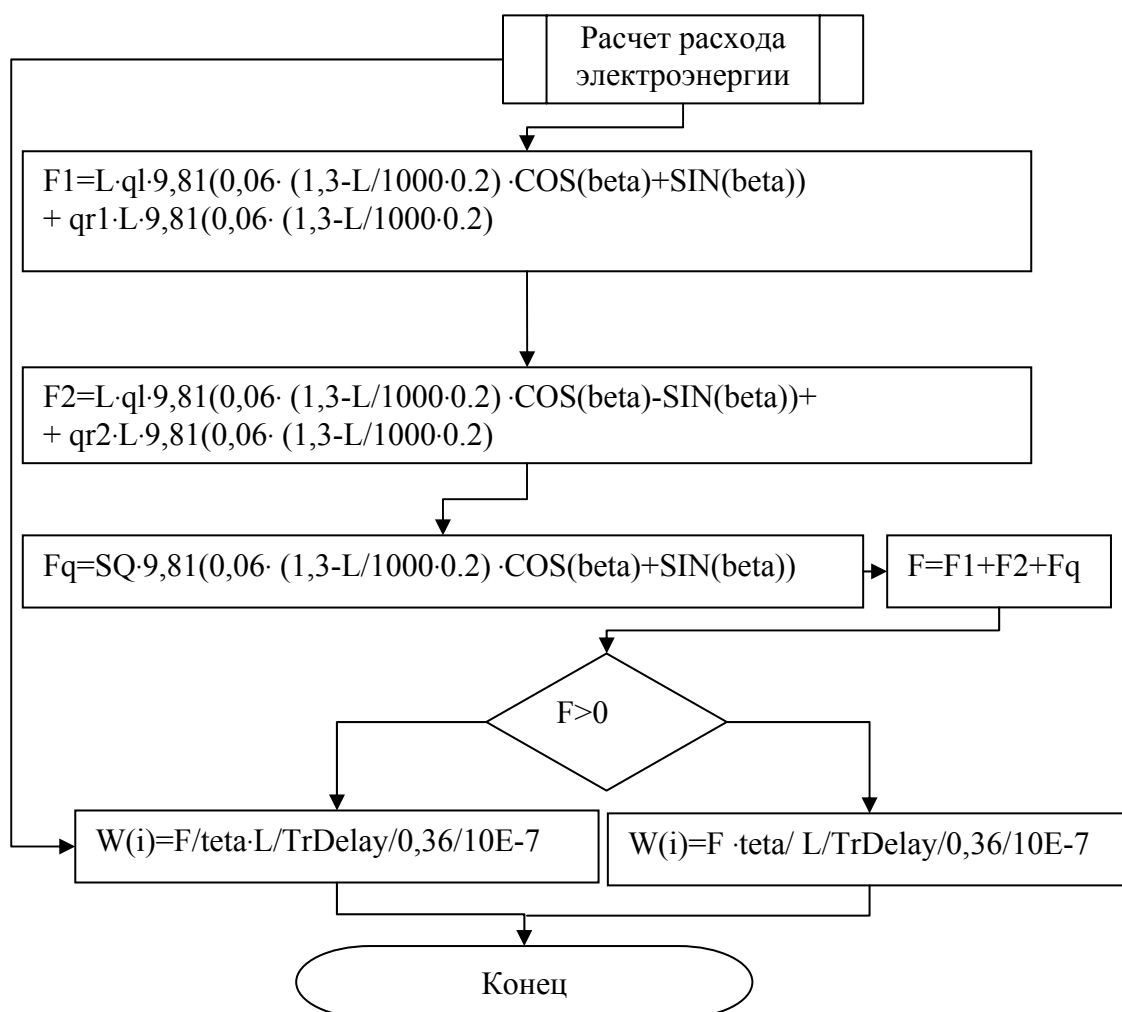


Рисунок 4.6 Подалгоритм расчета потребления электроэнергии конвейером

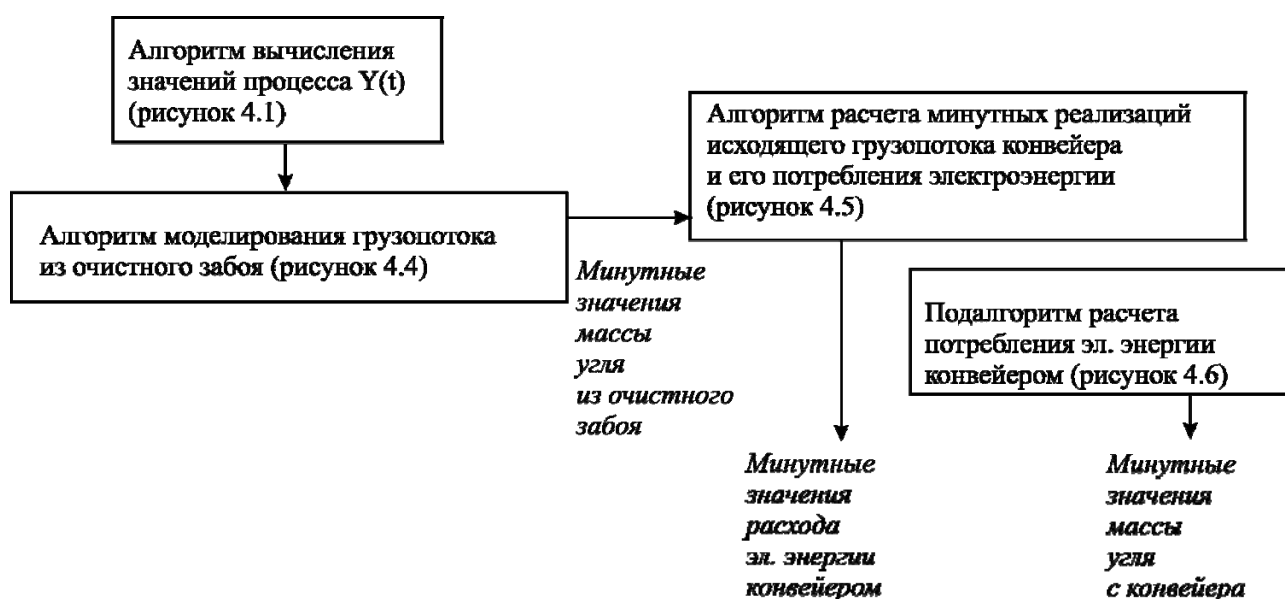


Рисунок 4.7 Связь блоков алгоритмов в общей структуре моделирования

4.2 Программная реализация моделей определения энергоэффективности

По представленным на рисунках 4.4 – 4.7 алгоритмам, разработаны имитационные модели блоков в среде MATLAB SIMULINK [83], гибкие к моделированию транспортных сетей любой сложности. Среда позволяет инкапсулировать параметры и расчет физических систем в визуально оформленные блоки, соединять эти блоки, передавая расчетные значения из системы в систему. Применительно к решаемой задаче, каждый блок характеризуется набором параметров для соответствия его реальному аналогу в транспортной сети шахты. Блок «ЛАВА» имеет только выходной порт для моделирования выходного грузопотока. Блок «КОНВЕЙЕР» имеет входные и выходные порты для грузопотоков. Также блок «КОНВЕЙЕР» имеет выходной порт для индикации потребленной электроэнергии и порт для отслеживания текущей массы груза на конвейере.

Блок «ЛАВА» характеризуется следующими внутренними параметрами (см. рисунок 4.8):

- Математическим ожиданием грузопотока на оси машинного времени, кг/мин;
- Дисперсией грузопотока на оси машинного времени, кг/мин;
- Коэффициентом машинного времени.

Блок «КОНВЕЙЕР» характеризуется параметрами (см. рисунок 4.9):

- Регулируемость, "да" или "нет";
- Масса нижних роlikоопор, кг/м;
- Масса верхних роlikоопор, кг/м;
- Масса ленты, кг/м;
- Паспортная производительность при текущей скорости, т/ч;
- Текущая скорость, м/с (либо максимальная в регулируемом режиме);
- Длина конвейера, м;
- Угол установки, °;
- КПД привода.

В блоках используются готовые элементы среды MATLAB SIMULINK: Normal distribution – нормальное распределение в диапазоне от 0 до 1; Uniform distribution – непрерывное равномерное распределение в диапазоне 0 до 1; Step – скачкообразный импульс; Multiply – скалярное умножение величин; Sum –

суммирование величин; Function – заданная пользователем сложная математическая функция; Const – постоянная величина; Memory – задержка входного сигнала на один временной такт. Switch – аналог условного оператора.

Блоки SIMULINK, разработанные на основе приведенных на рисунках 4.4 – 4.6 алгоритмов, представлены на рисунках 4.7 – 4.9.

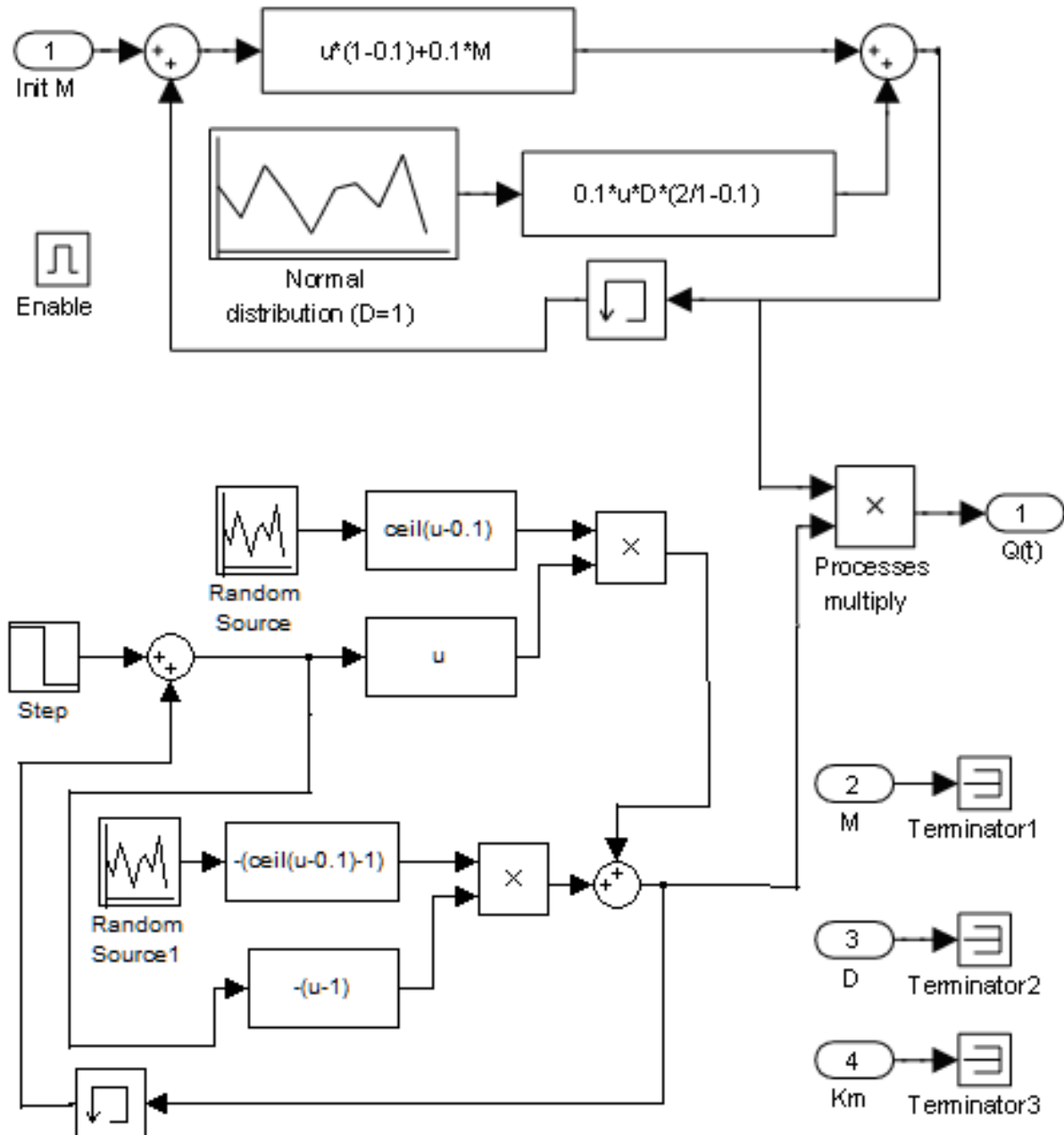


Рисунок 4.8 – Реализованный в SIMULINK алгоритм моделирования потока горной массы из очистного забоя

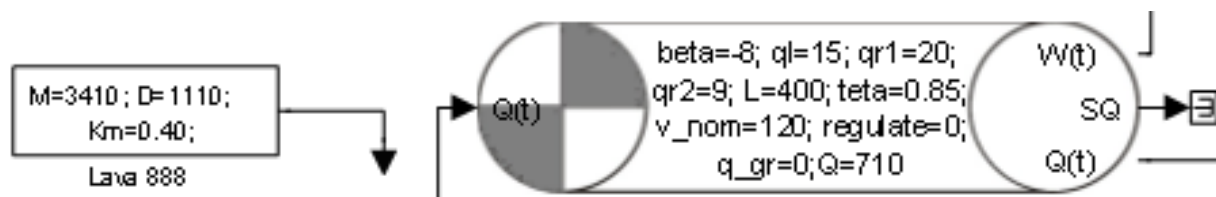


Рисунок 4.9 – Внешний вид блоков моделирования очистного забоя и конвейера

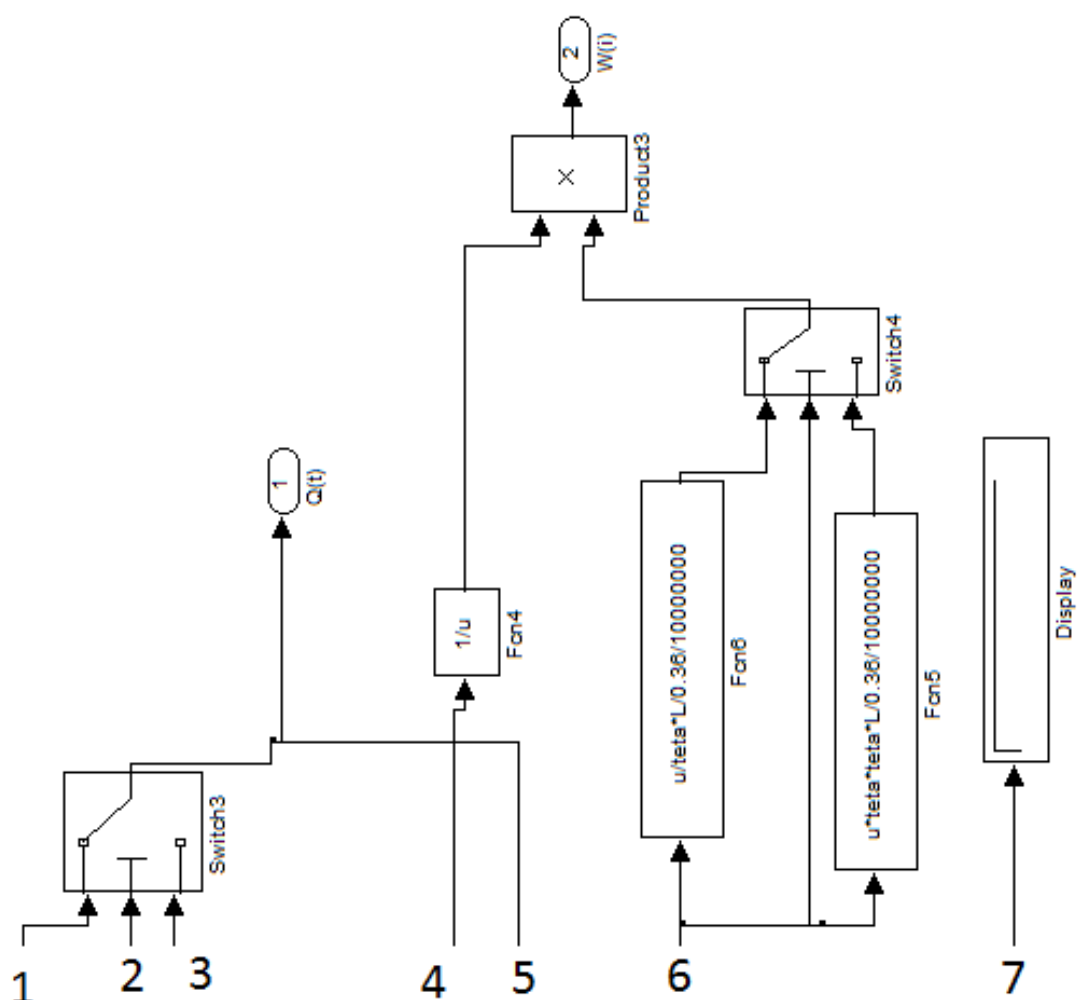


Рисунок 4.10 – Реализация в SIMULINK алгоритма расчета минутных значений выходного грузопотока конвейера и его электропотребления

ПАО "ДТЭК Павлоградуголь", разработанная в программном пакете MATLAB SIMULINK [83].

Схема магистральных конвейерных линий шахты «Павлоградская» приведена на рисунке 1.1. 4 «бис» восточный и 4 западный магистральные конвейерные штреки расположены на 160 горизонте и принимают угольный поток от 415 и 414 лавы соответственно. Выемка угля в 415 лаве производится при помощи добычного комбайна УКД200/400. Для транспортирования угля, от лавы, в магистральном конвейерном штреке установлены два конвейера 2ЛТП1000КСП длиной 400м и 1050 м соответственно. На каждом из них установлены по два приводных двигателя мощностью по 110 кВт каждый. Скорость конвейеров 2 м/с, производительность 710 т/час. Конвейеры имеют практически 4-х кратный запас по производительности. Это связано с тем, что ранее эта транспортная ветвь работала на два добычных участка 413 и 403. Первый конвейер в этой ветви длиной 400 м, уклонный, с углом падения -8 град. Второй работает на горизонтальном участке.

Западный магистральный конвейерный штрек №4 находится на том же горизонте, но направление движения угля с севера на восток. Конвейерная магистраль образована двумя конвейерами типа 2ЛТ80КСП, оба длиной по 640 м. Скорость конвейеров 2,5 м/с, они обеспечивают производительность 510 т/час. Грузопоток формируется от одной лавы 414. Конвейеры оборудованы двухдвигательным приводом мощностью по 55 кВт каждый. Грузопоток от обеих лав суммируется и поступает на магистраль пл.С1, которая состоит из трех конвейеров: 1Л100У длиной 220м, 1Л1000 длиной 780 м и 1Д100УД длиной 400 м. Максимальную производительность этой цепочки конвейеров ограничивает конвейер 2Л100У производительностью 684 т/час.

Конвейерный квершлаг №2 и 53-й магистральный конвейерный штрек принимает уголь от добычного комплекса типа «Ostroj», 304-й лавы. Он состоит из двух конвейеров типа ЛТП1000КСП, длиной 1020 м и 290 м. На первом установлены 2 двигателя по 132 кВт, на втором два двигателя по 110 кВт. Комплекс «Ostroj» обеспечивает производительность до 2500 т/сутки.

Грузопотоки из магистрального конвейерного штрека пл.С1 и конвейерного квершлага №2 объединяются на втором конвейере

магистрального конвейерного штрека пл. С5. Конвейер типа 2Л100У длиной 620 м оборудован двумя двигателями по 110 кВт. Первый в этой линии конвейер 2Л120, имеет длину 780 м и оборудован двумя двигателями по 250 кВт каждый. Особенностью этих конвейеров является использование двигателей с частотой вращения 1000 об/мин, что обеспечивает скорость ленты 1,5 м/с.

Далее уголь поступает на конвейер 1ЛУ120 длиной 740 м, расположенный в конвейерном угольном квершлага. На конвейере установлены два двигателя мощностью по 250 кВт, и он обеспечивает производительность 1260 т/час. На этот же конвейер производится выгрузка угля с конвейера 1Л100У №1 длиной 590 м с 1 Восточного магистрального конвейерного штрека. Выгрузка производится через усредняющий бункер объемом 7 м³.

Грузопоток для 1-го Восточного магистрального конвейерного штрека начинает формироваться с 888-й лавы. Добыча в 888-й лаве производится комбайном УКД-800ДМ. Уголь со сборного конвейера этой лавы поступает на конвейер 2ЛТП1000КСП длиной 440 м 1ВКШ пл.С8 и далее на конвейер 2ЛТП1000КСП длиной 640 м Восточного конвейерного квершлага пл.С5-С8. С этого конвейера уголь поступает на конвейер 1ЛТ100У длиной 175 м. С которого, через усредняющий бункер, поступает на конвейер 1Л100У длиной 650 м. На этот же конвейер производится выгрузка угля со сборного конвейера 563 лавы. Далее уголь по четырем конвейера 1Л100У поступает на конвейерный угольный квершлаг. С него на наклонный конвейерный квершлаг, а затем в угольный гезенк гл. ствола высотой 37 м и углом наклона 80°.

Согласно приведенному описанию и рисунку 1.1, а также характеристик конвейеров приведенных в таблице 4.1 выполним имитационное моделирование. Имитационная модель приведена на рисунке 4.11.

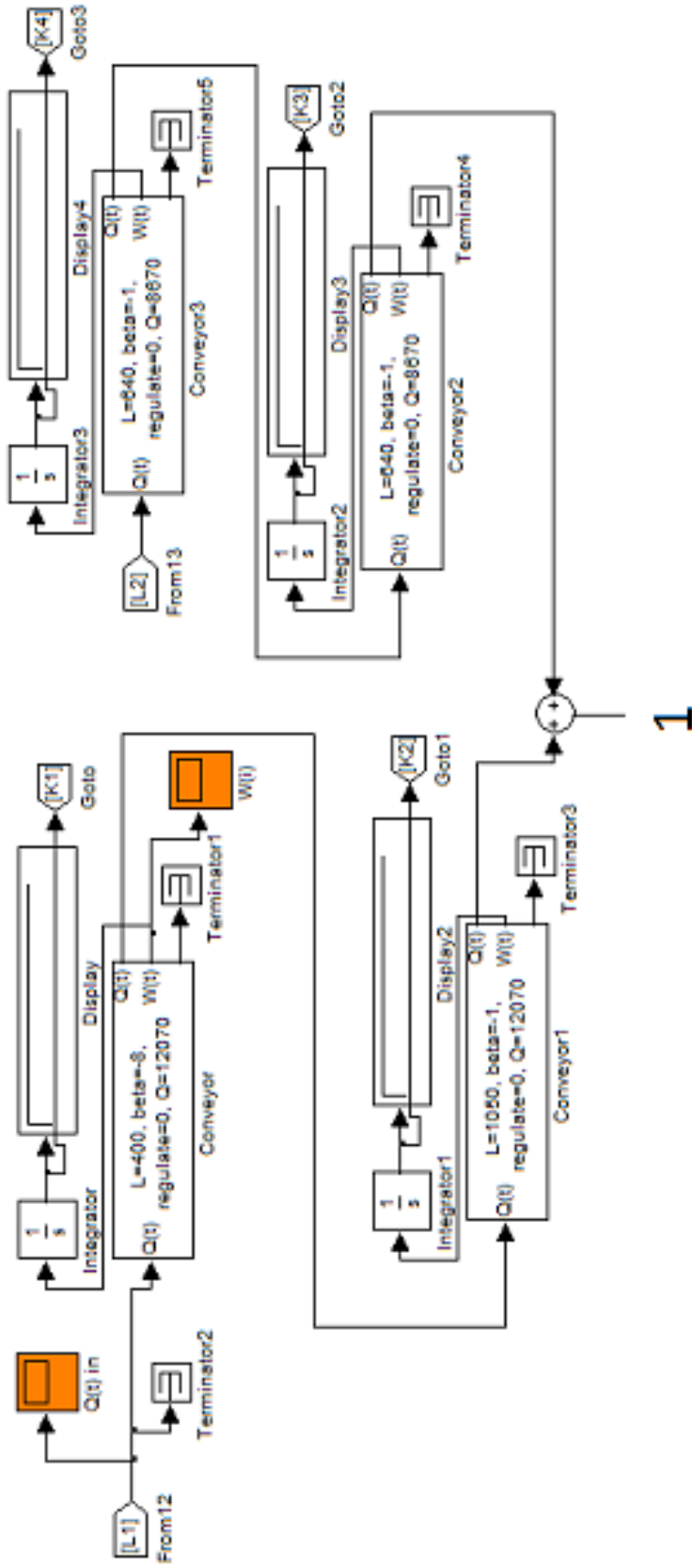


Рисунок 4.1.1. Имитационная модель магистрального конвейерного транспорта шахты Павлоградская (продолжение см. на стр. 98)

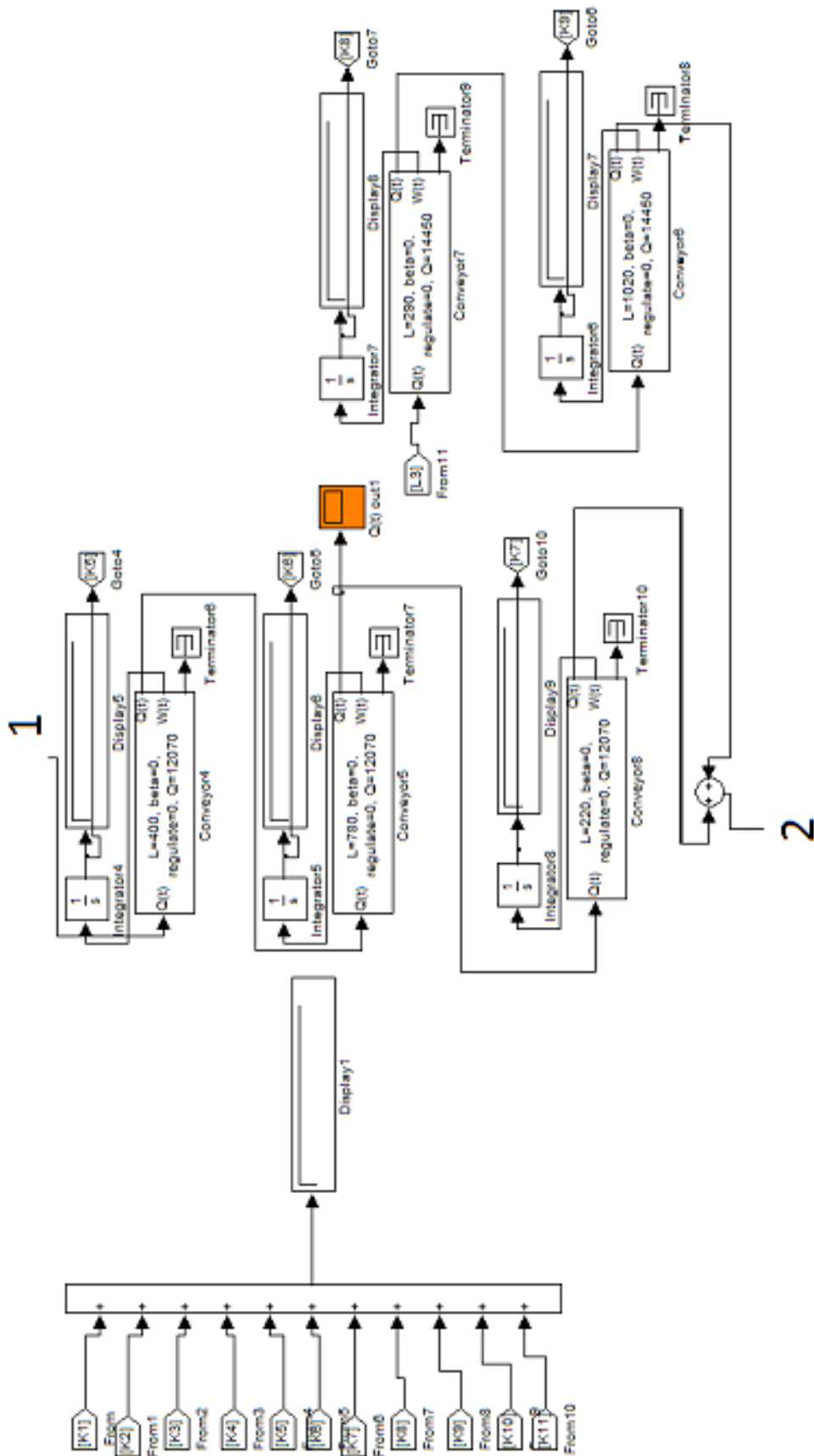


Рисунок 4.1.1. Имитационная модель магистрального конвейерного транспорта шахты Павлоградская
 Продолжение (начало см. на стр. 97)

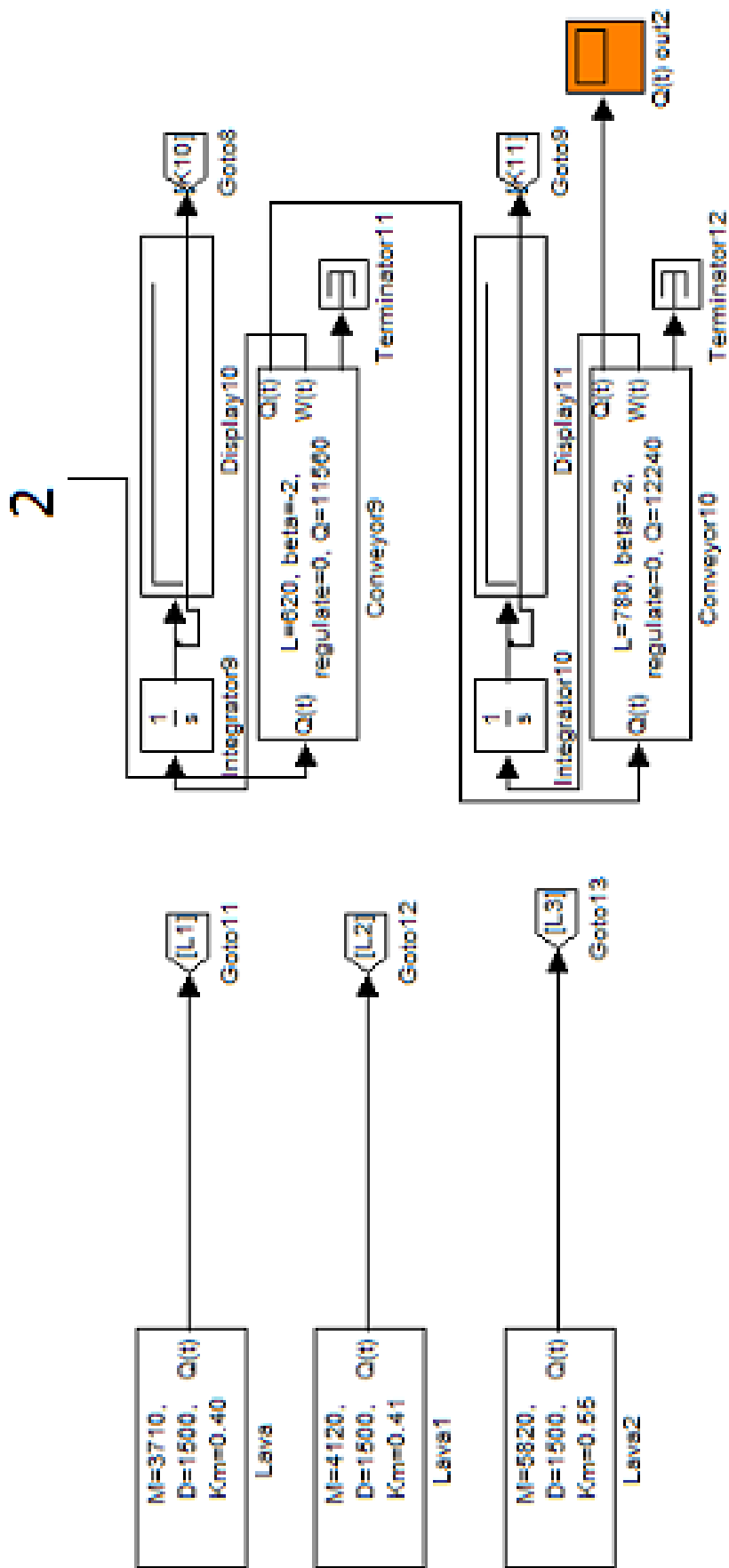


Рисунок 4.11. Имитационная модель магистрального конвейерного транспорта шахты Павлоградская
Продолжение (начало см. на стр. 97,98)

Таблица 4.1 – Технические данные конвейеров

Тип конвейера	Тип двигателя	Рн, кВт	Cos	КПД, %	Дл. Конв, м.	Скорость движения ленты, м/с	Угол град.	Производительность, т/ч
4 бис восточный магистральный конвейерный штрэк								
2ЛТП1000КС П	ЭДКОФ-53/4	2x110	0,88	92,5	400	2,0	-8	710
2ЛТП1000КС П	2x2ЭДКОФВ250L В4	2x110	0,85	93,4	1050	2,0	-1	710
4 западный магистральный конвейерный штрэк								
2ЛТ80КСП №2	2xЭДКОФВ250М-4	2x55	0,85	92,5	640	2,5	-1	510
2ЛТ80КСП №1	2xЭДКОФВ250М-4	2x55	0,85	92,5	640	2,5	-1	510
Магистральный конвейерный штрэк пл. С1								
1Л1000УД	2ВР-280М-6	2x90	0,87	97,0	400	1,0	-1	355
2Л100У	2ЭДКОФВ250LB6 2ЭДКОФВ250LB4	75 110	0,82 0,85	92 93,4	780	1,0	-1	340
2-й западный магистральный конвейерный штрэк								
1Л100У	ВР-280S-4	110	0,9	93,8	220	1,0	1	340
5-й западный магистральный конвейерный штрэк								
2ЛТП1000КС П	ЭДКРВ250LC4	132	0,86	94	290	2,5	0	850
5-й западный магистральный конвейерный штрэк, конвейерный квершлаг №2								
2ЛТП1000КС П	2xЭДКРВ250LC4	2x132	0,86	94	320+ 700	2,5	0	850
Магистральный конвейерный штрэк пл. С5								
2Л100У	ВАО-315S6	110	0,87	93,5	620	2,0	-2	680
2Л120	2xВАО2-315М4	2x250	0,89	94,6	780	1,5	-2	720
1-й восточный магистральный конвейерный штрэк пл. С8								
2ЛТП1000КС П	2xЭДКОФВ-53/4	2x110	0,88	92,5	440	2,0	-1	710
Восточный конвейерный квершлаг пл. С5-С8								
2ЛТП1000КС П	2xВР-250-S4	2x110	0,9	93,8	640	2,0	-8	710
1Л100У	ВР-250-S4	75	0,89	92,0	175	2,0	-8	680
1-й восточный магистральный конвейерный штрэк								
1Л100У	2x2ВР-280S-6	2x75	0,86	93,2	650	2,0	-1	680
1Л100У	2x2ВР-280S-6	2x75	0,86	93,2	650	2,0	-1	680
1Л100У №2	2x2ВР-280S-6	2x75	0,86	93,2	600	2,0	-1	680
1Л100У №1	2x2ВР-280S-6	2x75	0,86	93,2	590	2,0	-1	680
Конвейерный угольный квершлаг								
2ЛУ120	2xВАО2-315М4	2x250	0,89	94,6	740	2,5	3	1260
Наклонный конвейерный квершлаг								
1Л120	ВАО2-315М4	250	0,89	94,6	260	2,5	10	1260

Имитационная модель скомпонована из приведенных блоков для конвейеров УКТ-2 (участка конвейерного транспорта): конвейера 4-го восточного и западного магистральных конвейерных штреков, штрека пл. С1 и С5, 5-го и 2-го ЗМКШ.

Главной особенностью представленной имитационной модели является возможность моделирования конвейера в двух режимах: с постоянной скоростью движения ленты и со скоростью движения ленты, пропорциональной входному грузопотоку на конвейер. Это предусмотрено с целью наблюдения за электропотреблением отдельных конвейеров и всей шахтной транспортной сети при двух упомянутых режимах работы конвейеров.

Моделирование производим для 10 смен. Регулирование скорости движения ленты осуществляем на конвейерах по вариантам:

1. Схема без регулирования скорости движения ленты
2. Регулирование скорости только на последовательно установленных конвейерах, транспортирующих груз из одной лавы
3. Регулирование скорости сборных конвейеров
4. Регулирование скорости всех конвейеров

На имитационной модели получены следующие значения по предложенным вариантам, а результаты сведены в таблицу 4.2:

Таблица 4.2 Электропотребление магистральным конвейером транспортном шахты Павлогорская при установке средств регулирования скорости движения конвейерной ленты (и без них) по вариантам

Варианты	Потребление, кВт·ч/смена
1	3227,59
2	2039,03
3	2571,91
4	1351,66

Анализируя таблицу 4.2 можно сделать вывод, что снижение расхода электроэнергии наблюдается при установке средств повышения энергоэффективности по всем предложенным вариантам. Однако наибольшее снижения расхода электроэнергии наблюдается при установке преобразователей частоты на последовательно установленных конвейерах, транспортирующих груз из одной лавы.

На рисунках 4.12-4.14 приведены графики, полученные в результате имитационного моделирования системы магистрального конвейерного транспорта шахты "Павлоградская". На рисунке 4.12 приведен смоделированный с интервалом в 1 минуту грузопоток из очистного забоя за одну смену.

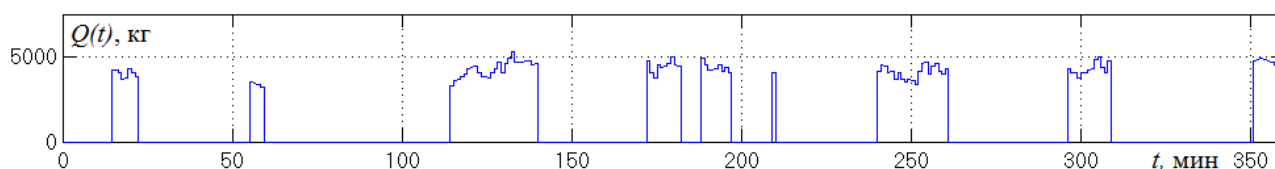


Рисунок 4.12. Результаты имитационного моделирования грузопотока из 414-ой лавы

После прохождения грузопотоков через конвейер с регулируемой скоростью движения ленты грузопоток выравнивается, что представлено на рисунках 4.12 и 4.13.

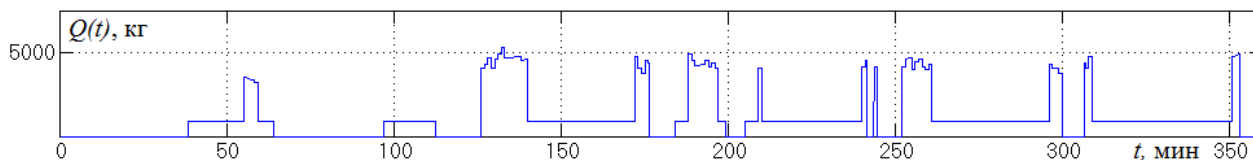


Рисунок 4.13. Результаты имитационного моделирования грузопотока после конвейера с регулируемой скоростью движения ленты 2ЛТ80КСП №2

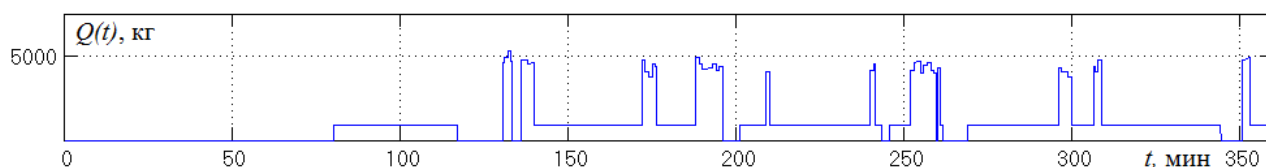


Рисунок 4.14. Результаты имитационного моделирования грузопотока после двух конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты 2ЛТ80КСП №2 и №1

Коэффициент машинного времени грузопотока растёт после прохождения каждого конвейера с регулируемой скоростью движения ленты. При этом электропотребление первого конвейера в линии с регулируемой скоростью за смену составило 75,9 кВт·ч, а второго – 71,8 кВт·ч. Графики минутного электропотребления конвейеров представлены на рисунках 4.15 и 4.16.

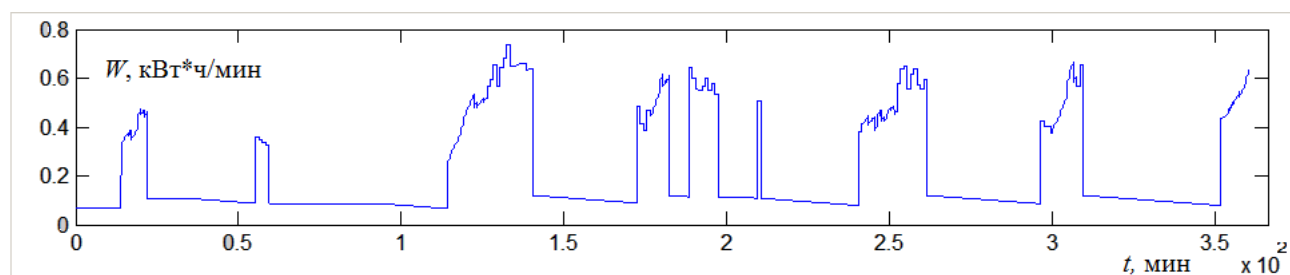


Рисунок 4.15. Результаты имитационного моделирования электропотребления конвейера 2ЛТ80КСП №2 с регулируемой скоростью движения ленты

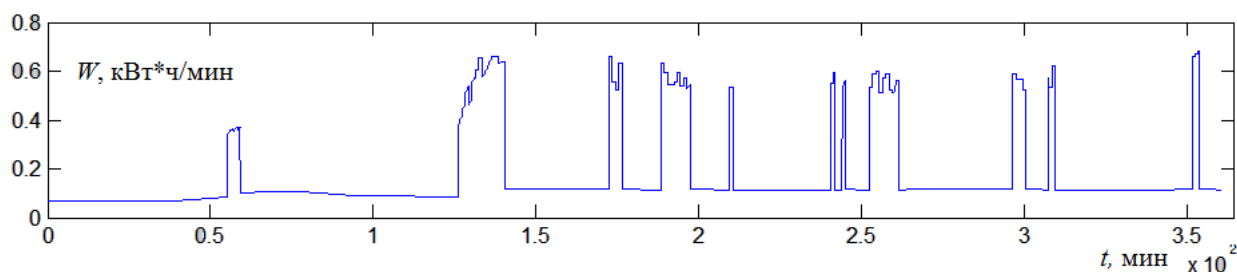


Рисунок 4.16. Результаты имитационного моделирования электропотребления конвейера 2ЛТ80КСП №1 с регулируемой скоростью движения ленты

Удельный расход электроэнергии можно получить для сменных значений, сопоставив графики на рисунках 4.13, 4.14, 4.15 и 4.16 за соответствующие моменты времени.

Анализируя рисунки 4.12 – 4.16 подтверждаем вывод, что снижение расхода электроэнергии на последующем установленном в линии конвейере наблюдается вследствие перераспределения грузопотока.

4.3 Экономическая оценка дополнительного снижения электропотребления при регулировании скорости движения конвейерных лент

Для обоснования принятых решений выполним экономическую оценку снижения расхода электропотребления шахтного магистрального конвейерного транспорта при регулировании скорости движения лент.

В разделе 3.1 анализируются преимущества установки регулируемого привода в цепочку конвейеров. Определим экономический эффект для вновь проектируемого участка шахтной конвейерной сети длиной 1 км, на который необходимо установить магистральный конвейер с учетом его оснащения регулируемым приводом, а также разделении этого участка на 2 – 7 конвейеров, каждый из которых оснащен регулируемым приводом.

Примем, что штрек горизонтальный, а характеристики устанавливаемых конвейеров следующие: $q''_p = 9,2$ кг/м; $q'_p = 20$ кг/м; $q_n = 15$ кг/м; $c' = 1,1$; $\omega = 0,06$; $\beta = 0^\circ$; $v = 2$ м/с, $L = 1$ км. На цепочку конвейеров поступает грузопоток из одной лавы со следующими статистическими характеристиками: $\lambda = 0,25$, $\mu = 0,164$. $M(Q)$ принимает крайние значения диапазона 3400 и 5300 кг/мин, а $K_{ск}$ значения 0,1 и 0,25.

Рассмотрим четыре варианта для сопоставления:

1. $M(Q) = 3400$ кг/мин, $K_{ск} = 0,1$;
2. $M(Q) = 5300$ кг/мин, $K_{ск} = 0,1$;
3. $M(Q) = 3400$ кг/мин, $K_{ск} = 0,25$;
4. $M(Q) = 5300$ кг/мин, $K_{ск} = 0,25$;

Параметр $M(Q)$ определяет, а параметр $K_{ск}$ влияет на динамику грузопотоков, что показано в пункте 3.2.

Используем тяговый расчет конвейера (2.2-2.5) и зависимости перераспределения потока после конвейера с регулируемым приводом (3.2-3.6). Определим математическое ожидание среднечасовой мощности значение которой представлено в таблице 4.3.

На рисунке 4.17 приведем диаграмму значений электропотребления линии с регулируемой скоростью ленты в зависимости от количества конвейеров в ней при $M(Q)=3400$ кг/мин, $K_{ск}=0,25$.

Таблица 4.3. Математическое ожидание среднечасовой мощности при изменении количества конвейеров в линии, а также $M(Q)$ и $K_{ск}$.

		Изменяемые условия			
Математическое ожидание грузопотока $M(Q)$, кг/мин		3400	5300	3400	5300
	Глубина регулирования $K_{ск}$	0,1	0,1	0,25	0,25
Количество конвейеров в линии		Математическое ожидание среднечасовой мощности, кВт			
Один конвейер без регулирования скорости	1	58,72	67,75	58,72	67,75
Несколько конвейеров с регулируемой скоростью	1	24,85	45,75	32,40	59,65
	2	24,20	44,36	30,96	56,75
	3	23,86	43,65	30,02	54,90
	4	23,65	43,20	29,37	53,64
	5	23,53	42,97	29,05	53,05
	6	23,45	42,81	28,82	52,61
	7	23,39	42,69	28,65	52,29
% снижения расхода ээ при увеличении кол-ва конвейеров от 1 до 7		5,88	6,69	11,57	12,34

К примеру, для случая $M(Q)=3400$ кг/мин, $K_{ск}=0,25$ расход электроэнергии при увеличении количества конвейеров с регулируемой скоростью движения ленты от 1 до 7 снизится на $(32,4-28,65) \cdot 100/32,4 = 11,57\%$

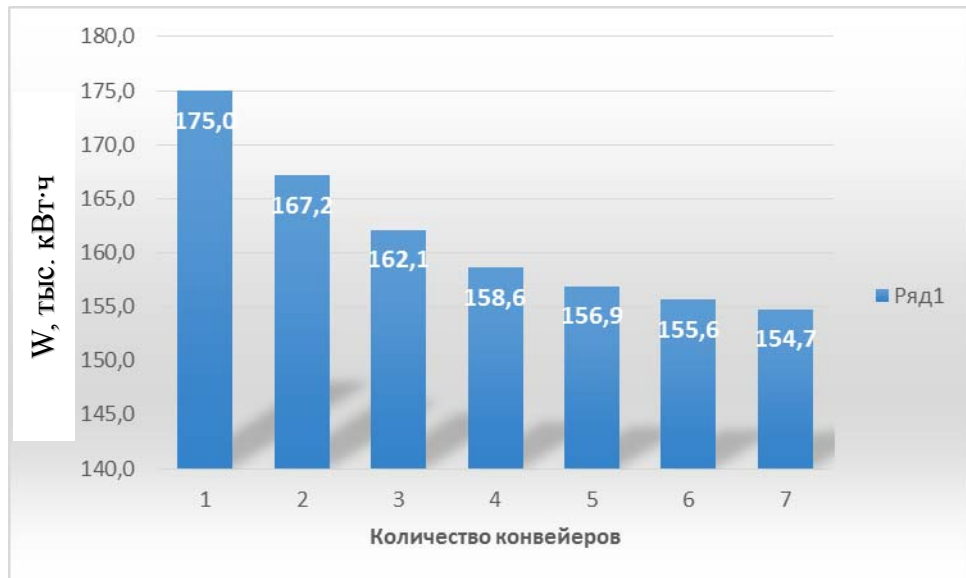


Рисунок 4.17 Изменение годового электропотребления участка конвейерного транспорта с использованием преобразователей частоты в зависимости от количества конвейеров в линии длиной 1 км

В таблице 4.4 приведем следующие сроки окупаемости проектов при стоимости одной приводной станции 166 тыс. грн., а одного преобразователя частоты 600 тыс грн. Таблице приведены значения для числа последовательно установленных конвейеров не более четырех, так как дальнейшая тенденция очевидна.

Таблица 4.4 Срок окупаемости при разбиении конвейерной линии длиной 1 км на несколько с регулируемой скоростью движения ленты

Количество конвейеров	Изменяемые условия		
	3400	5300	3400
Математическое ожидание грузопотока $M(Q)$, кг/мин	3400	5300	3400
Глубина регулирования $K_{ск}$	0,1	0,1	0,25
	Срок окупаемости, лет		
1	4,19	6,45	5,39
2	8,22	12,13	10,22
3	12,21	17,66	14,83
4	16,18	23,11	19,33

Анализируя данные таблицы 4.4 сформулируем вывод, что при дополнительных затратах на приводные станции и преобразователи частоты

срок окупаемости при искусственном разделении линии на несколько конвейеров является неприемлемым. Установка средств регулирования скорости движения конвейерной ленты приемлема либо к уже существующим конвейерным линиям, либо к проектируемым.

На рисунке 3.7 представлена гистограмма зависимости удельного расхода электроэнергии конвейером с регулированием скорости движения ленты в зависимости от местоположения его в транспортной цепочке. Сравним два случая установки преобразователей частоты: а) на конвейеры, которые находятся в одной транспортной линии и транспортируют уголь из одной лавы; б) на конвейера, которые транспортируют уголь из разных лав. Полагаем все параметры конвейеров одинаковыми: $q''_p=9,2$ кг/м; $q'_p=20$ кг/м; $q_n=15$ кг/м; $c'=1,1$; $\omega=0,06$; $\beta=0^\circ$; $v=2$ м/с, $L=1$ км. Схематически варианты изобразим на рисунке 4.18.

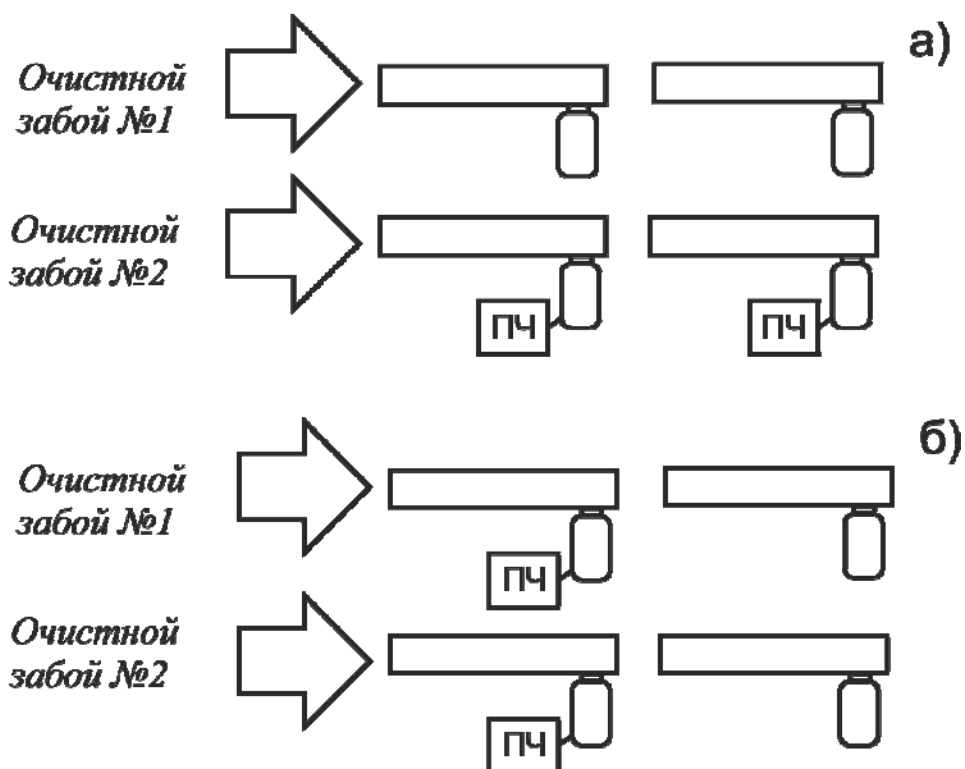


Рисунок 4.18 Варианты установки двух преобразователей частоты к четырем конвейерам: а) в одной линии; б) в разных линиях.

В таблице 4.5 представим простой срок окупаемости при внедрении преобразователей частоты к конвейерам по вариантам, а) и б). Значения получены путем определения по зависимостям (3.12) годового снижения расхода электроэнергии конвейеров и принятой стоимости электроэнергии 1,02 грн/кВт·ч.

Таблица 4.5 Срок окупаемости при разных вариантах установки преобразователей частоты

Установка ПЧ по вариантам	Срок окупаемости, лет
а)	4,01
б)	4,22

Из анализа результатов, приведенных в таблице 4.5 следует, что при ограниченном количестве преобразователей частоты их выгоднее применять на последовательно установленных конвейерах.

Проанализируем экономический эффект от применения средств регулирования скорости движения конвейерной ленты на шахте "Павлоградская". Подсчитаем срок окупаемости мероприятий по вариантам, приведённым в таблице 4.2. Во втором и третьем случае устанавливалось по 7 преобразователей частоты, каждый стоимостью 600 тыс грн. В четвертом случае устанавливалось 14 таких преобразователей. Принимаем стоимость, и подсчитаем простой срок окупаемости, не учитывая банковский процент и инфляцию. Результаты сводим в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 Срок окупаемости при использовании средств регулирования скорости ленты на конвейерах на шахте Павлоградской

Варианты	Срок окупаемости, лет
1	–
2	3,27
3	5,93
4	4,15

Анализируя данные таблицы 4.6 можно сделать вывод, что эффективность применения преобразователей в цепочке конвейеров выше, чем на сборных. Такой эффект объясняется большим резервом для повышения энергоэффективности и дополнительным снижением электропотребления в цепочке конвейеров.

Оценим эффективность использования регулирования скорости движения конвейерной ленты при наличии сборного бремсбергового конвейера. Считаем, что угольная масса поступает из 1,2,3,4-х лав, первые конвейера под лавами с регулируемой скоростью движения ленты и имеют следующие параметры: $q''_p = 9,2$ кг/м; $q'_p = 20$ кг/м; $q_l = 15$ кг/м; $c' = 1,1$; $\omega = 0,06$; $\beta = 0^\circ$; $v = 2$ м/с, $L = 1$ км. Далее грузопоток принимает сборный конвейер. Его параметры: $q''_p = 9,2$ кг/м; $q'_p = 20$ кг/м; $q_l = 15$ кг/м; $\omega = 0,06$ $c' = 1,1$; $L = 1000$ м; $\beta = -6^\circ$; $v = var$ м/с – скорость ленты пропорциональна количеству суммируемых грузопотоков: для одного потока скорость 1 м/с, для двух 2 м/с и т.д. – это необходимо для обеспечения приемной способности соответствующего количества грузопотоков.

Снижение расхода электроэнергии для одного конвейера с регулируемой скоростью ленты составит 182,9 тыс. кВт*ч/год. Срок окупаемости при стоимости преобразователя 600 тыс. грн – 3,28 года. Учитывая дополнительный эффект от снижения электропотребления бремсбергового конвейера экономический эффект увеличится, срок окупаемости соответственно снизится. Результаты расчетов сведем в таблицу 4.7

Таблица 4.7 Результаты расчет срока окупаемости при внедрении регулируемого привода и наличии сборного бремсбергового конвейера

Количество лав, из которых поступает уголь	1	2	3	4
Затраты на преобразователи частоты, тыс грн	600	1200	1800	2400
Годовое снижение затрат на регулируемых конвейерах, тыс грн	182,9	365,8	548,7	731,6
Годовое снижение затрат на регулируемых конвейерах и бремсберговом конвейере, тыс грн	249,4	473,6	635,8	812,8
Срок окупаемости проекта, лет	2,41	2,53	2,83	2,95

Анализируя расчетные значения срока окупаемости проекта можно сделать вывод, что он существенно снижается при наличии сборного бремсбергового конвейера с углом установки более -6 градусов.

4.4 Выводы

1. Усовершенствованный алгоритм моделирования временных характеристик грузопотоков из очистных забоев является линейным. По сравнению с предложенными ранее, он содержит меньшее число переменных, операторов и не содержит нелинейных условных структур, что достигнуто за счет использования свойств элементарных линейных функций для формирования соответствующих значений обобщенной функции процесса. Предложенный алгоритм в совокупности с косвенным методом определения характеристик потоков угля из очистных забоев позволяет в реальном времени оценивать энергоэффективность работы конвейеров и управлять процессами на транспортировании угля, в том числе по минимуму расхода электроэнергии, например, средствами регулируемого привода.

2. Разработанные алгоритмы и их реализация в MATLAB SIMULINK позволяют моделировать систему конвейерного транспорта угольной шахты любой сложности, включая конвейеры с регулированием скорости движения ленты для определения энергоэффективных режимов работы транспортной системы.

3. Экономический эффект от внедрения преобразователей частоты к приводам конвейеров увеличивается при использовании регулирования скорости движения ленты на линии последовательно установленных конвейеров, а также при наличии сборного бремсбергового конвейера. При регулировании скорости движения ленты на последовательно установленных конвейерах срок окупаемости увеличивается на 5% по сравнению с использованием регулирования скорости на конвейерах, что принимают груз с разных очистных забоев.

4. При наличии бремсбергового конвейера с углом установки более -6° после конвейеров с регулированием скорости движения ленты экономический эффект от внедрения преобразователей увеличивается за счет снижения расхода электроэнергии на бремсберговом конвейере. При этом срок окупаемости проекта снижается до 40 % в зависимости от условий работы конвейеров.

5. Увеличение количества последовательно установленных конвейеров с регулируемым приводом в линии определенной длины, по сравнению с одним конвейером с регулируемой скоростью движения ленты той же длины позволяет дополнительно снизить расход электроэнергии до 12 %.

6. Снижение коэффициента скорости $K_{ск}$ конвейеров повышает процент использования резервов энергоэффективности установленных в одной линии конвейеров за счет снижения расхода электроэнергии в периоды отсутствия угольной массы на входе конвейера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача повышения энергоэффективности магистрального конвейерного транспорта путем установления закономерностей влияния динамики грузопотоков и скорости движения ленты на расход электрической энергии транспортной системы угольной шахты.

Основные выводы и результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Идентификацию минутных значений грузопотока из очистного забоя предложено осуществлять по графику электрических нагрузок комплекса с точностью до $\pm 12\%$ для средних значений, что позволяет осуществлять определение расхода электроэнергии системой магистрального конвейерного транспорта угольной шахты.
2. Установлено, что нормативные значения удельного расхода электроэнергии, как критерия для определения энергетической эффективности работы конвейерной линии и системы транспорта в целом, должны приводиться к условиям работы конвейера, учитывая поправку на угол установки, массу движущихся частей и коэффициент сопротивления движению ленты. Поэтому минимально достижимый расход электроэнергии для каждого конвейера имеет специфическое значение, а определение возможного резерва снижения электропотребления требует учета технологических условий работы конкретного конвейера.
3. На основании данных экспериментальных исследований и применения метода наибольшего правдоподобия для их анализа установлено, что закон распределения минутных значений грузопотоков является нормальным для одного грузопотока и

логарифмическим нормальным для случая нескольких грузопотоков в узлах транспортной системы шахты.

4. При увеличении параметра n (2.38) и нелинейной зависимости электропотребления от загрузки у бремсбергового конвейера, его расход электроэнергии снижается за счет усреднения поступающего грузопотока. Параметр n биномиального распределения зависит от среднего времени отсутствия и наличия грузопотока, длины конвейера и скорости движения ленты. Эффект усреднения достигается при увеличении количества суммируемых грузопотоков в узлах транспортной системы, а также при регулировании скорости движения ленты на конвейерах, которые установлены до бремсбергового конвейера.
5. Регулирование скорости движения ленты на последовательно установленных конвейерах дает дополнительное снижение расхода электроэнергии по направлению грузопотока на каждом последующем конвейере за счет работы каждого последующего конвейера более продолжительное время на минимальной скорости.
6. Рациональное размещение преобразователей частоты при ограниченных материальных ресурсах целесообразно определять с учетом динамики грузопотоков и изменения их характеристик регулированием скорости движения лент. Разработанная имитационная модель системы шахтного конвейерного транспорта позволяет определять расход электроэнергии конвейерами с учетом динамики грузопотоков и регулирования скорости движения лент систем шахтного транспорта любой сложности, что будет способствовать повышению энергоэффективности системы конвейерного транспорта
7. Имитационное моделирование при внедрении средств повышения энергоэффективности на ленточных конвейерах на примере шахты «Павлоградская» позволило установить, что наименьший срок

окупаемости наблюдается при установке средств регулирования скорости ленты на последовательно установленных конвейерах в линии. Разделение конвейерной линии длиной один километр на несколько частей снижает потребление электроэнергии при установке регулируемого привода на каждый конвейер с увеличением их числа, но с учетом стоимости дополнительных приводных станций срок окупаемости возрастает до значения более 5 лет. При наличии сборного бремсбергового конвейера с углом установки менее -6 градусов в транспортной системе и регулирования скорости движения ленты на конвейерах до него срок окупаемости снижается в 1,2-1,5 раза.

8. Разработанные модели и алгоритмы по определению удельного расхода электроэнергии позволили обосновать дополнительное снижение расхода электроэнергии до 5 % на последовательно установленных конвейерах, что составляет $0,02 - 0,06$ кВт*ч/т*км и до 9 % в системе шахтного конвейерного транспорта при наличии сборных бремсберговых конвейеров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ / Под ред. Б. Ф. Братченко. – М.: Недра, 1978. – 423 с.
2. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, И.П. Ремизов, С.А. Саратикянс и др.; Под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра, 1990. – 245 с.
3. Бурчаков, А.С. Выбор рациональных технологических схем угольных шахт / Бурчаков А.С., Харченко В.А., Кафорин Л.Н. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
4. Ленточные конвейеры в горной промышленности / В.А. Дьяков, Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев и др. Под редакцией чл.-кор. АН СССР А.О. Спиваковского. М.: Недра, 1982. – 349 с.
5. Коновалов, В.С. Определение областей применения и основных параметров многоприводных ленточных и ленточно-канатных конвейеров для транспортирования массовых сыпучих грузов на дальние расстояния: НИ-4022-4023/ Коновалов В.С., Качанов В.Ф. [ВНИИПТМАШ], М.: 1963.
6. Котов, М.А. Опыт эксплуатации ленточных конвейеров и конвейерных лент на угольных шахтах / М.А. Котов, Ю.И. Григорьев, Г.А. Загорский и др. М., изд. ЦНИЭИ Уголь, 1970, – 91 с.
7. Система учета и контроля расхода электроэнергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, В.В. Ткачев, В.Т. Заика, А.А. Шишацкий, В.В. Надточий, Ю.Т. Разумный. // Промышленная энергетика, 1992, № 7, с.19–21.
8. Заїка, В.Т. Моделі для довгострокового та оперативного управління ресурсо- і електрозбереженням на вугільних шахтах / Заїка В.Т. // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. - Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 1997. – № 340. – С. 47 – 51.
9. Заика, В.Т. Регулирующая способность электроприемников в составе технологических звеньев угольной шахты и способы ее реализации для управления электросбережением / Заїка В.Т. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Межвед. науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1(60). – С. 35 – 40.

10. Малиновский, А.К. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников: Учебник для вузов / Малиновский А.К. – М.: Недра, 1987. – 277 с

11. Пивняк, Г.Г. Новые способы и проекты повышения эффективности электроэнергетического комплекса угольной шахты / Пивняк Г.Г., Разумный Ю.Т., Заика В.Т. // Науковий вісник НГА України. - Дніпропетровськ: [НГА України] – 1999. – № 6. – С. 95–104.

12. Заика, В. Т. Методы повышения эффективности электроснабжения и энергоиспользования подземных горных машин и установок угольных шахт: Дис. д-ра техн. наук: 05.09.03 / [Национальная горная академия Украины]. – Днепропетровск, 2001. – 350 с.

13. Прокуда, В.Н. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта «Павлоградская» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» / В.Н. Прокуда, Ю.А. Мишанский, С.Н. Проценко // Гірничя електромеханіка. – 2012. – № 88. – С. 107-111.

14. Транспорт на горных предприятиях / Б.А.Кузнецов, А.А. Ренгевич, В.Г. Шорин, Н.Я. Биличенко, К.И. Бахурин, А.М. Варшавский, В.И. Тарасов; под общ. ред. Б. А. Кузнецова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 551 с.

15. Кузнецов Б.А. Динамика пуска длинных ленточных конвейеров. / Кузнецов Б.А. //Транспорт шахт и карьеров. М.: Недра, 1971.

16. Шахмейстер, Л.Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости конвейеров, / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев, А.К. Лобачева // М., 1972. – 106 с.

17. Шахмейстер, Л.Г. Тяговые расчеты ленточных конвейеров / Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. – М. [МГИ]. 1969. 108 с.

18. Шахмейстер, Л.Г. Вероятностные методы расчета транспортирующих машин / Л.Г. Шахмейстер – М.,1983. – 312 с

19. Кариман, С.А. Моделирование и оптимизация производственных процессов при добыче угля / Кариман С.А., Брайцев А.В., Шрамко В.М. М.: Изд-во "Наука", 1975. – 135.

20. Петков, О. Н. Разработка и исследование системы автоматического управления скоростью ленточного конвейера по входному грузопотоку: автореф. дис. на сосиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.07 "Автоматизация процессов управления"/ Петков О. Н. – Москва, 2007 – 20 с.

21. Разумный, Ю.Т. Энергозбереження / Разумный Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. – Дніпропетровськ: [НГУ], 2008. – 164 с.

22. Николаев, А.К. Проблемы эксплуатации конвейерного транспорта на рудоперерабатывающих заводах Республики Куба / Николаев А.К., Васильев К.А. и др. // Горное оборудование и электромеханика. – Издательство «Новые технологии». – 2008. – №1. – С. 78-80.

23. Монастырский, В. Ф. Снижение энергозатрат при транспортировании насыпных грузов с помощью управления скоростью ленты конвейера / Монастырский В. Ф., Максютенко В. Ю., Кирия Р. В., Бужинский И. А. // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2007. – №10. – С. 35 – 37.

24. Shirong Zhang, Xiaohua Xia, Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems (2010), Applied Energy Publ., vol. 87, pp. 1929–1937. url: <http://www2.ee.up.ac.za/~xxia/APEN2010.pdf>

25. G. Lodewijks, D. L. Schott and Y. Pang Energy saving at belt conveyors by speed control, (2011) In s.n. (Ed.), Proceedings of the 16th beltcon conference (pp. 1-10). Fourways: Imhc. url: <http://www.beltcon.org.za/docs/B16-12.pdf>

26. Lauhoff H. Speed Control on Belt Conveyors – Does it Really Save Energy? (2005) Bulk Solids Handling Publ.; 25(6), pp. 368-377.

27. Проценко, С.Н. Снижение энергопотребления на конвейерном транспорте угольных шахт / Проценко С.Н. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2008. – Вип. 81. – С. 31-40.

28. Разумный, Ю.Т. Повышение энергоэффективности конвейерного транспорта угольных шахт / Разумный Ю.Т., Рухлов А.В., Козарь А.В. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2006. – Вип. 76. – С. 24 – 28.

29. Монастырский, В.Ф. Оптимизации энергоемкости транспортирования насыпных грузов ленточными конвейерами / В.Ф. Монастырский, С.В. Монастырский, Р.В. Кирия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М. : [МГГУ]. – 2008. – №11. – С. 304 – 309.

30. Монастырский, В.Ф. Эффективность работы ленточных конвейеров на горных предприятиях / В.Ф. Монастырский, В.Ю. Максютенко, Р.В. Кирия // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. — Днепропетровск: [ИГТМ НАНУ], 2010. — Вип. 88. — С. 185-191.

31. Разумный, Ю.Т. Режимы электроспоживания вугльных шахт: навч. Посібник / Разумный, Ю.Т. – Діпропетровськ, [Національна гірничя академія України], 2002. – 126 с.

32. Михэль Заклика БСС БАРТЕК Завод Менден/Германия, Мечислав Колек CARBO-BARTEC S.z/Польша, Станислав Тытко КWK «ANNA»/Польша, Ленточные конвейеры с регулируемой скоростью. [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: www.bartec.kz/files/mining/for-conveyance.pdf

33. Лобачева, А.К. Энергетические показатели конвейерного транспорта с регулируемой и нерегулируемой скоростью / А.К. Лобачева // Транспорт шахт и карьеров; под общ. ред. чл.-корр. АН СССР А.О. Спиваковского. – М., 1971. – С. 158-163.

34. Полунин, В.Т. Эффективность регулирования скорости шахтных конвейеров / В.Т. Полунин // Научные труды МГИ. М.:[МГИ], 1968. – №53. – с. 87–95.

35. Костюк, В.С. Регулируемый электропривод шахтных установок: Учебное пособие / Костюк В.С., Волкова Л.П., Фащиленко В.Н. – М.: [МГИ], 1984. – 65 с.

36. Эффективное использование электроэнергии и топлива в угольной промышленности / Н.И. Волощенко, Э.П. Островский, В.И. Мялковский и др. Под ред. Э.П. Островского, Ю.П. Миновского. – М.: Недра, 1990. –407 с.

37. Технично-економичеcкое обоснование внедрения частотно-регулируемого электропривода ленточных конвейерных установок. / Т.С. Камалов., О.З. Тоиров [Восемнадцатая Всероссийская научно-техническая конференция "Энергетика: эффективность, надежность, безопасность "] Томск – 2012, [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2012/C15/021.pdf

38. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под. ред. И.Я. Браславского. – М. : АСАДЕМА, 2004. – 202 с.

39. Економичне обгрунтування діапазону регулювання швидкості конвеєрних установок в умовах енергозберігаючої стратегії гірничо-збагачувальних комбінатів / Осадчук Ю.Г., Крутов Г.В., Савицький О.І., Саприкін Є.Д., Кочубей О.І., Вольщиков В.В. // Вісник КНУ, Випуск 36, с. 19-23. Кривий Ріг 2014, [Електронний ресурс] – Режим доступа до даних: journal.knu.edu.ua/vknu_36.pdf.

40. Каталог продукции УкрНИИВЭ. [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: ukrniive.com.ua/download/katalog_ukrniive.pdf

41. Компания BARTEC [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://bartec.ua/> .

42. Сажин, Р.А. Автоматизация технологических процессов горного производства: учеб. пособие / Р.А. Сажин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 138 с.

43. Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации промышленного транспорта (конвейерный, трубопроводный и другие транспортные средства непрерывного действия): ПОТ Р М-029-2003. Москва «Издательство НЦ ЭНАС» 2003. [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/41/41961/

44. Стадник, Н.И. Об использовании самовентилируемых двигателей в составе частотно-регулируемого электропривода ленточных конвейеров / Стадник Н.И. // Оптимізація виробничих процесів: зб. наук. пр.– 2013. – Вип. 14. – Севастополь, 2013. С 22-26.

45. Тетерев, Е.Д. Нагрузочная способность взрывозащищенных электродвигателей при питании от преобразователей частоты / Е.Д. Тетерев, С.В Чечельницкий, А.Ф. Дятлов // Уголь Украины. – 2008. – № 9. – С. 34–36.

46. Подпорин, Т.Ф. Определение энергетических затрат горных транспортных машин: учеб. пособие / Подпорин, Т.Ф. [ГУ КузГТУ] – Кемерово, 2005. – 120 с.

47. Ставицкий, В.Н. Алгоритм идентификации транспортной задержки конвейера / Ставицкий, В.Н. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. Випуск 20 (182) - Донецьк, [ДонНТУ], 2011. – С. 58 – 65

48. Ставицкий, В. Н. Динамика нагрузки регулируемого привода ленточного конвейера / В. Н. Ставицкий // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Обчисл. техніка та автоматизація. – 2012. – Вип. 23. – С. 49-53.

49. Стадник, Н. И. Частотно-регулируемый электропривод ленточных конвейеров на базе самовентилируемых двигателей / Н. И. Стадник // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. гірн.-електромех. – 2012. – Вип. 2. – С. 226–232.

50. Алотия, Л.М. К вопросу о целесообразности регулирования скорости конвейеров в условиях шахт Карагандинского бассейна / Алотия Л.М., Мерцалов Р.В., Краус Э.Г. // "Механизация и автоматизация рудничного транспорта", вып. 17, КНИУИ, Недра, 1965.

51. Алотия, Л.М. Технологические предпосылки ступенчатого регулирования скорости конвейеров в наклонных выработках шахт Карагандинского бассейна / Алотия Л.М., Мерцалов Р.В. // "Вопросы развития и совершенствования рудничного транспорта, вып. 22, КНИУИ, Недра, 1966.

52. Кондрахин, В.П. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. : Гірничо-електромеханічна. – 2013. – Вип. 2. – С. 140-150.

53. Типовое руководство по оборудованию и эксплуатации унифицированной телекоммуникационной системы диспетчерского контроля и автоматизированного управления горными машинами и технологическими комплексами (УТАС) в угольных шахтах (для Украины). Руководящий нормативный документ Министерства топлива и энергетики Украины. - Донецк: 2004. -100 с.

54. Научно-производственное предприятие Рудпромавтоматика [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://www.rpa.ua/html/ru/products/index.php>

55. Система автоматизированного управления разветвленными конвейерными линиями САУКЛ [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://www.instroyservis.com/index.php?page=saukl&lang=4>

56. Ткачев, В.В. Разработка системы передачи информации для подземных условий / В.В. Ткачев, Ю.А. Аврахов, Д.А. Поперечный, П.Ю. Огеенко, Н.В. Козарь // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: [РВК НГУ], 2004. – № 19. – Том 2. – С. 20-27.

57. Кирия, Р. В. Об определении коэффициента сопротивления движению ленты конвейера по роликоопорам / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Р. Г. Павленко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / [ИГТМ НАН Украины]. – Днепропетровск. – 2003. – Вып. № 47. – С. 98 – 107

58. Заика, В.Т. Модели для контроля энергетической эффективности шахтных магистральных конвейерных установок / В.Т. Заика // Науковий вісник НГА України. – Дніпропетровськ: [РВК НГА України] – 2000. – № 2. С. 72 – 77.

59. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий /В. И. Галкин, В. Г. Дмитриев, В. П. Дьяченко [и др.]. – М.: [МГГУ], 2005. – 543 с.
60. Конвеєри шахтні стрічкові. Вимоги до проектування, монтажу, технічного обслуговування та ремонту. Стандарт мінвуглепрому України: СОУ 10.1.00185790.004-2006. - Чинний від 06.11.2006.- Київ: Мінвуглепром, 2006. -95 с.
61. Конвейеры ленточные шахтные. Методика расчета: ОСТ 12.14.130-79. / Минуглепром СССР; введ 1981.01.01. – М., 1980. – 70 с.
62. Нормирование топливно-энергетических ресурсов и регулирование режимов энергопотребления / Под ред. В.В. Дегтярева. –М.: Недра, 1983. – 244 с.
63. Енергозбереження. Методи визначення норм витрат електроенергії гірничими підприємствами: ДСТУ 3224-95 – Чинний: від 1997-07-01. - Київ: Мінвуглепром, 1995. –88 с.
64. Енергобаланс вугільних підприємств. Аудит енергоспоживання. Інструкція. Стандарт Мінпаливенерго України : СОУ 10.1.00174094.001-2004. – Чинний від 2005-01-01. Наказ Мінпаливенерго України від 17.11.2004 № 726. – Київ, 2004.
65. Загорулько, А.Д. Методика выполнения измерений массы твердого топлива, поступающего на тепловые электростанции, автоматическими конвейерными весами / А.Д.Загорулько, В.А.Кравчук, В.А.Катунин. – М.: СПО «Союзтехэнерго», 1990. – 9 с.
66. Кондрахин, В. П. Измерение грузопотока на ленточном конвейере с помощью съёмного тензоизмерительного устройства с учётом натяжения ленты / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Гірничо-електромеханічна. – 2013. – Вип. 1. – С. 79–87. [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Npdntu_gir_2013_1_11.pdf

67. Гаврилов, П.Д. Структура системы управления многоприводным ленточным конвейером / Гаврилов П.Д., Носков А.П. // Электротехника, №5, –2009 с. 17–21.

68. Створення новітніх систем енергозабезпечення, методу поглибленого непрямого енергомоніто-рингу вугледобувних комплексів та технології діагностики стану дільничних вибухозахисених трансформаторних підстанцій (КТПВ): звіт по НДР (проміж.): ГП-454/ ДВНЗ «Національний гірничий університет»; кер. С.І. Випанасенко; викон.: Ю.Т. Разумний, В.Т. Заїка, О.І. Хованська, Н.С. Дрешпак, А.В. Рухлов, Я.Г. Куваєв, О.Р. Ковальов, І.Б. Кольцов, А.С. Румянцев, П.В. Камишанський, Є.В. Кошеленко, І.М. Луценко, Д.О. Кошовий, Н.В. Іванова. – Д., 2012. – 241 с., 54 рис., 51 табл., 3 додатки, 51 джерел. – Бі-бліогр.: с. 132 – 139. – № ДР 0112U000873.

69. Разумный, Ю.Т. Энергоэффективность магистрального конвейерного транспорта методом определения величин минутных значений угольного потока / Разумный Ю.Т., Заика В.Т., Прокуда В.Н. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2014. –Вип. 93. –С. 139-143.

70. Патент на корисну модель №98766, Україна. МПК Е 21 С 41/00. Спосіб визначення енергоефективності магистрального конвейерного транспорту / Разумний Ю.Т., Прокуда В.М.; заявник та патентовласник Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет". Публіковано 12.05.2015, Бюл. № 9.

71. Альшиц, Г.И. Горные машины / Альшиц, Г.И. – М.: Госгортехиздат. – 1961. – 491 с.

72. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. –М.: Наука, 1965. –511 с.

73. Основные положения по проектированию подземного транспорта новых и действующих шахт. / М.: [ИГД им. А.А. Скочинского], 1977. – 174 с.

74. Разумный, Ю.Т. Формирование характеристик потока угля конвейерного транспорта по данным моделирования грузопотоков из очистных забоев / Ю. Т. Разумный, В. Т. Заика, В. Н. Прокуда // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Електротехніка і енергетика. – 2013. – Вип. 2. – С. 208-213.

75. Колб, Ант. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник / Колб Ант.А., Колб А.А. – Д.: [Національний гірничий університет], 2006 – 511 с.

76. Разумный, Ю.Т. Эффективное использование электроэнергии та топлива: Навчальний посібник / Разумный Ю.Т., Рухлов А.В., Прокуда В.М., Рухлова Н.Ю; м-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д: [НГУ], 2014. – 223 с.

77. Заика, В.Т. Влияние регулируемого привода на грузопотоки и энергоэффективность системы шахтного конвейерного транспорта / В.Т. Заика, Ю.Т. Разумный, В.Н. Прокуда // Науковий вісник Національного гірничого університету – 2015. – №3. – С. 82-88.

78. Разумный, Ю. Т. Анализ влияния регулирования скорости конвейерной ленты на энергоэффективность транспортных систем / Ю. Т. Разумный, В. Н. Прокуда // Уголь Украины. –2014. –№ 12. –С. 43-46.

79. Прокуда, В. Н. Синтез вероятностных моделей контроля энергоэффективности магистрального конвейерного транспорта угольных шахт / В. Н. Прокуда // Електротехнічні та комп'ютерні системи. –2014. –№ 16. –С. 40-47.

80. Красс, М.С. Математика для экономистов / Красс М.С., Чупрынов Б.П. – СПб.: Питер, 2005, — 464 с: ил.

81. Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю.В. Прохоров, Ред. кол.: С.И. Адян, Н.С. Бахвалов и др. – М.: Сов. Энциклопедия, 1988. –847 с.

82 Fu Zhang, Murali Yeddanapudi, Variable transport delay modeling mechanism, US8180608 B1 [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних: <http://www.google.com.na/patents/US8180608>.

83. Mathworks. Accelerating the pace of engineering and science
[Электронный ресурс] – Режим доступа до даних:
<http://www.mathworks.com/help/simulink/>

Приложение А
Акт о промышленном внедрении результатов диссертационной работы

"УТВЕРЖДАЮ"

Главный инженер ш. "Павлоградская"

ШУ "Павлоградское"

ПАО "ДТЭК Павлоградуголь"

Бекешко А.Р.

2015 г.



АКТ

о внедрении исследований

Прокуды Владимира Николаевича

выполненных в диссертационной работе

на тему: "Энергоэффективность магистрального конвейерного транспорта угольных шахт с учетом динамики грузопотоков"

Настоящий акт составлен о том, что на шахте "Павлоградская" планируются к внедрению следующие научные и практические результаты кандидатской диссертационной работы Прокуды В.Н.:

1. Даны рекомендации по установке средств регулирования скорости движения ленты на конвейерах шахты Павлоградская.

2. Даны рекомендации по оптимизации размещения преобразователей частоты на шахте Павлоградская при ограниченном количестве последних.

Рекомендации основаны на разработанной в диссертации модели, позволяющей определять резервы снижения расхода электроэнергии магистральных конвейеров с учетом условий их работы и установки, а также алгоритма определения оптимальных мест установки средств повышения энергоэффективности конвейерного транспорта.

Главный механик

/Панушко Ю.Б. /

Главный энергетик

/Пономаренко В.Г. /

Приложение Б.
Акт о промышленном внедрении результатов диссертационной работы

"УТВЕРЖДАЮ"

Руководитель департамента
по проектированию
ООО «НПЦ ДТЭК»



В.В. Медолужко
2015 г.

АКТ

о внедрении исследований
Прокуды Владимира Николаевича,
выполненных в диссертационной работе
на тему: «Энергоэффективность магистрального конвейерного транспорта
угольных шахт с учетом динамики грузопотоков»

Настоящий акт составлен о том, что «НПЦ ДТЭК» принят к использованию в проектной документации, при проектировании системы магистрального конвейерного транспорта, способ определения оптимальных, по критерию минимального удельного расхода электроэнергии, мест установки средств регулирования скорости движения конвейерной ленты, отображающий научные и практические результаты кандидатской диссертационной работы Прокуды В.Н. и учитывающий:

1. Возможность определять оптимальные места установки средств повышения энергоэффективности по разработанному алгоритму, учитывающему дополнительные эффекты повышения энергетической эффективности при регулировании скорости движения ленты пропорционально грузопотоку на последовательно установленных магистральных и бремсберговых конвейерах.

2. Возможность определять резервы энергоэффективности системы конвейерного транспорта в целом и отдельно установленных конвейеров.

Начальник электротехнического
отдела НПЦ

/Левченко М.В./

Главный специалист
электротехнического отдела НПЦ

/Загний В.И./

Приложение В.

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс



"УТВЕРЖДАЮ"

Первый проректор

ГВУЗ «НГУ»

д.т.н., проф. Пилев П.И.

09

2015 г.

АКТ

о внедрении исследований

Прокуды Владимира Николаевича

выполненных в диссертационной работе

на тему: "Энергоэффективность магистрального конвейерного транспорта угольных шахт с учетом динамики грузопотоков"

Комиссия, в составе профессора кафедры СЭС д.т.н., проф. Выпанасенко С.И. и профессора каф СЭС к.т.н. Рогозы М.В., составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Прокуды В.Н. приняты к использованию в учебном процессе в ГВУЗ «НГУ» на кафедре систем электроснабжения. Научным результатом, является обоснование применения регулирования скорости движения ленты магистральных конвейерных линий угольных шахт на последовательно установленных конвейерах для дополнительного повышения энергоэффективности.

Указанные результаты включены в лекционный курс "Энергосбережение" и опубликованы в учебном пособии с грифом Рекомендовано ученым советом ГВУЗ "Национальный горный университет". Протокол №4 от 29.04.2014 о присвоении грифа "Рекомендовано ученым советом ГВУЗ "Национальный горный университет" учебному пособию "Ефективне використання електроенергії та палива: Навчальний посібник / Разумний Ю.Т., Рухлов А.В., Прокуда В.М., Рухлова Н.Ю; м-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д: [НГУ], 2014. – 223 с." Содержание учебного пособия соответствует программе дисциплины "Энергосбережение" для студентов специальностей 8.05070103 "Электротехнические системы электроснабжения", 8.05070108 "Энергетический менеджмент" и 8.05070205 "Электромеханические системы геотехнических производств".

Проф. каф. СЭС
д.т.н., проф.

/Выпанасенко С.И./

Проф. каф. СЭС
к.т.н.

/Рогоза М.В./

Приложение Г.
Расчетные значения удельного электропотребления конвейеров в линии при
различных параметрах грузопотока

Расчетные значения удельного электропотребления конвейеров в линии при различных значениях параметров поступающего грузопотока и данных конвейеров.

λ	μ	М	$K_{ск}$	$E_{конв}$	Удельный расход ээ i-м конвейером в линии, кВт*ч/т*км			
					1	2	3	4
0,25	0,164	3400	0,1	0,39	0,394	0,358	0,352	0,349
0,25	0,164	5400	0,1	0,39	0,462	0,414	0,410	0,409
0,25	0,164	3400	0,25	0,39	0,509	0,455	0,443	0,440
0,25	0,164	5400	0,25	0,39	0,557	0,476	0,458	0,453
0,25	0,164	2200	0,1	0,39	0,356	0,331	0,328	0,328
0,25	0,164	2200	0,25	0,39	0,507	0,481	0,476	0,474
0,25	0,164	3400	0,25	0,35	0,474	0,424	0,413	0,410
0,25	0,164	5400	0,25	0,35	0,527	0,450	0,433	0,429
0,25	0,164	3400	0,25	0,45	0,553	0,495	0,482	0,479
0,25	0,164	5400	0,25	0,45	0,596	0,509	0,490	0,485
0,25	0,5	3400	0,25	0,39	0,380	0,359	0,354	0,353
0,25	0,75	3400	0,25	0,39	0,360	0,345	0,341	0,340

Приложение Д.
Расчетные значения удельного электропотребления конвейеров при
различных параметрах их установки

Расчетные значения удельного электропотребления, используя тяговый расчет конвейера и соотношение (2.11) при разных значениях $\beta \in [0^\circ; 18^\circ]$, $\omega \in [0,02; 0,08]$, $E_{\text{конв}} \in [0,1; 0,6]$ при $c'=1,1$.

При $\omega = 0,08$.

$E_{\text{конв}} \backslash \beta$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0,1	0,31	0,37	0,43	0,49	0,54	0,60	0,66	0,71	0,77	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,10	1,15	1,20	1,25	1,31
0,11	0,32	0,38	0,43	0,49	0,55	0,60	0,66	0,72	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,15	1,21	1,26	1,31
0,12	0,32	0,38	0,44	0,50	0,55	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,11	1,16	1,21	1,26	1,32
0,13	0,32	0,38	0,44	0,50	0,56	0,61	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,06	1,11	1,16	1,22	1,27	1,32
0,14	0,33	0,39	0,45	0,50	0,56	0,62	0,67	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,12	1,17	1,22	1,27	1,33
0,15	0,33	0,39	0,45	0,51	0,57	0,62	0,68	0,74	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,07	1,12	1,17	1,23	1,28	1,33
0,16	0,34	0,40	0,45	0,51	0,57	0,63	0,68	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,02	1,07	1,13	1,18	1,23	1,28	1,34
0,17	0,34	0,40	0,46	0,52	0,58	0,63	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,08	1,13	1,18	1,24	1,29	1,34
0,18	0,34	0,40	0,46	0,52	0,58	0,64	0,69	0,75	0,81	0,86	0,92	0,97	1,03	1,08	1,14	1,19	1,24	1,29	1,35
0,19	0,35	0,41	0,47	0,53	0,58	0,64	0,70	0,76	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,09	1,14	1,19	1,25	1,30	1,35
0,2	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59	0,65	0,70	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25	1,31	1,36
0,21	0,36	0,42	0,48	0,54	0,59	0,65	0,71	0,77	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,10	1,15	1,20	1,26	1,31	1,36
0,22	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,71	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,16	1,21	1,26	1,32	1,37
0,23	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,66	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,11	1,16	1,22	1,27	1,32	1,37
0,24	0,37	0,43	0,49	0,55	0,61	0,67	0,72	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,06	1,11	1,17	1,22	1,27	1,33	1,38
0,25	0,38	0,44	0,50	0,56	0,62	0,67	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,12	1,17	1,23	1,28	1,33	1,38
0,26	0,38	0,44	0,50	0,56	0,62	0,68	0,74	0,79	0,85	0,90	0,96	1,02	1,07	1,12	1,18	1,23	1,29	1,34	1,39
0,27	0,39	0,45	0,51	0,57	0,63	0,68	0,74	0,80	0,85	0,91	0,97	1,02	1,08	1,13	1,18	1,24	1,29	1,34	1,40
0,28	0,39	0,45	0,51	0,57	0,63	0,69	0,75	0,80	0,86	0,92	0,97	1,03	1,08	1,14	1,19	1,24	1,30	1,35	1,40
0,29	0,40	0,46	0,52	0,58	0,64	0,70	0,75	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,09	1,14	1,20	1,25	1,30	1,35	1,41
0,3	0,40	0,46	0,53	0,58	0,64	0,70	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25	1,31	1,36	1,41
0,31	0,41	0,47	0,53	0,59	0,65	0,71	0,76	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,10	1,15	1,21	1,26	1,31	1,37	1,42
0,32	0,41	0,48	0,54	0,60	0,66	0,71	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,16	1,21	1,27	1,32	1,37	1,42
0,33	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,83	0,89	0,95	1,00	1,06	1,11	1,16	1,22	1,27	1,33	1,38	1,43
0,34	0,43	0,49	0,55	0,61	0,67	0,73	0,78	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,12	1,17	1,22	1,28	1,33	1,38	1,44
0,35	0,43	0,50	0,56	0,62	0,67	0,73	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,07	1,12	1,18	1,23	1,28	1,34	1,39	1,44
0,36	0,44	0,50	0,56	0,62	0,68	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,02	1,07	1,13	1,18	1,24	1,29	1,34	1,40	1,45
0,37	0,45	0,51	0,57	0,63	0,69	0,74	0,80	0,86	0,91	0,97	1,03	1,08	1,14	1,19	1,24	1,30	1,35	1,40	1,45
0,38	0,46	0,52	0,58	0,64	0,69	0,75	0,81	0,86	0,92	0,98	1,03	1,09	1,14	1,20	1,25	1,30	1,36	1,41	1,46
0,39	0,46	0,52	0,58	0,64	0,70	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,15	1,20	1,26	1,31	1,36	1,41	1,47
0,4	0,47	0,53	0,59	0,65	0,71	0,77	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,10	1,15	1,21	1,26	1,32	1,37	1,42	1,47
0,41	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,77	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,11	1,16	1,21	1,27	1,32	1,37	1,43	1,48
0,42	0,49	0,55	0,61	0,66	0,72	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,06	1,11	1,17	1,22	1,27	1,33	1,38	1,43	1,49
0,43	0,49	0,56	0,61	0,67	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,07	1,12	1,17	1,23	1,28	1,33	1,39	1,44	1,49
0,44	0,50	0,56	0,62	0,68	0,74	0,79	0,85	0,91	0,96	1,02	1,07	1,13	1,18	1,23	1,29	1,34	1,39	1,45	1,50
0,45	0,51	0,57	0,63	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,08	1,13	1,19	1,24	1,29	1,35	1,40	1,45	1,50
0,46	0,52	0,58	0,64	0,70	0,75	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,09	1,14	1,19	1,25	1,30	1,35	1,41	1,46	1,51
0,47	0,53	0,59	0,65	0,70	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25	1,31	1,36	1,41	1,47	1,52
0,48	0,54	0,60	0,66	0,71	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,15	1,21	1,26	1,32	1,37	1,42	1,47	1,52
0,49	0,55	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,11	1,16	1,22	1,27	1,32	1,37	1,43	1,48	1,53
0,5	0,56	0,62	0,68	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,12	1,17	1,22	1,28	1,33	1,38	1,43	1,49	1,54
0,51	0,58	0,63	0,69	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,01	1,07	1,12	1,18	1,23	1,28	1,34	1,39	1,44	1,49	1,54
0,52	0,59	0,64	0,70	0,75	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,08	1,13	1,18	1,24	1,29	1,34	1,40	1,45	1,50	1,55
0,53	0,60	0,65	0,71	0,76	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,08	1,14	1,19	1,24	1,30	1,35	1,40	1,46	1,51	1,56
0,54	0,61	0,66	0,72	0,77	0,82	0,88	0,93	0,98	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25	1,31	1,36	1,41	1,46	1,51	1,57

0,55	0,63	0,68	0,73	0,78	0,83	0,89	0,94	0,99	1,05	1,10	1,15	1,21	1,26	1,31	1,37	1,42	1,47	1,52	1,57
0,56	0,64	0,69	0,74	0,79	0,84	0,90	0,95	1,00	1,06	1,11	1,16	1,22	1,27	1,32	1,37	1,43	1,48	1,53	1,58
0,57	0,66	0,70	0,75	0,80	0,85	0,91	0,96	1,01	1,06	1,12	1,17	1,22	1,28	1,33	1,38	1,43	1,48	1,54	1,59
0,58	0,67	0,72	0,76	0,81	0,86	0,92	0,97	1,02	1,07	1,13	1,18	1,23	1,28	1,34	1,39	1,44	1,49	1,54	1,59
0,59	0,69	0,73	0,78	0,82	0,87	0,93	0,98	1,03	1,08	1,13	1,19	1,24	1,29	1,34	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60
0,6	0,71	0,74	0,79	0,84	0,89	0,94	0,99	1,04	1,09	1,14	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,46	1,51	1,56	1,61

При $\omega = 0,06$

$E_{\text{конт}} \backslash \beta$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0,1	0,24	0,29	0,35	0,41	0,47	0,52	0,58	0,63	0,69	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,02	1,07	1,12	1,18	1,23
0,11	0,24	0,30	0,35	0,41	0,47	0,52	0,58	0,64	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,07	1,13	1,18	1,23
0,12	0,24	0,30	0,36	0,41	0,47	0,53	0,58	0,64	0,70	0,75	0,81	0,86	0,92	0,97	1,02	1,08	1,13	1,18	1,24
0,13	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,53	0,59	0,64	0,70	0,76	0,81	0,87	0,92	0,97	1,03	1,08	1,13	1,19	1,24
0,14	0,25	0,31	0,36	0,42	0,48	0,54	0,59	0,65	0,70	0,76	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,09	1,14	1,19	1,24
0,15	0,25	0,31	0,37	0,42	0,48	0,54	0,60	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,14	1,20	1,25
0,16	0,25	0,31	0,37	0,43	0,49	0,54	0,60	0,66	0,71	0,77	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25
0,17	0,25	0,31	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,66	0,71	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,04	1,10	1,15	1,20	1,26
0,18	0,26	0,32	0,38	0,44	0,49	0,55	0,61	0,66	0,72	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,15	1,21	1,26
0,19	0,26	0,32	0,38	0,44	0,50	0,55	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,11	1,16	1,21	1,26
0,2	0,26	0,32	0,38	0,44	0,50	0,56	0,61	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,06	1,11	1,16	1,22	1,27
0,21	0,27	0,33	0,39	0,45	0,50	0,56	0,62	0,67	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,11	1,17	1,22	1,27
0,22	0,27	0,33	0,39	0,45	0,51	0,57	0,62	0,68	0,73	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,06	1,12	1,17	1,22	1,28
0,23	0,27	0,34	0,40	0,45	0,51	0,57	0,63	0,68	0,74	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,07	1,12	1,17	1,23	1,28
0,24	0,28	0,34	0,40	0,46	0,52	0,57	0,63	0,69	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,02	1,07	1,13	1,18	1,23	1,28
0,25	0,28	0,34	0,40	0,46	0,52	0,58	0,63	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,08	1,13	1,18	1,24	1,29
0,26	0,29	0,35	0,41	0,47	0,52	0,58	0,64	0,69	0,75	0,81	0,86	0,92	0,97	1,03	1,08	1,13	1,19	1,24	1,29
0,27	0,29	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59	0,64	0,70	0,75	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,08	1,14	1,19	1,24	1,30
0,28	0,29	0,36	0,42	0,47	0,53	0,59	0,65	0,70	0,76	0,81	0,87	0,93	0,98	1,03	1,09	1,14	1,20	1,25	1,30
0,29	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,59	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25	1,31
0,3	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,71	0,77	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,10	1,15	1,20	1,26	1,31
0,31	0,31	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,66	0,72	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,16	1,21	1,26	1,31
0,32	0,31	0,37	0,43	0,49	0,55	0,61	0,66	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,11	1,16	1,21	1,27	1,32
0,33	0,32	0,38	0,44	0,50	0,55	0,61	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,06	1,11	1,16	1,22	1,27	1,32
0,34	0,32	0,38	0,44	0,50	0,56	0,62	0,67	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,11	1,17	1,22	1,27	1,33
0,35	0,33	0,39	0,45	0,51	0,56	0,62	0,68	0,73	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,07	1,12	1,17	1,23	1,28	1,33
0,36	0,33	0,39	0,45	0,51	0,57	0,63	0,68	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,02	1,07	1,12	1,18	1,23	1,28	1,34
0,37	0,34	0,40	0,46	0,52	0,57	0,63	0,69	0,74	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,07	1,13	1,18	1,24	1,29	1,34
0,38	0,34	0,40	0,46	0,52	0,58	0,64	0,69	0,75	0,80	0,86	0,92	0,97	1,02	1,08	1,13	1,19	1,24	1,29	1,34
0,39	0,35	0,41	0,47	0,53	0,58	0,64	0,70	0,75	0,81	0,86	0,92	0,97	1,03	1,08	1,14	1,19	1,24	1,30	1,35
0,4	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59	0,65	0,70	0,76	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,09	1,14	1,20	1,25	1,30	1,35
0,41	0,36	0,42	0,48	0,54	0,59	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25	1,31	1,36
0,42	0,36	0,43	0,48	0,54	0,60	0,66	0,71	0,77	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,10	1,15	1,21	1,26	1,31	1,36
0,43	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,66	0,72	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,16	1,21	1,26	1,32	1,37
0,44	0,38	0,44	0,50	0,55	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,11	1,16	1,21	1,27	1,32	1,37
0,45	0,38	0,44	0,50	0,56	0,62	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,06	1,11	1,17	1,22	1,27	1,33	1,38
0,46	0,39	0,45	0,51	0,57	0,62	0,68	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,12	1,17	1,22	1,28	1,33	1,38
0,47	0,40	0,46	0,51	0,57	0,63	0,68	0,74	0,79	0,85	0,91	0,96	1,01	1,07	1,12	1,18	1,23	1,28	1,33	1,39
0,48	0,41	0,46	0,52	0,58	0,63	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,07	1,13	1,18	1,23	1,29	1,34	1,39
0,49	0,41	0,47	0,53	0,58	0,64	0,70	0,75	0,81	0,86	0,92	0,97	1,02	1,08	1,13	1,19	1,24	1,29	1,34	1,40
0,5	0,42	0,48	0,53	0,59	0,65	0,70	0,76	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,08	1,14	1,19	1,24	1,30	1,35	1,40
0,51	0,43	0,49	0,54	0,60	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,14	1,20	1,25	1,30	1,35	1,41
0,52	0,44	0,49	0,55	0,60	0,66	0,71	0,77	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25	1,31	1,36	1,41
0,53	0,45	0,50	0,56	0,61	0,67	0,72	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,15	1,21	1,26	1,31	1,36	1,42
0,54	0,46	0,51	0,56	0,62	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,94	1,00	1,05	1,11	1,16	1,21	1,26	1,32	1,37	1,42

0,55	0,47	0,52	0,57	0,63	0,68	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,00	1,06	1,11	1,16	1,22	1,27	1,32	1,37	1,43
0,56	0,48	0,53	0,58	0,63	0,69	0,74	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,06	1,12	1,17	1,22	1,28	1,33	1,38	1,43
0,57	0,49	0,54	0,59	0,64	0,69	0,75	0,80	0,85	0,91	0,96	1,01	1,07	1,12	1,18	1,23	1,28	1,33	1,39	1,44
0,58	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,81	0,86	0,91	0,97	1,02	1,07	1,13	1,18	1,23	1,29	1,34	1,39	1,44
0,59	0,52	0,56	0,61	0,66	0,71	0,76	0,81	0,87	0,92	0,97	1,03	1,08	1,13	1,19	1,24	1,29	1,34	1,40	1,45
0,6	0,53	0,57	0,62	0,66	0,72	0,77	0,82	0,87	0,93	0,98	1,03	1,09	1,14	1,19	1,24	1,30	1,35	1,40	1,45

При $\omega = 0,04$

$E_{\text{конт}} \backslash \beta$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0,1	0,16	0,21	0,27	0,33	0,39	0,44	0,50	0,55	0,61	0,66	0,72	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,04	1,10	1,15
0,11	0,16	0,22	0,27	0,33	0,39	0,44	0,50	0,56	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	0,99	1,05	1,10	1,15
0,12	0,16	0,22	0,28	0,33	0,39	0,45	0,50	0,56	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,10	1,16
0,13	0,16	0,22	0,28	0,34	0,39	0,45	0,51	0,56	0,62	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,05	1,11	1,16
0,14	0,16	0,22	0,28	0,34	0,40	0,45	0,51	0,56	0,62	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,05	1,11	1,16
0,15	0,17	0,23	0,28	0,34	0,40	0,45	0,51	0,57	0,62	0,68	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,00	1,06	1,11	1,16
0,16	0,17	0,23	0,29	0,34	0,40	0,46	0,51	0,57	0,62	0,68	0,74	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,11	1,17
0,17	0,17	0,23	0,29	0,35	0,40	0,46	0,52	0,57	0,63	0,68	0,74	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,06	1,12	1,17
0,18	0,17	0,23	0,29	0,35	0,41	0,46	0,52	0,57	0,63	0,69	0,74	0,80	0,85	0,90	0,96	1,01	1,07	1,12	1,17
0,19	0,17	0,23	0,29	0,35	0,41	0,46	0,52	0,58	0,63	0,69	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,01	1,07	1,12	1,17
0,2	0,18	0,24	0,30	0,35	0,41	0,47	0,52	0,58	0,64	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,96	1,02	1,07	1,12	1,18
0,21	0,18	0,24	0,30	0,36	0,41	0,47	0,53	0,58	0,64	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,07	1,13	1,18
0,22	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,47	0,53	0,58	0,64	0,70	0,75	0,81	0,86	0,92	0,97	1,02	1,08	1,13	1,18
0,23	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,47	0,53	0,59	0,64	0,70	0,75	0,81	0,86	0,92	0,97	1,03	1,08	1,13	1,19
0,24	0,19	0,25	0,31	0,36	0,42	0,48	0,53	0,59	0,65	0,70	0,76	0,81	0,87	0,92	0,97	1,03	1,08	1,14	1,19
0,25	0,19	0,25	0,31	0,37	0,42	0,48	0,54	0,59	0,65	0,70	0,76	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,08	1,14	1,19
0,26	0,19	0,25	0,31	0,37	0,43	0,48	0,54	0,60	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,03	1,09	1,14	1,19
0,27	0,19	0,25	0,31	0,37	0,43	0,49	0,54	0,60	0,65	0,71	0,77	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,14	1,20
0,28	0,20	0,26	0,32	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,66	0,71	0,77	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,09	1,15	1,20
0,29	0,20	0,26	0,32	0,38	0,43	0,49	0,55	0,60	0,66	0,72	0,77	0,83	0,88	0,93	0,99	1,04	1,10	1,15	1,20
0,3	0,20	0,26	0,32	0,38	0,44	0,49	0,55	0,61	0,66	0,72	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,15	1,20
0,31	0,20	0,27	0,32	0,38	0,44	0,50	0,55	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	0,99	1,05	1,10	1,16	1,21
0,32	0,21	0,27	0,33	0,39	0,44	0,50	0,56	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,10	1,16	1,21
0,33	0,21	0,27	0,33	0,39	0,45	0,50	0,56	0,62	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,05	1,11	1,16	1,21
0,34	0,21	0,28	0,33	0,39	0,45	0,51	0,56	0,62	0,67	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,00	1,06	1,11	1,16	1,22
0,35	0,22	0,28	0,34	0,40	0,45	0,51	0,57	0,62	0,68	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,11	1,17	1,22
0,36	0,22	0,28	0,34	0,40	0,46	0,51	0,57	0,63	0,68	0,74	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,06	1,12	1,17	1,22
0,37	0,22	0,28	0,34	0,40	0,46	0,52	0,57	0,63	0,68	0,74	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,07	1,12	1,17	1,23
0,38	0,23	0,29	0,35	0,41	0,46	0,52	0,58	0,63	0,69	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,02	1,07	1,12	1,18	1,23
0,39	0,23	0,29	0,35	0,41	0,47	0,52	0,58	0,63	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,96	1,02	1,07	1,13	1,18	1,23
0,4	0,24	0,30	0,35	0,41	0,47	0,53	0,58	0,64	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,08	1,13	1,18	1,23
0,41	0,24	0,30	0,36	0,42	0,47	0,53	0,59	0,64	0,70	0,75	0,81	0,86	0,92	0,97	1,02	1,08	1,13	1,18	1,24
0,42	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,53	0,59	0,64	0,70	0,75	0,81	0,86	0,92	0,97	1,03	1,08	1,13	1,19	1,24
0,43	0,25	0,31	0,37	0,42	0,48	0,54	0,59	0,65	0,70	0,76	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,08	1,14	1,19	1,24
0,44	0,25	0,31	0,37	0,43	0,48	0,54	0,60	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,03	1,09	1,14	1,19	1,25
0,45	0,26	0,32	0,37	0,43	0,49	0,54	0,60	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,04	1,09	1,14	1,20	1,25
0,46	0,26	0,32	0,38	0,43	0,49	0,55	0,60	0,66	0,71	0,77	0,82	0,88	0,93	0,99	1,04	1,09	1,15	1,20	1,25
0,47	0,27	0,32	0,38	0,44	0,49	0,55	0,61	0,66	0,72	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,04	1,10	1,15	1,20	1,26
0,48	0,27	0,33	0,39	0,44	0,50	0,55	0,61	0,66	0,72	0,77	0,83	0,88	0,94	0,99	1,05	1,10	1,15	1,21	1,26
0,49	0,28	0,33	0,39	0,45	0,50	0,56	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,05	1,10	1,16	1,21	1,26
0,5	0,28	0,34	0,39	0,45	0,51	0,56	0,62	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,05	1,11	1,16	1,21	1,27
0,51	0,29	0,34	0,40	0,45	0,51	0,56	0,62	0,68	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95	1,00	1,06	1,11	1,16	1,22	1,27
0,52	0,29	0,35	0,40	0,46	0,51	0,57	0,62	0,68	0,73	0,79	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	1,11	1,17	1,22	1,27
0,53	0,30	0,35	0,41	0,46	0,52	0,57	0,63	0,68	0,74	0,79	0,85	0,90	0,96	1,01	1,06	1,12	1,17	1,22	1,27
0,54	0,31	0,36	0,41	0,47	0,52	0,58	0,63	0,69	0,74	0,80	0,85	0,90	0,96	1,01	1,07	1,12	1,17	1,23	1,28

0,55	0,31	0,36	0,42	0,47	0,53	0,58	0,64	0,69	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,02	1,07	1,12	1,18	1,23	1,28
0,56	0,32	0,37	0,42	0,48	0,53	0,58	0,64	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,97	1,02	1,07	1,13	1,18	1,23	1,28
0,57	0,33	0,38	0,43	0,48	0,53	0,59	0,64	0,70	0,75	0,81	0,86	0,91	0,97	1,02	1,08	1,13	1,18	1,24	1,29
0,58	0,34	0,38	0,43	0,49	0,54	0,59	0,65	0,70	0,76	0,81	0,86	0,92	0,97	1,03	1,08	1,13	1,19	1,24	1,29
0,59	0,34	0,39	0,44	0,49	0,54	0,60	0,65	0,71	0,76	0,81	0,87	0,92	0,98	1,03	1,08	1,14	1,19	1,24	1,29
0,6	0,35	0,39	0,44	0,49	0,55	0,60	0,66	0,71	0,76	0,82	0,87	0,93	0,98	1,03	1,09	1,14	1,19	1,25	1,30

Приложение Е.
Экспериментальные данные

Экспериментальные данные ГЭН и скорости подачи комбайна очистного
забоя

Время, t	Мощность комплекса, P, кВт	Скорость подачи комбайна, v, м/мин
14:30	31,68	0,72
14:31	158,4	
14:32	163,68	
14:33	31,68	
14:34	142,56	
14:35	105,6	
14:36	139,92	
14:37	5,28	
14:38	10,56	
14:39	10,56	
14:40	5,28	
14:41	10,56	
14:42	10,56	
14:43	10,56	
14:44	10,56	
14:45	10,56	
14:46	4,752	
14:47	10,56	
14:48	4,224	
14:49	10,56	
14:50	5,28	
14:51	5,28	
14:52	5,28	
14:53	4,224	
14:54	4,224	
14:55	6,336	
14:56	5,28	
14:57	4,224	
14:58	4,752	
14:59	5,28	
15:00	2,64	
15:01	5,28	
15:02	4,224	
15:03	5,28	
15:04	132	1,83
15:05	126,72	1,77
15:06	132	1,83
15:07	137,28	1,89
15:08	132	1,83
15:09	116,16	1,65
15:10	126,72	1,77
15:11	126,72	1,77
15:12	158,4	2,12
15:13	105,6	1,54
15:14	116,16	1,65
15:15	126,72	1,77
15:16	121,44	1,71
15:17	116,16	1,65
15:18	110,88	1,60

15:19	105,6	1,54
15:20	137,28	1,89
15:21	132	1,83
15:22	110,88	1,60
15:23	110,352	1,59
15:24	121,44	1,71
15:25	153,12	2,06
15:26	10,56	0,00
15:27	116,16	1,65
15:28	121,44	1,71
15:29	137,28	1,89
15:30	116,16	1,65
15:31	121,44	1,71
15:32	105,6	1,54
15:33	110,88	1,60
15:34	31,68	0,00
15:35	110,88	1,60
15:36	126,72	1,77
15:37	110,88	1,60
15:38	100,32	1,48
15:39	105,6	1,54
15:40	110,88	1,60
15:41	110,88	1,60
15:42	126,72	1,77
15:43	121,44	1,71
15:44	10,56	0,00
15:45	84,48	1,31
15:46	110,88	1,60
15:47	95,04	1,42
15:48	116,16	1,65
15:49	105,6	1,54
15:50	79,2	0,00
15:51	95,04	1,42
15:52	95,04	1,42
15:53	31,68	75,34
15:54	26,4	
15:55	31,68	
15:56	42,24	
15:57	36,96	
15:58	36,96	
15:59	26,4	
16:00	26,4	
16:01	5,28	
16:02	5,28	
16:03	10,56	
16:04	7,92	
16:05	26,4	
16:06	26,4	
16:07	31,68	
16:08	10,56	
16:09	10,56	
16:10	10,56	
16:11	10,56	
16:12	10,56	
16:13	10,56	
16:14	10,56	

16:15	13,2	
16:16	13,2	
16:17	7,92	
16:18	7,92	
16:19	10,56	
16:20	10,56	
16:21	31,68	
16:22	10,56	
16:23	31,68	
16:24	7,92	
16:25	10,56	
16:26	105,6	
16:27	21,12	
16:28	5,28	
16:29	7,92	
16:30	7,92	

Исходные экспериментальные данные для построения регрессионной зависимости на рисунке 2.7. $\bar{P}=120,14$ кВт, $\bar{v}=1,81$ м/мин.

P_i , кВт	v_i , м/мин
79,2	0
84,48	1,49
95,04	1,22
95,04	1,77
95,04	1,36
100,32	1,80
105,6	1,92
105,6	1,96
105,6	1,32
105,6	1,63
105,6	1,40
105,6	1,71
105,6	1,50
110,35	1,59
110,88	1,74
110,88	1,54
110,88	1,90
110,88	1,27
110,88	1,77
110,88	1,76
110,88	2,17
110,88	1,51
116,16	1,97
116,16	1,77
116,16	1,81
116,16	2,01
116,16	1,57
116,16	1,84
121,44	1,58
121,44	1,49
121,44	2,10
121,44	1,93
121,44	1,71

126,72	1,49
126,72	1,71
126,72	2,12
126,72	2,01
126,72	2,09
126,72	1,77
132	2,05
132	1,77
132	1,94
132	2,00
137,28	1,67
137,28	1,88
137,28	1,94
139,92	2,29
142,56	2,39
153,12	1,97
158,4	2,23
158,4	2,35
163,68	2,55

Экспериментальные данные для анализа законов распределения при суммировании трех грузопотоков

Q, кг/мин	Вероятность
0	0
200	0
400	0
600	0
800	0
1000	0
1200	0
1400	0
1600	1,38889E-05
1800	4,16667E-05
2000	5,55556E-05
2200	0,000111111
2400	0,000194444
2600	0,000138889
2800	0,000305556
3000	0,000416667
3200	0,000180556
3400	0,000194444
3600	0,000125
3800	0,000180556
4000	0
4200	9,72222E-05
4400	2,77778E-05
4600	0
4800	0
5000	4,16667E-05

5200	0,000111111
5400	9,72222E-05
5600	0,000138889
5800	0,000152778
6000	0,000180556
6200	0,000125
6400	0,000208333
6600	9,72222E-05
6800	0,000180556
7000	9,72222E-05
7200	2,77778E-05
7400	2,77778E-05
7600	4,16667E-05
7800	5,55556E-05
8000	0
8200	0
8400	0
8600	1,38889E-05
8800	0
9000	0
9200	0
9400	0
9600	1,38889E-05
9800	0
10000	1,38889E-05
10200	2,77778E-05
10400	2,77778E-05
10600	0
10800	0
11000	2,77778E-05
11200	1,38889E-05
11400	0
11600	0

Приложение Ж.
Программа расчета вероятностей уровней грузопотоков в узлах схемы
конвейерного транспорта

Программа расчета вероятностей уровней грузопотоков в узлах схемы магистрального конвейерного транспорта при регулировании скорости движения лент.

```
import static java.lang.System.out;
public class Main {
    public static void main(String[] args) {
        int k,i,j; int p;
        double[][] N = new double[5][3];
        double[] Z = new double[243];
        .....
        for ( k=0;k<243;k++)
        {
            p = k;
            for ( j=0;j<5;j++)
            {
                Z[k] = 1.0*Z[k]*N[j][p%3];
                p = p / 3;
            }
            out.printf(" %6.4f \n", Z[k]);
        }
    }
}
```