

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

На правах рукописи

САДРИДИНОВ Ахлидин Бахридинович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ
РАБОТ УГОЛЬНЫХ ШАХТ НА ОСНОВЕ ОБОСНОВАНИЯ
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – докт. техн. наук, профессор Петров В. Л.

Москва – 2021 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	
1.1. Общие положения.....	10
1.2. Анализ исследований в области оценки энергоэффективности технологических установок и комплексов.....	11
1.3. Характеристика современного уровня техники и технологии ведения горнопроходческих работ.....	17
1.4. Постановка задач научного исследования.....	19
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ УГОЛЬНЫХ ШАХТ	
2.1. Исходные положения.....	21
2.2. Обоснование методических принципов исследования процесса электропотребления горнопроходческих работ.....	23
2.3. Методика исследования электропотребления горнопроходческих работ.....	28
2.4. Выводы.....	41
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ	
3.1. Исходные положения.....	43
3.2. Анализ и оценка эффективности электропотребления при ведении горнопроходческих работ.....	48
3.3. Разработка математических энерготехнологических моделей для анализа энергоэффективности горнопроходческих работ	55

3.4. Разработка прогнозных моделей электропотребления для обеспечения управления энергоэффективностью горнопроходческих работ.....	64
3.5. Выводы.....	77
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ	
4.1. Исходные положения.....	79
4.2. Программный комплекс для анализа процесса электропотребления и оценки энергоэффективности горнопроходческих работ.....	81
4.3. Программный комплекс эффективного управления электропотреблением горнопроходческих работ угольных шахт.....	84
4.4. Выводы.....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Материалы, подтверждающие использование результатов диссертационной работы.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Пакет прикладных программ для анализа энергоэффективности горнопроходческих работ.....	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Эффективность работы угольных шахт, являющейся основой сырьевой и энергетической базы для многих отраслей промышленности, определяется техническим уровнем средств механизации и автоматизации технологических процессов добычи угля.

Интенсификация горного производства на высокопроизводительных шахтах за счет технического переоснащения проходческих комплексов требует значительных изменений в ведении подготовительных работ. В первую очередь это касается прогрессивного комбайнового способа, т.к. уровень комбайновой проходки по ведущим угольным шахтам колеблется от 72 до 98 % [124].

Горнопроходческие работы (ГПР) в условиях угольных шахт в настоящее время интенсивно развиваются как по увеличению объемов выполняемых работ, так и по темпам их ведения, что отражается в росте энергоемкости технологических процессов и объемов потребляемой электроэнергии.

В соответствии с Долгосрочной программой развития угольной промышленности России на период до 2030 года (ДП-2030) предусматривается широкое внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий в области добычи угля на основании глубокой модернизации отрасли в сфере цифровизации, автоматизации, энерго- ресурсосбережения и т.д.

На горных предприятиях для некоторых технологических процессов производства структура системы электроснабжения не позволяет реализовать принцип детерминации электрической нагрузки, так как ограничена возможность контроля электропотребления отдельными энергоемкими электроустановками, характерны неравномерность и неопределенность режима электропотребления, а также значительное влияние технологических факторов на эффективность ведения горных работ.

В тоже время вопросы повышения энергоэффективности электротехнических комплексов и систем угольных шахт изучены явно не достаточно.

В частности, не рассмотрены вопросы: оценки эффективности ведения ГПР в условиях угольных шахт; отсутствие научного обоснования показателей для оценки энергоэффективности и определения устойчивых уровней электропотребления проходческих участков.

Отсутствуют рекомендации по повышению энергоэффективности ГПР в соответствии с требованиями технических условий, с учетом технологических решений, горно-геологических и организационных факторов производства.

В связи с этим повышение энергоэффективности горнопроходческих работ угольных шахт на основе обоснования энерготехнологических параметров для управления электропотреблением является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. В основу исследования положены научные труды Б.Н. Абрамовича, В.Е. Аракелова, В.И. Вейца, М.С. Ершова, В.И. Заславца, А.Г. Захаровой, Л.Г. Зюбровского, Б.А. Константинова, А.Н. Кремера, Н.М. Кузнецова, А.В. Ляхомского, Г.В. Никифорова, В.К. Олейникова, А.Х. Сальникова, В.Н. Фашиленко, Л.А. Шевченко и другие ученые, в которых разработаны методологические основы исследования и анализа режимов энергопотребления на предприятиях горнодобывающих отраслей промышленности, разработаны методы и средства эффективного управления энергоресурсами; научные труды В.В. Алексеева, Г.И. Бабокина, А.В. Дементьева, Л.А. Плащанского, А.Д. Рубана, В.И. Щуцкого, в которых выполнен анализ электропотребления и оценка энергоэффективности подземных электротехнических комплексов и систем высокопроизводительных угольных шахт.

В научных работах решался широкий спектр задач, связанных с энергоэффективностью технологических процессов, технологий производства, производственных процессов промышленных предприятий и объединений минерально-сырьевого комплекса.

На угольных шахтах, наряду с энергоемкими процессами добычи и транспортировки полезного ископаемого, вентиляции горных выработок и работой систем водоотлива значительная составляющая расхода электроэнергии

приходится на ведение горнопроходческих работ (ГПР), которые отличаются широким диапазоном применяемой техники и технологии прохождения горных выработок, в специфических условиях горного производства.

Одним из решений задачи повышения энергоэффективности ведения горнопроходческих работ в угольных шахтах является обеспечение устойчивой работы проходческих участков в соответствии с техническими условиями.

Управление электропотреблением ГПР может быть усовершенствовано за счет реализации мероприятий по повышению энергоэффективности, которые предложены в диссертационной работе.

Объектом исследования диссертационной работы является энергоэффективность горнопроходческих работ угольных шахт.

Предметом исследования является процесс электропотребления при ведении горнопроходческих работ угольных шахт.

Идея работы заключается в том, что повышение энергоэффективности достигается путем совершенствования управления электропотреблением с применением энерготехнологических показателей ГПР.

Целью диссертационной работы является повышение энергоэффективности горнопроходческих работ угольных шахт на основе обоснования энерготехнологических параметров для управления электропотреблением.

Задачи научных исследований.

Задачи научных исследований определены в соответствии с п. 2 и п. 3 паспорта специальности 05.09.03 и включают в себя следующие позиции.

1. Обоснование методических принципов и разработка методики анализа энергоэффективности горнопроходческих работ.

2. Исследование электропотребления горнопроходческих работ и обоснование энерготехнологических параметров.

3. Исследование прогнозных моделей электропотребления для повышения энергоэффективности горнопроходческих работ.

4. Обоснование и разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности ГПР в угольных шахтах.

Методология и методы диссертационного исследования.

Теоретические и экспериментальные исследования энергопотребления при ведении горнопроходческих работ выполнены с использованием методов теории электроснабжения горных предприятий, теоретических методов анализа энергоэффективности, теории планирования эксперимента, теории вероятностей и математической статистики. При установлении вероятностных и энерготехнологических моделей процесса электропотребления использовались лицензионные программные пакеты *Statistica Neural Networks*, *Microsoft Office Excel*.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов рекомендаций обеспечивается научно-обоснованной постановкой задач исследования, корректным использованием апробированных методов теории вероятности и математической статистики; удовлетворительной сходимостью (расхождение не превышает 10 %) результатов теоретических и экспериментальных исследований электропотребления; внедрением научных и практических результатов диссертационной работы в производственную практику.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Методические принципы энерготехнологического анализа для управления энергоэффективностью ГПР.

2. Математические энерготехнологические модели, позволяющие проводить анализ электропотребления для повышения энергоэффективности ГПР.

3. Прогнозные модели на основе устойчивых трендов электропотребления и их аддитивных составляющих, обеспечивающие управление энергоэффективностью ГПР.

Вышеизложенные научные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, получены впервые.

Научная новизна результатов исследования состоит в решении актуальной научной задачи повышения энергоэффективности ведения ГПР в условиях угольных шахт.

Составляющими научной новизны являются:

- 1) обоснование методических принципов энерготехнологического анализа электропотребления для управления энергоэффективностью ГПР;
- 2) разработка математических энерготехнологических моделей на основе результатов анализа электропотребления и производительности горнопроходческих работ;
- 3) разработка прогнозных моделей на основе устойчивых трендов электропотребления и их аддитивных составляющих.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Установлены зависимости между общим и удельным расходами электроэнергии от производительности проходческих участков, позволяющие выполнить качественную и количественную оценку эффективности ведения горнопроходческих работ.

2. Установлены зависимости, позволяющих оценить уровни электропотребления при ведении горнопроходческих работ.

3. Обоснованы показатели оценки эффективности ведения горнопроходческих работ.

4. Разработан и апробирован программный комплекс для анализа энерготехнологических потоков при ведении ГПР на угольных шахтах (Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020661811).

5. Разработаны рекомендации, для повышения энергоэффективности ведения горнопроходческих работ в соответствии с требованием технических условий.

6. Разработана и апробирована комплексная программа эффективного управления электропотреблением горнопроходческих участков угольных шахт (Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020662067).

Реализация работы. Рекомендации по повышению энергоэффективности горнопроходческих работ приняты к внедрению на шахте «Ангишт» и использованию в учебном процессе в НИТУ МИСиС.

Апробация работы. Основные положения и разделы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции «Совершенствование технологии строительства шахт и сооружений» (Донецк, Украина, 2012 г.), V Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (Томск, 2012 г.), на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, 2013, 2014, 2018 и 2021 гг.), Всероссийской молодёжной научной школе-конференции «Состояние и пути развития российской энергетики» (Томск, 2014 г.), XX научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск 2014 г.), на Международном студенческом научном форуме Российской академии естествознания (Москва 2015 и 2018 г.г.), 5-ом Международном инновационном горном симпозиуме (Кемерово, 2020 г.), Международной конференции по технике, технологиям и образованию (г. Стара Загора, Болгария, 2020).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в числе которых входящие в перечень рецензируемых научных изданий рекомендованных ВАК РФ 5 научных статей, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 статьи в изданиях, индексируемых *Scopus*.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 124 страницах машинописного текста, включая 30 рисунков и 18 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений.

Список литературы включает 128 наименования научных работ.

Автор диссертации выражает глубокую благодарность проф., д.т.н. А.В. Ляхомскому и доц., к.т.н. А.В. Пичуеву за научные консультации и методическую помощь при написании данной диссертационной работы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Общие положения

При изучении вопросов, связанных с эффективностью электропотребления на угольных шахтах возникает актуальная научная задача обоснования энерготехнологических показателей для повышения энергоэффективности основных технологических процессов, обеспечивающих выполнение требований по энергосбережению при добыче угля, снижению себестоимости и росту производительности.

При осуществлении мероприятий по энергосбережению на горном производстве инженерно-техническим работникам (ИТР) необходимо обладать информацией о количестве прямых затрат энергии на основные технологические процессы, включая работу вспомогательных установок.

Для технологических процессов ведения ГПР на угольных шахтах такая информация необходима, т.к. снижение прямых затрат энергии может привести к росту совокупных затрат и в этом случае общие затраты энергии превысят первоначальный базовый уровень.

Планирование и управление развитием горного производства, достижение более высокого уровня интенсификации технологических процессов осуществляются с применением предварительного анализа совокупных затрат энергии, приходящихся на единицу произведенной продукции или объема выполненных работ [120, 123].

Оценка затрат энергии производится, по наиболее энергоемким процессам и установкам, к которым в том числе относятся горнопроходческие комплексы, оснащенные агрегатами, машинами и механизмами номинальной мощностью более 100 кВт.

Анализ процессов электропотребления и оценки энергоэффективности ведения ГПР включает в себя:

- сравнительный анализ фактических и плановых показателей энергопотребления ГПП за период наблюдения;
- обоснование энерготехнологических показателей на прохождение горных выработок за планируемый период;
- разработка рекомендаций по совершенствованию процесса электропотребления при выявленных неэкономичных режимах работы горнопроходческих комплексов;
- разработка практических рекомендаций по совершенствованию процесса энергопотребления как основы управления энергоэффективностью ведения ГПП.

1.2. Анализ исследований в области оценки энергоэффективности технологических установок и комплексов

Исследования в области анализа режимов электропотребления, оценки энергоемкости и энергоэффективности технологических процессов горного производства, управления энергетическими ресурсами горных предприятий и горнодобывающих отраслей промышленности проводилось достаточно большим количеством известных во всем мире ученых. Основные базовые исследования были проведены во второй половине XX-го и начале XXI-го века. На современном этапе НТП продолжается дальнейшее развитие как теоретических положений, так и их практическая реализация в условиях реального горного производства. Появление новых методов математического анализа, совершенствование и значительный рост потенциала средств вычислительной техники, расширение диапазона коммуникационного обмена информационными потоками, развитие *IT*-технологий позволяет решать и реализовывать широкий спектр задач в области повышения энергоэффективности в любых сферах современного производства, в том числе и в горнодобывающей промышленности.

Вопросы теории, практики, анализа и оценки энергоэффективности представлены значительным рядом научных публикаций таких ученых, как

Б.Н. Абрамовича, Б.Н. Авилова-Карнаухова, В.В. Алексеева, В.Е. Аракелова, Г.И. Бабокина, Б.П. Белыха, Г.Я. Вагина, В.И. Вейца, С.Д.

Волобринского, Ф.Г. Гусейнова, А.В. Т.Х. Гулбрандсена, А.В. Дементьева, М.С. Ершова, Б.И. Заславца, А.Г. Захаровой, Б.А. Константинова, А.Н. Кремера, Н.М. Кузнецова, А.В. Ляхомского, Г.В. Никифорова, В.К. Олейникова, Л.А. Плащанского, В.А. Праховника, А.Х. Сальникова, В.Н. А.Д. Рубана, В.Н. Фащиленко, Л.А. Шевченко, Ю.В. Шевырева, В.И. Щуцкого, П.П. Ястребова и др. [2 – 8, 12 – 15, 20, 21, 40 – 49, 51 – 65, 67 – 69, 71 – 74].

В представленных исследованиях рассмотрены следующие важные научные положения и решены следующие научные задачи:

- 1) разработаны теоретические основы и методы расчета, нормирования, планирования расхода электроэнергии;
- 2) обоснованы системы нормативных экономических показателей, применяемых в условиях экономического планировании энергопотребления;
- 3) обоснованы показатели расхода и экономии топливно-энергетических ресурсов;
- 4) осуществлено обоснование нормирования удельного электропотребления с применением методов математической статистики и теории вероятности для получения характеристик энергопотребления промышленных предприятий;
- 5) разработаны методы анализа и нормирования энергетических характеристик с учетом многомерных статистических связей на основе теории вероятности и математической статистики;
- 6) осуществлено моделирование и исследование энергосберегающих режимов горнодобывающих предприятий, включая, планирование и регулирование режимов электропотребления, моделирование графиков электрических нагрузок, оптимизацию и управление электропотреблением;
- 7) разработаны современные технические электронные средства, предназначенные для организации управления, контроля и учета электропотребления;

8) разработаны способы и средства организации информационного обеспечения, предназначенного для определения и анализа резервов экономии энергетических ресурсов;

9) обоснованы и разработаны положения комплексного потребления энергоресурсов и синтеза оптимальных энергетических балансов;

10) Дана количественная оценка и выполнен анализ степени влияния производственных факторов на энергопотребление на основе методов корреляционно-регрессионного анализа, для определения энергетических характеристик отдельных энергоемких механизмов и т.д.

Актуальные вопросы в области энергетики, энергоэффективности и управления энергоресурсами на горных исследовались и продолжают изучаться в рамках действующей научной школы Московского государственного горного университета и Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Наиболее значимые результаты представлены в работах В.И. Щуцкого, А.В. Ляхомского, В.Н. Фащиленко, Г.И. Бабокина, Л.А. Плащанского, Ю.Ф. Крицевого, А.Ю. Сергеева, Д.А. Егорова, А.В. Пичуева, Е.Н. Перфильевой, Н.Б. Дьячкова и др. [3 – 5, 7, 12 – 14, 39, 41, 66, 68, 94, 95].

В представленных исследованиях рассмотрены следующие важные научные положения и задачи.

В работе В.В. Алексеева [3] представлена методология исследования, оценки состояния и моделирования процесса электропотребления на горных предприятиях в условиях неопределенности и неполноты информации. В результате были установлены закономерности энергоемкости технологических процессов и зависимости расхода энергии от технологических факторов, определены модели статей энергобалансов, были предложены временные, факторные и комбинированные модели энергопотребления. В условиях слабой информативности признаков целесообразным было применение методов сжатия информационного поля с использованием разложения Карунена-Лоэва и метода главных компонент.

Для учета сезонности и многофакторного влияния на режим энергопотребления была предложена комбинированная модель исследуемого процесса.

В работах Г.Я. Вагина [12, 13] научно обоснованы и разработаны многофакторные прогнозные модели электропотребления с учетом сезонной динамики изменения электрической нагрузки и степени влияния главных технологических факторов. В основу прогнозных моделей была предложена комбинированная модель электропотребления в виде многофакторной зависимости, полученной в результате анализа технологических процессов производства корреляционно-регрессионным методом, и динамической зависимости, описывающей характер изменения нагрузки во времени, полученной в результате спектрального анализа Фурье.

Вместе с тем следует отметить, что приведенные в модели могут использоваться только при долгосрочном прогнозировании и не учитывают флуктуационные процессы изменения сменной электрической нагрузки, а также аperiodически возникающие в технологическом цикле аддитивные помехи.

В работе В.И. Вейца при исследовании эффективности процесса энергопотребления учитывалось влияние управленческих и технических факторов на энергоэффективность технологических процессов горного производства [14]. Были получены энерготехнологические характеристики с учетом временных, технологических и производственных параметров. Научной новизной в представленных работах является учет в определении энергоэффективности энергопотребления не только технологических фактов (энергетический КПД, удельное энергопотребление, учет энергоресурсов, коэффициент мощности, ВЭР, энергетический паспорт), но и управленческие факторы (энергетическая политика, организация, мотивационное, информационное, маркетинговое и инвестиционное обеспечение) [79]. Это позволило автору предложить использование при оценке эффективности электропотребления энерготехнологических профилей для управления энергоресурсами.

В работах А.В. Ляхомского, Ю.Ф. Крицевого, А.Ю. Сергеева, Д.А. Егорова на основании методологического подхода к проблеме повышения энергоэффективности были обоснованы научно-методические принципы и разработаны способы построения программно-аналитических комплексов для управления процессом электропотребления. Была предложена концепция и программно-техническое обеспечения для последующего внедрения на производство системы ПАКУЭ (Программно-аналитический комплекс управления энергоресурсами) [41, 53, 60 – 73, 94].

В работах Г.И. Бабокина, Ставцева В.А. рассмотрены вопросы оценки энергоэффективности ведения очистных работ на высокопроизводительных угольных шахтах. Выполнены исследования влияния технологической схемы работы и длины лавы на удельный расход электрической энергии очистного комбайна. Разработаны технические средства и методы энергосбережения применительно к угольным шахтам АО «СУЭК-Кузбасс» [6, 95].

В работе Перфильевой Е.Н. рассмотрены вопросы эффективного управления энергоресурсами, разработаны практические рекомендации по повышению энергоэффективности на основе учета управленческих факторов, повышения уровня планирования и оперативного управления электропотреблением [79].

В работе Петухова С.В. приведены результаты исследования процесса электропотребления, получены энерготехнологические характеристики, энерготехнологические профили для оценки энергоэффективности технологических процессов, связанных с добычей полезных ископаемых открытым способом, а также разработаны практические рекомендации по энергоресурсосбережению на предприятиях АО «СУЭК-Хакасия» и АО «СУЭК-Красноярск» [80].

В работах Дьячкова Н.Б. рассмотрены методы и технические средства сбережения электрической энергии в системах электро- и теплоснабжения, централизованные и децентрализованные системы контроля и учета

энергоресурсов, например АСКУЭ. Достаточно подробно рассмотрены вопросы разработки методик энергоаудита [39, 40, 68].

В работе А.В. Пичуева выполнен анализ основных технологических процессов ведения горнопроходческих работ комбайнами с исполнительным органом избирательного действия, получены обобщенные энергетические характеристики для комбайнов производства стран СНГ (Россия, Украина) и основных зарубежных производителей (США, Англия, Германия, Австрия, Швеция, Чехословакия и Китай). Предложена методика оценки энергоемкости горнопроходческих работ по энергетическим эквивалентам [83].

Краткий обзорный анализ научных исследований показал, что для оценки энергоэффективности технологических процессов в горном производстве для обработки информационных баз данных о факторах, оказывающих влияние на процесс электропотребления, в основном применяются методы теории вероятности и математической статистики, графоаналитические и нейросетевые системы, а также методы теории распознавания образов [39]. Их применение позволяет в условиях ограниченности поступающей информации и использовать статистические данные для синтеза математических моделей электропотребления. В приведенных работах для горных предприятий различного профиля установлены многомерные зависимости электропотребления, которые являются основой для разработки прогнозных моделей, а также совершенствования системы управления ТЭР.

Анализ исследований эффективности электропотребления на горнодобывающих предприятиях показывает, что в основном они посвящены установлению степени влияния организационных и технологических факторов на энергоэффективность производственных процессов.

Следует отметить, что в данных работах недостаточно изучены вопросы обоснования показателей, необходимых при разработке энерготехнологических и прогнозных моделей электропотребления.

Достаточно малое количество исследований проведено в области анализа энергоэффективности работы горно-шахтного оборудования, в особенности

горнопроходческих технологических комплексов. Этот факт объективно обусловлен технической сложностью реализации системы сбора, передачи и обработки данных в специфических условиях ведения подземных горных работ.

В настоящее время актуальным представляется разработка алгоритмического обеспечения для программно-аналитических комплексов, предназначенных для анализа электропотребления, и реализации оперативного управления энергоэффективностью. Это обусловлено тем, что современные способы средства для решения этих задач должны быть адаптированы к реальным производственным условиям и имеют представительную ресурсную наработку, достаточную для формирования представительных баз данных для их последующего анализа [39].

Научное обоснование и разработка метода анализа эффективности электропотребления с целью повышения энергоэффективности ведения ГПР угольных шахт на основе достижений в области *IT*-технологий, современных существующих и разрабатываемых информационно-аналитических и программных комплексов, с использованием апробированных методов математического анализа, технических средств сбора и обработки информации, представляется актуальной задачей.

1.3. Характеристика современного уровня техники и технологии ведения горнопроходческих работ

В настоящее время в мировой угольной промышленности находится в эксплуатации значительное количество проходческих комбайнов, которые можно условно разделить на две группы: комбайны со стреловидным и буровым исполнительными органами. ПК первой группы предполагают последовательный характер обработки забоя, тогда как при использовании роторного исполнительного органа подготовительный забой обрабатывается одновременно по всей поверхности. Первая группа комбайнов является более многочисленной и содержит комбайны самых различных конструкций с обширным диапазоном габаритов, масс, энерговооруженности и т.д. [48, 93].

Основное производство проходческих комбайнов в странах СНГ осуществляется в: ОАО «Копейский машиностроительный завод» ООО «Юргинский машзавод», ЗАО «Горловский машиностроитель», ОАО «Новокузнецкий машиностроительный завод», ОАО «Ясиноватский машиностроительный завод».

В странах ЕС, США, Канады и Китая основными производителями являются компании: «*Voest-Alpine bergtechnik*» и «*Sandvik Roadheaders*», «*Dosco overseas engineering Ltd*», «*Eichhoff bergbautechnik GMBH*», «*Joy Mining Machinery*», «*WIRTH*», «*Shanghai Chuangli Mining Equipment Co Ltd*». «*CARTER*», «*CATERPILLAR*», «*TEREX-SHAEF*» [11, 21, 90].

Проходческие комбайны (ПК) составляют основу горнопроходческих комплексов угольных шахт и предназначены для разрушения массива горных пород, попутной добычи угля и перегрузки горной массы в вагонетки или на ленточные конвейеры [17, 18, 70].

В горнодобывающей отрасли промышленности (ПК) подразделяются на два вида: избирательного и сплошного разрушения.

ПК избирательного разрушения подразделяют на машины: лёгкого типа (с массой до 20 – 25 т, мощностью двигателя ИО до 60 – 80 кВт, с пределом прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж} \leq 80$ МПа при сечении выработок $S \leq 25$ м²; среднего типа (35 – 50 т, 100 – 160 кВт, $\sigma_{сж} \leq 110$ МПа при $S \leq 35$ м²); тяжёлого типа (до 100 – 110 т, до 300 – 400 кВт, $\sigma_{сж} \leq 150$ МПа при $S \leq 45$ м²) [21, 86, 112].

Технические характеристики ПК избирательного разрушения российского и зарубежного производства представлены в [22, 88].

Переход от ПК лёгкого типа к комбайнам среднего и тяжёлого типа обусловлен значительным увеличением объёма комбайновой проходки, ростом установленной мощности приводных двигателей исполнительного органа, повышением скорости проходки, качественным изменением технологии ведения горнопроходческих работ.

Современные ПК характеризуются высокой степенью механизации процессов отделения пород от массива и удаления отделенной массы из забоя, что

обеспечивает высокую производительность проходческих работ. Вместе с тем до настоящего времени уровень механизации проведения горных выработок комбайновым способом составляет всего 30 – 35 % [22, 77, 78, 88].

Уровень механизации и трудозатраты на выполнение технологических операций в значительной степени определяются конструкцией и структурой ПК. Эти операции в значительной степени определяют темпы проходки и затраты на прохождение выработок.

Способность комбайна обеспечить совмещение этих операций во времени позволяет значительно сократить длительность рабочего цикла прохождения выработки, а возможность прохождения выработок с высоким качеством боковых поверхностей и почвы – значительно повысить эффективность его работы за счет снижения объема разрушаемой массы и значительного сокращения объема забутовки. Существенное влияние на эффективность работы комбайна в целом оказывает тип исполнительного органа [75, 76, 87].

Важнейшим условием повышения энергоэффективности ведения горнопроходческих работ является комплексное решение организационных и технических задач на производстве.

Для этого необходимо научно обоснованное техническое перевооружение ГПР на базе внедрения современных технологий и обеспечения высокопроизводительными проходческими машинами и комплексами.

В настоящее время оптимальная технология проведения выработок базируется на основе применения комбайна среднего или тяжелого типов [82]. При применении прогрессивной технологии ведения ГПР, даже одна проходческая бригада может выйти на темпы проведения проходки до 300 – 400 м/мес.

1.4. Постановка задач научного исследования

Анализ основных исследований процессов электропотребления и повышения энергоэффективности на угольных шахтах позволили поставить в

диссертационной работе следующие научные задачи (в соответствии с п. 2 и п. 3 паспорта специальности 05.09.03).

1. Обоснование методических принципов и разработка методики анализа энергоэффективности горнопроходческих работ.

Методические принципы анализа процессов электропотребления позволяют реализовать комплексный подход к исследованию и оценке энергоэффективности ГПР. Методика предполагает структуру и порядок сбора и обработки данных по электропотреблению ГПР в соответствии с техническими условиями.

2. Исследование электропотребления горнопроходческих работ и обоснование энерготехнологических параметров.

Выполнение научных исследований предполагает статистический анализ режимов электропотребления при ведении ГПР с целью определения фактических энергетических показателей и их соответствия нормативным требованиям. Энерготехнологическая модель представляет собой совокупность энерготехнологических параметров, на основе которых определяются энергоэффективность ГПР.

3. Исследование прогнозных моделей электропотребления для повышения энергоэффективности горнопроходческих работ.

Прогнозная модель предназначена для анализа динамики электропотребления с целью оценки энергоэффективности проходческих работ путем сравнения плановых и фактических показателей расхода электроэнергии.

4. Обоснование и разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности горнопроходческих работ в угольных шахтах.

Повышение энергоэффективности предполагает комплексный подход, включающий в себя определение энерготехнологических параметров энергоэффективности, прогнозное моделирование, разработку алгоритмов сбора и обработки информации о режимах электропотребления и оценки энергоэффективности ГПР.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

2.1. Исходные положения

Объектом исследования диссертационной работы является энергоэффективность горнопроходческих работ угольных шахт.

Предметом исследования является процесс электропотребления при ведении горнопроходческих работ угольных шахт.

При определении затрат энергии и оценке энергоэффективности ГПР в условиях угольных шахт решаются следующие задачи:

- 1) идентификация назначения и характеристика технологии ведения проходческих работ;
- 2) выбор методов научного исследования электропотребления ГПР;
- 3) определение основных технических условий ведения ГПР (номенклатура основного технологического оборудования), номенклатуры средств измерений и обработки информационных потоков;
- 4) установление последовательности и оценка весомости операций выполнения работы по оценке затрат энергии и обеспечению энергоэффективности ГПР;
- 5) выбор алгоритма получения результатов для определения энерготехнологических параметров;
- 6) определение порядка документирования результатов оценки энергоэффективности ведения проходческих работ;
- 7) метрологическое обеспечение.

В качестве основных методов научного исследования эффективности электропотребления ГПР приняты: статистический анализ; корреляционно-регрессионный анализ; динамическое и прогнозное моделирование.

Номенклатура основного технологического оборудования горнопроходческих участков определена из технических характеристик

проходческих машин и вспомогательного оборудования в соответствии с технологической схемой прохождения горных выработок. Номенклатура средств измерений и обработки информационных потоков определена в соответствии с применяемой на шахте системой АСКУЭ.

Последовательность и оценка весомости операций выполнения работы по оценке затрат энергии и обеспечению энергоэффективности ГПР определена синхронизацией работы системы посменного учета расхода электроэнергии, а также измерения глубины проходки.

В качестве алгоритма получения результатов для оценки энергоэффективности в соответствии с методикой, изложенной в п. 2.3, для каждого участка и каждой смены определяются:

- уровни основных показателей энергопотребления, их отклонения, оценивается динамика электропотребления от смены к смене по месяцам, кварталам и в целом за период проходки;
- фактические показатели сравниваются с аналогичными плановыми показателями;
- определяются общие тренды по месячным, квартальным и годовому интервалам и соответственно прогнозируются ожидаемые значения соответствующих показателей [33, 34].

Документирование результатов оценки энергоэффективности ГПР ведется для каждого участка посменно. Результаты фиксируются в табличной форме *МО EXCEL* с указанием даты, номера смены, погонных метров горной выработки, сменного расхода электроэнергии, удельного расхода электроэнергии по погонным метрам проходки.

Метрологический контроль обеспечивается отделом энергооборудования, автоматики и связи шахты.

Для обоснования основных методических принципов научных исследований и разработки методики оценки энергоэффективности ГПР в данной главе необходимо решить следующие задачи.

1. Обоснование методических принципов исследования электропотребления горнопроходческих работ.

2. Разработка методики аналитического и экспериментального исследования электропотребления горнопроходческих работ.

2.2. Обоснование методических принципов исследования процесса электропотребления горнопроходческих работ

В процессе эксплуатации, технического обслуживания и ремонта электроустановок, а также модернизации технологических процессов горного производства возникает необходимость оценки эффективности принимаемых решений, особенно в вопросах обеспечения энергетической эффективности ведения горных работ. Отсутствие или ошибочность такой оценки, как правило, приводит к нарушению технических условий ведения ГПР и технических регламентов, принятых в соответствии с Федеральным законом № 184-ФЗ [26] и положений Федерального закона «Об энергосбережении...» № 261-ФЗ [27]. В этом случае, в соответствии с КоАП (статья 9.16) [43], предусматриваются значительные штрафные санкции [44].

Ведение горнопроходческих работ в условиях разработки месторождений полезных ископаемых имеет свою специфику.

Способ проходки зависит от следующих факторов.

1. Горно-геологические и гидрогеологические условия месторождения, физико-механические свойства пород и полезного ископаемого, условия залегания и т.д.

2. Технология разработки месторождения, включающая в себя: системы разработки полезного ископаемого, транспортирования горной массы, проветривания, водоотлива, структуру основных и вспомогательных выработок.

3. Категорийность шахты по взрывоопасным газам и пыли.

От физико-механических свойств породы зависит определение технологии ведения проходческих работ.

При прохождении горных выработок в зависимости от неоднородности структуры залегания пород проходческие машины работают по грунтам с различными характеристиками по твердости, спаянности, трещиноватости и т.д., что оказывает значительное влияние на скорость проходки и объемно-весовые показатели извлекаемой горной массы.

Для большинства проходческих машин избирательного разрушения существует ограничение по верхнему пределу одноосного усилия сжатия горных пород режущим органом который находится на уровне $q_{сж} = 120$ МПа. Для тяжелых проходческих машин верхний предел как правило не превышает $q_{сж} = 140 - 150$ МПа. Применение таких машин при проходке по твердым породам требует значительных затрат электрической энергии по сравнению с проходкой выработок буровзрывным способом.

При этом нужно отметить, что у БВР есть свои недостатки, оказывающие значительное влияние на энергоемкость проходческих работ. Нарушение технологии при проведении взрыва могут привести к увеличению сечения выработки за предельные допустимые габариты, что потребует дополнительных затрат времени и энергии на удаление избыточной горной массы, установку крепи и заполнение образовавшихся пустот и вывалов породы. В случае неправильного распределения зарядов может случиться не полный подрыв с образованием крупногабаритных блоков или их зависанием в рабочем сечении выработки. В результате потребуется дополнительная энергия и время на разрушение породы и ее удаление, что также оказывает влияние на энергоэффективность ведения горнопроходческих работ.

Категорийность шахты по газу и пыли также оказывает существенное влияние на технологию ведения проходческих работ. Как правило, при подземной разработке угольных месторождений при проведении горных выработок в зонах не опасных по газу и пыли используется буровзрывной способ с отгрузкой породопогрузочными машинами ковшового типа или с нагребавшими лапами. При ведении проходческих работ по углю используются ПМ с избирательным

органом резания. В этом случае проходческая машина осуществляет дополнительно добычу полезного ископаемого.

Таким образом, при определении энергоэффективности проходческих работ важно учитывать не только технические характеристики проходческих машин, но и показатели, оказывающие влияние на их производительность.

Для оценки эффективности процесса электропотребления горнопроходческого комплекса целесообразно использовать энергетический КПД $\eta_{ПК}$ проходческого комбайна [84, 97].

Исходя из средних значений η , использование энергии дифференцируется на полезную энергию, невозвратные потери и потери от несовершенства технологических установок и горнопроходческих машин.

Для горнодобывающих предприятий в качестве показателя энергоэффективности используется отношение расхода энергии к единице конечной выпускаемой продукции, т.е. показатель энергоемкости ω , [84].

Для горнопроходческих работ в качестве критерия оценки энергоэффективности предлагается использовать показатель энергоемкости по погонным метрам пройденной горной выработки ω_1 (кВт·ч/п.м.) и по попутной добыче полезного ископаемого ω_2 (кВт·ч/т).

Таким образом, энергоэффективность зависит не только от энергетического КПД энерготехнологических установок, но и от величины затрат электроэнергии на ведение ГПР [113, 114].

В более широком понимании энергоэффективность – это степень полезного использования подводимой к энергоустановке первичной энергии и зависящая от применяемой технологии для производства продукции, выполнения работ и оказания услуг [31].

Показатель энергетической эффективности (ПЭЭ) для любого технологического процесса устанавливается государственными стандартами и другими официальными нормативными документами [26].

При обосновании необходимости модернизации технологического процесса или выборе нового перспективного технологического оборудования в качестве показателя целесообразно использовать коэффициент энергетической эффективности, который может быть определен по формуле

$$k_{\varepsilon} = \frac{\omega_{\Pi}}{\omega_{\text{б}}}, \quad (2.1)$$

или

$$k_{\varepsilon} = \frac{\omega_{\text{б}} - \omega_{\Pi}}{\omega_{\text{б}}} \cdot 100, \quad (2.2)$$

где $\omega_{\text{б}}$, ω_{Π} – соответственно энергоемкость базового и перспективного вариантов реализации технологического процесса.

При этом следует учитывать, что энергоэффективность технологического процесса не является тождественной с экономической эффективностью энергопотребления, для которой имеется своя система показателей, характеризующих соответствующие уровни эффективности управления энергоресурсами (энергетический, организационный, мотивационный, информационный, маркетинговый и инвестиционный) [108, 114].

Достижение высокой энергоэффективности требует значительных затрат ресурсов и получаемая экономия энергии должна быть сопоставима с соответствующими инвестиционными затратами. В этом случае решается задача определения критериев оптимальной энергоэффективности.

Показатель экономичности энергопотребления (ПЭЭП) представляет собой количественную характеристику эксплуатационных свойств основного и вспомогательного оборудования, машин и механизмов [31, 45].

Наиболее эффективной является такая технология, которая имеет наименьшую энергоемкость относительно нормируемых показателей удельного расхода энергии на производство.

Для комплексной оценки энергоэффективности горнодобывающих предприятий на соответствие международным стандартам ИСО/МЭК наиболее

рациональным представляется индексный метод учета их влияния на окружающую среду [1, 45, 100].

Схема взаимосвязи показателей для оценки энергетической эффективности горнопроходческих комплексов приведена на рисунке 2.1.

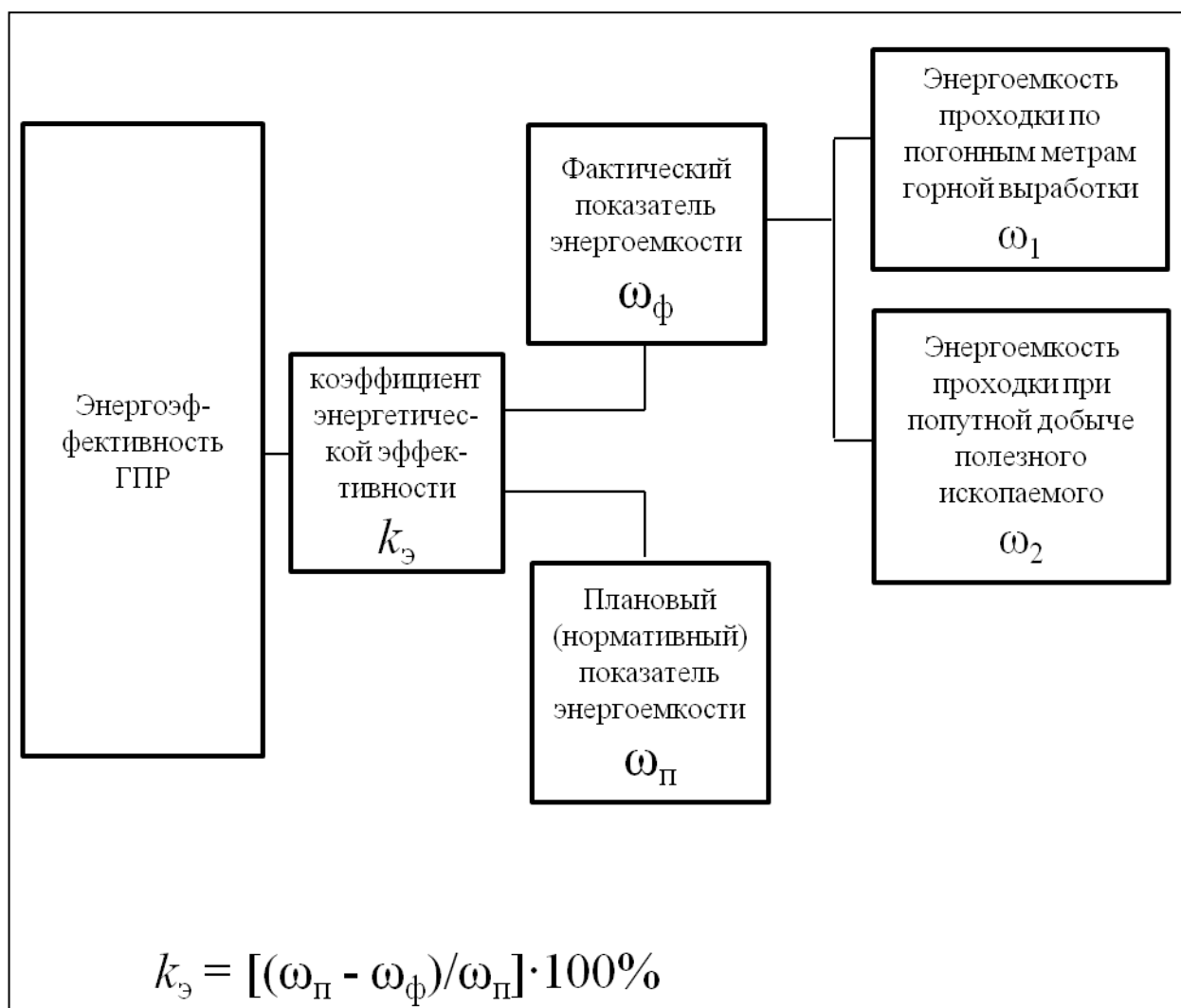


Рисунок 2.1 – Схема взаимосвязи показателей для оценки энергетической эффективности ГПР

При оценке энергоэффективности ведения ГПР в условиях угольных шахт целесообразно использовать коэффициент энергетической эффективности:

$$k_{\varepsilon} = \frac{\omega_{\Pi} - \omega_{\phi}}{\omega_{\Pi}} \cdot 100, \%, \quad (2.3)$$

где ω_{ϕ} – фактический показатель удельного расхода электроэнергии, как отдельными сменными бригадами, так и участком в целом [113].

Таким образом, для более полной оценки энергоэффективности проходческих комплексов целесообразным представляется следующее.

1. На стадии модернизации необходимо учитывать не только экономические и энергетические показатели горнопроходческих комплексов, но и оценивать степень их влияния на энергоэффективность технологического объекта в целом.

2. В процессе текущей эксплуатации показатели энергоемкости, напрямую связанные с объемом производства (работы), должны оцениваться на соответствие общим нормативным показателям, а также их технологическим составляющим и нормам потерь энергии.

3. Энергетическая эффективность горного производства может быть обеспечена на базе систематического комплексного анализа показателей энергоэффективности, их объективной оценке и принятии обоснованных решений по совершенствованию электропотребления при ведении ГПР.

Основные методические принципы анализа режимов потребления электрической энергии предусматривают статистический анализ энергетических показателей технологических процессов ведения ГПР, получение энерготехнологических характеристик для различных проходческих участков, исследование динамики электропотребления и построение прогнозных моделей.

Наибольший эффект достигается в том случае, когда для контролируемых энерготехнологических параметров последовательно определяются их статистические показатели, устанавливаются закон распределения вероятностей, на основании корреляционно-регрессионного анализа разрабатываются математические модели электропотребления и прогнозные модели [118].

2.3. Методика исследования электропотребления горнопроходческих работ

В основу анализа эффективности электропотребления при ведении ГПР угольных шахт, предполагается использование методов теории вероятности и

математической статистики, позволяющие установить вероятностные законы распределения энерготехнологических показателей для условий работы горнопроходческих комплексов.

Исходным материалом являются данные периодического контроля следующих параметров ведения ГПР за исследуемый интервал времени:

- производительность по погонным метрам горной выработки Q (пм);
- потребленная электроэнергия W (кВт·ч);
- удельный расход электроэнергии ω (кВт·ч/пм).

Для шести горнопроходческих участков шахты «Северная» использовались данные сменных показателей по производительности и расходу электроэнергии за 10 месяцев работы. Общий массив данных составил 21240 фиксированных значений.

На первом этапе определяются статистические характеристики энерготехнологических параметров исследуемого электропотребления, которые представляются в виде одномерных массивов $[Q]$, $[W]$, $[\omega]$, или временными рядами $Q(t)$, $W(t)$, $\omega(t)$.

Расчетные соотношения для определения статистических показателей приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Статистические показатели (начало)

Показатель	Обозначение	Расчетная формула	Примечание
Максимальное значение	x_{max}	$\bar{\omega} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i$	N – количество переменных массива; ω_i – дискретная контролируемая величина, соответствующая определенному интервалу наблюдений Δt_i
Минимальное значение	x_{min}	ω_{min}	—
Среднее значение	\bar{x}	ω_{max}	—
Дисперсия	D	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega})^2$	—
Стандартное отклонение	σ	$\sigma = \sqrt{D}$	—
Медиана	Me	$Me = x_o + h \frac{\frac{\sum f_i}{2} - S_{m-1}}{f_m}$	x_o – нижняя граница интервала; h – величина интервала; $\sum f_i$ – сумма частот; S_{m-1} – сумма накопленных частот интервалов до медианы; f_m – частота медианного интервала
Мода	Mo	$M_o = x_o + h \frac{f_m - f_{m-1}}{(f_m - f_{m-1}) + (f_m - f_{m+1})}$	x_o – нижняя граница модального интервала; h – величина интервала; f_m – частота модального интервала; f_{m-1} – частота интервала, предшествующего модальному; f_{m+1} – частота интервала, следующего за модальным.

Таблица 2.1 – Статистические показатели (окончание)

Показатель	Обозначение	Расчетная формула	Примечание
Асимметрия	A	$A = \frac{1}{ND^{1,5}} \sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega})^3 = \frac{M_3}{M_2^{1,5}}$	M_2, M_3 – центральные моменты второго и третьего порядков (см. формулу 2.6)
Эксцесс	E	$E = \frac{1}{ND^2} \sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega})^4 = \frac{M_4}{M_2^2} - 3$	M_4 – центральный момент четвертого порядка (см. формулу 2.6)

На втором этапе для установления вероятностных законов распределения энерготехнологических параметров в зависимости от частотного распределения определяются абсолютные и относительные показатели вариационных рядов, которые приведены в таблице 2.2.

Для большинства физических процессов непрерывная случайная величина как правило, подчиняется нормальному закону, имеет плотность вероятности распределения

$$f(\omega) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\omega-\bar{\omega})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.4)$$

где σ – стандартное отклонение

Если величина ω имеет нормальное распределение, то $f(\omega) = e^{\omega}$ имеет логнормальное распределение.

Плотность логнормального распределения имеет вид:

$$f(\omega) = \frac{1}{\omega\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(\omega)-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.5)$$

где μ – параметр положения, σ – параметр масштаба.

Центральный момент k -го порядка, определяется по общей формуле

$$M_k(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^k, \quad (2.6)$$

где $k = 1, 2, 3, 4$ – порядок центрального момента.

Таблица 2.2 – Показатели вариационных рядов

Показатель	Обозначение	Расчетная формула	Примечание
Среднее значение	\bar{x}	$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^N (\omega'_i f_i)}{N}$	f_i – частоты попадания значений в интервальные ряды ω'_i – средние значения интервального ряда
Линейное отклонение	\bar{d}	$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^N |d_i| f_i}{N}$	–
Дисперсия	D	$D = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^2 f_i}{N}$	–
Стандартное отклонение	σ	$\sigma = \sqrt{D}$	–
Коэффициент осцилляции	k_R	$k_R = \frac{R_{\omega}}{\bar{\omega}} \cdot 100 = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\bar{\omega}} \cdot 100$	–
Относительное линейное отклонение	$k_{\bar{d}}$	$k_{\bar{d}} = \frac{\bar{d}}{\bar{\omega}} \cdot 100$	–
Коэффициент вариации	ϑ	$v = \frac{\sigma}{\bar{\omega}} \cdot 100$	–

Предварительный анализ режимов потребления электроэнергии на проходческих участках показал, что функция плотности вероятности может быть представлена равномерным законом распределения $f(W) = \frac{1}{W_{max} - W_{min}}$ на интервале $W_{min} < W < W_{max}$, иначе $f(W) = 0$.

На третьем этапе статистического анализа строятся соответствующие гистограммы функции плотности распределения случайных величин, в соответствии с принятыми гипотезами вероятностей их распределения.

В основном законы распределения для энерготехнологических параметров описываются нормальным законом, гамма распределением, логнормальным или равномерным.

Принятые гипотезы проверяются в соответствии с критериями согласия Пирсона, Колмогорова, Лифферсона и др. [9, 32, 107].

Установленные в результате статического анализа вероятностные законы изменения энерготехнологических показателей могут быть положены в основу математических и прогнозных моделей электропотребления.

Для определения энерготехнологических параметров ГПР в диссертационной работе используется корреляционно-регрессионный метод.

В результате расчетов определяются регрессионные зависимости, которые представляют собой энерготехнологические характеристики энергопотребления [109, 113].

Коэффициент парной корреляции, характеризующий степень отклонения от линейной связи между последовательностями $[W]$ и $[Q]$, определится по формуле

$$R_{WQ} = \frac{A - \frac{BC}{N}}{\sqrt{D - \frac{B^2}{N}} \sqrt{E - \frac{C^2}{N}}}, \quad (2.7)$$

где N – количество коррелируемых пар;

A, B, C, D, E – промежуточные коэффициенты, определяемые по формулам

$$A = \sum_{i=1}^N (W_i Q_i); \quad B = \sum_{i=1}^N Q_i; \quad C = \sum_{i=1}^N W_i; \quad D = \sum_{i=1}^N Q_i^2; \quad E = \sum_{i=1}^N W_i^2.$$

Линейный парный регрессионный анализ заключается в определении эмпирической линейной зависимости типа $W(Q) = a_0 + a_1 Q$, описывающей связь между некоторым числом пар значений (например, W_i и Q_i) и обеспечивающей наименьшую среднеквадратическую погрешность σ^2 .

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по формулам:

$$a_1 = \frac{BC-NA}{B^2-ND}; \quad a_0 = \frac{1}{N(C-a_1B)}. \quad (2.8)$$

Взаимосвязь между удельным расходом энергии ω_i и производительностью Q_i может быть представлена гиперболической регрессией типа $y(x) = a_0 + a_1/x$.

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по формулам:

$$a_0 = \frac{CB-DA}{NB-A^2}; \quad a_1 = \frac{ND-AC}{NB-A^2}, \quad (2.9)$$

где A, B, C, D – промежуточные коэффициенты, определяемые по формулам:

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{1}{Q_i}; \quad B = \sum_{i=1}^N \frac{1}{Q_i^2}; \quad C = \sum_{i=1}^N \omega_i; \quad D = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{Q_i}.$$

Если представить область определения значений W в зависимости от Q в виде эллипса (рисунок 2.2), то определяющими для него параметрами будут значения средних величин \bar{W} и \bar{Q} соответствующих его геометрическому центру и среднеквадратических отклонений σ_W и σ_Q , определяющих его граничные параметры соответственно по большой и малой полуосям.

Для определения значений W запишем исходное уравнение эллипса в каноническом виде:

$$\frac{(W-\bar{W})^2}{\sigma_W^2} + \frac{(Q-\bar{Q})^2}{\sigma_Q^2} = 1. \quad (2.10)$$

В результате преобразований уравнение (2.10) примет вид:

$$W = \bar{W} \pm \frac{\sigma_W}{\sigma_Q} \sqrt{\sigma_Q^2 - (Q - \bar{Q})^2}. \quad (2.11)$$

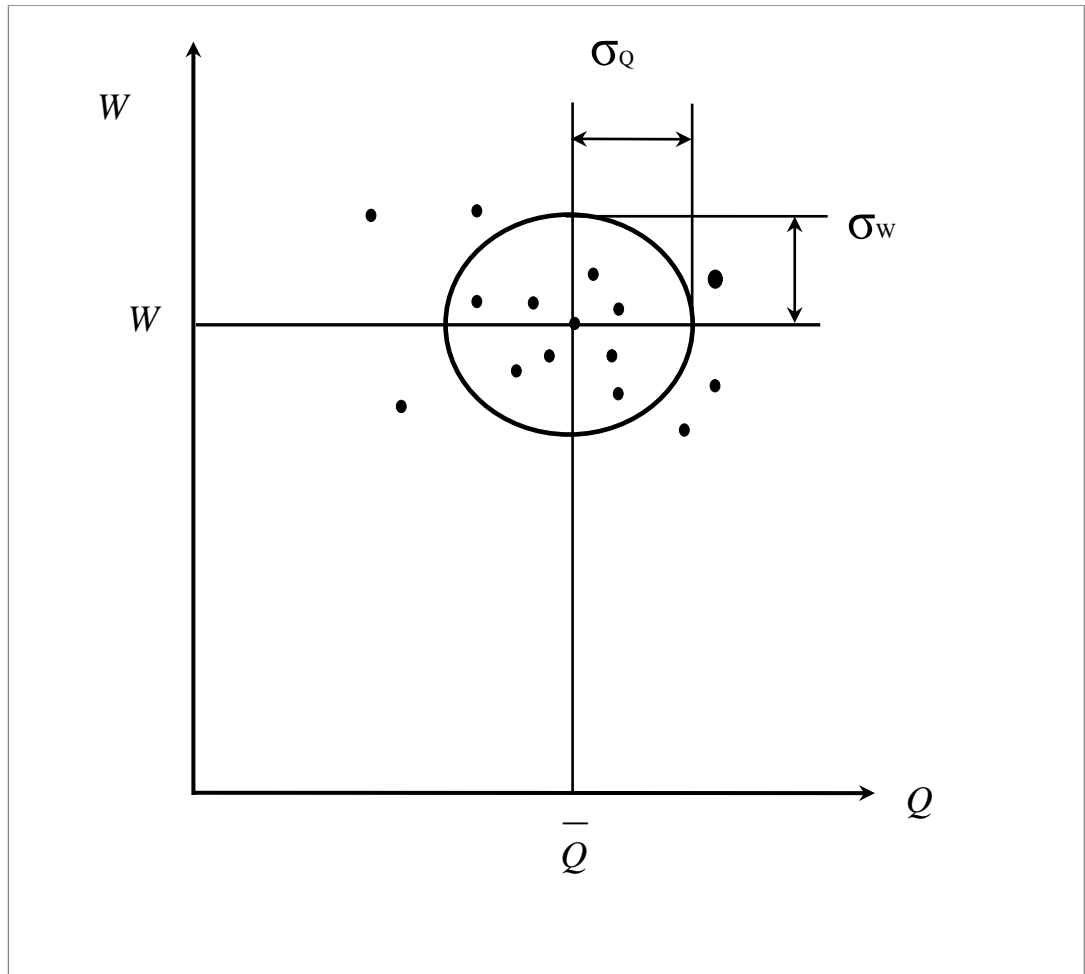


Рисунок 2.2 – Корреляционный эллипс

Если обозначить отношение среднеквадратических отклонений коэффициентом $k = \frac{\sigma_W}{\sigma_Q}$, то уравнение (2.14) примет вид:

$$W = \bar{W} \pm k \sqrt{D_Q - (Q - \bar{Q})^2}, \quad (2.12)$$

где D_Q – дисперсия аргумента $D_Q = \sigma_Q^2$ [81, 82].

Для анализа тренда показателя электропотребления целесообразно использовать корреляционный эллипс (рисунок 2.3) [119], большая ось которого совпадает с прямой, соответствующей регрессионной зависимости между параметрами W и Q , имеющей наклон к оси абсцисс $\alpha = \arctg(b)$, где b – коэффициент уравнения регрессии $W = b_0 + bQ$.

В случае, если необходимо получить эллипс, включающих все действительные параметры по их максимальной амплитуде, по уравнение корреляционного эллипса имеет вид:

$$\frac{(W-\bar{W})^2}{(\sigma_W \cdot \cos \alpha)^2} + \frac{(Q-\bar{Q})^2}{(\sigma_Q \cdot \sin \alpha)^2} = 1. \quad (2.13)$$

Область определения значений показателей устойчивого электропотребления будет определяться диапазонами максимального отклонения параметров электропотребления и производительности относительно их средних значений:

$$W \in \left[\bar{W} \pm \frac{\sigma_W}{\sigma_Q} \cdot \operatorname{tg} \alpha \sqrt{D_{Q\alpha} - (Q - \bar{Q})^2} \right], \quad (2.14)$$

где $D_{Q\alpha}$ – приведенная дисперсия аргумента $D_{Q\alpha} = (\sigma_Q \cos \alpha)^2$.

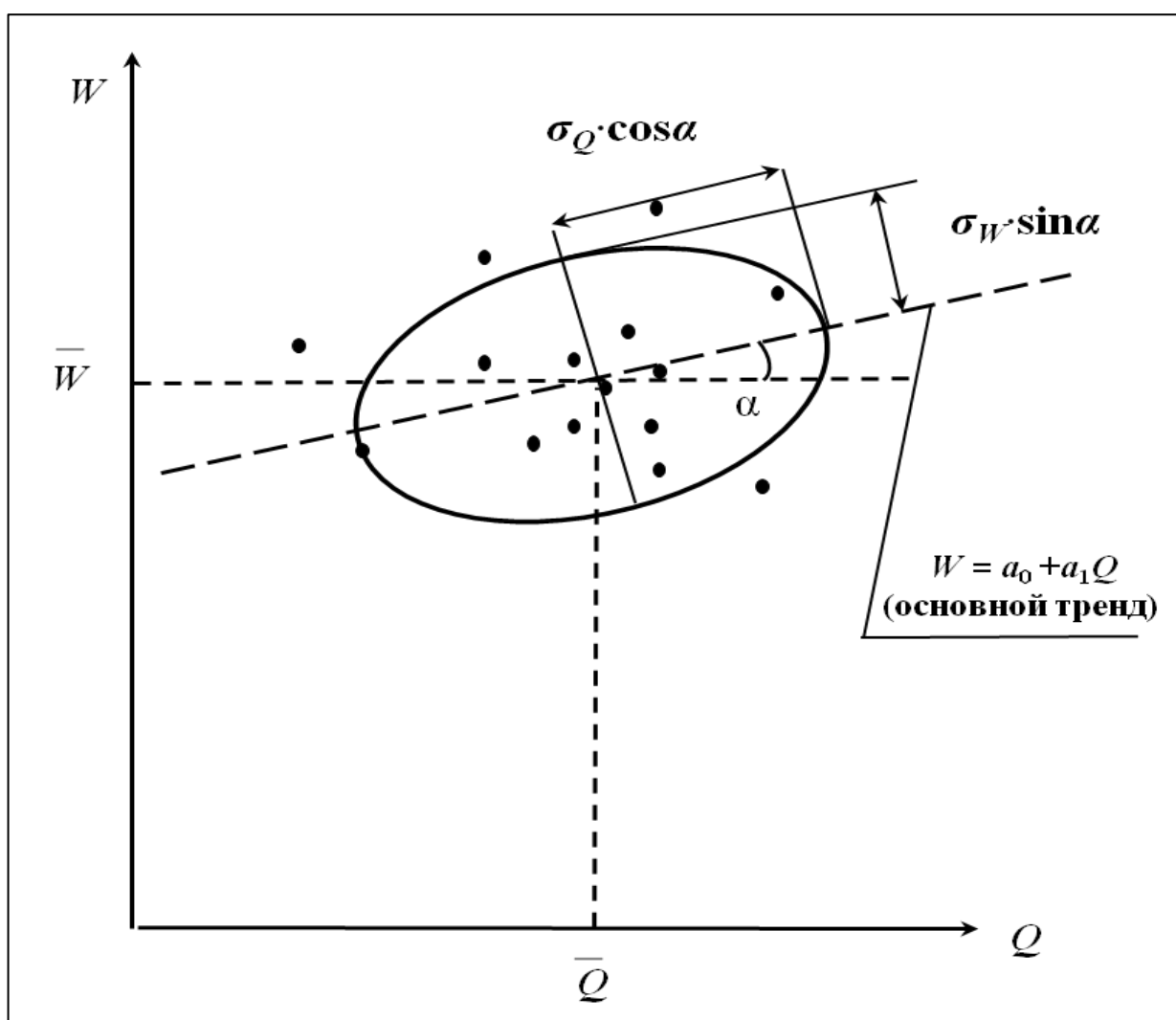


Рисунок 2.3 – Корреляционный эллипс с учетом основного тренда

Для определения точек на корреляционном эллипсе необходимо рассчитать выборочный парный коэффициент корреляции:

$$R_{WQ} = \frac{\overline{WQ} - \bar{W} \cdot \bar{Q}}{\sigma_W \sigma_Q}, \quad (2.15)$$

где \overline{WQ} – среднее арифметическое значение из произведений W и Q ;

\bar{W}, \bar{Q} – средние арифметические параметры W и Q ;

$\sigma_W \sigma_Q$ – соответственно стандартное отклонение признаков W и Q .

Множеству наблюдений ($W = 1, 2 \dots N$) и ($Q = 1, 2 \dots N$) можно сопоставить эмпирический эллипс рассеяния. Если случайные переменные W и Q распределены нормально, то внутри эллипса попадает в среднем доля P всех наблюдений (вероятность попадания точки (W_i, Q_i) , внутри эллипса равна P).

Центр эллипса имеет координаты (\bar{W}, \bar{Q}) , т.е. расположен в центре тяжести точек (W_i, Q_i) . Форма и размеры эллипса определяются величинами стандартных отклонений выборок σ_W, σ_Q парного коэффициента корреляции R_{WQ} и заданной вероятностью P .

Уравнение корреляционного эллипса:

$$\frac{1}{1-R_{WQ}^2} \left[\left(\frac{W_i - \bar{W}}{\sigma_W} \right)^2 + \left(\frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma_Q} \right)^2 - 2 \cdot R_{WQ} \frac{W_i - \bar{W}}{\sigma_W} \cdot \frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma_Q} \right] = \chi_p^{*2}, \quad (2.16)$$

где χ_p^{*2} – квантиль распределения Пирсона (χ^2 – распределения) с двумя степенями свободы. Если распределения случайных переменных W и Q не слишком отличаются от нормального, эмпирический эллипс рассеяния дает наглядное представление о совместной области рассеяния данных.

Чтобы построить корреляционный эллипс необходимо ввести новые переменные.

Перейдем к стандартизованным безразмерным переменным – центрируем исходные переменные и нормируем их на стандартные отклонения соответствующих выборок:

$$h = \frac{W_i - \bar{W}}{\sigma_W}; g = \frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma_Q}. \quad (2.17)$$

Введем новые переменные u и v , координатные оси которых совпадают с главными осями корреляционного эллипса:

$$u = \frac{h-g}{\sqrt{2}}; \quad v = \frac{g-h}{\sqrt{2}}. \quad (2.18)$$

В переменных u и v уравнение эллипса рассеяния примет вид:

$$\left(\frac{u}{\sigma_u}\right)^2 + \left(\frac{v}{\sigma_v}\right)^2 = \chi_p^{*2}, \quad (2.19)$$

где $\sigma_u = \sqrt{1 + R_{WQ}}$, $\sigma_v = \sqrt{1 - R_{WQ}}$ – соответственно стандартные отклонения переменных u и v .

Точки на эллипсе рассчитываются из параметрического уравнения эллипса:

$$u = k\sigma_u \cos\varphi; \quad v = k\sigma_v \sin\varphi, \quad (2.20)$$

где $k = \sqrt{\chi_p^{*2}}$ – коэффициент размера эллипса;

φ – параметр $0 \leq \varphi \leq 2\pi$.

После расчета точек на эллипсе в переменных u и v по параметрическому уравнению их координаты преобразуются к исходным переменным W и Q по формулам:

$$W = \frac{u+v}{\sqrt{2}} \sigma_w + \bar{W}; \quad Q = \frac{u-v}{\sqrt{2}} \sigma_Q + \bar{Q} \quad (2.21)$$

или

$$W = \bar{W} + \beta_W \cdot (\sqrt{1 + R_{WQ}} \cdot \cos\varphi + \sqrt{1 - R_{WQ}} \cdot \sin\varphi); \quad (2.22)$$

$$Q = \bar{Q} + \beta_Q \cdot (\sqrt{1 + R_{WQ}} \cdot \cos\varphi - \sqrt{1 - R_{WQ}} \cdot \sin\varphi), \quad (2.23)$$

где $\beta_W = \sqrt{\frac{D_W \cdot \chi_p^{*2}}{2}}; \quad \beta_Q = \sqrt{\frac{D_Q \cdot \chi_p^{*2}}{2}}.$

Здесь $D_W = \sigma_W^2$ и $D_Q = \sigma_Q^2$ – соответственно дисперсии признаков W и Q .

С уменьшением объема выборки существенно изменяется не только характер зависимости $W=f(Q)$, но и зона распределения контролируемых параметров [81, 82].

Таким образом, применение указанной методики оценки эффективности электропотребления позволяет: с достаточной степенью точности определить и выполнить сравнительный анализ текущих и плановых энерготехнологических показателей; определить уровни электропотребления; определить устойчивый тренд и характер изменения процесса электропотребления ГПР.

Для анализа процессов энергопотребления ГПР необходимо исследование их динамики и установление зависимостей, позволяющих осуществить качественную и количественную оценку характера изменения энергетических показателей технологических процессов, а также разработать соответствующие прогнозные модели.

Для прогнозирования удельного расхода электроэнергии используем частные варианты моделей временных рядов, из которых наиболее удобными при разработке прогнозных моделей энергопотребления при ведении горнопроходческих работ являются следующие:

$$\omega(t) = T(t) + A(t); \quad (2.24)$$

$$\omega(t) = T(t) + N(t) + A(t). \quad (2.25)$$

Рассмотрим построение модели прогнозирования временного ряда вида (2.24), состоящей из тренда $T(t)$ и аддитивной помехи $A(t)$ для суточных значений показателя $\omega(t)$.

В качестве тренда возьмем линейную функцию

$$T(t) = a + b \cdot t. \quad (2.26)$$

Коэффициенты уравнения тренда находятся по формулам:

$$b = \frac{\sum_{t=1}^n (t\omega_t) - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n \omega_t}{\sum_{t=1}^n t^2 - \frac{1}{n} (\sum_{t=1}^n t)^2}, \quad (2.27)$$

$$a = \bar{\omega}_t - b\bar{t}. \quad (2.28)$$

Здесь $\bar{\omega}_t$, \bar{t} – средние значения уровней исходного ряда ω_t и времени t .

Аддитивная помеха носит случайный характер. Для ее моделирования используется вероятностный подход. В случае, когда помеха (отклонение от тренда) близка к нормальному закону распределения и имеет стандартное отклонение $S_{A(t)}$, случайная помеха подчиняется «правилу трех сигм».

Аддитивная помеха (вероятное отклонение от тренда удельного расхода электроэнергии) определится по формуле:

$$A(t) = S_{A(t)} = \left(\frac{1}{n-2} \sum_{t=1}^n (A(t) - \bar{A}(t))^2 \right)^{0,5}, \quad (2.29)$$

где n – длина ряда; $A(t)$ – текущая помеха; $\bar{A}(t)$ – средний уровень помех.

Простая модель временного ряда энергопотребления имеет следующий вид: $\omega_t = b + \varepsilon_t$, где b константа и ε_t случайная ошибка. Константа b относительно стабильна на каждом временном интервале, но может также медленно изменяться со временем. Один из способов определения b состоит в том, чтобы использовать сглаживание скользящим средним, в котором последним наблюдениям приписываются большие веса, чем предпоследним и т. д. Таким образом, более старым наблюдениям приписываются экспоненциально убывающие веса, при этом, в отличие от скользящего среднего, учитываются все предшествующие наблюдения ряда, а не те, что попали в определенное окно.

Формула простого экспоненциального сглаживания имеет вид:

$$S_t = \alpha \cdot \omega_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}. \quad (2.30)$$

где S_t – прогнозное сглаженное значение, $\alpha = [0, 1]$ – весовой коэффициент; ω_t – текущее значение; S_{t-1} – предыдущее значение сглаженного ряда.

Когда эта формула применяется рекурсивно, то каждое новое сглаженное значение (которое является также прогнозом) вычисляется как взвешенное среднее текущего наблюдения и сглаженного ряда. Очевидно, результат сглаживания зависит от параметра α (*альфа*). Если $\alpha = 1$, то предыдущие наблюдения полностью игнорируются. Если α равно 0, то игнорируются текущие наблюдения. Значения α между 0 и 1 дают промежуточные результаты.

На практике параметр сглаживания часто ищется с поиском на сетке. Возможные значения параметра разбиваются сеткой с определенным шагом, например от $\alpha = 0,1$ до $\alpha = 0,9$, с шагом 0,1. Выбирается показатель α , для которого сумма квадратов (или средних квадратов) остатков (наблюдаемые значения минус прогнозы на шаг вперед) является минимальной.

Относительная ошибка прогнозирования вычисляется как:

$$\Delta \varepsilon_t = 100 \cdot (\omega_t - S_t) / \omega_t, \quad (2.31)$$

где ω_t – наблюдаемое значение в момент времени t ;

S_t – прогноз (сглаженное значение).

Автокорреляция представляет собой это корреляцию исходного ряда с самим собой, сдвинутым на определенный лаг k .

График автокорреляций для различных значений лагов играет существенную роль в идентификации прогнозной модели. Коэффициенты автокорреляции уровней ряда определяются по формуле:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1+k}^n (\omega_t - \bar{\omega}_{1k}) \cdot (\omega_{t-k} - \bar{\omega}_{1k})}{\sqrt{\sum_{t=1+k}^n (\omega_t - \bar{\omega}_{1k})^2 \sum_{t=1+k}^n (\omega_{t-k} - \bar{\omega}_{1k})^2}}. \quad (2.32)$$

Стандартная ошибка коэффициента автокорреляции r_k для процесса скользящего среднего порядка $k-1$ вычисляется как:

$$\sigma(r_k) = \sqrt{\frac{1 + 2 \sum_{i=1}^{k-1} r_i^2}{N}}, \quad (2.33)$$

где N – число наблюдений в ряде; k – лаг (для $i = 1$ до $k-1$).

На данном лаге k оценка достоверности прогнозного моделирования может быть осуществлена по статистике (критерию) Бокса-Льюинга Q , который для $i = [1, k]$ определится по формуле:

$$Q_k = N(N + 2) \sum \frac{r_i^2}{N - i}. \quad (2.34)$$

При большом числе наблюдений Q статистика имеет χ^2 -распределение с $k-p-q$ степенями свободы, где p и q число параметров авторегрессии и скользящего среднего лага.

2.4. Выводы

В результате проведенного анализа процессов электропотребления ГПР и методов оценки энергоэффективности получены следующие результаты.

1. Современные применяемые системы электроснабжения и технические средства регистрации энерготехнологических параметров позволяют выполнить общую оценку энергоэффективности условия ведения ГПР на угольных шахтах. В настоящее время дифференцировать эти параметры по отдельным технологическим установкам, входящим в состав проходческих участков, не представляется возможным.

2. Выполнен анализ и определены энерготехнологические параметры для оценки энергоэффективности горнопроходческих комплексов. В качестве показателя предлагается использовать коэффициент энергетической эффективности, позволяющий выполнить сравнительную оценку между плановым (нормативным) и фактическим удельным электропотреблением. Отличительной особенностью оценки энергоэффективности ГПР является дифференцирование показателя производительности по двум составляющим: пройденным погонным метрам горной выработки и объем попутно извлекаемого полезного ископаемого

3. Для анализа процессов электропотребления выполнено обоснование основных методических принципов энергетического обследования и обработки данных наблюдений.

Отличительными особенностями являются:

- для определения уровней электропотребления и производительности проходческих участков в качестве энерготехнологической характеристики предлагается использование корреляционного эллипса, описывающего область определения энерготехнологических параметров и определяющего его общий тренд;

- для оценки динамики электропотребления предлагается дифференцировать интервалы динамических рядов как ежесменные (в пределах от 1 недели до месяца), суточные (в течение месяца, квартала и года). Такой подход позволяет разработать для каждого интервала свою динамическую модель и выполнить соответствующую оценку энергоэффективности;

- для анализа динамики энергопотребления разработана модель временного ряда удельного расхода электроэнергии в виде его основного тренда и аддитивной составляющей, а также использование экспоненциального сглаживания динамического ряда, которое позволят учесть прогнозные значения на заданном лаге в соответствии с вероятностными показателями.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

3.1. Исходные положения

На шахте «Северная» находится 6 проходческих участков, на которых осуществляется проходка штреков (участки № 1, 5, 6, 8, 9, 10) с использованием проходческих комбайнов *Dh R75* (участки № 1, 10), *Joy 12CM30* (участки № 5, 8), *Sandvik MB-670* (участок № 9), КП-21 (участок № 6).

Техническая характеристика проходческих комбайнов и энерготехнологические параметры проходческих участков приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Техническая характеристика проходческих комбайнов и энерготехнологические параметры проходческих участков

Проходческий комплекс	Номер участка	Предел прочности пород при одноосном сжатии, (МПа)		Суммарная мощность электродвигателей комбайна, кВт	Мощность двигателя исполнительного органа, кВт	Напряжение сети (В)	Сечение горной выработки	Среднесменные показатели проходческого участка		
		По углю и породе	По породе				$S_v, \text{м}^2$	$W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$Q, \text{мм}$	$\omega, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{мм}$
КП-21	6	20	69	189	110	660/1140	9,4	49,4	2,02	24,5
<i>Dh R75</i>	10	42	100	275	250	660/1140	17,5	107,6	2,03	53,0
<i>Dh R75</i>	1	42	100	275	250	660/1140	17,5	109,6	1,99	55,1
<i>Joy 12CM30</i>	8	50	100	610	340	1140	18,2	207,6	3,53	58,8
<i>Joy 12CM30</i>	5	50	100	610	340	1140	18,2	182,1	3,45	52,8
<i>Sandvik MB-670</i>	9	60	100	567	270	660/1140	18,9	415,4	8,47	49,0

Проходческие работы ведутся без применения БВР по грунтам при осевых усилиях сжатия $\sigma_{сж}$ в пределах от 20 до 70 МПа. Стандартное сечение горной выработки 18 м^2 . Нарезка вентиляционных и откаточных штреков в зависимости от мощности пласта (от 1,5 м до 1,9 м) обеспечивает попутную добычу полезного

ископаемого. Плановые показатели проходки для различных участков составляют от 2300 п.м. до 9500 п.м.

Схема электроснабжения проходческих участков «Северная» приведена на рисунке 3.1. Работы ведутся по породе, по углю и по углю с присечкой. Сечение горных выработок 17,5; 18,2 и 18,9 м².

На данном участке технологическое оборудование включает в себя скребковые конвейеры 2СР75, ленточные конвейеры 3Л-1200, 3Л-1400, насосы системы водоотлива ВШН-160, вентиляторы местного проветривания ВМ-8М и лебедки ЛВД-21.

Исходными данными являлись сменные показатели производительности и электропотребления проходческих участков в период с ноября 2016 г. по октябрь 2017 г., приведенные в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Показатели годовой производительности и расхода электроэнергии при ведении ГПР

Смена	Показатель	Участок					
		1	5	6	8	9	10
1	W, кВт·ч	32283,6	53407,9	14541,9	61378,1	119725,9	32197,8
	Q, пм	581,94	1026,1	606,61	1063,4	2510,03	582,3
2	W, кВт·ч	32417,8	53312,7	14668	60901,4	124852	31928,1
	Q, пм	615,63	1023,3	589	989,8	2451,95	593,4
3	W, кВт·ч	32475,2	53708,1	14534,9	60904,5	122416,9	30913,6
	Q, пм	583,67	1003,1	600,8	1056,2	2499,43	613,44
4	W, кВт·ч	32103,6	54491,7	14484,8	61824	123200,1	31877,8
	Q, пм	572,13	1012,2	586,82	1059,41	2536,13	606,26
Итого за год	W, кВт·ч	129280,2	214920,4	58229,5	245007,9	490194,8	126917,2
	Q, пм	2353,4	4064,8	2383,2	4168,8	9997,5	2395,4

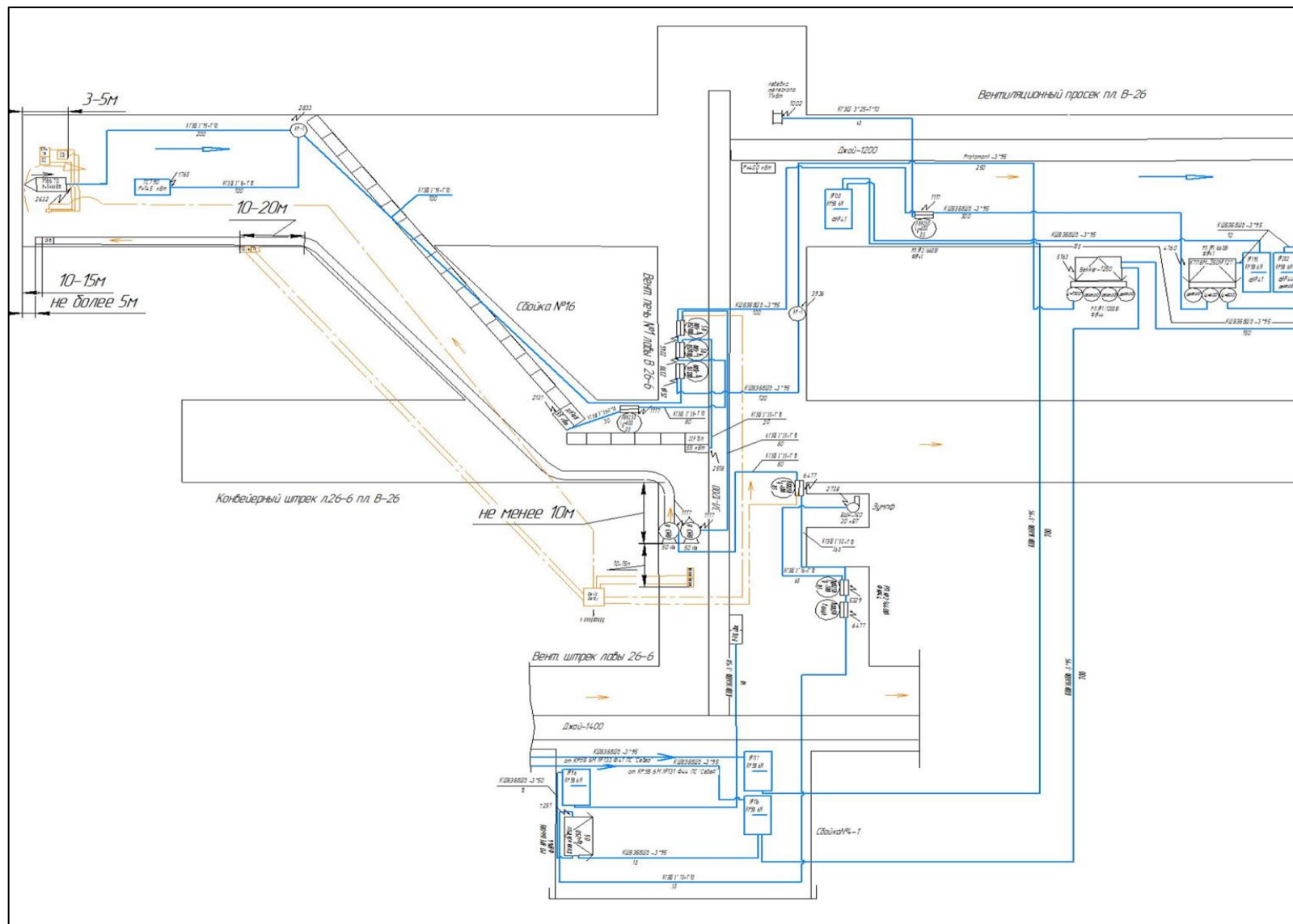


Рисунок 3.1 – Схема электроснабжения проходческих участков шахты «Северная»

Предварительный анализ показал следующее.

Разность по суммарному годовому расходу электроэнергии между сменами ΔW для каждого из участков колеблется от 133 до 5127 кВт·ч ($\Delta W \% = 0,91 - 4,1$). При этом для участков с большей энерговооруженностью этот показатель выше как в абсолютном, так и в относительном соотношении (между сменами внутри участков).

Годовой расход электроэнергии на ведение ГПР составляет незначительную часть в электропотреблении шахты (не более 5 – 8 %) и не оказывает существенного влияния на совокупные показатели затрат энергии по предприятию.

В качестве показателя уровня энергопотребления при анализе эффективности проходческих работ с точки зрения рационального использования электроэнергии сменными бригадами предлагается использовать коэффициент:

$$k_{W.см} = \frac{\bar{W}_{см} - W_{смi}}{\bar{W}_{см}} \cdot 100, (\%), \quad (3.1)$$

где $W_{смi}$ – расход электроэнергии за i -ю смену на проходческом участке, кВт·ч;

$\bar{W}_{см}$ – среднесменный расход электроэнергии по совокупному потреблению всеми сменами проходческого участка, кВт·ч.

Разность по годовым показателям по протяженности проходки горной выработки между сменами $\Delta Q_{пм}$ для каждого из участков колеблется от 13,9 до 84,2 погонных метра ($\Delta Q_{пм} \% = 1,35 - 7,07$). При этом абсолютные и относительные показатели проходки для участков и между сменами внутри участков практически не зависят от их энерговооруженности.

При пересчете итоговых показателей $\Delta Q_{пм}$ по отношению к величине среднесменной проходки $\bar{Q}_{пм}$ для каждого участка разница в затраченном времени между сменными бригадами составляет от 4 до 35 смен (24 – 210 часов в год).

Этот факт свидетельствует о том, что при прохождении горных выработок показатель проходки $Q_{пм}$ зависит не только от горно-геологических и технологических факторов, но и правильной (рациональной) организации работы бригады в течение смены.

При оценке эффективности проходческих работ в точки зрения рационального использования электроэнергии сменными бригадами предлагается использовать в качестве показателя эффективности прохождения горных выработок коэффициент:

$$k_{Q.пм} = \frac{\bar{Q}_{пм} - Q_{пм.i}}{\bar{Q}_{пм}} \cdot 100, (\%), \quad (3.2)$$

где $\bar{Q}_{пм.i}$ – средняя производительность i -ой смены проходческого участка по погонным метрам горной выработки, п.м;

$\bar{Q}_{пм}$ – среднесменное значение протяженности пройденной горной выработки на проходческом участке, п.м. [117, 128].

В главе поставлены следующие научные задачи.

1. На основании статистических данных электропотребления и объема выполненных проходческих работ установить законы распределения для показателей, характеризующих энергоэффективность проходческих участков.
2. На основании корреляционного анализа установить наличие взаимосвязи между энерготехнологическими показателями ГПР.
3. На основании регрессионного анализа определить:
 - энерготехнологические зависимости между полным расходом электроэнергии и производительностью проходческого участка по погонным метрам проходки горной выработки;
 - энерготехнологические зависимости между удельным расходом электроэнергии и производительностью проходческого участка по погонным метрам проходки горной выработки.
4. Выполнить исследование динамики изменения энергетических и технологических показателей, характеризующих работу проходческого участка и определить прогнозные модели электропотребления.

3.2. Анализ и оценка эффективности электропотребления при ведении горнопроходческих работ

В соответствии с методикой аналитических исследований, изложенной во 2-ой главе диссертации, выполнен анализ производительности и процесса потребления электрической энергии на проходческих участках угольной шахты.

Исходными данными являлись сменные показатели производительности и электропотребления проходческих участков.

В таблице 3.3 приведены среднесменные энерготехнологические показатели (производительности, полного и удельного расходов электроэнергии) проходческих участков шахты «Северная».

Таблица 3.3 – Среднесменные энерготехнологические показатели проходческих участков (по итогам года)

Показатель	Размерность	Проходческие участки					
		№ 1	№ 5	№ 6	№ 8	№ 9	№ 10
Q	пм	1,99	3,45	2,02	3,53	8,47	2,03
W	кВт·ч	109,6	182,1	49,35	207,6	415,4	107,6
ω	кВт·ч/пм	59,95	56,5	26,8	62,6	51,92	57,87

В таблице 3.4 приведены аналогичные показатели для проходческих участков в соответствии с рабочими сменами.

Диапазон изменения показателей по удельному расходу электроэнергии относительно проходки $\omega = 51,9 - 65,8$ кВт·ч/пм ($\Delta\epsilon = 21\%$). Такой разброс значений можно объяснить тем, что непосредственное извлечение горной массы в рамках технологического процесса обусловлено её объемом, плотностью породы, степенью разрыхления и полноты загрузки ковша или стола питания погрузочной машины. На величину удельного расхода электроэнергии при проходке одного погонного метра горной выработки влияет крепость проходимых горных пород f , их сопротивляемость усилию резания $q_{сж}$ исполнительного органа проходческого комбайна или осевое усилие подачи буровой установки $P_{ос}$.

Диапазон изменения средних показателей между сменами в пределах участков (за исключением участка № 1) не превышает 2 %, что свидетельствует о достаточно устойчивой работе в течение года. Однако следует отметить, что расход электроэнергии за смену имеет свою характерную динамику, рассмотренную в разделе 3.4.

На втором этапе установлены законы распределения вероятностей, которому подчиняются среднесменные энерготехнологические параметры работы проходческих участков, определены их устойчивые уровни и диапазоны допустимых отклонений. Это позволяет обосновать нормативные (плановые) показатели для проходческих участков и оценить потенциал повышения эффективности производства проходческих работ.

Для исследования были выбраны 4 участка (№ 1, 6, 8 и 9).

В результате статистического анализа определены основные энерготехнологические показатели для проходческих участков: M – среднее значение (математическое ожидание), σ – стандартное отклонение (среднеквадратическая погрешность), M_e – медиана. Для оценки вероятностного закона распределения энерготехнологических показателей определены соответствующие коэффициенты (асимметрия, эксцесс, коэффициенты осцилляции, относительного линейного отклонения и вариации). Расчетные данные приведены в таблице 3.5.

Анализ показал следующее.

1. Для представленных показателей характерен достаточно большой размах вариации относительно средней величины. Характеризующий его коэффициент осцилляции изменяется в диапазоне $k_R = 30 - 170$ %. Наибольший размах вариации относительно среднего значения приходится на показатели удельного расхода ω (кВт·ч/мм) и производительности Q (мм).

Таблица 3.4– Энерготехнологические показатели проходческих участков за смену

Показатель	Размерность	участок № 1				участок № 5			
		1 смена	2 смена	3 смена	4 смена	1 смена	2 смена	3 смена	4 смена
Q	п.м.	1,99	1,99	1,98	1,99	3,44	3,45	3,45	3,45
W	кВт·ч	95,0	109,5	110,1	109,6	182,1	182,1	182,2	182,3
ω	кВт·ч/п.м.	59,9	59,6	60,4	59,7	56,48	56,48	56,5	56,49
		участок № 6				участок № 8			
Q	п.м.	2,02	2,02	2,02	2,02	3,61	3,36	3,58	3,59
W	кВт·ч	49,36	49,35	49,35	49,33	208,1	206,4	206,5	209,6
ω	кВт·ч/п.м.	26,79	26,81	26,8	26,8	61,23	65,85	61,49	61,97
		участок № 9				участок № 10			
Q	п.м.	8,47	8,31	8,47	8,6	2,03	2,03	2,03	2,03
W	кВт·ч	415,2	423,2	415	417,6	107,5	107,6	107,58	107,56
ω	кВт·ч/п.м.	51,92	53,9	51,9	51,5	57,87	57,9	57,9	57,9

2. Разница между средним и медианным значениями показателей производительности практически совпадают (относительная погрешность $\Delta\varepsilon = + 0,01 \%$), для полного расхода электроэнергии – $\Delta\varepsilon = + 2,6 \%$. Однако для удельного расхода электроэнергии относительная погрешность $\Delta\varepsilon = - 9 \%$. Последнее свидетельствует о необходимости установления причин такого несоответствия.

3. Коэффициенты асимметрии, эксцесса и вариации указывают на соответствие показателей производительности и технологического расхода электроэнергии нормальному закону распределения симметричностью относительно средних значений и однородностью совокупных значений. При этом низкий коэффициент эксцесса может характеризовать данные распределения как равномерные.

4. Для показателей удельного расхода электроэнергии характерна положительная асимметрия и малый эксцесс, что с учетом однородности выборки, характерно для экспоненциального закона распределения.

Установление законов распределения среднесменных показателей выполнялось для 4-х проходческих участков. Результаты расчетов приведены в табл. 3.6. Гистограммы и функции плотности распределения на примере проходческого участка № 1 представлены на рисунках 3.2. и 3.3.

Статистический анализ показал, что характер изменения полного расхода электроэнергии подчиняется равномерному закону распределения вероятностей, а удельного расхода электроэнергии - логнормальному закону распределения вероятностей.

Проверка гипотез о законе распределения вероятностей в соответствии с критериями согласия Пирсона χ^2 , Колмогорова и Лифферсона показал высокую сходимость с вероятностью 0,95.

Таблица 3.5 - Статистические параметры 4-х проходческих участков

Участок	показатель	$R_{\min} - R_{\max}$	M	D	σ	Me	Mo	A	E	K_R	K_D	v
6	Q , пм	1-2,99	2,02	0,31	0,56	2,04	1,91	-0,04	-1,19	98	15,3	27,7
	W , кВт·ч	36,7-61,6	49,35	43,44	6,59	49,35	45,32	-0,05	-1,15	50	88	13,4
	ω , кВт·ч/пм	12,49-57,48	26,8	88,2	9,39	24,23	37	0,88	0,09	50	293	35
1	Q , пм	1,01-3	1,99	0,32	0,56	1,99	2,03	0,05	-1,14	100	16	28
	W , кВт·ч	91,5-127,9	109,6	102,2	10,1	110,3	105,5	-0,09	-1,18	34	93	9,2
	ω , кВт·ч/пм	31,7-120,5	59,95	373,8	19,32	55,6	70,57	0,76	-0,21	51	623	32,2
8	Q , пм	2-5	3,53	0,736	0,86	3,53	4,46	-0,01	-1,18	85	20,7	24,4
	W , кВт·ч	127,3-290	207,6	2006	44,8	208,3	190,6	0,04	-1,16	80	96,1	21,6
	ω , кВт·ч/пм	25,9-135	62,6	457,4	21,4	58,96	55,9	0,76	0,19	170	725	34,2
9	Q , пм	5,02-12	8,47	4,14	2,03	8,4	7,65	0,02	-1,26	82	48,9	23,9
	W , кВт·ч	270,8-554	415,4	6341,6	79,6	422,35	398,3	0,84	-1,19	68	1527	19,1
	ω , кВт·ч/пм	22,97-107,2	51,92	254,1	15,9	51,85	48,1	0,72	0,27	162	489	30,6

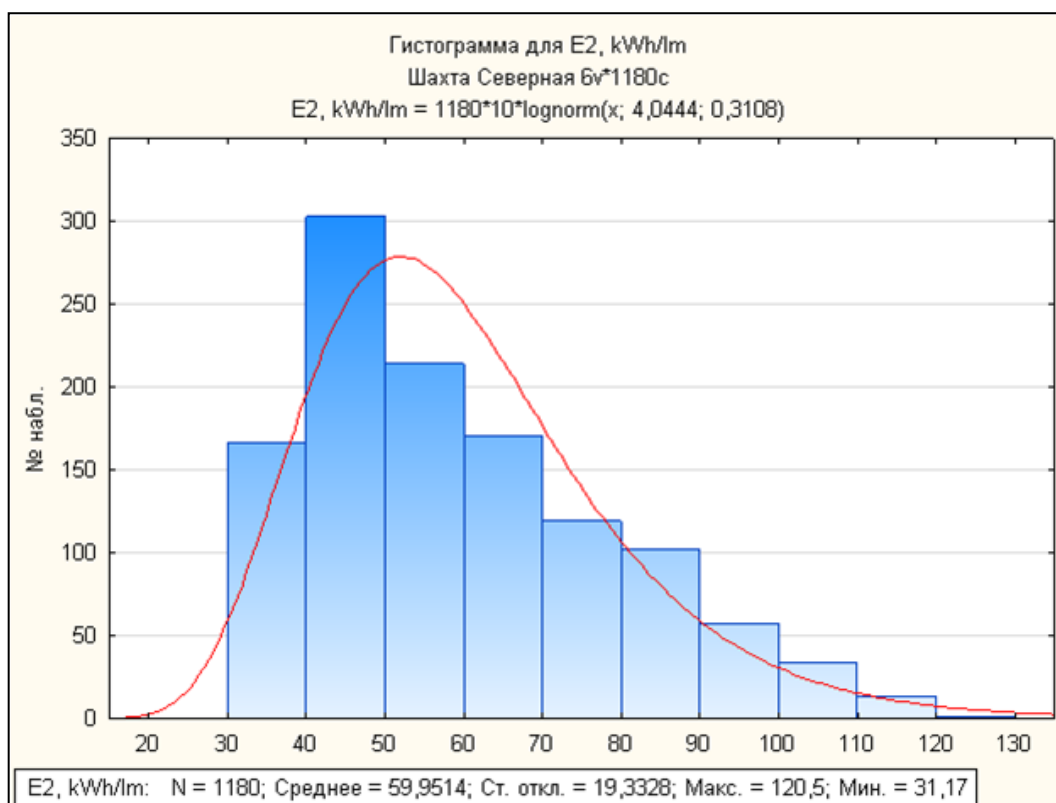


Рисунок 3.2 – Гистограмма функции плотности распределения $f^*(\omega)$

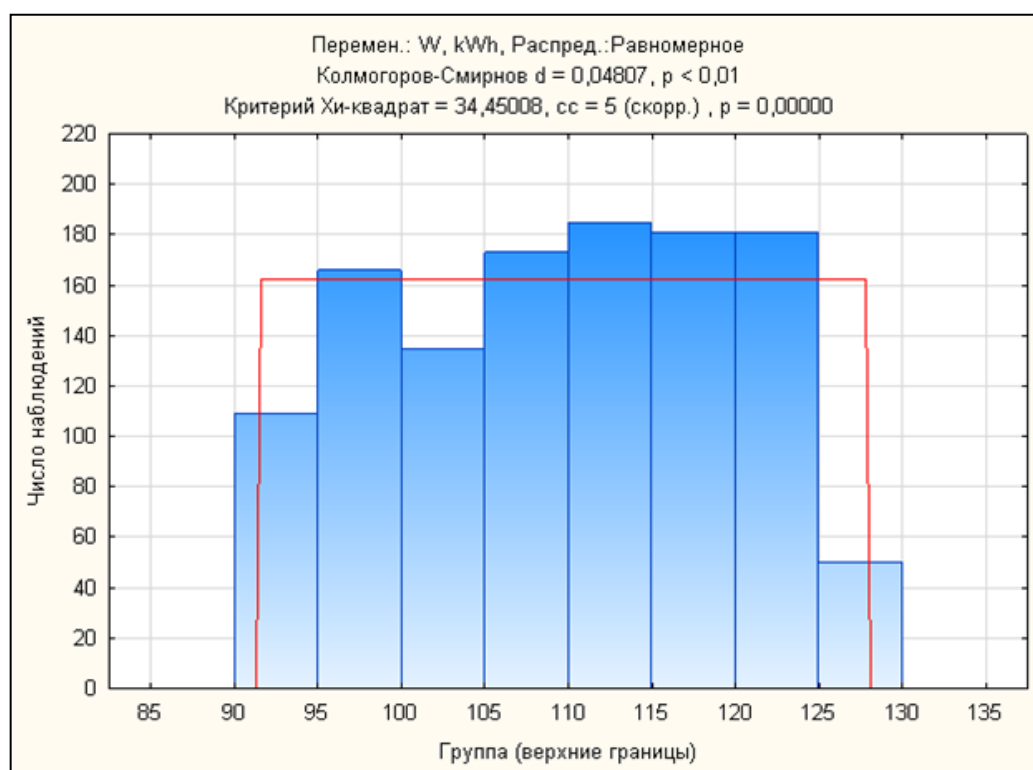


Рисунок 3.3 – Гистограмма функции плотности распределения $f^*(W)$

Таблица 3.6 – Законы распределения функции плотности вероятностей

Участок	Показатель	Размерность	M	Me	Закон распределения	Плотность распределения
1	W	кВт·ч	109,6	110,3	равномерный	$f(W) = Reg [W; 0,0275]$
	ω	кВт·ч/п.м.	59,95	55,6	логнормальный	$f(\omega) = LN [\omega; 4,044; 0,3108]$
6	W	кВт·ч	49,35	49,35	равномерный	$f(W) = Reg [W; 0,0402]$
	ω	кВт·ч/п.м.	26,8	24,23	логнормальный	$f(\omega) = LN [\omega; 3,231; 0,344]$
8	W	кВт·ч	207,6	208,3	равномерный	$f(W) = Reg [W; 0,0062]$
	ω	кВт·ч/п.м.	62,6	58,96	логнормальный	$f(\omega) = LN [\omega; 4,081; 0,3372]$
9	W	кВт·ч	415,4	422,35	равномерный	$f(W) = Reg [W; 0,0035]$
	ω	кВт·ч/п.м.	51,92	51,85	логнормальный	$f(\omega) = LN [\omega; 3,904; 0,3039]$

Для вероятностного закона распределения $f(W)$ характерна симметрия относительно \bar{W} , т.е. его среднее значение M имеет одинаковую вероятность на всем диапазоне изменения от минимума до максимума. Устойчивый уровень электропотребления определится в диапазоне $\bar{W} \pm \sigma$, а предельно допустимый – в диапазоне $\bar{W} \pm 2\sigma$.

Для вероятностного закона распределения $f(\omega)$ характерна асимметрия относительно $\bar{\omega}$. Устойчивый уровень удельного расхода электроэнергии может быть задан по величине M_e .

3.3. Разработка математических энерготехнологических моделей для анализа энергоэффективности горнопроходческих работ

Для построения и последующего исследования энерготехнологических параметров проходческих участков используем методы корреляционного и регрессионного анализа. Объектами исследования являются проходческие участки № 1, 6, 8, 9.

На основе данных, приведенных в таблице 3.3, выполнена проверка наличия взаимосвязи между среднесменными энерготехнологическими показателями проходческих участков шахты «Северная».

При этом учитывается тот факт, что на участках работают машины различного типа и с различной мощностью электроприводных двигателей.

Коэффициент корреляции для зависимостей полного расхода электроэнергии от сменной производительности по проходке для всех проходческих участков составил $R_{WQ} = 0,98$. Такой высокий коэффициент ($R > 0,95$) свидетельствует о том, что функция $W = f(Q)$ коллинеарная (линейно зависящая) и не может описываться статистическим методом, т.к. функция и аргумент взаимосвязаны конкретным физическим законом, и могут быть определены расчетным путем.

Коэффициент корреляции для зависимости удельного расхода электроэнергии от сменной производительности по проходке для всех

проходческих участков составил соответственно $R_{\omega Q} = 0,097$. Такой низкий коэффициент ($R < 0,1$) свидетельствует об отсутствии какой-либо связи между функцией и аргументом, и также не может описываться статистическими методами. С изменением объема производимых проходческой машиной работ уровень потребления электрической энергии изменяется взаимно пропорционально, поэтому изменение удельных показателей незначительны и находятся в зоне минимальной статистической погрешности, стремящейся к нулю.

Таким образом, при исследовании энергоэффективности проходческих работ необходимо выполнить анализ среднесменных показателей для каждого участка в отдельности, т.е. учесть особенности процесса электропотребления при ведении ГПР.

На основе данных, приведенных в таблице 3.4, выполнена проверка наличия взаимосвязи между энерготехнологическими показателями для сменных бригад проходческих участков шахты «Северная».

Коэффициенты корреляции энерготехнологических параметров для исследуемых функций приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7– Коэффициенты корреляции энерготехнологических параметров

Участок	Функция	Коэффициент корреляции R	Участок	Функция	Коэффициент корреляции R
№ 6	$W = f(Q)$	0,002	№ 8	$W = f(Q)$	0,072
	$\omega = f(Q)$	–0,88		$\omega = f(Q)$	–0,74
№ 1	$W = f(Q)$	0,008	№ 9	$W = f(Q)$	0,008
	$\omega = f(Q)$	–0,92		$\omega = f(Q)$	–0,75

Анализ коэффициентов корреляции энерготехнологических параметров показал следующее.

1. Между полным расходом электроэнергии и протяженностью проходки взаимосвязь отсутствует $R_{wQ} = 0,002 - 0,008$. Это подтверждается тем, что проходческие участки тратят практически одинаковое количество электроэнергии на 1 п. м. Зависимость может быть представлена корреляционным эллипсом рассеяния относительно средних значений в диапазоне $\pm \sigma$.

2. Между удельным расходом электроэнергии и протяженностью проходки имеется устойчивая корреляционная связь $R_{\omega Q} \geq -0,74$. Зависимость может быть представлена уравнением регрессии параболической, экспоненциальной или полиномиальной формы.

Регрессионные зависимости сменного удельного расхода электроэнергии от погонных метров проходки горных выработок по каждому участку приведены соответственно в таблице 3.8. Анализ совмещенных графиков зависимостей $\omega = f(Q)$ показал, что характер изменения удельного расхода электроэнергии в зависимости от производительности погонным метрам горной выработки в целом для смен на рамках каждого конкретного участка практически совпадает. Характерные графики приведены на рисунках 3.4 – 3.7.

Анализ регрессионных зависимостей удельного расхода электроэнергии от производительности по сменам и отдельным участкам за весь период наблюдения показал следующее.

1. По всем участкам (за исключением участка № 8) показатели удельного расхода ω (кВт·ч/п.м.) фактически мало отличаются от смены к смене. Вместе с тем анализ совмещенных уравнений регрессии позволяет установить эффективность работы каждой смены относительно друг друга.

Расхождение в показателях объясняется организационными вопросами, связанными с отклонениями от режимов технологического процесса и, в определенной степени, также зависит от уровня квалификации состава бригады.

Таблица 3.8 – Зависимости удельного расхода электроэнергии от погонных метров проходки горных выработок

Участок	Смена	Уравнение регрессии	R
№ 6	1	$\omega = 1,01 + 46,5/Q$	– 0,8
	2	$\omega = 2,16 + 46,4/Q$	– 0,87
	3	$\omega = -0,33 + 48,44/Q$	– 0,86
	4	$\omega = -0,04 + 48,44/Q$	– 0,89
№ 1	1	$\omega = 0,95 + 104/Q$	– 0,87
	2	$\omega = 0,85 + 106,7/Q$	– 0,91
	3	$\omega = -2,37 + 115,1/Q$	– 0,92
	4	$\omega = 1,73 + 104,4/Q$	– 0,92
№ 8	1	$\omega = -16,7 + 273,9/Q$	– 0,84
	2	$\omega = -19,6 + 283,1/Q$	– 0,8
	3	$\omega = -4,51 + 214,1/Q$	– 0,76
	4	$\omega = 7,49 + 180,7/Q$	– 0,72
№ 9	1	$\omega = -3,23 + 450,9/Q$	– 0,75
	2	$\omega = -5,64 + 458,4/Q$	– 0,81
	3	$\omega = -4,34 + 441,9/Q$	– 0,71
	4	$\omega = -0,81 + 428,9/Q$	– 0,76

2. Существенные расхождения в показателях участка № 8 свидетельствуют о значительных отклонениях от заданных параметров технологического процесса между сменами. При этом 3-я и 4-я смены имеют лучшие показатели по энергоэффективности по сравнению с 1-ой и 2-ой сменами фактически на всем диапазоне изменения параметров проходки горной выработки.

3. Реализация контроля показателей энергоэффективности позволяет на уровне сменных бригад четко фиксировать соблюдение регламента ведения горнопроходческих работ и режимов работы технологического комплекса,

своевременно устанавливать причины их нарушения и принимать соответствующие мероприятия по их восстановлению.

Для регрессионного анализа показателей суточного потребления электроэнергии по участкам дополнительно используем данные за 1-й квартал периода наблюдения, приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Статистические показатели суточного электропотребления и производительности участков за 1-ый квартал

участок	показатель	M	D	σ
№ 1	Q , п.м.	8,09	1,107	1,052
	W , кВт·ч	438,3	420,4	20,5
	ω , кВт·ч/п.м.	55,12	65,58	8,098
№ 6	Q , п.м.	4,76	0,48	0,69
	W , кВт·ч	277,1	1113,3	33,4
	ω , кВт·ч/п.м.	58,2	124,76	11,17
№ 8	Q , п.м.	14,28	2,845	1,69
	W , кВт·ч	831,1	10019,4	100,1
	ω , кВт·ч/п.м.	59,2	124,76	11,17
№ 9	Q , п.м.	30,507	15,8	3,975
	W , кВт·ч	1683,3	23092	151,96
	ω , кВт·ч/п.м.	50,95	58,55	7,65

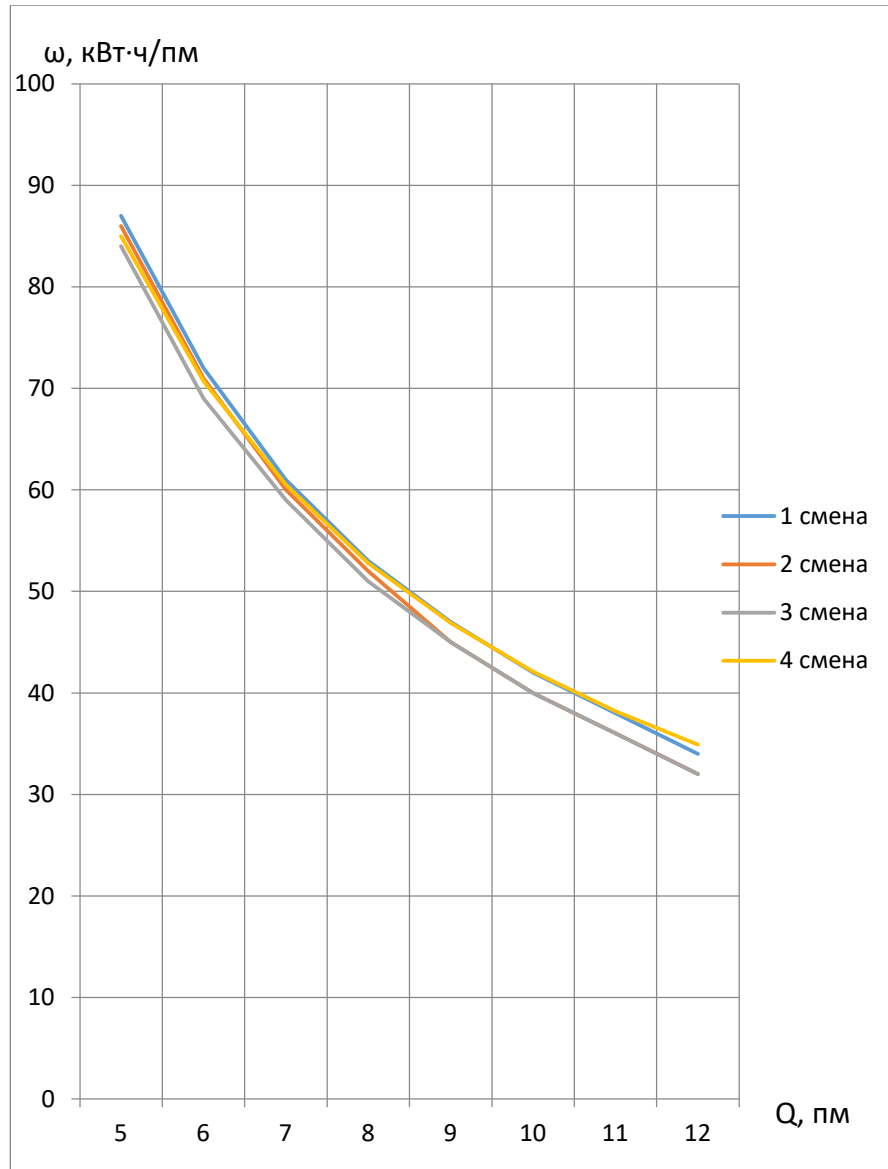


Рисунок 3.4 – Зависимости $\omega = f(Q)$. Участок № 9

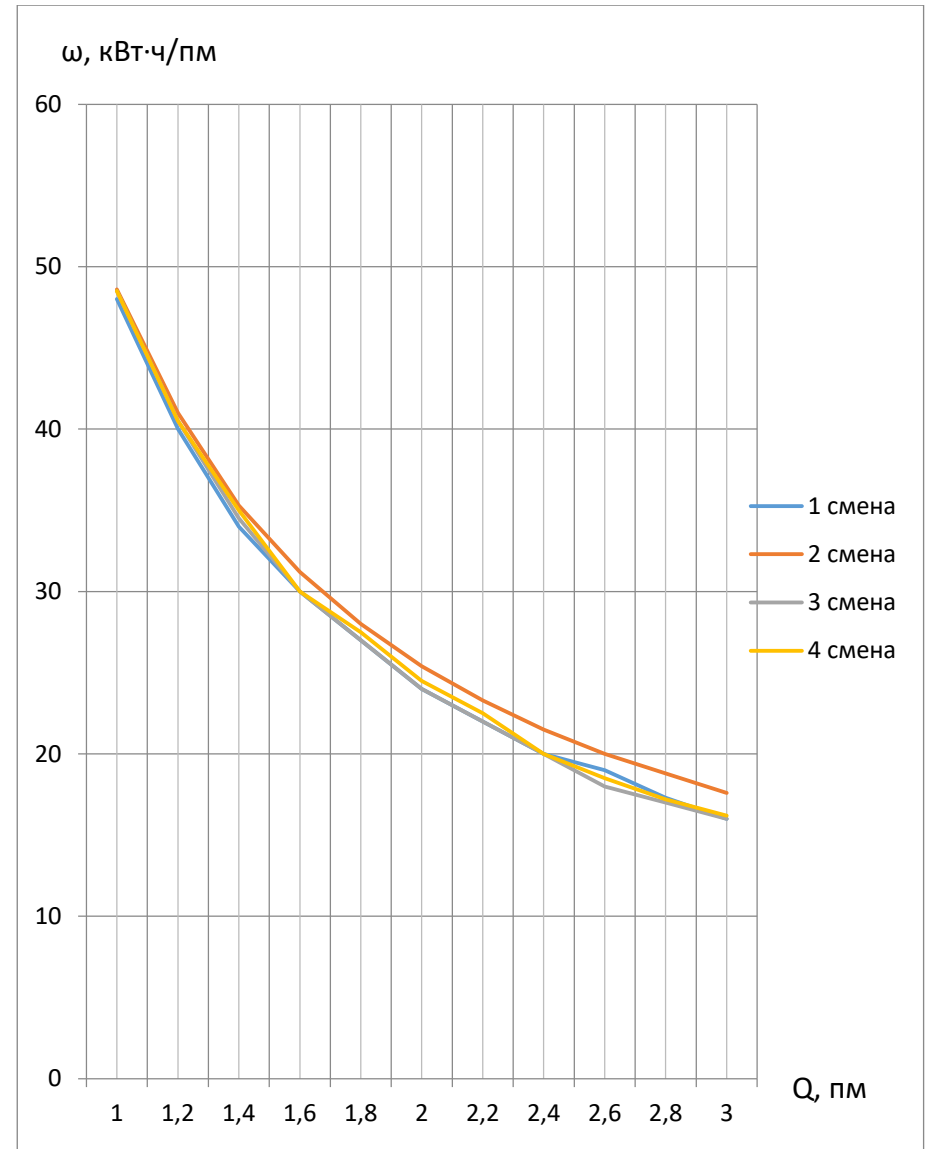
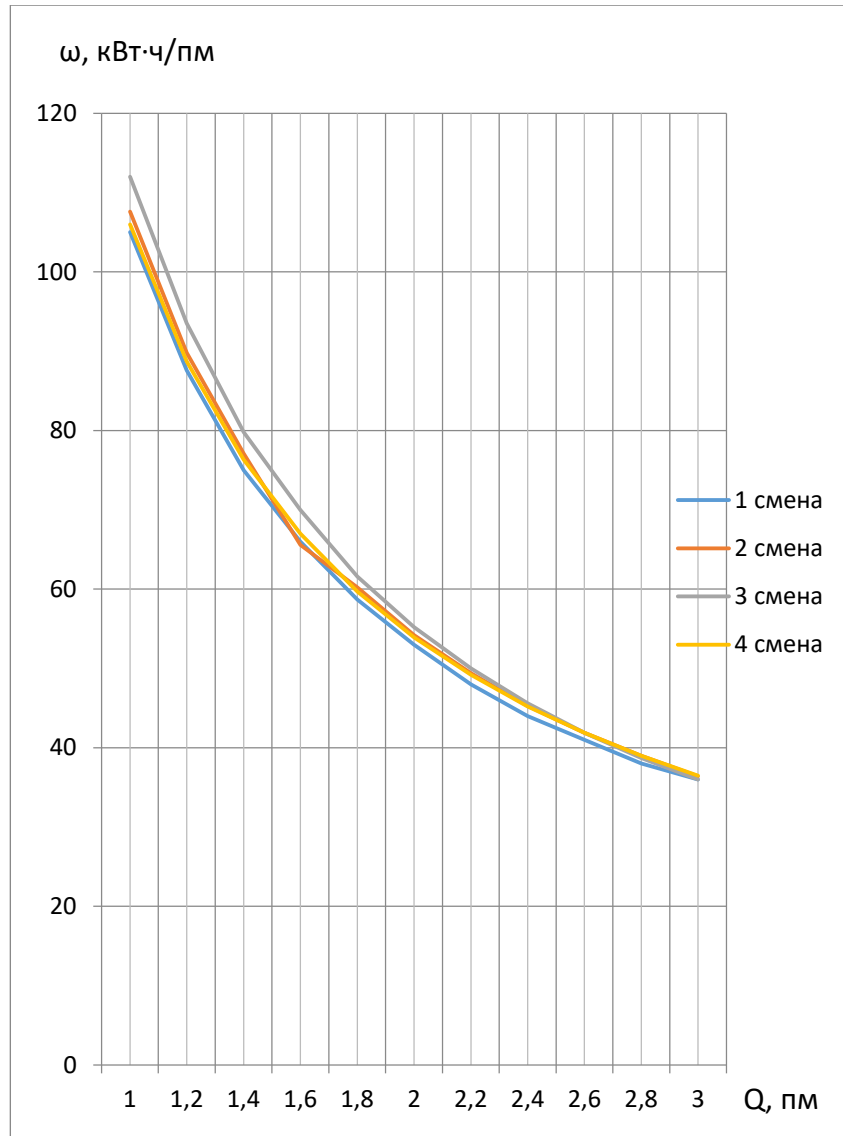
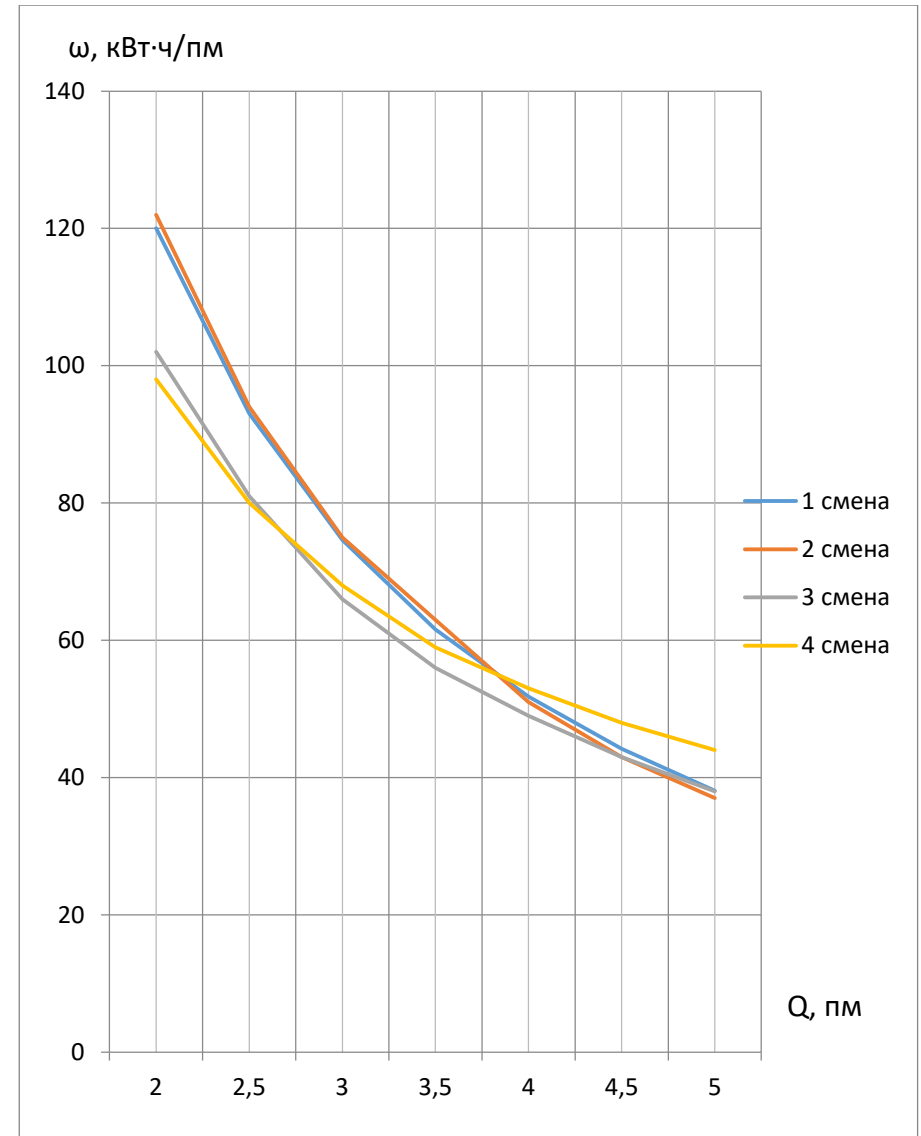


Рисунок 3.5 – Зависимости $\omega = f(Q)$. Участок № 6

Рисунок 3.6 – Зависимости $\omega = f(Q)$. Участок № 1Рисунок 3.7 – Зависимости $\omega = f(Q)$. Участок № 8

Коэффициенты корреляции для функций $W = f(Q)$, $\omega = f(Q)$ приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Коэффициенты корреляции

Участок	Функция	Коэффициент корреляции R	Участок	Функция	Коэффициент корреляции R
№ 6	$W = f(Q)$	0,29	№ 8	$W = f(Q)$	-0,15
	$\omega = f(Q)$	-0,86		$\omega = f(Q)$	-0,76
№ 1	$W = f(Q)$	-0,03	№ 9	$W = f(Q)$	0,05
	$\omega = f(Q)$	-0,93		$\omega = f(Q)$	-0,79

Анализ коэффициентов корреляции показал, что между удельными показателями расхода электроэнергии и производительностью участка по пройденным погонным метрам горной выработки существует устойчивая обратная корреляционная связь ($R = -0,69 \div -0,789$). Между расходом электроэнергии и производительностью по погонным метрам – отсутствует ($R \approx 0$).

Таким образом, уравнения регрессионных зависимостей $W = f(Q)$ могут быть представлены корреляционными эллипсами, а зависимости $\omega = f(Q)$ – гиперболическими или полиномиальными функциями.

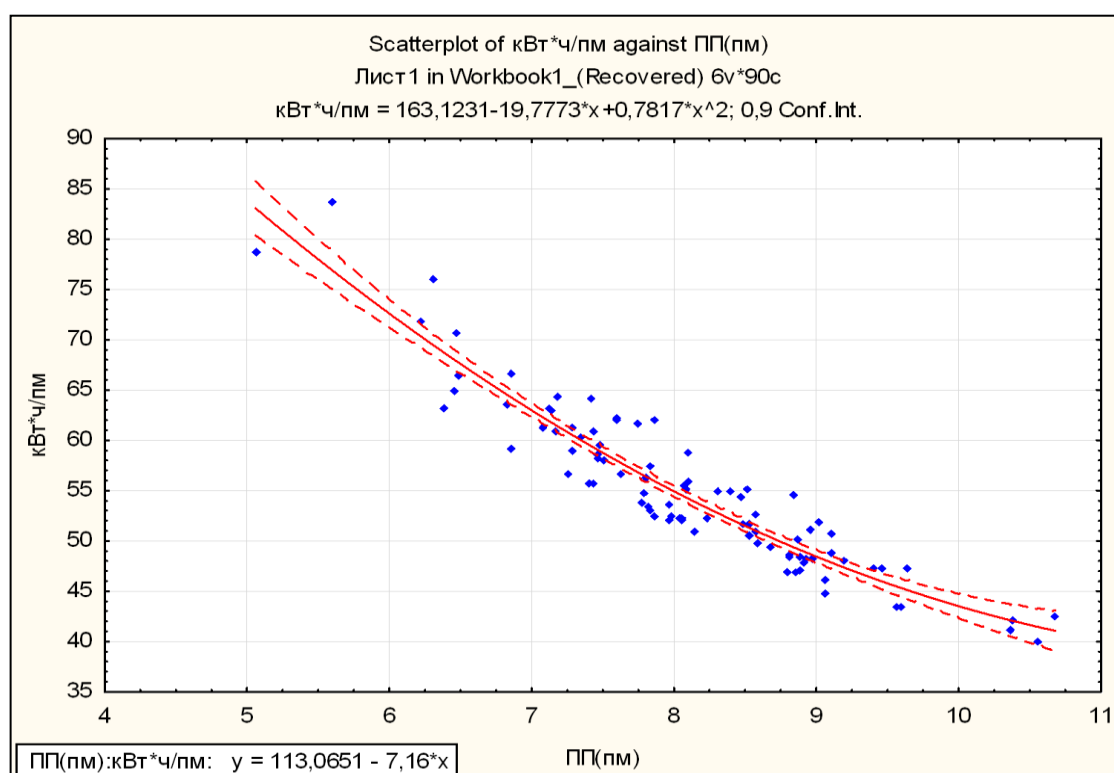
Уравнения регрессии приведены в таблице 3.11.

Q , п.м.	4,76	0,48	0,69
W , кВт·ч	277,1	1113,3	33,4
ω , кВт·ч/п.м.	58,2	124,76	11,17

Энерготехнологические характеристики приведены на рисунках 3.8 и 3.9.

Таблица 3.11 – Уравнения регрессии

Участок	Математическая модель	R^2
№ 1	$W(Q) = 438,3 \pm 19,5 \cdot \sqrt{1,107 - (Q_i - 8,09)^2}$	–
	$\omega(Q) = 163,12 - 19,78 \cdot Q + 0,78 \cdot Q^2$	0,87
№ 6	$W(Q) = 277,1 \pm 48,4 \cdot \sqrt{0,46 - (Q_i - 4,76)^2}$	–
	$\omega(Q) = 123,2 - 9,83 \cdot Q + 0,24 \cdot Q^2$	0,81
№ 8	$W(Q) = 831,1 \pm 59,2 \cdot \sqrt{2,485 - (Q_i - 14,28)^2}$	–
	$\omega(Q) = 233,17 - 19,66 \cdot Q + 0,51 \cdot Q^2$	0,83
№ 9	$W(Q) = 1683,3 \pm 38,22 \cdot \sqrt{15,8 - (Q_i - 30,51)^2}$	–
	$\omega(Q) = 183,18 - 6,46 \cdot Q + 0,074 \cdot Q^2$	0,77

Рисунок 3.8 – Энерготехнологическая характеристика $\omega = f(Q)$

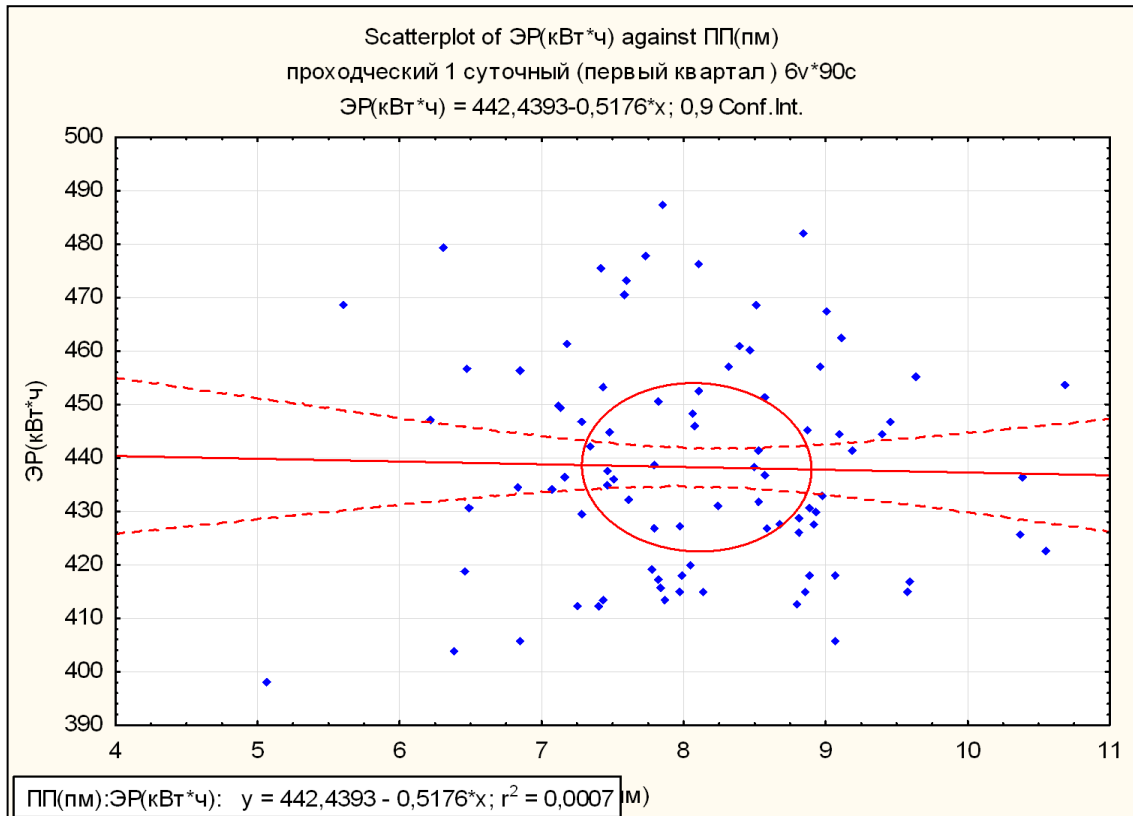


Рисунок 3.9 - Энерготехнологическая характеристика $W = f(Q)$

3.4. Разработка прогнозных моделей электропотребления для обеспечения управления энергоэффективностью горнопроходческих работ

Для анализа динамики электропотребления построены временные диаграммы зависимостей полного и удельного расхода электроэнергии, а также производительности проходческих участков.

Основными задачами динамического анализа являются:

- исследование характера и особенностей изменения энерготехнологических показателей во времени;
- установление параметров динамических рядов;
- сравнительная оценка динамических рядов и установление взаимосвязи между ними;
- оценка возможности разработки прогнозных моделей.

Анализ динамических рядов выполнен для трех вариантов.

1. Анализ сменного электропотребления проходческих участков

В качестве примера рассмотрен участок № 10.

На рисунках 3.10 – 3.13 приведены графики по каждой смене проходческого участка № 10 за период с 1.03 по 14.03. (одна неделя).

Анализ графиков показал, что для выбранных потоков W , ω , Q имеется явно выраженная динамика по амплитуде в заданных границах диапазона изменения абсолютных величин.

Периодичность изменения параметров носит циклический, но не гармонический характер. Этот факт обусловлен тем, что на изменение показателей оказывает влияние большое количество факторов (геологических, технологических и организационных), степень влияния которых определить в полном объеме не представляется возможным, поэтому флуктуацию относительно основного тренда представить в виде спектральной функции Фурье не представляется возможным.

Отсутствие гармонической составляющей позволяет в динамической модели использовать только общий тренд и аддитивную помеху, например

$$W(t) = T(t) + A(t) = \bar{W} + A(W), \quad (3.3)$$

где \bar{W} – среднесменное потребление электроэнергии на участке;

$A(W)$ – аддитивная функция, определяющая вероятность ухода параметра W из диапазона $\pm \sigma_W$.

Анализ графиков (рисунков 3.10 – 3.13) позволил сделать вывод о том, что динамическая модель может быть представлена аналогичным образом и для функций $\omega(t)$, $Q(t)$.

Взаимный анализ динамических рядов показал следующее.

Наибольший сменный расход электроэнергии соответствует наименьшему количеству пройденных погонных метров выработки, наибольшему удельному расходу электроэнергии и наибольшему объему извлекаемой горной массы.

Увеличение скорости проходки от смены к смене приводит к тому, что с периодичностью 3 – 7 смен происходит резкое снижение темпа, вплоть до

полной остановки. За тем в течение 1 – 5 смен интенсивность проходки снова возрастает.

Чем резче идет увеличение скорости проходки, тем меньше интервалы между фактическими простоями. Особенно это характерно для смен, которые увеличивают скорость проходки более чем в полтора раза. Это, как правило, ведет к тому, что в последующие смены происходит резкое падение темпа проходки и возрастают показатели электропотребления и объема извлекаемой из выработки горной массы.

Об эффективности проходки горной выработки можно судить по характеру изменения удельного расхода электроэнергии, который является взаимно определяющим между технологическим расходом электроэнергии и производительностью участка. Изменение этого показателя имеет более выраженный разброс, как по амплитуде, так и по частоте.

Анализ динамики удельного расхода электроэнергии показывает, что его постепенное снижение от смены к смене, соответствующее увеличению скорости проходки до определенного предела приводит в последующем к ее резкому снижению, а потребление электроэнергии возрастает. Этот факт свидетельствует о том, что участок практически останавливается.

На возвращение к нормальному режиму требуется по 2 до 5 последующих смен. Таким образом, обеспечение энергоэффективности проходческих работ заключается в соблюдении технологических параметров процесса проходки в заданном устойчивом диапазоне работы.

Рисунок 3.10 – Сменная динамика электропотребления $W(t)$, кВт·ч

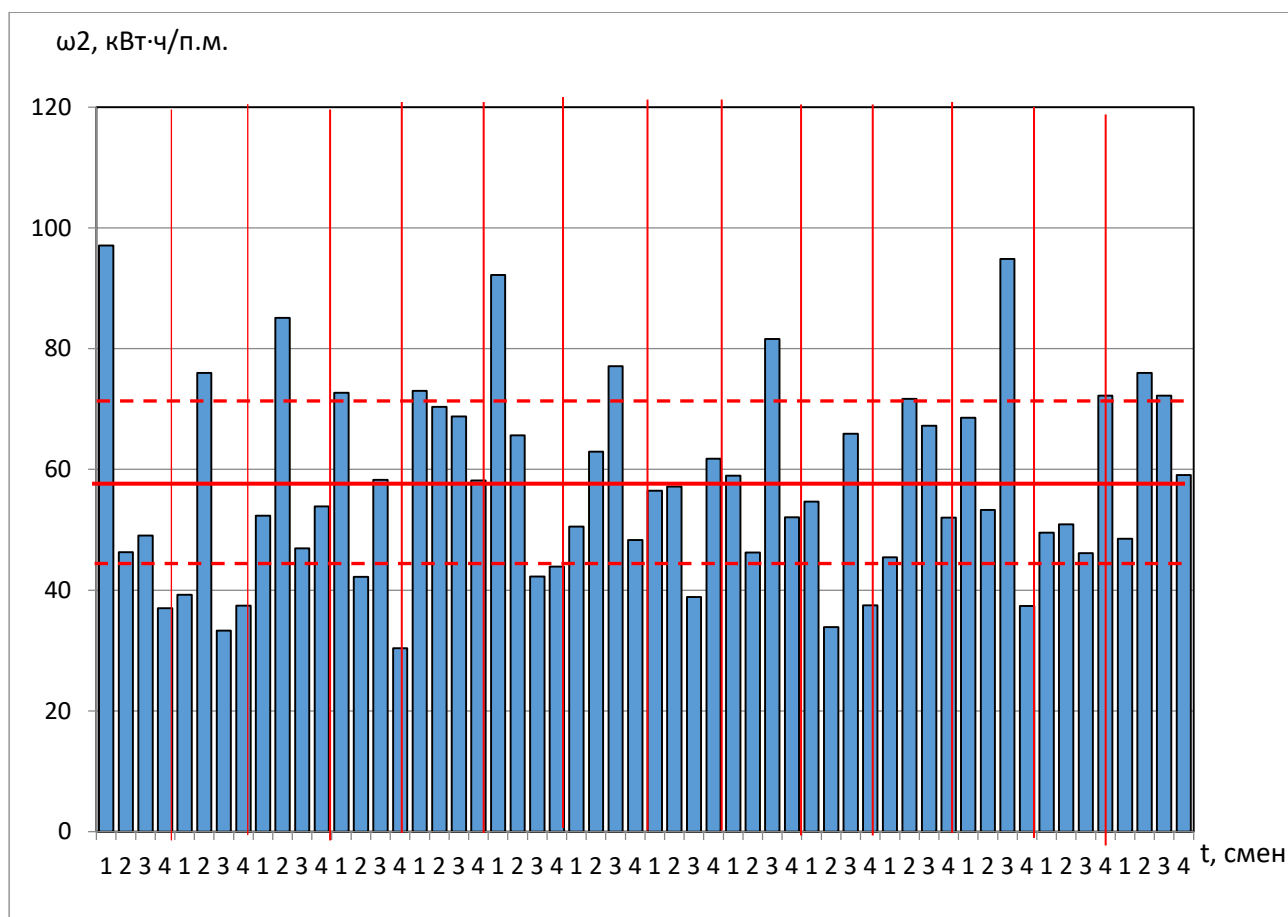


Рисунок 3.12 – Сменная динамика изменения удельного расхода ω , кВт·ч/п.м.

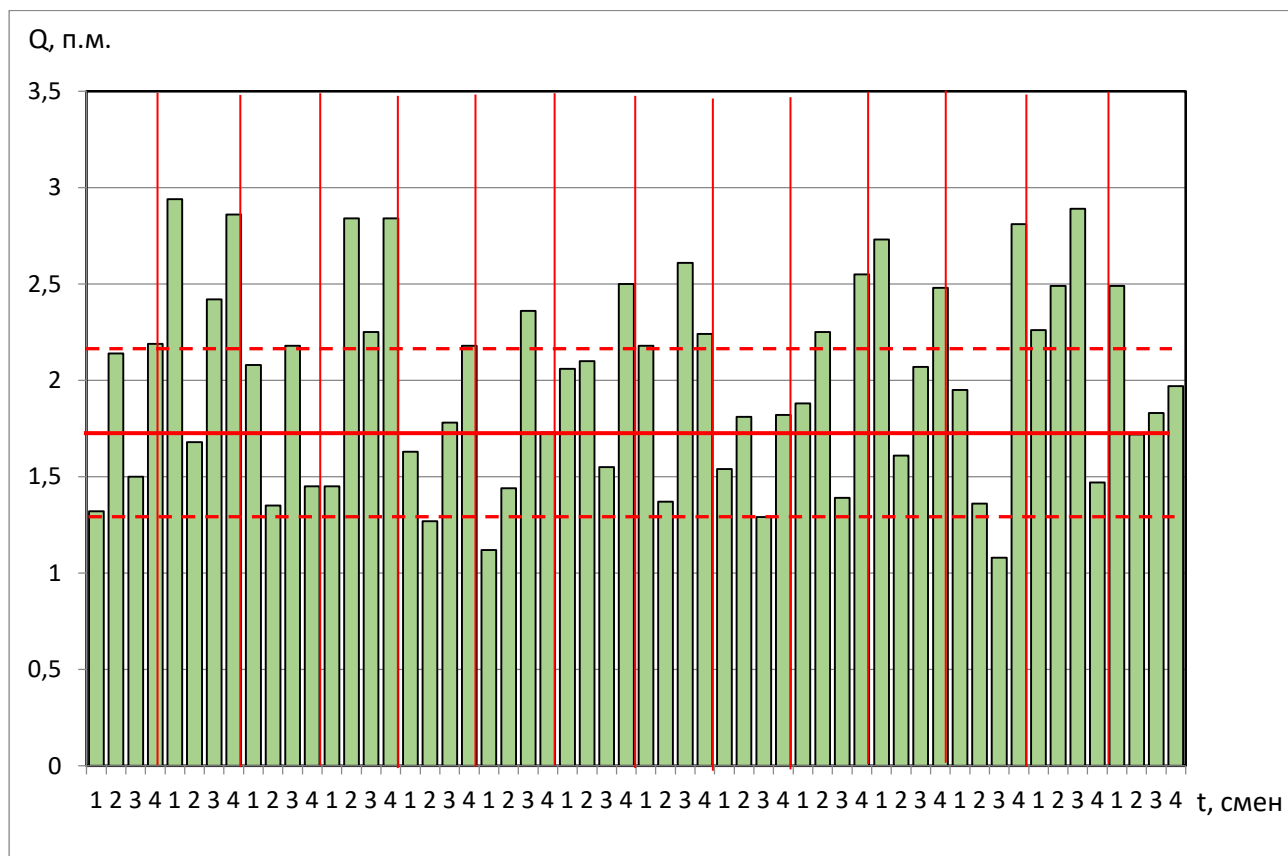


Рисунок 3.13 – Сменная динамика изменения производительности Q , п.м.

2. Анализ суточного электропотребления проходческих участков

В качестве примера рассмотрен участок № 1.

На рисунках 3.14 – 3.16 приведены суточные графики проходческого участка № 1 за период с 1.04 по 30.07. (2-й квартал).

Анализ графиков показал, что для потока W имеется менее выраженная динамика по амплитуде в заданных границах диапазона изменения абсолютных величин. Большая степень сглаженности, по сравнению с междусменным электропотреблением объясняется тем, что смены взаимно компенсируют темпы проходки, поэтому суточное потребление усредняется.

Цикличность изменения W можно отследить за интервал не менее одного месяца. При этом сравнительный анализ показал, что динамическая функция на таком интервале имеет гармонический характер на заданном интервале, но не имеет периодического, повторяющегося из месяца в месяц процесса.

Флуктуация относительно среднего значения обусловлена теми же причинами, что и при сменной нагрузке и может в первом приближении быть представлена в виде характерной для данных условий финитной функции $N(W)$, в качестве которой предлагается использовать кубический сплайн.

Для обеспечения эффективности динамической модели выполняется оптимизация такой функции по результатам всего периода наблюдений. Функция аддитивных помех $A(W)$ определяет вероятность выхода абсолютных значений за область допустимого отклонения.

Математическая модель в общем виде определится по формуле

$$W(t) = T(t) + N(t) + A(t) = \bar{W} + N(W) + A(W), \quad (3.4)$$

где \bar{W} – среднесменное потребление электроэнергии на участке;

$N(W)$ – финитная сплайн-функция;

$A(W)$ – аддитивная функция, определяющая вероятность ухода параметра W из диапазона $\pm \sigma_W$.

Потоки ω и Q имеют явно выраженную динамику по амплитуде и частоте в заданных границах диапазона изменения абсолютных величин. При этом

следует отметить, что частота периодических колебаний и амплитудных аномалий значительно меньше, чем при ежесменной фиксации указанных параметров.

Периодичность изменения параметров носит циклический, но не гармонический характер. Этот факт также обусловлен тем, что на изменение показателей оказывает влияние большое количество факторов (геологических, технологических и организационных), степень влияния которых определить в полном объеме не представляется возможным, поэтому флуктуацию относительно основного тренда представить в виде спектральной функции Фурье или финитной сплайн-функцией также не представляется возможным.

Отсутствие гармонической составляющей позволяет в динамической модели использовать только общий тренд и аддитивную помеху, например

$$\omega(t) = T(t) + A(t) = \bar{\omega} + A(\omega), \quad (3.5)$$

где $\bar{\omega}$ – среднее значения удельного расхода электроэнергии в месяц

$A(\omega)$ – аддитивная функция, определяющая вероятность ухода параметра W из диапазона $\pm \sigma_{\omega}$.

Анализ графиков (рисунки 3.14 – 3.16) позволил сделать вывод о том, что динамическая модель может быть представлена аналогичным образом и для функции $Q(t)$.

Взаимный анализ динамических рядов показал следующее.

Динамика суточного энергопотребления и производительности участка отличается от сменной меньшей частотой флуктуации, чем ежесменное энергопотребление, за счет компенсации совокупных суточных показателей.

При последовательном увеличении скорости проходки удельный расход электроэнергии плавно уменьшается, при этом суточное потребление находится в пределах диапазона допустимых значений.

В случае увеличения скорости проходки более чем в полтора раза (свыше 8 п.м./сутки), происходит резкое снижение темпа проходки, на восстановление которого уходит 1 – 3 дня.

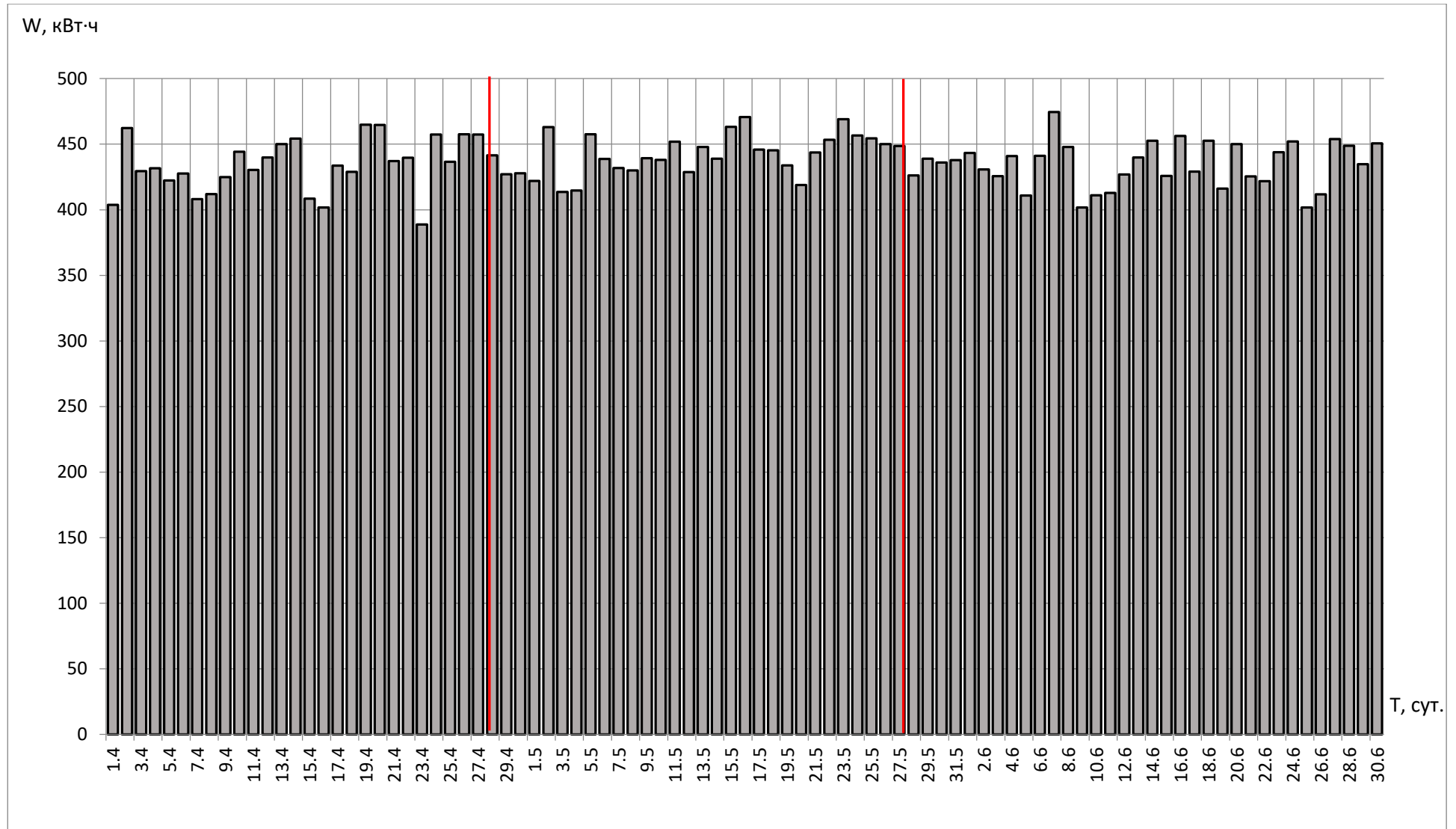


Рисунок 3.14 – Диаграмма электропотребления участка № 1

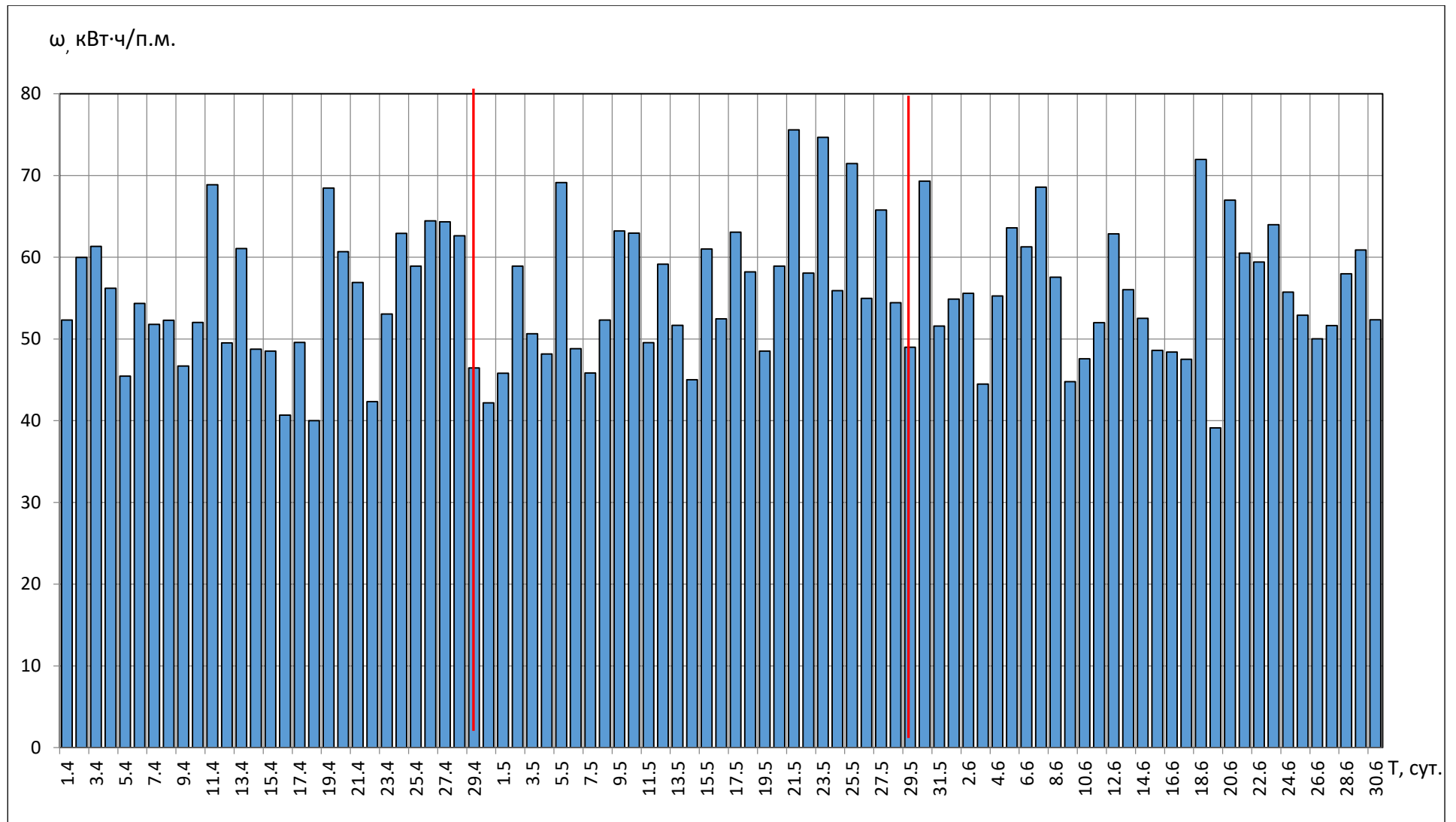


Рисунок 3.15 – Диаграмма удельного расхода электроэнергии на проходческом участке № 1

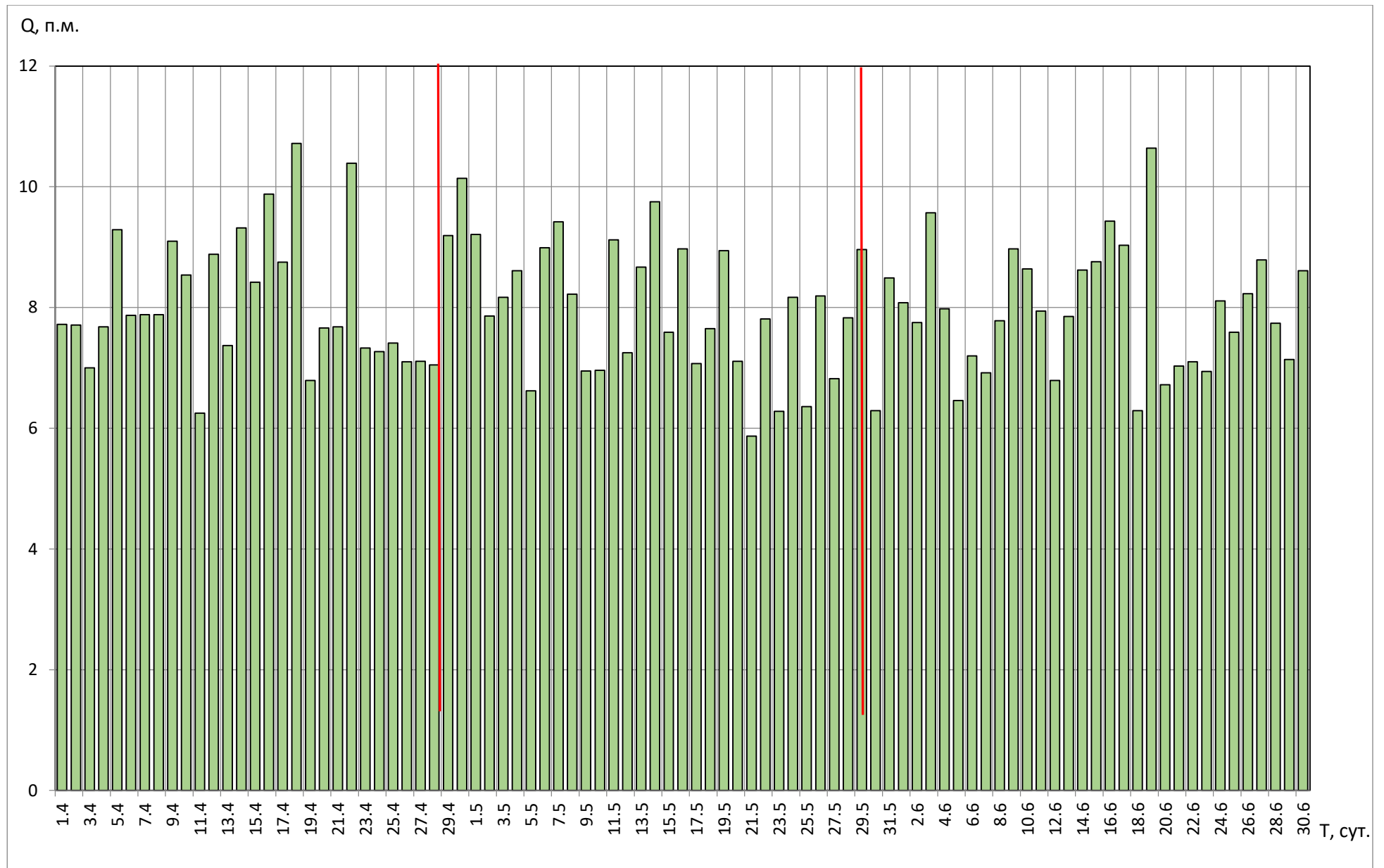


Рисунок 3.16 – Диаграмма производительности проходческого участка № 1

Таким образом, устойчивая работа проходческого участка может быть обеспечена за счет соблюдения технологических параметров проходки всеми сменами.

Общий тренд электропотребления для отдельных месяцев не является постоянным, поэтому для обеспечения достаточного уровня энергоэффективности необходима постоянная корректировка фактических показателей с плановыми

Анализ динамики энергетических потоков показал, что существуют устойчивые уровни технологического и удельного расхода электроэнергии. Отклонения от них в диапазоне, превышающем значения $\pm \Delta \varepsilon$, приводят к перерасходу электроэнергии или к повышению вероятности остановки ПМК для внепланового технического обслуживания или ремонта.

На рисунке 3.17 в качестве примера приведена динамика изменения суточного удельного расхода электроэнергии по проходческому участку № 8. Общий тренд за квартал описывается линейной зависимостью $\omega = 61,7 - 0,046 \cdot t$.

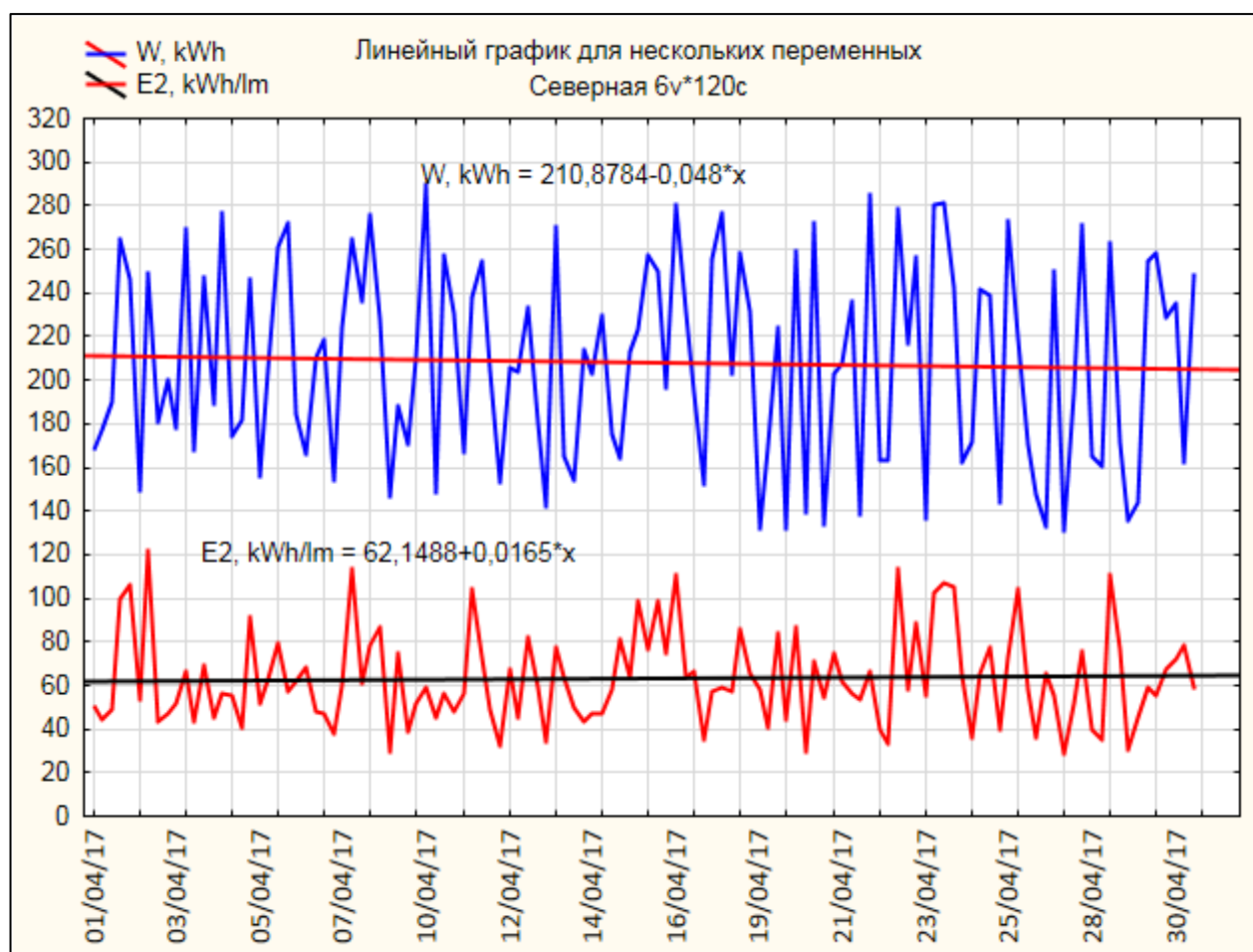


Рисунок 3.17 – Динамика удельного расхода электроэнергии

Анализ показывает, что диапазон изменения $\omega(t)$ свидетельствует о значительных отклонениях от общего тренда и превышает рекомендуемые пределы, соответствующие устойчивой работе проходческого комплекса (ПК).

На рисунке 3.18 представлена прогнозная модель электропотребления, состоящая из временного тренда с учетом аддитивной помехи, представляющей собой отклонение в пределах $\pm \Delta\varepsilon$. Прогнозная модель, исходя из квартального графика, рассчитана на 10 дней с лагом 5 по фиксированным показателям. Таким образом, можно однозначно планировать режим устойчивой работы ПК с учетом возможных отклонений в установленных пределах.

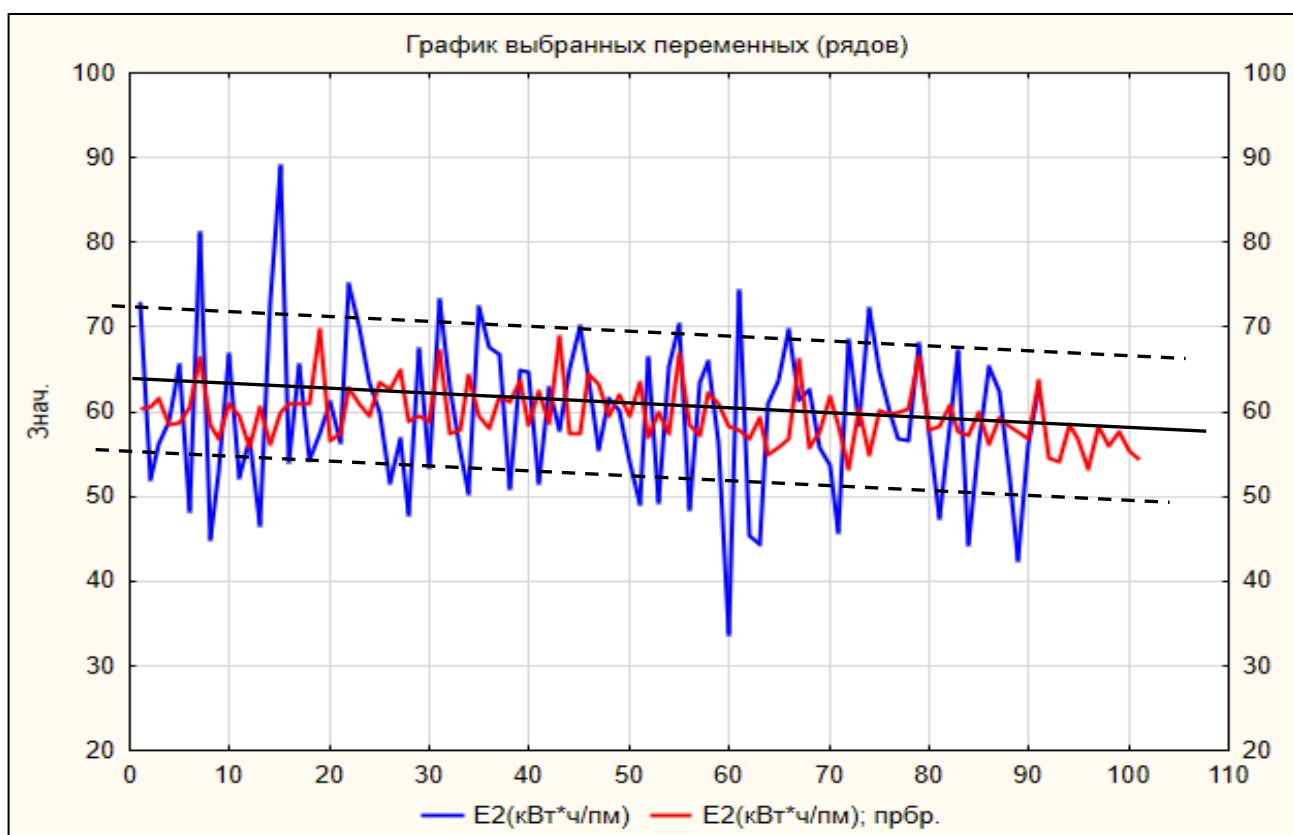


Рисунок 3.18 – Прогнозная модель $\omega = f(t)$

Прогнозная модель удельного расхода электроэнергии будет иметь вид

$$\omega = 61,7 - 0,046 \cdot t \pm \Delta\varepsilon, \quad (3.6)$$

где $\Delta\varepsilon = 8,6$ – аддитивная составляющая.

Анализ показал, что удельный расход электроэнергии имеет общую тенденцию к снижению. При этом прогнозные значения не выходят из зоны,

ограниченной рекомендуемыми пределами, соответствующими стандартному отклонению.

На рисунке 3.19 приведена автокорреляционная функция $\omega = f(t)$ и стандартные ошибки – оценки белого шума.

Анализ показывает, что на прогножном лаге 15 коэффициент автокорреляции изменяется от $-0,131$ до $+0,123$, стандартная ошибка не превышает $0,1031$, статистика (критерий) Бокса-Льюинга изменяется от $1,62$ до $10,3$. При этом автокорреляционная функция четко вписывается в границы доверительного интервала.

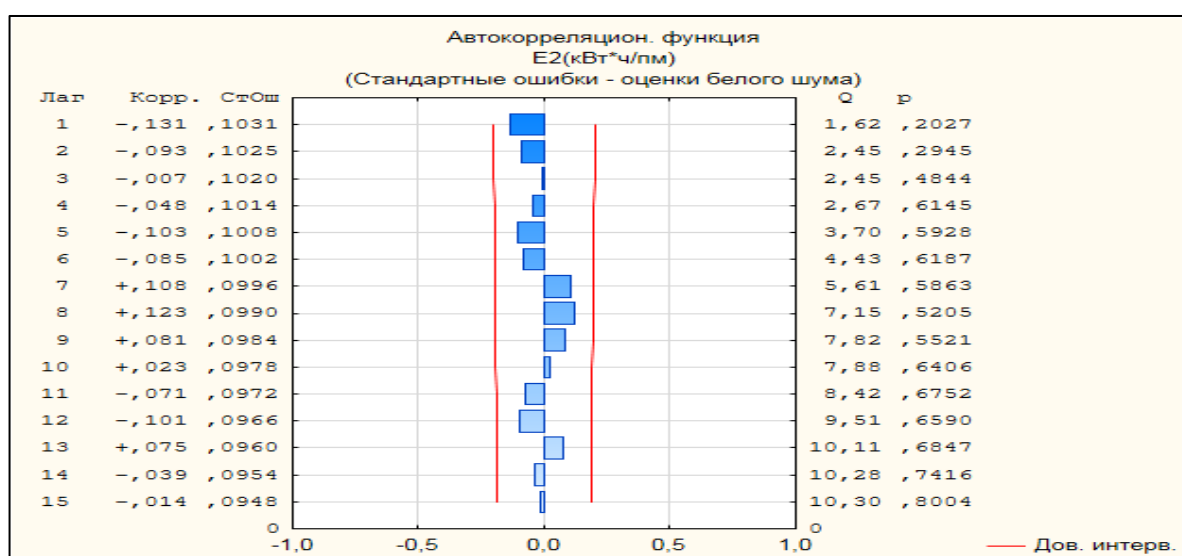


Рисунок 3.19 – Автокорреляционная функция $\omega = f(t)$ и стандартные ошибки

Приведенные в таблице 3.12 оценочные показатели результатов экспоненциального сглаживания показывают, что прогнозная модель удовлетворяет требованиям точности, т.к. $|\Delta\epsilon| = 3,058\% < 10\%$.

Таблица 3.12 – Показатели ошибки экспоненциального сглаживания

Итоговые ошибки тренда	Значение
Средняя ошибка	–0,336
Средняя абсолютная ошибка	7,905
Суммы квадратов	8286,92
Ср. квадрат	91,065
Средняя относительная ошибка	–3,058

3.5 Выводы

В результате статистических исследований энерготехнологических показателей получены следующие результаты и выводы.

1. Энерготехнологические показатели W , ω , Q имеют достаточно широкий диапазон изменения. Определены их устойчивые уровни и допустимые диапазоны изменения, с точки зрения обеспечения энергоэффективности ведения ГПР.

2. Электропотребление проходческих участков подчиняется равномерному закону распределения. Удельный расход электроэнергии в зависимости от пройденных погонных метров горной выработки подчиняется логнормальному закону распределения.

Данные факты позволяют рекомендовать использование соответствующих средних и медианных значений в качестве ориентиров для обоснования плановых показателей работы участков и смен.

3. Установлены возможные причины ухода абсолютных показателей энергопотребления за зону допустимых значений. К таким причинам можно отнести превышение скорости проходки выработки отдельными бригадами в течение смены, уход за габаритами сечения горной выработки, потери времени на ликвидацию аварий на технологическом оборудовании проходческих комплексов. Организационные причины, связанные с нарушением технологического процесса производства проходческих работ.

4. Разработана энерготехнологическая модель в виде корреляционного эллипса, позволяющая определить область допустимых значений, а также диапазонов устойчивого уровня электропотребления проходческих участков.

5. Анализ энерготехнологических характеристик показал, что показатели эффективности работы сменных бригад, за небольшим исключением совпадают друг с другом. Возможные отклонения могут быть объяснены различным уровнем квалификации пилота и членов его бригады, что в свою очередь приводит к отклонениям от заданного технологического процесса ГПР.

6. Анализ динамики энерготехнологических параметров позволил разработать временные модели, учитывающие общие тренды и аддитивные помехи, которые необходимо учитывать при определении абсолютных и относительных показателей энергоэффективности ведения ГПР. Полученные временные модели положены в основу прогнозных моделей энерготехнологических параметров, позволяющих обосновать нормативные показатели, а также реализовать систему управления энергоэффективностью горнопроходческих работ.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

4.1. Исходные положения

На угольных шахтах, составляющая расхода электроэнергии приходится на ведение горнопроходческих работ (ГПР), которые отличаются широким диапазоном применяемой техники и технологии прохождения горных выработок, в специфических условиях горного производства.

Одним из решений задачи повышения энергоэффективности ведения горнопроходческих работ в угольных шахтах является обеспечение устойчивой работы проходческих участков в соответствии с техническими условиями.

Управление электропотреблением ГПР может быть усовершенствовано за счет реализации мероприятий по повышению энергоэффективности, которые предложены в диссертационной работе.

Для технологических процессов, обеспечивающих ведение основных и вспомогательных операций при ведении ГПР, структура системы электроснабжения проходческих участков не позволяет реализовать принцип детерминации электрической нагрузки, так как ограничена возможность контроля электропотребления отдельными энергоемкими электроустановками, характерны неравномерность и неопределенность режима электропотребления, а также значительное влияние технологических факторов на эффективность ведения горных работ.

В связи с этим при оценке эффективности электропотребления возможно только выполнение ограниченных операций, направленных на управление энергоэффективностью ГПР.

Проведенные в диссертационной работе научные исследования позволили определить приоритетные действия, направленные на повышение энергоэффективности.

Прежде всего, это совершенствование системы контроля процесса электропотребления и производственных показателей с дифференциацией на сменные бригады, а также сменные, суточные, квартальные и итоговые по проходческим участкам. Для этого необходимо использовать современные средства технического контроля и соответствующее программное обеспечение.

Важным этапом является анализ электропотребления за предыдущие этапы ведения ГПР с оценкой энергоэффективности различных типов горнопроходческих комплексов с конкретной привязкой к начальным техническим условиям и последующей возможной их корректировкой.

Повышение энергоэффективности ведения ГПР является комплексной задачей, в которой на информационно-аналитической базе возможна реализация принципа управления процессом электропотребления. Это может быть достигнуто за счет ограничения уровня и продолжительности повышенного расхода электроэнергии при резком снижении производительности проходческого участка, а также принятие своевременных мер от превышения допустимых темпов проходки, приводящих к увеличению износа технологического оборудования и росту вероятности развития аварийной ситуации или нарушению регламента ведения работ.

Актуальным представляется осуществление контроля за показателями электропотребления и производительностью конкретными сменными бригадами.

Это позволяет оценить плановые и фактические показатели энергоэффективности, выявить возможные резервы по повышению производительности, снижению неоправданных потерь времени, вопросы материального стимулирования бригад.

Изложенные выше положения реализованы в рекомендациях по повышению энергоэффективности ГПР угольных шахт, приведенных в данной главе.

4.2. Программный комплекс для анализа процесса электропотребления и оценки энергоэффективности горнопроходческих работ

Программный комплекс (Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020661811) предназначен для анализа энерготехнологических параметров и может применяться для оценки энергоэффективности ведения горнопроходческих работ на угольных шахтах [126].

Программный комплекс обеспечивает выполнение следующих функций:

- статистический анализ параметров электропотребления технологических процессов проходки горных выработок;
- расчет двухмерных (2М-) энерготехнологических моделей ГПР;
- расчет трехмерных (3М-) энерготехнологических моделей ГПР;
- численный спектральный анализ динамики энерготехнологических параметров.

В основу анализа энергоэффективности ведения ГПР на угольных шахтах положены основные методические принципы научных исследований и разработанная в данной диссертационной работе методика определения энерготехнологических показателей, математических и прогнозных моделей процесса электропотребления.

В соответствии с прикладной программой (см. Приложение Б, программа Б.1 «*STATIST*») определяются статистические характеристики параметров процесса электропотребления.

В соответствии с прикладной подпрограммой (см. Приложение Б, программа Б.2 «*CORRELL-1*») определяются двухмерные (2-М) энерготехнологические модели электропотребления при ведении ГПР на основе корреляционно-регрессионного метода.

В соответствии с прикладной программой расчета статистических показателей (см. Приложение Б, программа Б.3 «*CORRELL-2*») рассчитывается

трехмерная (3-М) энерготехнологическая модель $E = f(F_1, F_2)$, в которой изменение функции E определяется двумя независимыми аргументами F_1 и F_2 .

В соответствии с прикладной программой (см. Приложение Б, программа Б.4 «*DINAMIC*») выполняется анализ динамики процесса электропотребления ГПР угольных шахт.

В соответствии с прикладной программой (см. Приложение Б, программа Б.5 «*STAT-SPLINE*») выполняется разработка прогнозных моделей с использованием экстраполяции временных моделей электропотребления кубическими сплайнами.

Экстраполяция сплайн-функции осуществляется по формуле

$$W(t) = W_N - \left(\frac{(t_N - t_N)m_{N-1}}{6} + \frac{W_N - W_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \right) (t - t_N). \quad (4.1)$$

Применение сплайн-интерполяции позволяет разработать прогнозные модели процесса электропотребления энергопотребления при ведении ГПР угольных шахт [38].

Блок-схема алгоритмического обеспечения и программный комплекс его реализации для анализа энерготехнологических потоков при ведении горнопроходческих работ на угольных шахтах представлены на рисунке 4.1.

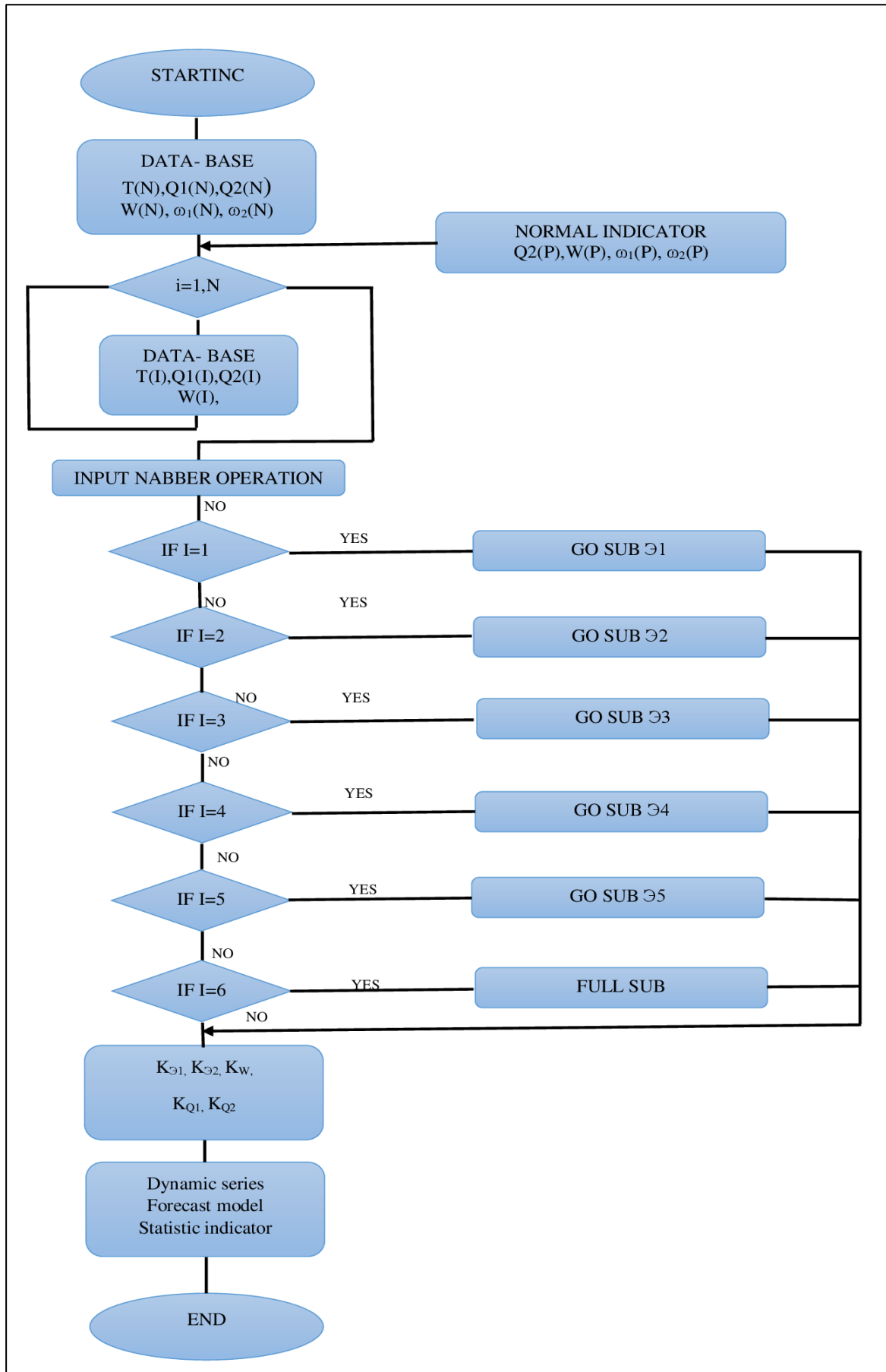


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма анализа энерготехнологических параметров

4.3. Программный комплекс эффективного управления электропотреблением горнопроходческих работ угольных шахт

Программный комплекс (Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020662067) предназначен для расчета и анализа энерготехнологических параметров, составления прогнозных моделей электропотребления и может применяться для оперативного управления энергоэффективностью ведения ГПП на угольных шахтах [127].

Программный комплекс обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Анализ энерготехнологических показателей процесса электропотребления при проходке горных выработок;
2. Моделирование энерготехнологических характеристик для горнопроходческого комплекса;
3. Прогнозное моделирование энергопотребления методом экспоненциального сглаживания с учетом основного тренда и аддитивных помех;
4. Идентификацию производственных показателей работы сменных бригад;
5. Формирование промежуточных и итогового отчета по эффективности энергопотребления проходческих участков.

Методическое обеспечение и алгоритм эффективного управления электропотреблением ГПП угольных шахт реализуется следующим образом.

1. Формируемая база данных включает в себя дату, номер смены, показатели сменной производительности проходческого участка, сменное потребление электроэнергии, а также индивидуальные коды бригад (*IDB*) и коды останова или простоя (*IDS*).
2. Коды *IDB* позволяют определить дату, номер смены, время работы и производительность конкретной бригады, а также сменный состав рабочих на участке.

3. Коды *IDS* позволяют определить характер причины и продолжительность остановки горнопроходческого технологического комплекса угольной шахты.

Сформированная в виде таблиц *Microsoft Excel* база данных на последующих этапах реализации алгоритма управления позволяет получить полную информацию для определения показателей эффективности ведения горнопроходческих работ и своевременного принятия решений (рисунок 4.2).

Реализация алгоритма управления осуществляется на основании разработанной методики оценки энергоэффективности ГПР в угольных шахтах с учетом технологических решений, горно-геологических условий и организационных факторов производства:

- определяются показатели электропотребления для участков за каждую смену, сутки, месяц, квартал и за полный период проходки;
- соответствие фактических и плановых показателей работы сменных бригад участков оценивается по коэффициенту энергетической эффективности, показателю оценки уровня энергопотребления и показателю эффективности прохождения горных выработок, а также устанавливаются причины отклонений;
- в соответствии производственным планом и техническими условиями ведения ГПР осуществляется корректировка режима работы проходческого комплекса и сменных бригад.

В основу методики оценки энергоэффективности ведения ГПР положен расчет энерготехнологических показателей, характеризующих процесс электропотребления и работу проходческих участков.

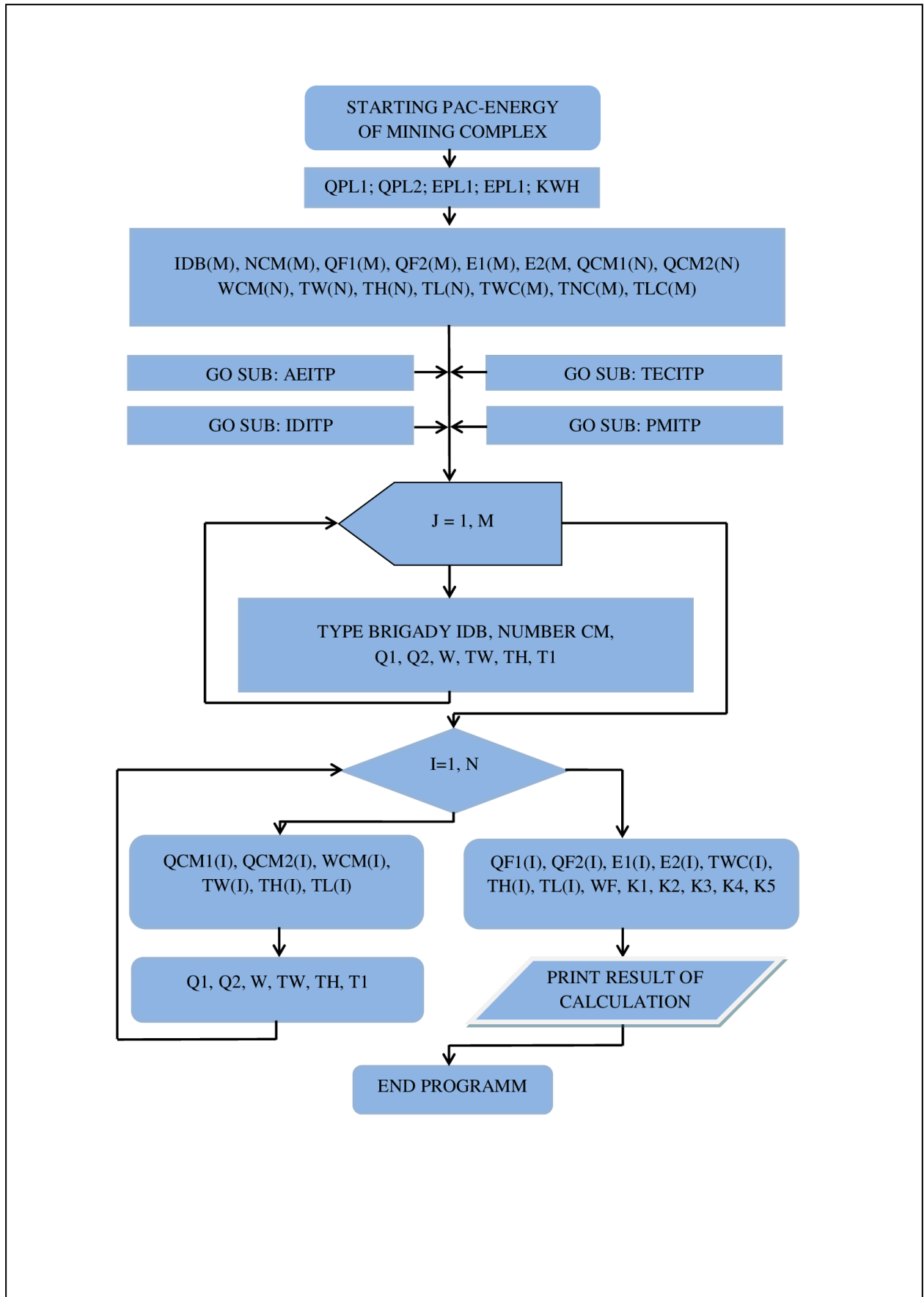


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма управления энергоэффективностью ГПП угольных шахт

В соответствии с методикой анализа процесса электропотребления, представленной во 2 главе диссертации и результатами анализа, выполненного в 3-й и 4-й главах, предлагается формирование системы базы данных структурная схема которой представлена на рисунке 4.3.

1. База данных по всем производственным участкам:

•Проходческий комплекс

<i>ID</i>	участок (ПК)	
комплекс (модель ПК)		
Мощность электродвигателей, $\Sigma P_{\text{дв}}$		[кВт]
Техническая производительность, $Q_{\text{т}}$		[м³/мин]
Одноосное усилие сжатия, $q_{\text{сж}}$		[МПа]

•Режим работы

<i>ID</i>	участок (ПК)	
продолжительность смены,		[час]
время основной работы ПК,		[мин]
время вспомогательных операций,		[мин]
ожидаемое время простоя,		[мин]

•Расчетные параметры

<i>ID</i>	участок (ПК)	№
сменная потребляемая мощность, $W_{\text{см}}$		[кВт·ч]
сменная эксплуатационная производительность по проходке горной выработке, $Q_{\text{см}}$		[п.м.]
удельный расход электроэнергии по проходке горной выработки, $\omega_{\text{см}}$		[кВт·ч/п.м.]

В результате расчетов формируется сводная таблица 4.1 энерготехнологических показателей проходческих участков.

Таблица 4.1 – Сводная таблица энерготехнологических показателей проходческих участков

Показатель	Размерность	Участок				
		ID 00-1	ID 00-2	ID 00-3	.....	ID 00-8
комплекс (модель ПК)		.....	.....	.....	.....	.....
сменная потребляемая мощность	кВт·ч	.....	.....	.....	.....	.....
сменная эксплуатационная производительность по горной массе	т	.....	.....	.....	.....	.....
сменная эксплуатационная производительность по проходке горной выработке	пм	.....	.....	.....	.....	.....
удельный расход электроэнергии по горной массе	кВт·ч/т	.....	.....	.....	.....	.....
удельный расход электроэнергии по проходке горной выработки	кВт·ч/пм	.....	.....	.....	.....	.....

По результатам учета энерготехнологических параметров формируется сводная таблица 4.2, в которой приводятся: текущая дата, номер смены, код бригады, производительность, полный и удельный расход электроэнергии.

Таблица 4.2 – Показатели работы сменных бригад

Дата	Смена	Код бригады	Q , п.м.	W , кВт·ч	ω , кВт·ч/п.м.
01.01.2017	1	<i>IDB3</i>	10,28	484,95	47,17
01.01.2017	2	<i>IDB2</i>	10,6	430,35	40,6
01.01.2017	3	<i>IDB1</i>	9,74	442,36	45,42
01.01.2017	4	<i>IDB5</i>	7,66	315,59	41,2
02.01.2017	1	<i>IDB6</i>	8,73	419,22	48,02
02.01.2017	2	<i>IDB3</i>	8,72	536,75	61,55
02.01.2017	3	<i>IDB2</i>	5,02	538,03	107,18

Аналогично по результатам учета энерготехнологических параметров на проходческом участке за сутки формируется сводная таблица 4.3.

Таблица 4.3. – Суточные показатели работы проходческого участка

Дата	Q , п.м.	W , кВт·ч	ω , кВт·ч/п.м.
01.01.2017	8,1	476,31	58,8
02.01.2017	8,14	414,92	50,97
03.01.2017	10,38	436,22	42,03
04.01.2017	9,4	444,47	47,28
05.01.2017	8,53	431,81	50,62
06.01.2017	6,85	456,3	66,61
07.01.2017	7,47	434,76	58,2
08.01.2017	8,93	429,96	48,15
09.01.2017	9,64	455,02	47,2
10.01.2017	6,22	447,02	71,87
11.01.2017	7,12	449,96	63,2
12.01.2017	7,08	434,16	61,32

На рисунке 4.3 приведена структурная схема сбора данных по электропотреблению и производительности сменных бригад по еженедельным и

суточным показателям, из которых формируется сводная таблица для проходческих участков. Каждому элементу (таблице) присваивается свой соответствующий идентификационный номер.

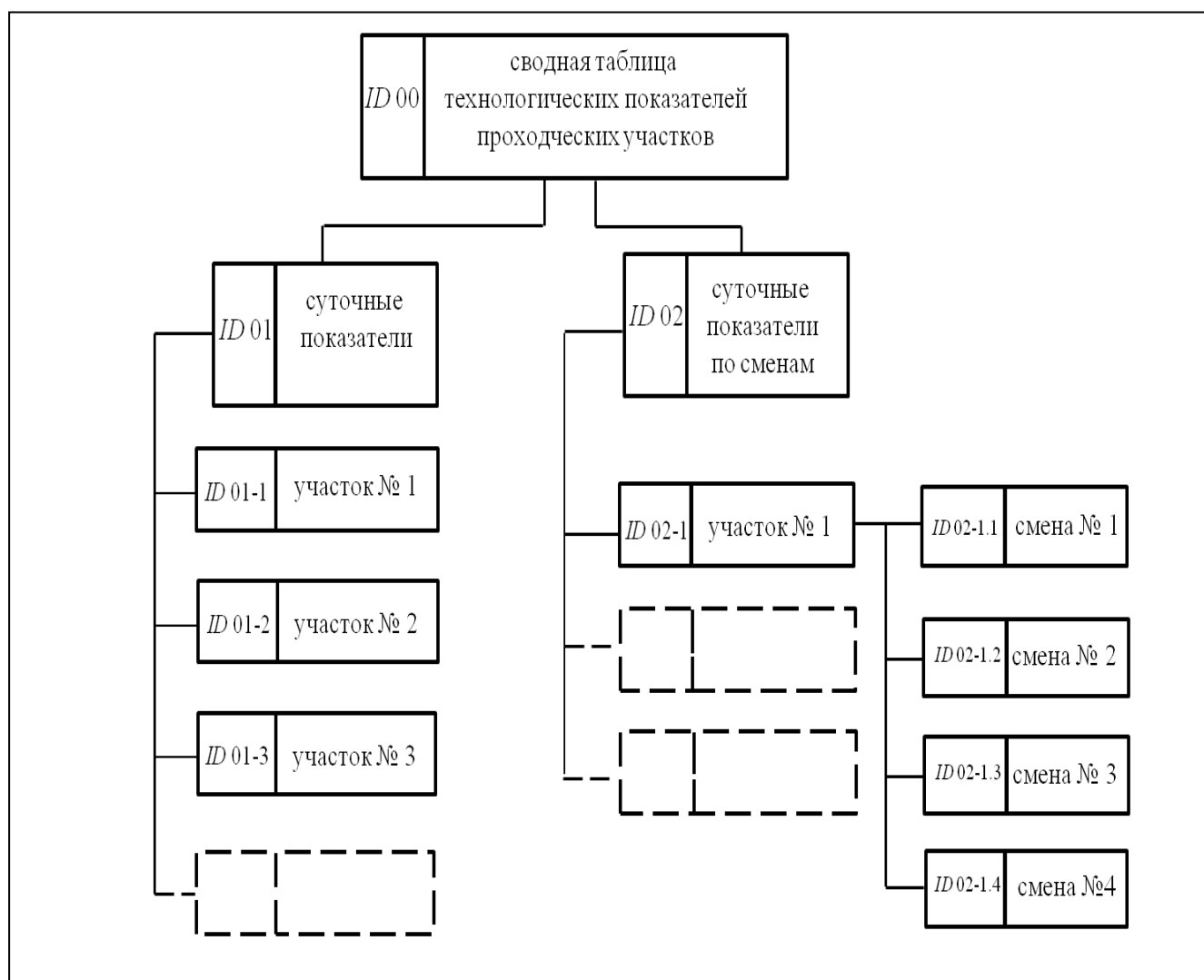


Рисунок 4.3 – Структурная схема сбора данных

Отчетные данные для каждого участка по среднесменным и среднесуточным показателям представляются в виде таблиц 4.4 и 4.5. Показателям расхода электроэнергии, производительности по проходке и удельному расходу электроэнергии по проходке присваиваются соответствующие идентификационные коды.

Таблица 4.4 – Выходные данные по среднесменным показателям для каждого участка

Код	Показатель	Размерность	(ID 03-1) УЧАСТОК №1			
			смена №1 (ID 03-1.1)	смена №2 (ID 03-1.2)	смена №3 (ID 03-1.3)	смена №4 (ID 03-1.4)
PK-01	Расход электроэнергии	кВт·ч				
PK-02	Производительность по проходке	пм				
PK-01.01	Удельный расход электроэнергии по проходке	кВт·ч/пм				

Таблица 4.5. – Выходные данные по среднесуточным показателям в виде сводной отчетной таблицы

Код	Показатель	Размерность	участок №1 (ID 03-1.1)	участок №2 (ID 03-1.2)	участок №3 (ID 03-1.3)	.....
PK-03	Расход электроэнергии	кВт·ч				
PK-04	Производительность по проходке	пм				
PK-03.01	Удельный расход электроэнергии по проходке	кВт·ч/пм				

В соответствии с алгоритмом программного комплекса эффективного управления электропотреблением горнопроходческих работ угольных шахт разработан интерфейс, представляющий собой компьютерную визуализацию энерготехнологической информации (рисунок 4.4).

Интерфейс позволяет последовательно выводить на экран монитора сводный график фактического сменного расхода электроэнергии, (рисунок 4.5), сводный график фактического удельного расхода электроэнергии по погонным метрам горной выработки, (рисунок 4.6) и сводный график фактически пройденных погонных метров горной выработки за каждую смену (рисунок 4.7), а также соответствующие прогнозные модели. При помощи активных клавиш можно задать номер участка. Текущие данные по энерготехнологическим показателям заводятся в специальную таблицу с интерфейса ввода-вывода.

Интерактивная информационная панель интерфейса программного комплекса (рисунок 4.8) отражает на экране монитора данные по энерготехнологическим показателям работы сменных бригад, идентификационный код бригады, пройденные погонные метры, полное потребление электроэнергии, удельный расход электроэнергии, отклонение от удельного расхода, время простоя бригад и соответствующие идентификационные коды причин простоя, а также средние и интегральные значения энерготехнологических показателей.

Зеленый цвет соответствует энерготехнологическим показателям устойчивой работы проходческого участка. Желтый цвет соответствует допустимым отклонениям относительно основного тренда. Красный цвет соответствует критическим значениям энерготехнологических показателей.

Таким образом, визуализация энерготехнологических показателей позволяет не только отслеживать их значения, но и идентифицировать их соответствие конкретным бригадам.

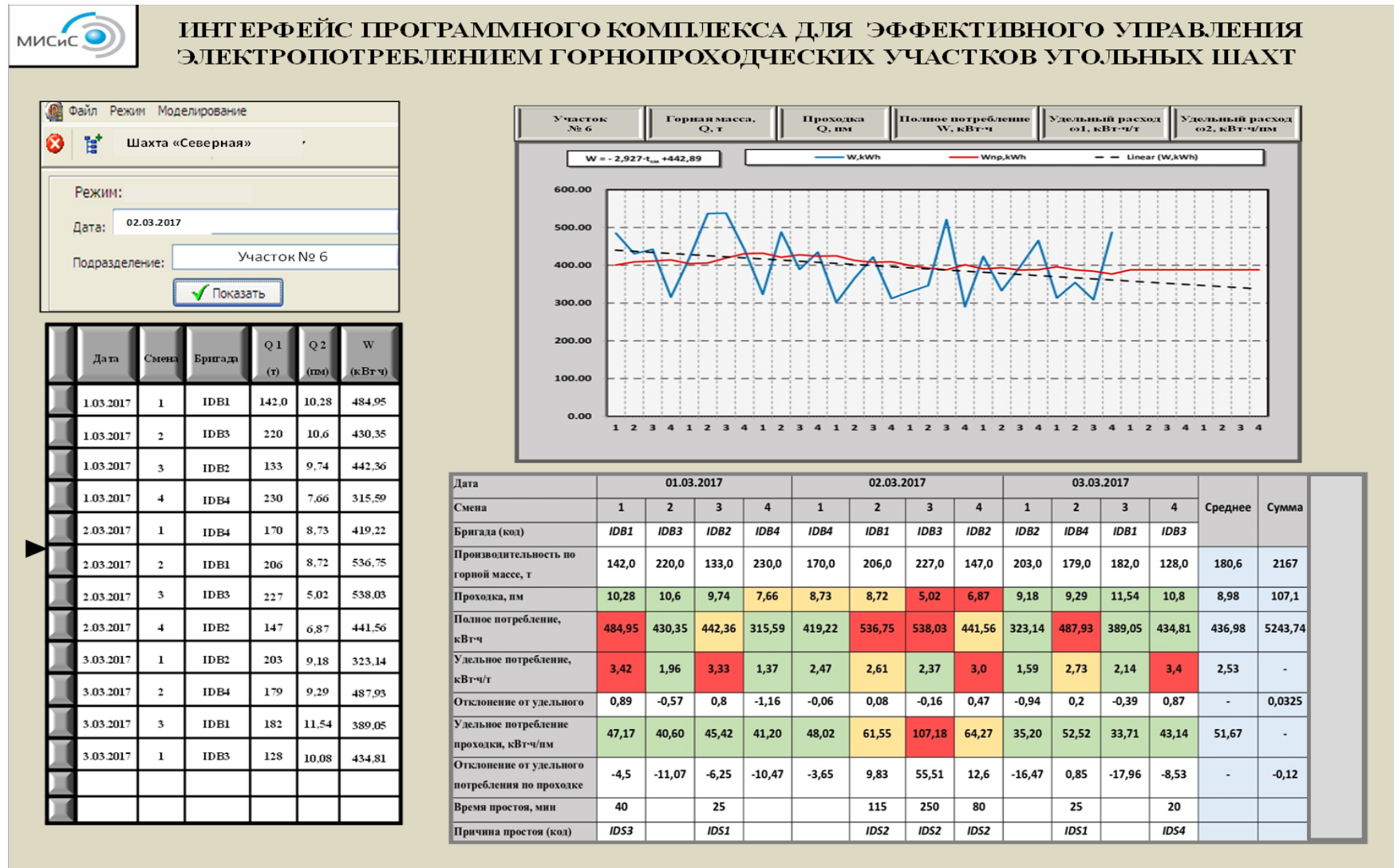


Рисунок. 4.4 – Интерфейс программного комплекса для эффективного управления электропотреблением горнопроходческих участков угольных шахт

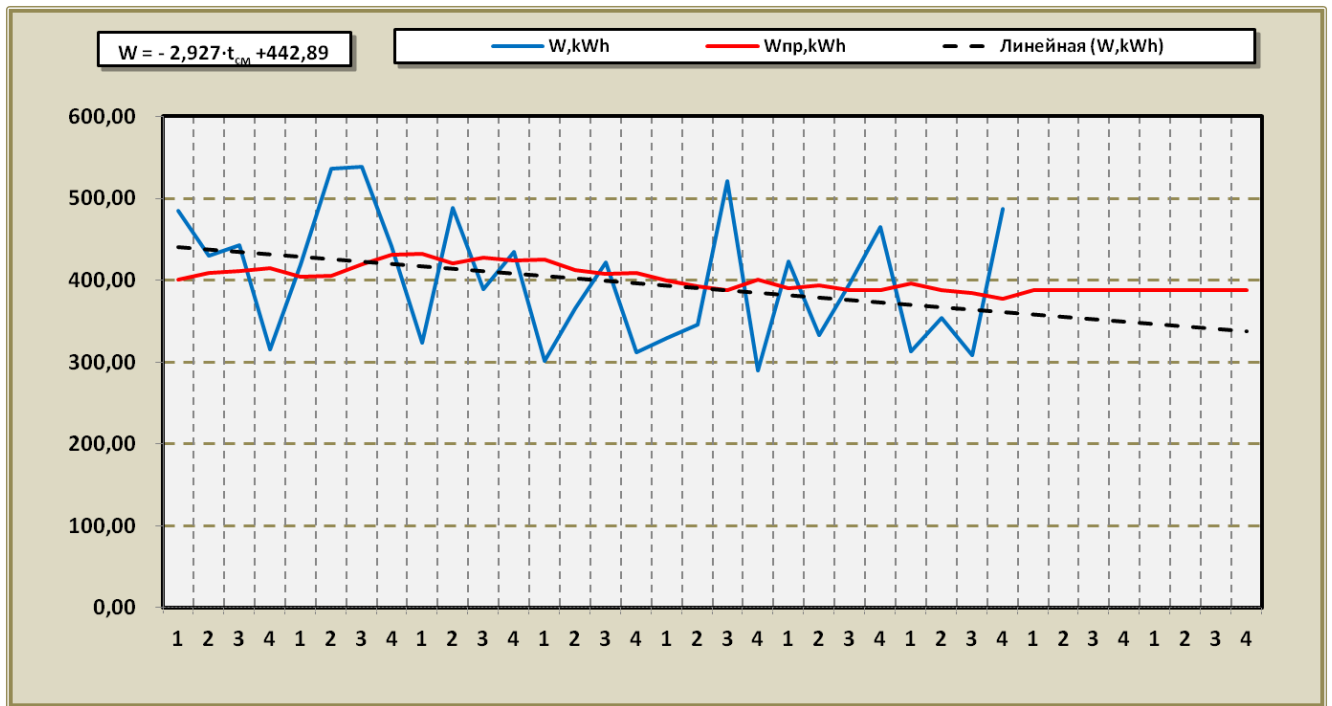


Рисунок 4.5 – Сводный график фактического расхода электроэнергии, основного тренда и прогнозной модели

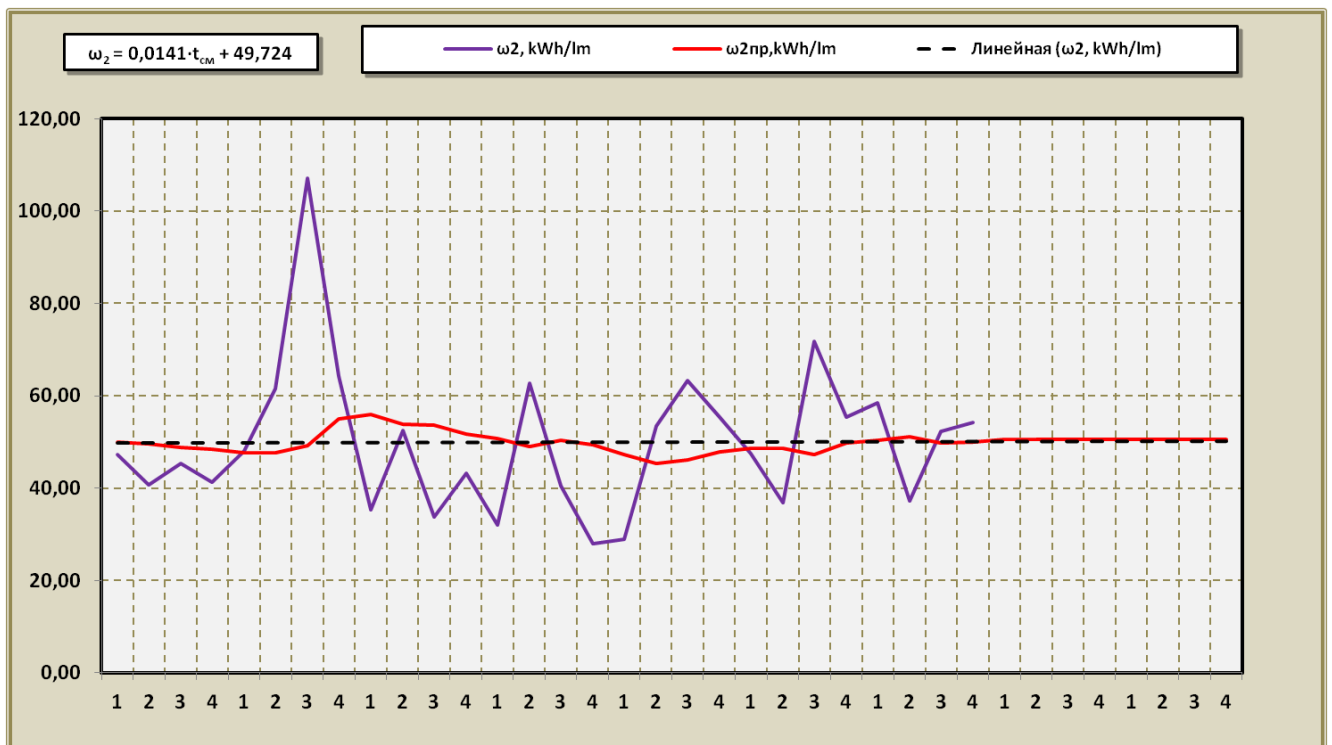


Рисунок 4.6 – Сводный график фактического удельного расхода электроэнергии по погонным метрам горной выработки, основного тренда и прогнозной модели

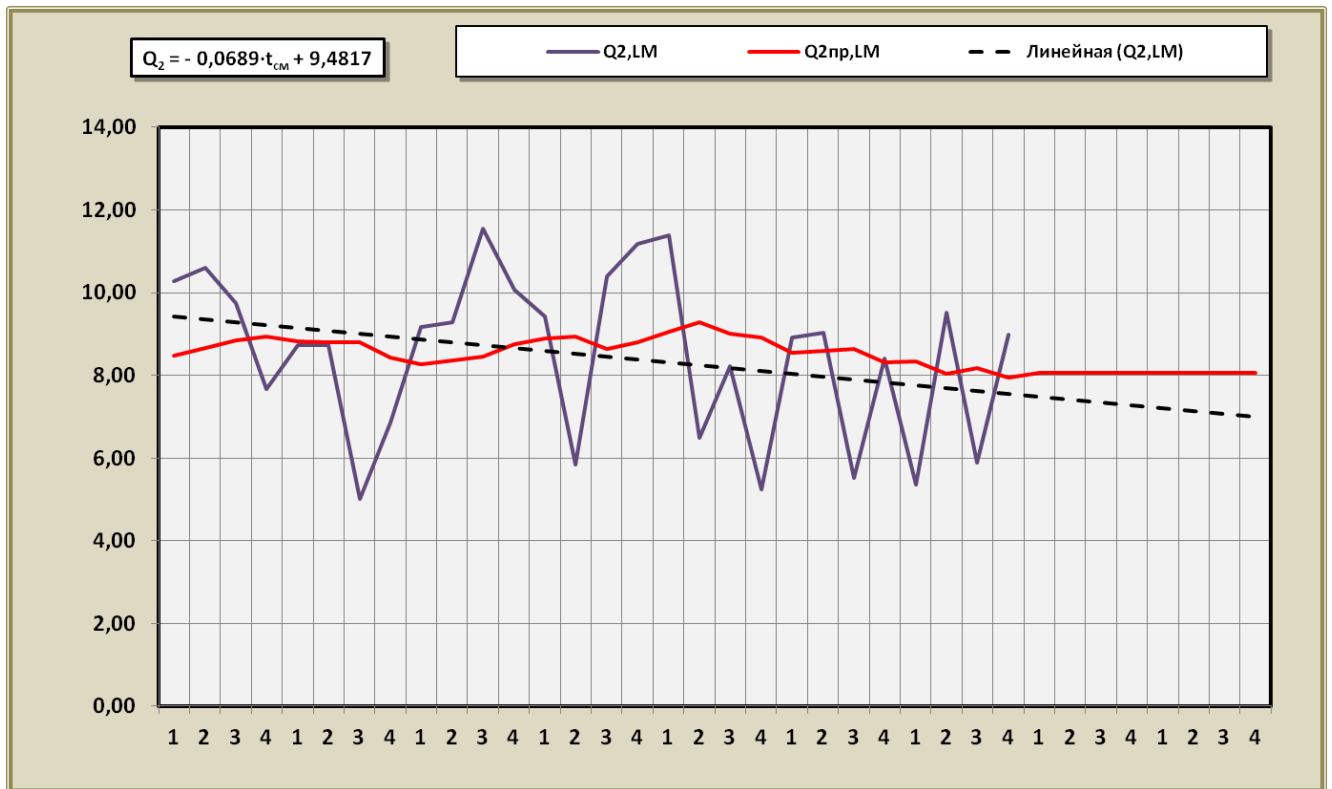


Рисунок 4.7 – Сводный график фактически пройденных погонных метров горной выработки, основного тренда и прогнозной модели

Реализация программного комплекса эффективного управления электропотреблением горнопроходческих работ угольных шахт позволяет на основании энерготехнологических и прогнозных моделей принимать оперативные решения по оценке эффективности электропотребления в соответствии с фактическими и плановыми энерготехнологическими показателями работы сменных бригад проходческих участков угольных шахт.

Дата	01.03.2017				02.03.2017				03.03.2017				Среднее	Сумма
Смена	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
Бригада (код)	IDB1	IDB3	IDB2	IDB4	IDB4	IDB1	IDB3	IDB2	IDB2	IDB4	IDB1	IDB3		
Производительность по горной массе, т	142,0	220,0	133,0	230,0	170,0	206,0	227,0	147,0	203,0	179,0	182,0	128,0	180,6	2167
Проходка, пм	10,28	10,6	9,74	7,66	8,73	8,72	5,02	6,87	9,18	9,29	11,54	10,8	8,98	107,1
Полное потребление, кВт·ч	484,95	430,35	442,36	315,59	419,22	536,75	538,03	441,56	323,14	487,93	389,05	434,81	436,98	5243,74
Удельное потребление, кВт·ч/т	3,42	1,96	3,33	1,37	2,47	2,61	2,37	3,0	1,59	2,73	2,14	3,4	2,53	-
Отклонение от удельного	0,89	-0,57	0,8	-1,16	-0,06	0,08	-0,16	0,47	-0,94	0,2	-0,39	0,87	-	0,0325
Удельное потребление проходки, кВт·ч/пм	47,17	40,60	45,42	41,20	48,02	61,55	107,18	64,27	35,20	52,52	33,71	43,14	51,67	-
Отклонение от удельного потребления по проходке	-4,5	-11,07	-6,25	-10,47	-3,65	9,83	55,51	12,6	-16,47	0,85	-17,96	-8,53	-	-0,12
Время простоя, мин	40		25			115	250	80		25		20		
Причина простоя (код)	IDS3		IDS1			IDS2	IDS2	IDS2		IDS1		IDS4		

Рисунок 4.8 – Интерактивная информационная панель интерфейса программного комплекса

4.4. Выводы

Разработаны рекомендации по повышению энергоэффективности с учетом технических условий ведения горнопроходческих работ угольных шахт, заключающиеся в следующем.

1. Для повышения энергоэффективности ведения ГПР целесообразно использовать разработанный программный комплекс, позволяющий выполнить анализ сменного и суточного электропотребления и производительности проходческих участков.

2. Для обеспечения энергоэффективности ГПР предлагается использовать разработанные модели электропотребления, позволяющие определить энерготехнологические показатели, соответствующие плановым показателям производительности проходческих участков.

3. Для снижения удельного расхода электроэнергии за счет повышения производительности участков необходимо обеспечение заданного темпа проходки и сокращение потерь времени при устранении отказов, а также сокращении простоев по эксплуатационным, организационным и техническим причинам.

4. Для повышения уровня энергетического планирования ГПР целесообразно применять энерготехнологические параметры, полученные на основе прогнозных моделей электропотребления.

5. Мониторинг энергоэффективности ГПР целесообразно проводить соответствующими алгоритмами комплексной программы эффективного управления электропотреблением горнопроходческих участков угольных шахт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной проблемы повышения энергоэффективности горнопроходческих работ угольных шахт на основе обоснования энерготехнологических параметров для управления электропотреблением.

На основании проведенных исследований лично автором получены следующие результаты.

1. Обоснованы методические принципы энерготехнологического анализа электропотребления для управления энергоэффективностью проведения горнопроходческих работ (ГПР) в угольных шахтах.

В основу методики положен алгоритм обработки экспериментальных данных, а также модели электропотребления, позволяющие определить значения общего и удельного расхода электроэнергии. Для определения уровней электропотребления предложено использовать корреляционные эллипсы, определяющие зону эффективной работы проходческих участков.

2. Установлены статистические параметры и законы распределения вероятностей электропотребления проходческих участков в условиях угольных шахт.

В результате проведения исследований установлено, что общий расход электроэнергии подчиняется равномерному закону распределения вероятностей, а удельный расход электроэнергии по пройденным погонным метрам выработки – логнормальному закону распределения вероятностей.

3. Разработаны математические энерготехнологические модели, позволяющие проводить анализ электропотребления для повышения энергоэффективности ГПР.

В основу моделей положены энерготехнологические характеристики, позволяющие определить их рациональные значения в соответствии с показателями сменной производительности проходческих участков.

4. Разработаны прогнозные модели на основе устойчивых трендов электропотребления и их аддитивных составляющих, обеспечивающие управление энергоэффективностью ГПР.

5. Разработаны рекомендации, направленные на повышение энергоэффективности с учетом технических условий проведения ГПР угольных шахт.

6. Разработаны и внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» учебно-методическое пособие, интерактивный электронный образовательный ресурс, а также модуль Программы дополнительного профессионального образования для повышения квалификации специалистов отраслевых предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термины и определения в нормативных правовых актах Российской Федерации: Справочник. / Составители: А.В. Плотников, Г.К. Пискова – М.: Информпечать, 1998. – 297 с.
2. Авилов-Карнаухов, Б.Н. Электроэнергетические расчеты для угольных шахт / Б.Н. Авилов-Карнаухов. – М.: Недра, 1969. – 96 с.
3. Алексеев, В.В. Расчет энергозатрат на проведение горизонтальных выработок. Передовой научно-производственный опыт геологоразведочных организаций. Вып. 18 / В.В. Алексеев, С.И. Наугольников, С.Ю. Егоров – М.: ВИЭМС, 1984.
4. Анчарова, Т.В. Проблемы и пути решения анализа и нормирования электропотребления промышленных предприятий с многономенклатурным производством / Т.В. Анчарова, А.П. Пищур // Электро. – 2003. – № 6. – С. 22–26.
5. Аракелов, В.Е. Методические вопросы экономии энергоресурсов / В.Е. Аракелов, А.И. Кремер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
6. Бабокин, Г.И. Исследование влияния технологической схемы работы и длины лавы на удельный расход электрической энергии очистного комбайна / Г.И. Бабокин // ГИАБ. – № 2, – 2021. – С. 139 – 149.
7. Батищев, В.Е. Энергосбережение: справочное пособие. Издание 2-е. / В.Е. Батищев, Б.Г. Мартыненко, С.Л. Сысков [и др.]. – Екатеринбург: Экс-Пресс, 2000. – 340 с.
8. Белых, Б.П. Электрические нагрузки электропотребления на горнорудных предприятиях / Б.П. Белых, И.С. Свердель, В.К. Олейников. – М.: Недра, 1971. – 247с.
9. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. М.: – Наука, 1983. – 416 с.

10. Борисов, Б.П. Повышение эффективности использования электрической энергии в системах электротехники / Б.П. Борисов, Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1990. – 237 с.
11. Бреннер, В.А. Состояние и перспективы развития проходческих комбайнов для горных выработок / В.А. Бреннер, А.Б. Жабин, И.Г. Шмакин // <http://library.stroit.ru/articles/combain/index.html>.
12. Вагин, Г.Я. Экономия энергоресурсов в промышленных технологиях. / Г.Я. Вагин, Л.В. Дудников, Е.А. Зенютич [и др.] // Справочно-методическое пособие. Под ред. С.К. Сергеева. – Н. Новгород: НГТУ, НИЦЭ, 2001. – 296 с.
13. Вагин, Г.Я. Экономия энергии в промышленности / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов. – Н. Новгород: НГТУ, НИЦЭ, 2001. – 296 с.
14. Вейц, В.И. Экономия электроэнергии в промышленности / В.И. Вейц. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1947. – 208 с.
15. Волобринский, С.Д. Электрические нагрузки и балансы промышленных предприятий / С.Д. Волобринский. – Л.: Энергия, 1976. – 127 с.
16. Волотковский, С.А. Электрификация открытых горных работ. Учебник для вузов / С.А. Волотковский [и др.]. – М.: Недра, 1987.
17. Гетопанов, В.Н. Горные и транспортные машины и комплексы. Учебник для вузов / В.Н. Гетопанов, Н.С. Гудилин, Л.И. Чугреев. – М.: Недра, 1991.
18. Гетопанов, В.Н. Горные и транспортные машины и комплексы / В.Н. Гетопанов, Н.С. Гудилин, Л.И. Чугреев. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
19. Гличев, А.В. Универсальная методика стратегического оценивания состоятельности товаров / А.В. Гличев, М.Б. Плущевский, В.В. Федоров // Стандарты и качество. – 1999. – № 11. – С. 54–58.
20. Гордеев, В.И. Управление электропотреблением и его прогнозирование / В.И. Гордеев, И.Е. Васильев, В.И. Щуцкий. – Ростов-на-Дону: РГУ, 1991. – 104 с.
21. Горная энциклопедия. Справ. изд. / Под редакцией Е. А. Козловского. – М.: Советская энциклопедия, 1984 – 1991.
22. Горная техника. Каталог-справочник. – СПб.: Выпуск № 1, 2012, С. 40–43.

23. Горные машины. // <http://www.netmechanics.ru/gormash.php?chp=204> .
24. ГОСТ 19431-84. Энергетика и электрификация. Термины и определения.
25. ГОСТ Р 51379-99. Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов. Основные положения. Типовые формы.
26. ГОСТ Р 51387-99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения.
27. ГОСТ Р 51541-99. Энергетическая эффективность. Состав показателей.
28. ГОСТ 53905-2010. Энергосбережение. Термины и определения.
29. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1982.
30. Гунин, В.М. Опыт нормирования и прогнозирования электропотребления промышленного предприятия на основе математической обработки статистической отчетности / В.М. Гунин, Л.А. Копцев, Г.В. Никифоров // Промышленная энергетика. – 2000. – № 2. – С. 2 – 6.
31. Гулбрандсен, Т.Х. Энергоэффективность и энергетический менеджмент. Учебно-методическое пособие / Т.Х. Гулбрандсен, Л.П. Падалко, В.Л. Червинский. – Минск: БГАТУ, 2010. – 240 с.
32. Гук, Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. Учебник для вузов / Ю.Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
33. Гусейнов, Ф.Г. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики / Ф.Г. Гусейнов, О.С. Мамедяров. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 151 с.
34. Данилов, Н.И. Энергосбережение. Введение в проблему / Н.И. Данилов, А.И. Евпланов, В.Ю. Михайлов и [др.]. – Екатеринбург: Изд-во «Сократ», 2001. – 208 с.
35. Документ МГС «Энергосбережение. Методика определения полной энергоемкости продукции, работ и услуг». (Технический секретариат Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации № 3229 от 19 марта 1999 г.)

36. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года. – М.: Министерство энергетики РФ. <https://minenergo.gov.ru/node/1846>.

37. ДСТУ 3051-95(ГОСТ 30166-95). Ресурсосбережение. Основные положения.

38. Дьяконов, В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ / В.П. Дьяконов. – М.: Наука, 1987.

39. Дьячков, Н.Б. Повышение энергоэффективности алмазодобывающих предприятий на основе программно-аналитического управления энергоресурсами / Дьячков Николай Борисович // Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МГГУ, 2012.

40. Дьячков, Н.Б. Энергоёмкость процессов обогащения полиметаллических руд / Н.Б. Дьячков // Материалы XIX международной конференции «UKR-POWER 2006» «Проблемы энергосбережения, безопасности, экологии в промышленной и коммунальной энергетике». – Ялта: – 2006, С. 69 – 71.

41. Егоров, Д.А. Исследование режимов и совершенствование методов расчета расхода электроэнергии и электрических нагрузок полиметаллических рудников / Егоров Дмитрий Александрович // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МГИ, 1989.

42. Жернаков, А.П. Экономия топливно-энергетических ресурсов при геологоразведочных работах / А.П. Жернаков, В.Д. Акимов, В.В. Алексеев. – М.: ЗАО «Геоинформмак», 2000. – 317 с.

43. Закон РФ «Об энергосбережении» № 28-ФЗ от 3 апреля 1996 г.

44. Закон РФ «О государственном регулировании внешнеторговой деятельности» № 157-ФЗ от 13 октября 1995 г.

45. ИСО 8402:1994 (E/F/R). Качество. Словарь // В сб. «ИСО 9000. Международные стандарты», 1995. – Т. 2.

46. Каршибаев, А.И. Повышение эффективности электропотребления в условиях горных предприятий Узбекистана / Каршибаев Аскарбек Илашевич // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МГГУ, 2011.

47. Ключев, Ю.Б. Планирование электропотребления на промышленном предприятии / Ю.Б. Ключев. – М.: Энергия, 1970. – 120 с.
48. Клорикьян, С.Х. Машины и оборудование для шахт и рудников. Справочник. / С.Х. Клорикьян [и др.]. – М.: МГГУ, 2000. – 471 с.
49. Ковальчук, Н.А. Повышение эффективности электропотребления при разработке россыпных месторождений на основе совершенствования методов определения электрических нагрузок. / Ковальчук Николай Алексеевич // Дисс. ... канд. тех. наук. – М.: МГИ, 1986.
50. Колпачков, В.И. Производственная эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт энергетического оборудования / В.И. Колпачков, А.И. Ящура. – М.: ЗАО «Энергосервис», 1999. – 809 с.
51. Константинов, Б.А. О применении математических методов при нормировании электроэнергии в промышленности / Б.А. Константинов. – М.: Электричество, – 1964. – № 1.
52. Копытов, Ю.В. Экономия электроэнергии в промышленности: Справочник / Ю.В. Копытов, Б.А. Чуланов. – М.: Энергия, 1978. – 120 с.
53. Крицевый, Ю.Ф. Разработка методов и средств повышения точности прогнозирования электропотребления при разработке россыпных месторождений / Крицевый Юрий Феликсович // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МГИ, 1989.
54. Кудрин, Б.И. О теоретических основах и практике нормирования и энергосбережения / Б.И. Кудрин // Промышленная энергетика. – 2006. – № 6.
55. Кузнецов, Н.М. Анализ электропотребления на Стойленском горно-обогатительном комбинате / Н.М. Кузнецов, М.Г. Петров, Ф.В. Власов // Горный информационно-аналитический бюллетень, – № 6, – 2005. – С. 268 – 273.
56. Кузнецов, Н.М. Рациональное электропотребление на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях / Н.М. Кузнецов, В.И. Щуцкий. – Апатиты, 1997.

57. Лимитовский, А.М. Концепция энергосбережения на геологоразведочных работах и оценка направлений исследований в этой области / А.М. Лимитовский, Е.В. Лимитовская. – М., МГГА, 1997.
58. Лисиенко, В.Г. Хрестоматия по энергосбережению. Кн. 1 / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 688 с.
59. Лисиенко, В.Г. Хрестоматия по энергосбережению. Кн. 2 / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 670 с.
60. Ляхомский, А.В. Математическое моделирование электропотребления горных предприятий / А.В. Ляхомский // Изв. вузов. Электромеханика. – 1986. – № 12. – С. 15 – 17.
61. Ляхомский, А.В. Моделирование энергетических характеристик технологических электроприемников при измельчении руд черных металлов / А.В. Ляхомский, С.В. Вахрушев, В.Б. Малявин [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – № 7. – 2006. – С. 305 – 309.
62. Ляхомский, А.В. Моделирование поверхности показателей энергоэффективности обогатительных производств горных предприятий / А.В. Ляхомский, С.В. Вахрушев, М.Г. Петров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – № 10, – 2006. – С. 313 – 316.
63. Ляхомский, А.В. Моделирование поверхности показателей энергоэффективности обогатительных производств горных предприятий / А.В. Ляхомский, С.В. Вахрушев, М.Г. Петров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – № 10. – 2006. – С. 313 – 316.
64. Ляхомский, А.В. Методические принципы исследования эффективности горных предприятий / А.В. Ляхомский, Е.Н. Перфильева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 8. – С. 340 – 342.
65. Ляхомский, А.В. Концептуальные основы и разработка программно-аналитического комплекса «Управление энергоресурсами промпредприятий» / А.В. Ляхомский, М.Г. Петров, Н.Б. Дьячков [и др.] // Проблемы энергосбережения безопасности экологии в промышленности и коммунальной энергетике / Материалы XXI международной конференции – Ялта: 2007. – С. 28–30.

66. Ляхомский, А.В. Развитие теории и совершенствование методов повышения эффективности применения электроэнергии на горных предприятиях / Ляхомский Александр Валентинович // Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – М.: МГГУ, 1990.

67. Ляхомский, А.В. О влиянии состояния рынка производства, передачи и потребления электрической энергии на повышение энергоэффективности горных предприятий / А.В. Ляхомский, А.Н. Синявский, А.В. Скоробогатов // Горные машины и автоматика. – 2001. – № 7. – С. 3 – 4.

68. Ляхомский, А.В. Повышение эффективности планирования оперативного управления и отчетности за энергопотребление / А.В. Ляхомский, В.Н. Фащилenko, Н.Б. Дьячков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 7. – С. 282 – 286.

69. Ляхомский А.В. Принципы построения системы управления потреблением энергетических ресурсов / А.В. Ляхомский, Б.Я. Малявин // Вопросы регулирования ТЭК: регионы и Федерация. – 2002. – № 1. – С. 49 – 50.

70. Медведев, И.Ф. Механизация проведения горных выработок в крепких породах / И.Ф. Медведев, А.А. Фещенко, С.И. Одинец. – М.: Недра, 1982. – 166 с.

71. Методика определения нормы расхода электроэнергии по производственному объединению угольной промышленности (при подземной добыче угля). – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1981.

72. Миновский, Ю.П. Эффективность мероприятий по снижению потребления электроэнергии на шахтах / Ю.П. Миновский // Уголь. – 1983. – № 5. – С. 14–15.

73. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.

74. Олейников, В.К. Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях / В.К. Олейников. – М.: Недра, 1983. – 192 с.

75. Организация проходческих работ. <http://www.newreferat.com/ref-29093-7.html>.

76. Организация проходческих работ в угольной промышленности.
<http://roscoal.ru/content/press-centr/informaciya-dlya-vas/organizaciya-prohodcheskih-rabot-v-ugolnoi-promyshlennosti/>.

77. Перспективы создания проходческих комбайнов нового технического уровня <http://library.stroit.ru/articles/combain2/index.html>.

78. Перспективы развития проходческих комбайнов. Угольный портал *http://coal.dp.ua/index.php?Itemid=27&catid=25:the-project&id=19:gimli&option=com_content&view=article*.

79. Перфильева, Е.Н. Повышение энергоэффективности горных предприятий на основе управления энергетическими ресурсами / Перфильева Евгения Николаевна // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МГГУ, 2007.

80. Петухов, С.В. Исследование электропотребления и разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности горных работ предприятий с открытой разработкой угля / Петухов Степан Викторович // Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: НИТУ «МИСиС». – 2019. – 143 С.

81. Пичуев, А.В. Прогнозирование электропотребления на горнорудных карьерах. «Студенческий научный форум – 2016». Российская академия естествознания / А.В. Пичуев, Дэюй Мяо, Н.Б. Овсянников. – М.: – 2016. – 9 с. – *<http://www.scienceforum.ru/2016/>*.

82. Пичуев, А.В. Анализ энергетических показателей и оценка энергоэффективности технологических участков карьеров / А.В. Пичуев, Н.Б. Овсянников // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. – № 7. – С. 370 – 375.

83. Пичуев, А.В. Энергоэффективность горнопроходческих работ / А.В. Пичуев // *Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing*, – 2017. – 115 с.

84. Пичуев, А.В. Комплексная оценка энергоэффективности тоннелепроходческих механизированных комплексов / А.В. Пичуев, В.В. Мартышкин // Технический оппонент. – № 2. – 2019. – С. 26 – 28.

85. Плущевский, М.Б. Око земное – образ стандартософии как науки наук XX века / М.Б. Плущевский // Стандарты и качество. – 1993. – № 3. – С. 45.

86. Проходка автотранспортного уклона на руднике «Восход» tudwood.ru/1890329/nedvizhimost/oborudovaniya_ispolzuemye_prohodke_naklonnyh_stvolov.

87. Продолжительность проходческих операций <http://www.kz1.donetsk.ua/press-czentr/22-raboty-pri-stroitelstve-i-reskonstrukcii-shax/785-prodolzhitelnost-proxodcheskix-operaczij.html>.

88. Проходческие комбайны. Каталог техники. // <http://maxi-exkavator.ru/>.

89. Проходческий комбайн. Горная энциклопедия. <http://mining-enc.ru/p/proxodcheskij-kombajn/>.

90. Реш, М. Опыт проходки выработок комбайнами избирательного действия и требования к ним / М. Реш // Глюкауф. – № 7/8. – 1991.

91. Руководящий технический материал РТМ 48.19-6,02-89. Инструкция по нормированию расхода электроэнергии на горных предприятиях цветной металлургии. – М.: 1989.

92. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшинский. – М.: Изд-во «Наука», 1971. – 192 с.

93. Семенченко, А. К. Перспективы создания проходческих комбайнов нового технического уровня Каталог-справочник «Горная Техника – 2005» / А.К. Семенченко, О.Е. Шабает, Д.А. Семенченко [и др.] // <http://library.stroit.ru/articles/combain2/index.html>.

94. Сергеев, А.Ю. Исследование и рационализация электропотребления и электробалансов при добыче полиметаллических руд подземным способом / Сергеев Анатолий Юрьевич // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МГИ, 1989.

95. Ставцев, В.А. Технические средства и методы энергосбережения. Энергоаудит предприятий / В.А. Ставцев, Г.Н. Бабокин // – Тула: Гриф и К, 2003. – 237 с.

96. РД 153-34.0-09.162-00 . «Положение по проведению энергетических обследований организаций РАО «ЕС России».

97. Р 50-605-89-94. Рекомендации по стандартизации. Энергосбережение. Порядок установления показателей энергопотребления и энергосбережения в документации на продукцию и процессы. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.

98. Тангаев, И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых / И.А. Тангаев. – М.: Недра, 1986. – 231 с.

99. Термины и определения в нормативных правовых актах Российской Федерации: Справочник / Сост. А.В. Плотников, Г.К. Пискова. – М.: Информпечать, 1998. – 304 с.

100. Терминология государственной системы стандартизации: Справочник. - М.: Изд-во стандартов, 1989. – 142 с.

101. Трубецкой, К.Н. Открытые горные работы. Справочник / К.Н.Трубецкой [и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.

102. Хорешок, А.А. О состоянии и перспективах развития средств механизации горнопроходческих работ в условиях Кузнецкого угольного бассейна / А.А. Хорешок, В.В. Кузнецов, А.Ю. Борисов – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2006.

103. Чувыкин, Б.В. Фinitные функции. Теория и инженерные приложения / Б.В. Чувыкин // Под ред. Э.К. Шахова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 1999. – 99 с.

104. Щуцкий В.И., Ляхомский А.В., Ковальчук Н.А. Определение перспективных нагрузок в условиях неполной информации // Колыма. – 1985. № 4–5. – С. 45 – 49.

105. Щуцкий, В.И. Режимы нагрузок электроприемников приисков / В.И. Щуцкий, А.В. Ляхомский, Н.А. Ковальчук // Колыма. – 1984 – № 9. – С. 27–29.

106. Электрификация горного производства. Учебник для вузов / Под редакцией Л.А. Пучкова и Г.Г. Пивняка. – М.: Изд-во МГГУ, 2007.

107. Kolmogoroff A.N. *Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione // Giornale dell' Istituto Italiano degli Attuari*. 1933. – Vol. 4. – № 1. – P. 83-91.

108. *International Standard ISO 13600 Technical energy systems - Basic concepts. First edition 1997-11-15* (Международный стандарт ИСО 13600:1997. Энергосистемы технические. Основные понятия).

109. Садридинов, А.Б. Энергетические характеристики проходческих комбайнов с исполнительными органами избирательного действия / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 9. – С. 348 – 350.

110. Садридинов, А.Б. Энергетическая оценка горнопроходческих работ с учетом их влияния на техногенную среду в условиях городского подземного строительства / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 2. – С. 303 – 306.

111. Садридинов, А.Б. Оценка энергоэффективности горнопроходческих работ по энергетическим эквивалентам затрат энергии / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 12. – С. 320 – 323.

112. Садридинов, А.Б. Сравнительный анализ энергетических характеристик проходческих комбайнов, представленных на мировом рынке / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 1. – С. 297 – 300.

113. Садридинов, А.Б. Комплексный анализ показателей энергоэффективности промышленных предприятий / А.Б. Садридинов, А.В. Пичуев, С.М. Карпенко // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2018. – № 2. – С.15 – 17.

114. Садридинов, А.Б. Анализ и моделирование режимов энергопотребления туннельных комплексов в угольных шахтах / В.Л. Петров, А.Б. Садридинов, А.В. Пичуев // V^й Международный инновационный горный

симпозиум. – Кемерово: – 2020. – DOI
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401006>.

115. Садридинов, А.Б. Оценка энергоэффективности технологических процессов при строительстве подземных коллекторов / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск: – 2012. – С. 145 – 147.

116. Садридинов, А.Б. Энергоэффективность проходческих работ в условиях городского подземного строительства / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск: – 2012. – С. 142–143.

117. Садридинов, А.Б. Анализ энергетических показателей работы горнопроходческих комплексов угольной шахты // Горные науки и технологии. 2020;5(4):367-375. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-367-375>.

118. Садридинов, А.Б. Методы оценки энергоэффективности проходческих работ в условиях городского подземного строительства / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // Сб. научн. трудов Международной научно-технической конференции «Совершенствование технологии строительства шахт и сооружений». – Выпуск № 18. – Донецк: Украина. – 2012. – С. 25–27.

119. Садридинов, А.Б. Моделирование графиков электрических нагрузок при ведении проходческих работ в условиях городского подземного строительства / А.Б. Садридинов // Всероссийская молодёжная научная школа-конференция «Состояние и пути развития российской энергетики». – Томск: НИТПУ, Изд-во ООО «СКАН». – Т2. – 2014. – С. 351 – 354.

120. Садридинов, А.Б. Оценка энергозатрат на создание, техническое обслуживание и ремонт проходческих комбайнов / А.В. Пичуев, А.Б. Садридинов // В сб. докл. XX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». – Томск: – НИТПУ, Изд-во ООО «СКАН». – Т2. – 2014. – С. 351 – 354.

121. Садридинов, А.Б., Анализ энергозатрат на техническое обслуживание и ремонт проходческих комбайнов избирательного действия / А.Б. Садридинов, Фэн Хао, А.В. Пичуев // VII Международная студенческая электронная научная конференция "СТУДЕНЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ 2015" – РАЕ – 6 с. – (<http://www.scienceforum.ru/>).

122. Садридинов, А.Б., Анализ энергозатрат на содержание и техническое обслуживание подземных горных выработок условиях ведения горнопроходческих работ / А.Б. Садридинов, Дэюй Мяо, А.В. Пичуев // VII Международная студенческая электронная научная конференция "СТУДЕНЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ 2015" – РАЕ – 6 с. (<http://www.scienceforum.ru/>).

123. Садридинов, А.Б. Анализ энергозатрат труда основного и вспомогательного персонала при ведении горнопроходческих работ / А.Б. Садридинов, Фэн Хао, Дэюй Мяо, А.В. Пичуев // VII Международная студенческая электронная научная конференция "СТУДЕНЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ 2015". – РАЕ. – 5 с. (<http://www.scienceforum.ru/>).

124. Садридинов, А.Б. Повышение энергоэффективности горнопроходческих работ / А.Б. Садридинов, А.В. Пичуев, В.И. Петуров // Транспортная инфраструктура Сибирского региона». – Иркутск: ИГУПС. – 2016. Т 1. – С. 641 – 645.

125. Садридинов, А.Б. Оценка влияния горнопроходческих работ на техногенную среду в условиях шахтного строительства / А.Б. Садридинов, А.В. Пичуев // ГИАБ (научно-технический журнал), 2019. – № 6 – С. 300. Депонент.

126. Садридинов, А.Б. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2020661811 РФ. «Программный комплекс для анализа энерготехнологических потоков при ведении горнопроходческих работ на угольных шахтах» / В.Л. Петров, А.Б. Садридинов [и др.]; заявитель и правообладатель НИТУ «МИСиС». – № 2020661064; заявл. 25.09.2020; опубл. 01.10.2020.

127. Садридинов, А.Б. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2020662067 РФ. «Комплексная программа эффективного управления

электропотреблением горнопроходческих участков угольных шахт» / В.Л. Петров, А.Б. Садридинов, А.В. Пичуев // Заявитель и правообладатель НИТУ «МИСиС». – № 2020661054. Заявл. 25.09.2020. Оpubл.07.10.2020.

128. Садридинов, А.Б. *Analysis and Modeling of Power Consumption Modes of Tunnelling Complexes in Coal Mines* (Анализ и моделирование режимов энергопотребления проходческих комплексов в угольных шахтах) / *Petrov, V., Sadridinov, A., Pichuev, A.* (2020) *E3S Web of Conferences*, 174, DOI: 10.1051/e3sconf/202017401006.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Материалы, подтверждающие использование диссертационной работы

Вазорати саноат ва
технологияҳои нави
Ҷумҳурии Тоҷикистон
КВД «Ангишти Тоҷик»
ҶСК «Ангишт»



Министерство
промышленности и
новых технологий
Республики Таджикистан
ГУП «Ангишти Тоҷик»
ОАО «Ангишт»

№ с/х 20202972300055229000 БДА ЧТ «Амонатбанк», дар ш. Исфара
РМБ 350101626. х/м- 20402972316264. ИНН 550001386. Тел: 2-21-42 Факс: 2-21-42

№ 67 от
24 » 11 2020г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы

**«ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ УГОЛЬНЫХ ШАХТ НА ОСНОВЕ
ОБОСНОВАНИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ»**

Садридинова Ахлидина Бахридиновича

Комиссия в составе:

председатель Каримов Н.М.,

члены комиссии: Зоиров Х.Б., Джумаев А., Шаропова М.,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Повышение энергоэффективности горнопроходческих работ угольных шахт на основе обоснования энерготехнологических параметров для управления электропотреблением», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в проектно-конструкторской деятельности Акционерного общества открытого типа «Ангишт».

При разработке проектно-сметной документации в виде:

1. Методики оценки энергоэффективности горнопроходческих работ в условиях угольных шахт.
2. Рекомендаций по повышению энергоэффективности ведения горнопроходческих работ в условиях угольных шахт.

По результатам научных разработок опубликовано 16 научных статей.

Использование указанных результатов позволяет: повысить качество проектирования систем электроснабжения угольных шахт; оценить энергоэффективность работы горнопроходческих участков в соответствии с международными стандартами ИСО 9000, ИСО 14000 и ИСО 13600.

Работа выполнена в соответствии с государственной программой: «Об энергосбережении и эффективности», Указа Президента Республики Таджикистан №653 от 24 апреля 2009 года «О дополнительных мерах по экономному использованию энергии» и «Государственной программы «Качество» на 2013-2015 годы», утвержденной Постановлением Правительства Республики Таджикистан, №512 от 2 октября 2012 года, за 2013 год.

Результаты внедрялись при выполнении НИР и ПКР по теме:
«Проектирование горизонта +740м»

Председатель комиссии Ген. директор

Члены комиссии: Инженер

Гл.энергетик

Гл.механик



Каримов Н.М.

Зоиров Х.Б.

Джумаев А.

Шаропова М.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020661811

Программный комплекс для анализа энерготехнологических потоков при ведении горнопроходческих работ на угольных шахтах

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (RU)*

Авторы: *Петров Вадим Леонидович (RU), Пичуев Александр Вадимович (RU), Садритдинов Ахлидин Бахридинович (RU)*

Заявка № 2020661064

Дата поступления 25 сентября 2020 г.

Дата государственной регистрации

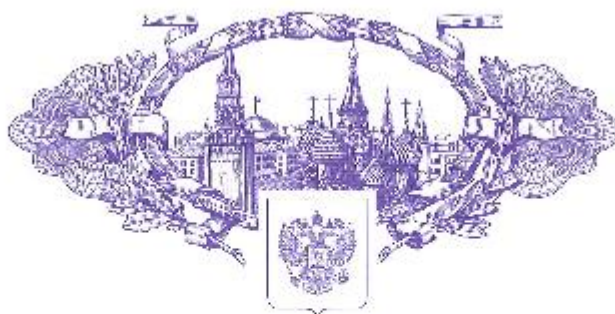
в Рոодре программ для ЭВМ 01 октября 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ичнов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020662067

Комплексная программа эффективного управления
электропотреблением горнопроходческих участков
угольных шахт

Принадлежит: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС» (RU)*

Авторы: *Петров Вадим Леонидович (RU), Ничуев Александр
Вадимович (RU), Садридинов Ахлидин Бахридинович (RU)*



Заявка № 2020661054

Дата поступления 25 сентября 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программы для ЭВМ 07 октября 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.И. Ничуев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пакет прикладных программ для анализа энергоэффективности горнопроходческих работ на угольных шахтах

Б.1 Программа «*STATIST*» – расчет статистических показателей

```

CLS
PRINT "STATISTICA"
A = 0: B = 0: C = 0: D = 0: W = 0
INPUT "N="; N
DIM Y(N), X(N)
FOR I = 1 TO N
PRINT I
INPUT "X="; X(I)
A = A + X(I)
NEXT I
M = A / N
FOR I = 1 TO N
B = B + (X(I) - M) ^ 2
C = C + (X(I) - M) ^ 3
D = D + (X(I) - M) ^ 4
NEXT I
PRINT "B="; B
PRINT "C="; C
PRINT "D="; D
D1 = B / N
SIG1 = SQR(D1): D0 = B / (N - 1)
SIG0 = SQR(D0)
M2 = B / N: M3 = C / N: M4 = D / N
A1 = M3 / (M2 ^ 1.5): E = M4 / (M2 ^ 2) - 3
U3 = SQR (6 * (N - 1) / (N + 1) / (N + 3))
U4 = SQR (24 * N * (N - 2) * (N - 3) / (N - 1) / (N - 1) / (N + 3) / (N + 5))
PRINT "M="; M
PRINT "M2="; M2
PRINT "M3="; M3
PRINT "M4="; M4
PRINT "D="; D1
PRINT "D0="; D0
PRINT "SIG="; SIG1
PRINT "SIG0="; SIG0
PRINT "A="; A1
PRINT "E="; E
PRINT "U3="; U3
PRINT "U4="; U4
END

```

Таблица идентификаторов

Параметр	Обозначение	Идентификатор
Количество значений	N	N
Параметры массива	X	X
Математическое ожидание	\bar{X}	M
Центральные моменты	$M2$	$M2$
	$M3$	$M3$
	$M4$	$M4$
Дисперсия смещенная	D	D
Дисперсия несмещенная	$D0$	$D0$
Стандартное отклонение смещенное	σ	SIG
Стандартное отклонение несмещенное	σ_0	$SIG0$
Асимметрия	A	A
Экссесс	E	E
Коэффициенты нормального закона распределения	u_3	$U3$
	u_4	$U4$

Б.2. Программа «CORRELL-1» - расчет параметров энергетических характеристик (парная регрессия)

```

CLS
PRINT "LINEYNAYA Y=B0+B1*X , YES-1"
PRINT "GIPERBOLA Y=B0+B1/X, YES - 2"
INPUT "YES-"; W: IF W = 2 THEN 2
INPUT "N="; N: A = 0: B = 0: C = 0: D = 0: E = 0
FOR I = 1 TO N
PRINT I
INPUT "X="; X: INPUT "Y="; Y
A = A + X * Y: B = B + X: C = C + Y
D = D + X ^ 2: E = E + Y ^ 2
NEXT I
R = (A - B * C / N) / (SQR(D - B ^ 2 / N) * SQR(E - C ^ 2 / N))
B1 = (B * C - N * A) / (B ^ 2 - N * D)
B0 = (C - B1 * B) / N
PRINT "R="; R
PRINT "B0="; B0: PRINT "B1="; B1
10 INPUT "X="; X
Y = B0 + B1 * X
PRINT "Y="; Y:
PRINT "END, YES-1, NO-0"
INPUT KL
IF KL = 1 THEN 20
GOTO 10
2 INPUT "N="; N: A = 0: B = 0: C = 0: D = 0

```

```

A1 = 0: B1 = 0: C1 = 0: D1 = 0: E1 = 0
FOR I = 1 TO N
PRINT I
INPUT "X="; X: INPUT "Y="; Y
A = A + 1 / X: B = B + 1 / (X ^ 2): C = C + Y: D = D + Y / X:
A1 = A1 + Y * X: B1 = B1 + X: C1 = C1 + Y
D1 = D1 + X ^ 2: E1 = E1 + Y ^ 2
NEXT I
R = (A1 - B1 * C1 / N) / (SQR (D1 - B1 ^ 2 / N) * SQR (E1 - C1 ^ 2 / N))
E = N * B - A ^ 2: F = C * B - D * A: K = N * D - A * C: F = F / E: K = K / E
PRINT "R="; R
PRINT "B0="; F: PRINT "B1="; K
15 INPUT "; X = "; X
Y = F + K / X
PRINT "Y="; Y
PRINT "END, YES-1, NO-0"
INPUT Q
IF Q = 1 THEN 20
GOTO 15
20 END

```

Таблица идентификаторов

Параметр	Обозначение	Идентификатор
Количество пар переменных	N	N
Переменная (аргумент)	X	X
Переменная (функция)	Y	Y
Коэффициент парной корреляции	R	R
Коэффициенты уравнения регрессии	b_0 b_1	B_0 B_1

Б.3. Программа «CORRELL-2» -расчет параметров энергетических характеристик (множественная регрессия)

```

CLS
INPUT "N="; N: DIM X1(N): DIM X2(N): DIM Y(N)
A1 = 0: B1 = 0: D1 = 0: E1 = 0
A2 = 0: B2 = 0: D2 = 0: C1 = 0
A3 = 0: K = 0: L = 0: M = 0
FOR I = 1 TO N
PRINT I
INPUT "Y="; Y(I): INPUT "X1="; X1(I): INPUT "X2="; X2(I)
A1 = A1 + X1(I) * Y(I)
A2 = A2 + X2(I) * Y(I)
A3 = A3 + X1(I) * X2(I)
B1 = B1 + X1(I): B2 = B2 + X2(I)
C1 = C1 + Y(I)
D1 = D1 + X1(I) ^ 2: D2 = D2 + X2(I) ^ 2

```



```

E1 = E1 + Y(I) ^ 2
NEXT I
YY = C1 / N: XX1 = B1 / N: XX2 = B2 / N
FOR I = 1 TO N
K = K + (Y(I) - YY) ^ 2: L = L + (X1(I) - XX1) ^ 2: M = M + (X2(I) - XX2) ^ 2
NEXT I
R1 = (A1 - B1 * C1 / N) / (SQR(D1 - B1 ^ 2 / N) * SQR(E1 - C1 ^ 2 / N))
R2 = (A2 - B2 * C1 / N) / (SQR(D2 - B2 ^ 2 / N) * SQR(E1 - C1 ^ 2 / N))
R3 = (A3 - B1 * B2 / N) / (SQR(D1 - B1 ^ 2 / N) * SQR(D2 - B2 ^ 2 / N))
RN = SQR((R1 ^ 2 - 2 * R1 * R2 * R3 + R2 ^ 2) / (1 - R3 ^ 2))
RYX1 = (R1 - R2 * R3) / SQR((1 - R2 ^ 2) * (1 - R3 ^ 2))
RYX2 = (R2 - R1 * R3) / SQR((1 - R1 ^ 2) * (1 - R3 ^ 2))
SIG1 = SQR(K / N): SIG2 = SQR(L / N): SIG3 = SQR(M / N)
B01 = (SIG1 / SIG2) * ((R1 - R2 * R3) / (1 - R3 ^ 2))
B02 = (SIG1 / SIG3) * ((R2 - R1 * R3) / (1 - R3 ^ 2))
B00 = YY - B01 * XX1 - B02 * XX2
PRINT "R1="; R1: PRINT "R2="; R2: PRINT "R3="; R3: PRINT "RN="; RN
PRINT "RYX1="; RYX1
PRINT "RYX2="; RYX2
PRINT "SIG1="; SIG1: PRINT "SIG2="; SIG2: PRINT "SIG3="; SIG3
PRINT "B0="; B00: PRINT "B1="; B01: PRINT "B2="; B02
1 INPUT "X1="; X1: INPUT "X2="; X2
Y = B00 + B01 * X1 + B02 * X2
PRINT "Y="; Y:
PRINT "END, YES-1,NO-0"
INPUT KL
IF KL = 0 THEN 1
END

```

Таблица идентификаторов

Параметр	Обозначение	Идентификатор
Количество пар переменных	N	N
Переменная (аргумент)	X_1	$X1(I)$
Переменная (аргумент)	X_2	$X2(I)$
Переменная (функция)	Y	$Y(I)$
Частный коэффициент парной корреляции	R_{YX_1}, R_{YX_2} $R_{X_1X_2}$	$R1, R2$ $R3$
Коэффициент множественной корреляции	$R_{YX_1X_2}$	RN
Коэффициент парной корреляции при элиминировании признаков	$R_{YX_1 \cdot X_2}$ $R_{YX_2 \cdot X_1}$	$RYX1$ $RYX2$
Среднеквадратическое отклонение	$\sigma_Y, \sigma_{X_1}, \sigma_{X_2}$	$SIG1, SIG2$ $SIG3$
Коэффициенты уравнения регрессии	b_0, b_1 b_2	$B00, B01$ $B02$

**Б.4. Программа «DINAMIC» – расчет динамической модели
(спектральный анализ)**

```

CLS
PRINT "DINAMIC"
INPUT "PERIOD N="; N
DIM X(N), Y(N), T(N)
S1 = 0: S2 = 0
S3 = 0: S4 = 0: S5 = 0
FOR I = 1 TO N
PRINT "I="; I: INPUT "X="; X(I)
T = 2 * 3.14159 * (I - 1) / N
S1 = S1 + X(I): S2 = S2 + X(I) * COS(T)
S3 = S3 + X(I) * SIN(T): S4 = S4 + X(I) * COS(2 * T)
S5 = S5 + X(I) * SIN(2 * T)
NEXT I
A0 = S1 / N: A1 = 2 * S2 / N: B1 = 2 * S3 / N
A2 = 2 * S4 / N: B2 = 2 * S5 / N
PRINT S1
PRINT "A0="; A0
PRINT "A1="; A1
PRINT "B1="; B1
PRINT "A2="; A2
PRINT "B2="; B2
FOR I = 1 TO N
T = 2 * 3.14159 * (I - 1) / N
Y(I)=A0+A1*COS(T)+B1*SIN(T) + A2 * COS(2 * T) + B2 * SIN(2 * T)
NEXT I
A = 0: B = 0: C = 0: D = 0: E = 0: F = 0
FOR I = 1 TO N
A = A + X(I): B = B + Y(I): F = F + (X(I) - Y(I)) ^ 2
C = C + X(I) ^ 2: D = D + Y(I) ^ 2: E = E + X(I) * Y(I)
NEXT I
R1 = (E - A * B / N): R2 = SQR(C - A * A / N): R3 = SQR(D - B * B / N)
R = R1 / (R2 * R3)
SIG = SQR(F / N)
PRINT "R="; R
PRINT "SIG="; SIG
FOR I = 1 TO N
INPUT X
IF X = 0 THEN 1
PRINT USING "#####."; Y(I)
NEXT I
1 END

```

Таблица идентификаторов

Параметр	Обозначение	Идентификатор
Период	N	N
Интервал	T	$T(I)$
Значения функции	X	$X(I)$
Коэффициенты динамического ряда	a_0	$A0$
	a_1	$A1$
	b_1	$B1$
	a_2	$A2$
Дисперсия	b_2	$B2$
Стандартное отклонение	σ	SIG
Коэффициент корреляции	R	R

**Б.5 Программа «STAT-SPLINE» - расчет прогнозной модели
(сплайн-аппроксимация)**

```

CLS
PRINT "SPLAIN-APROCSIMATION"
INPUT "CHISLO UZLOV N="; N
DIM X(N), Y(N), L(N), M(N), R(N), S(N)
FOR I=1 TO N
PRINT "I="; I
INPUT "X(I)="; X(I)
INPUT "Y(I)="; Y(I)
NEXT I
D=X(2)-X(1): E = (Y(2) - Y(1)) / D
FOR K = 2 TO N - 1
H = D: D = X(K + 1) - X(K): F = E: E = (Y(K + 1) - Y(K)) / D
L(K) = D / (D + H): R(K) = 1 - L(K): S(K) = 6 * (E - F) / (H + D)
NEXT K
FOR K = 2 TO N - 1
P = 1 / (R(K) * L(K - 1) + 2): L(K) = - L(K) * P
S(K) = (S(K) - R(K) * S(K - 1)) * P
NEXT K
M(N) = 0: L(N - 1) = S(N - 1): M(N - 1) = L(N - 1)
FOR K = N - 2 TO 1 STEP -1
L(K) = L(K) * L(K + 1) + S(K): M(K) = L(K)
NEXT K
FOR K = 1 TO N
PRINT "K="; K
PRINT "M(K)="; M(K)
NEXT K
16 INPUT "VVEDITE ARGUMENT X="; X
IF X < 0 GOTO 26

```

```

I = 0: IF X > X(N) THEN 23
IF X <= X(1) THEN 25
18 I = I + 1:
IF X > X(I) THEN 18
J = I - 1: D = X(I) - X(J): H = X - X(J)
R = X(I) - X: P = D * D / 6
Y = (M(J) * R ^ 3 + M(I) * H ^ 3) / 6 / D
Y = Y + ((Y(J) - M(J) * P) * R + (Y(I) - M(I) * P) * H) / D
22 PRINT "Y(X) = "; Y
GOTO 16
23 D = X(N) - X(N - 1)
Y = D * M(N - 1) / 6 + (Y(N) - Y(N - 1)) / D
Y = Y * (X - X(N)) + Y(N): GOTO 22
25 D = X(2) - X(1)
Y = -D * M(2) / 6 + (Y(2) - Y(1)) / D
Y = Y * (X - X(1)) + Y(1): GOTO 22
26 END

```

Таблица идентификаторов

Параметр	Обозначение	Идентификатор
Число узлов	N	N
Переменная (аргумент)	X	$X(I)$
Переменная (функция)	Y	$Y(I)$
Номер узла	k	K
Частная производная	$m(k)$	$M(k)$