

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ПЕТУХОВ Степан Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО
ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ ПРЕДПРИЯТИЙ С
ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКОЙ УГЛЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель – докт. техн. наук, профессор Ляхомский А. В.

Москва – 2019 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Устойчивое развитие предприятий минерально-сырьевого комплекса страны в значительной мере зависит от решения задач энергосбережения и повышения энергоэффективности производства. В числе задач, поставленных в государственных программах [1-4], стоят задачи: снижение энергоемкости ВВП к 2020 г. по отношению к 2007 г. не менее, чем на 13,5%; снижение энергоемкости угольной отрасли к 2030 г. по отношению к 2010 г. на 30%. Предприятия минерально-сырьевого комплекса являются крупнейшими потребителями энергетических ресурсов и характеризуются высокой долей энергозатрат в себестоимости продукции. Так, на горных предприятиях угольной отрасли доля затрат на энергоресурсы достигают 18-23%, а на горно-обогатительных предприятиях железорудной отрасли – 23-30%.

В настоящее время, как показывают результаты выполнения вышеприведенных задач также оценки экспертного сообщества, повышение энергоэффективности развивается по инерционному сценарию и имеет недостаточные темпы, что требует обеспечения инновационного сценария развития повышения энергоэффективности.

Поэтому исследования, направленные на научно-методическое, техно-технологическое, программно-аналитическое, информационно-организационное обеспечение, позволяющее осуществить инновационное повышение энергоэффективности предприятий угольной отрасли, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в разработку вопросов теории и практики повышения эффективности, применения электроэнергии внесён исследованиями Б. Н. Авилова-Карнаухова, В. В. Алексеева, Т. В. Анчаровой, Г. И. Бабокина, Б. П. Белых, Г. Я. Вагина, И. Е. Васильева, С. Д. Волобринского, С. И. Гамазина, В. И. Гордеева, М. С. Ершова, Б. И. Заславца, Е. А. Зенютюча, Б. А. Константинова, Л. А. Копцева, Б. И. Кудрина, В. Г. Лисиенко, Н. А. Ковальчука, М. Г. Ладыгичева, А. В. Ляхомского, Ю. П. Миновского, Г. В. Никифорова, В. К. Олейникова, Л. А. Плащанского, А. В. Праховника, А. Х. Сальникова, В. Н. Фащиленко, Л. А. Шевченко, Ю. В. Шевырева, Я. М. Щелокова, В. И. Щуцкого и др.

В указанных исследованиях, в основном, рассматривались технические аспекты процесса электропотребления, касающиеся энергосбережения и повышения энергоэффективности, и недостаточно внимания уделялось процессу электропотребления как «человеко-машинному» процессу. В этой связи рассматриваемая тема требует дальнейшего развития.

Объектом исследования диссертационной работы является процесс электропотребления вскрышных, добычных, отгрузочных горных работ предприятий угольной отрасли с открытой разработкой месторождений.

Предметом исследования является эффективность процесса электропотребления с учетом его «человеко-машинного» – эргатического характера.

Идея работы заключается в том, что инновационное повышение энергоэффективности должно базироваться на системном управлении процессом электропотребления, интегрирующим как техно-технологические аспекты, так и аспекты энергетического менеджмента.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности процесса электропотребления вскрышных, добычных, отгрузочных горных работ на основе системного управления, распространяющегося как на энерготехнологические, так и на программно-аналитические, информационные, организационные аспекты.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**:

- Анализ современного состояния эффективности процесса электропотребления предприятий угольной отрасли.

- Разработка методики исследования эффективности процесса электропотребления предприятий угольной отрасли.
- Установление индивидуальных вероятностных свойств энерготехнологических параметров, индивидуальных энерготехнологических профилей вскрышных, добычных экскаваторных работ для применения в управлении эффективностью электропотребления.
- Установление обобщённых вероятностных свойств энерготехнологических параметров, обобщённых энерготехнологических профилей вскрышных, добычных, отгрузочных экскаваторных работ для применения в управлении эффективностью электропотребления.
- Исследование управления процессом электропотребления предприятий угольной отрасли для повышения энергоэффективности.
- Разработка на основе результатов выполненных исследований рекомендаций по повышению эффективности электропотребления предприятий угольной отрасли.

Методология и методы диссертационного исследования. Теоретические и экспериментальные исследования выполнены с использованием методов теории электроснабжения промышленных предприятий, теории электропотребления, теории планирования эксперимента, теории вероятностей, теории математической статистики, теории энергетического менеджмента. При установлении вероятностных и энерготехнологических моделей процесса электропотребления использовались программный пакет Statistica, Microsoft Office Excel.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций подтверждается научным обоснованием постановки задач исследования, корректным применением современных методов вероятностного и статистического моделирования, подтверждается статистической значимостью и высоким (до 10%) уровнем сходимости теоретических результатов с практическими данными, полученными на базе экспериментального материала; а также практическим использованием результатов исследования в производственной практике.

Научные положения, выносимые на защиту, и их новизна:

1. Методические принципы исследования эффективности процесса электропотребления как энергетического процесса, учитывающие комплексное влияние энерготехнологических, организационных и информационно-аналитических факторов на повышение его эффективности.
2. Индивидуальные и обобщенные вероятностные модели в виде нормальных законов распределения вероятностей энерготехнологических параметров, впервые полученные для различных технологических схем вскрышных, добычных и отгрузочных экскаваторных работ.
3. Индивидуальные и обобщенные энерготехнологические профили в виде статистически значимых линейных, логарифмических и гиперболических корреляционных зависимостей с достаточно высокой математической точностью аппроксимации (в основном до 10%), впервые установленные для различных технологических схем вскрышных, добычных и отгрузочных экскаваторных работ.
4. Концептуальные принципы информационно-аналитического обеспечения повышения эффективности электропотребления и структура программно-аналитического комплекса по управлению энергоресурсами, разработанные впервые.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны методические принципы исследования эффективности процесса электропотребления, как энергетического процесса, комплексно учитывающие энерготехнологические факторы и факторы, обусловленные деятельностью персонала, участвующего в процессе электропотребления.
2. Установлены индивидуальные и обобщенные модели, описывающие вероятностные свойства энерготехнологических параметров вскрышных, добычных и отгрузочных экскаваторных работ.

3. Установлены индивидуальные и обобщенные энерготехнологические профили, обеспечивающие аналитическое описание для цифрового управления энергоэффективностью вскрышных, добычных и отгрузочных экскаваторных работ.

4. Разработаны концептуальные принципы и структура программно-аналитического комплекса, позволяющие выполнять цифровое управление энергоэффективностью с объединением участников процесса электропотребления на базе единой информационно-аналитической платформы.

5. Разработана методика исследования управления процессом электропотребления с оценкой уровня развития составляющих энергетического менеджмента и интегрированием технических и управленческих аспектов повышения энергоэффективности.

6. Оценки статистических характеристик, вероятностные модели и энерготехнологические профили энерготехнологических параметров позволяют осуществлять планирование, оперативное управление и отчетность по эффективному потреблению электроэнергии при введении вскрышных, добычных, отгрузочных экскаваторных работ предприятий с открытой разработкой угля.

7. Разработаны рекомендации, позволяющие обеспечить управление эффективностью потребления электроэнергии на предприятиях с открытой разработкой угля с применением программно-аналитических комплексов для повышения энергоэффективности.

Реализация работы. Методические положения исследования процесса электропотребления, как эргатического процесса, энерготехнологические профили вскрышных, добычных и отгрузочных работ, рекомендации по управлению энергоэффективностью использованы при разработке нормативно-технической документации и программно-аналитического комплекса по управлению энергетическими ресурсами систем энергетического менеджмента, внедренных на предприятиях Сибирской угольной энергетической компании.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: IX Всероссийская (с международным участием) научно-техническая конференция «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике» (г. Пермь, ФГБОУ ВО ПНИПУ, 2015 г.); Планирование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона. (г. Санкт-Петербург, С-ПГЭУ «ЛЭТИ», 2015 г.); Ежегодные научные симпозиумы «Неделя-горняка» (г. Москва, ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС», 2014-2017 гг.); Международная научно-практическая конференция «Альтернативная и интеллектуальная энергетика» (г. Воронеж, ФГБОУ «ВГГУ», 2018 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка, включающего 114 наименований, 3 приложений. Общий объем работы 215 стр., из которых 168 стр. основного текста, включая 20 рисунков, 39 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ современного состояния эффективности процесса электропотребления предприятий угольной отрасли.

Приводится общая характеристика влияния различий горно-геологических, климато-метеорологических условий на значительную вариацию показателя энергетической эффективности – удельное энергопотребление на предприятиях угольной отрасли. В этой связи выполнение средних по отрасли целевых показателей государственных программ для отдельных предприятий затруднительно. В этом случае целесообразно ориентироваться на

среднегодовые (за программный период) тренды ежегодного снижения удельного энергопотребления, составляющие в добыче угля – 1,5%, в переработке угля – 1,8%.

Несмотря на значительное внимание к вопросам энергосбережения и повышения энергоэффективности как со стороны государства, так со стороны хозяйствующих субъектов, повышение энергоэффективности, судя по результатам текущего выполнения программных показателей государственных программ и по оценкам экспертного сообщества, характеризуется инерционным, а не инновационным сценарием развития.

К числу основных причин, обуславливающих инерционный сценарий повышения энергоэффективности на предприятиях угольной отрасли, относятся: недостаточное обеспечение современным техническим учетом потребления электроэнергии; практическое отсутствие мониторинга показателей энергоэффективности в реальном времени; недостаточный уровень аналитического описания процесса электропотребления в целях управления его эффективностью; низкий уровень управления процессом электропотребления как эргатическим процессом, включая организационные, мотивационные, информационные, маркетинговые и инвестиционные аспекты.

Процесс электропотребления в аспекте повышения энергоэффективности имеет в своем составе две основные компоненты: техническую – энергопотребляющие производственные процессы, машины, оборудование; управленческую – участие, действия персонала в управлении процессом электропотребления.

Техническая компонента повышения эффективности электропотребления характеризуется вопросами повышения к.п.д., улучшения коэффициента мощности, повышения коэффициента загрузки оборудования, снижения потерь энергоресурсов, повышения коэффициента готовности оборудования и др.

Компонента повышения эффективности электропотребления, обусловленная действиями персонала, характеризуется вопросами управления электропотреблением, связанными с организационными, информационными и иными аспектами менеджмента электроэнергии на предприятиях.

В настоящее время вопросы управления процессом электропотребления, повышения его энергоэффективности рассматриваются, преимущественно, как вопросы технических задач с явно недостаточным рассмотрением методов, способов управления, обеспечивающих результативные действия персонала в повышении эффективности электропотребления.

На основании проведенного анализа эффективности процесса электропотребления предприятий угольной отрасли сформулированы задачи исследования.

Во второй главе выполнена разработка методики исследования эффективности процесса электропотребления предприятий угольной отрасли как эргатического процесса.

Процесс электропотребления предприятий угольной отрасли обусловлен рядом групп факторов. В числе указанных групп основными являются горно-геологическая, климато-метеорологическая, производственно-технологическая, организационно-управленческая группы.

Исследование эффективности процесса электропотребления основывается на следующих методических принципах:

1. Процесс электропотребления является вероятностным процессом, для исследования которого требуется применение методов теории вероятностей и математической статистики.
2. Исследование эффективности электропотребления требует интеграции энергетических и технологических показателей процессов, работ.
3. Для исследования эффективности процесса электропотребления требуются экспериментальные данные, полученные в условиях действующих предприятий угольной отрасли.
4. При исследовании требуется дать оценку факторов, влияющих на энергоэффективность процесса электропотребления.

5. Для установления состояния управления процессом электропотребления требуется оценка развития аспектов энергетического менеджмента в условиях действующих предприятий угольной отрасли.

6. Для исследования состояния управления процессом электропотребления требуется анализ организационно-информационно-аналитического обеспечения повышения энергоэффективности, а именно: мониторинга эффективности электропотребления; информационно-аналитической обеспеченности персонала, участвующего в работах, процессах, потребляющих электроэнергию; режимов электропотребления в соответствии с заданными параметрами эффективности электропотребления; состояния выдачи персоналу, управляющему электропотребляющими объектами, плановых заданий по эффективности электропотребления; отчета этого персонала за исполнение этих заданий.

На основании методических принципов разработана методика исследования эффективности процесса электропотребления, позволяющая: учесть вероятностный характер процесса электропотребления с интеграцией энергетических и технологических показателей производства; оценить статистические характеристики; установить законы распределения вероятностей энерготехнологических параметров процесса электропотребления; оценить действие факторов, влияющих на электропотребление; установить уровень управления процессом электропотребления.

К факторам, влияющим на электропотребление наиболее энергоемкого процесса предприятий с открытой разработкой угольных месторождений – выемки-погрузки горной массы, относятся: свойства горных пород (мягкая, полускальная, скальная); свойства горной массы (связанность, слёживаемость, смерзаемость, заснеженность); свойства полезного ископаемого (физическое состояние угля в пласте); тип вскрыши (бестранспортная, автотранспортная, железнодорожная); тип добычи (автотранспортная, железнодорожная, конвейерная); параметры забоя; состав выемочно-погрузочного оборудования (механические лопаты, драглайны, роторные экскаваторы); тип разгрузки (в отвал, в автосамосвалы, в железнодорожные вагоны, на конвейер).

Количественную оценку влияния указанных факторов на электропотребление в связи с неполнотой информации и неопределенности условий действия факторов выполнить затруднительно, а в некоторых случаях невозможно. В этой связи целесообразно выделить наиболее информативный фактор, который, в свою очередь, зависит от рассматриваемых факторов. С учётом того, что рассмотренные выше факторы, в конечном счете, влияют на объемы работ, то наиболее информативным фактором, который в обобщенном виде отражает влияние рассмотренных факторов на электропотребление, определен объем выполняемых работ.

Исследование вероятностных свойств процесса электропотребления выполнено в соответствии со схемой (рисунок 1). Формирование баз данных, статистических выборок проведено на основе данных экспериментального исследования, позволившего получить оценки статистических характеристик объемов работ, электропотребления и удельного электропотребления с уровнем доверительной вероятности, равной 0,95. Статистические характеристики – среднее (\bar{x}), медиана (Me), мода (Mo), дисперсия (D), среднеквадратическое отклонение (σ), коэффициент вариации (ϑ), асимметрия (A), эксцесс (E) определены по известным формулам математической статистики. Проверка гипотез о законах распределения выполнена с применением критерия Колмогорова.

Энерготехнологические профили в виде корреляционных зависимостей электропотребления (W) и удельного электропотребления (w) от объемов работ (Q) для различных технологических схем вскрыши и добычи, а также для различных типов и марок экскаваторов получены с применением метода наименьших квадратов.

Степень связи между величинами, входящими в корреляционные уравнения, определены с помощью коэффициента корреляции (r) и его доверительного интервала с проверкой статистической значимости с применением t-критерия Стьюдента. Доля изменения электропотребления при изменении объемов работ определена по коэффициенту детерминации

R^2 (для линейных зависимостей) и индексу корреляции ρ (для нелинейных зависимостей) с проверкой статистической значимости с применением F-критерия Фишера. Точность установленных энерготехнологических профилей оценена по средней относительной ошибке аппроксимации (\bar{A}) по шкале Чеддока. Статистическая значимость параметров корреляционных зависимостей определена с применением t-критерия Стьюдента. Проверка правомерности применения метода наименьших квадратов выполнена по условию некоррелированности остатков (ε) и их независимости с применением критерия Дарбина-Уотсона (d). Оценка степени влияния объема работ на электропотребление выполнена с применением коэффициента эластичности (ε).

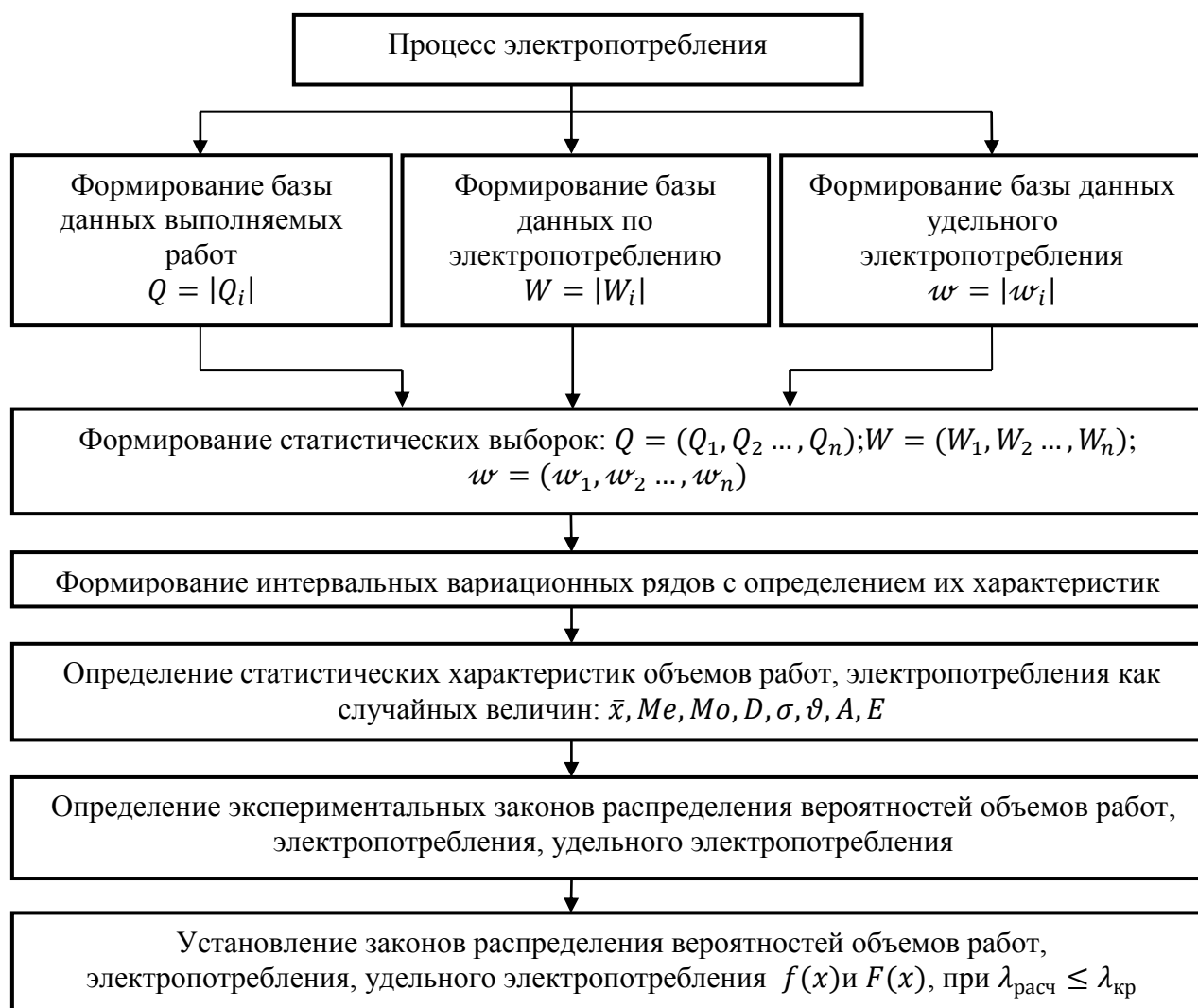


Рисунок 1 – Схема исследования вероятностных свойств процесса электропотребления

Для установления обобщённых энерготехнологических профилей – корреляционных зависимостей требуется проверить отсутствие статистически значимых различий между отдельными выборками энерготехнологических параметров с применением критерия Ван-Дер-Вардена. Выражения для оценки качества энерготехнологических зависимостей приведены в таблице 1.

В таблице 1: Q_i, W_i – экспериментальные данные объема работ и электропотребления; \bar{w}, \hat{w} – удельное электропотребление, соответственно, среднее и определенное по корреляционной зависимости; n – число членов статистической выборки; m – число предикторов в зависимости; ψ – квантиль стандартного нормального закона; R_i – ранг i -того наблюдения;

n_1 и n_2 – число членов первой и второй сравниваемых выборок, \bar{Q} , \bar{W} – средние значения объема работ и электропотребления.

Таблица 1 – Выражения для оценки качества энерготехнологических профилей экскаваторных работ

Показатели	Формула	Примечание
Энерготехнологический профиль (корреляционная зависимость)	$W = b_0 + b_1 \cdot Q, w = b_0 - b_1 \cdot Q$	Для линейной связи
Коэффициенты зависимости	$b_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot W_i - \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \sum_{i=1}^n W_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2 - (\sum_{i=1}^n Q_i)^2}, b_0 = \bar{W} - b_1 \cdot \bar{Q}$	
Коэффициент корреляции	$R_{WQ} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot W_i - \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \sum_{i=1}^n W_i}{\sqrt{[n \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2 - (\sum_{i=1}^n Q_i)^2] [n \cdot \sum_{i=1}^n W_i^2 - (\sum_{i=1}^n W_i)^2]}}$	Статистическая значимость - $ t_{расч} > t_{крит}$
Коэффициент детерминации	$R_{WQ}^2 = (R_{WQ})^2$	Статистическая значимость - $F_{расч} > F_{крит}$
Индекс корреляции	$\rho = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \hat{w}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}}$	При нелинейной зависимости
$t_{расч}$ -критерий Стьюдента	$t_{расч} = \frac{R_{WQ} \sqrt{n - m - 1}}{\sqrt{1 - R_{WQ}^2}}$	
$t_{крит}$	Табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$	
$F_{расч}$ - критерий Фишера	$F_{расч} = \frac{R_{WQ}^2}{1 - R_{WQ}^2} \times \frac{n - m - 1}{m}$	
$F_{крит}$	Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости α и степенях свободы $df_1 = m$ и $df_2 = n - m - 1$	
Точность зависимости	$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left \frac{W_i - \bar{W}_i}{W_i} \right \times 100\%$	По шкале Чеддока
Среднее значение остатков	$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum \varepsilon_i}{n} \approx 0$	$\bar{\varepsilon} \approx 0$
Критерий Дарбина-Уотсона	$d_{расч} = \frac{\sum_{i=2}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\sum \varepsilon_i^2}$	$0 \leq d_{расч} \leq 4$
Коэффициент эластичности	$\bar{\varepsilon} = b_1 \frac{\bar{Q}}{\bar{w}}$	
Критерий Ван-Дер-Вардена (расчетный)	$X_{эмп} = \sum_{i=1}^{n=2} \psi \left(\frac{R_i}{n_1 + n_2 + 1} \right)$	Отсутствие различия $X_{эмп} < X_{кр}$
Критерий Ван-Дер-Вардена (критический)	Табличное значение критерия Ван-Дер-Вардена	

Исследование управления процессом электропотребления выполнено на основе: оценок, полученных с применением экспертного метода при ранговых измерениях составляющих энергетического менеджмента по шкалам качества; анализа освоения контроля над процессом электропотребления и организационно-информационно-аналитического обеспечения участников процесса электропотребления.

В соответствии с положениями разработанной методики выполнено исследование процесса электропотребления как эргатического процесса.

В третьей главе выполнено исследование процесса электропотребления с определением индивидуальных вероятностных моделей и энерготехнологических профилей, устанавливающих влияние объемов выемочно-погрузочных работ на электропотребление экскаваторов.

Исследование выполнено в соответствии с методикой, разработанной в гл.2, на базе экспериментальных данных, охватывающих: предприятия с открытой разработкой бурого и каменного углей; технологические процессы – вскрыша автотранспортная, вскрыша с отгрузкой в ж/д вагоны, бестранспортная вскрыша, приемка вскрышных пород в отвалы; добыча (отгрузка) угля; различные типы и марки экскаваторов. Общее число экспериментальных данных, включенное в исходную статистическую базу, составило 37356 значений. Полученные экспериментальные данные позволили создать представительные статистические выборки для дальнейшего исследования электропотребления горных работ с определением статистических характеристик, вероятностных моделей электропотребления, энерготехнологических профилей основных технологических схем вскрышных и добычных работ при использовании различных типов и марок выемочно-погрузочного оборудования.

Установленные характерные особенности статистических характеристик рассматриваемых величин, а именно: близкие по значениям средние и медианы; значения коэффициентов вариации, не превышающие значения 0,33; относительно незначительные значения коэффициентов асимметрии и эксцесса – позволили выдвинуть гипотезу о нормальном распределении вероятностей исследуемых величин. Проверка гипотезы о принадлежности законов распределения вероятностей исследуемых величин к нормальному закону, выполненная с применением критерия Колмогорова, показала, что с доверительной вероятностью 0,90 и 0,95 можно принять нормальный закон распределения вероятностей.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (1)$$

где x – случайные величины энерготехнологических параметров выемочно-погрузочных работ экскаваторов – $Q_{см}$, $W_{см}$, $w_{см}$; \bar{x} – среднее значение; σ_x – стандартное отклонение.

Значения параметров \bar{x} и σ_x полученных законов распределения вероятностей – вероятностных моделей – выемочно-погрузочных работ экскаваторов приведены в таблице 2.

Полученные оценки статистических характеристик и установленные вероятностные модели сменных энерготехнологических показателей выемочно-погрузочных работ экскаваторов повышают уровень их аналитического описания для управления процессом электропотребления.

Для повышения уровня планирования, оперативного управления, отчетности за эффективное использование электроэнергии установлены зависимости электропотребления $W_{см} = f(Q_{см})$ и удельного электропотребления $w_{см} = f(Q_{см})$ от объемов выемочно-погрузочных работ – энерготехнологические профили.

Анализ полей рассеяния экспериментальных данных в координатах объем работ – электропотребление и объем работ – удельное электропотребление позволил сделать вывод о линейности связей между указанными величинами.

Определение корреляционных зависимостей между исследуемыми величинами, выполненное с применением метода наименьших квадратов, показало, что искомые уравнения имеют вид:

– для электропотребления

$$W_{см} = b_0 + b_1 Q_{см}, \quad (2)$$

– для удельного электропотребления

$$w_{см} = b_0 - b_1 Q_{см}. \quad (3)$$

Установленные энерготехнологические профили (корреляционные зависимости) электропотребления и удельного электропотребления выемочно-погрузочных работ приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Параметры вероятностных моделей выемочно-погрузочных работ

№	Тип, марка экскаватора	Среднесменные параметры вероятностных моделей					
		Объем работы, м ³		Электропотребление, кВт·ч		Удельное электропотребление, кВт·ч/м ³	
		\bar{Q}	σ	\bar{W}	σ	\bar{w}	σ
Вскрыша автотранспортная							
Бородинский разрез							
1	ЭКГ-12,5	9006	1815	3851	648	0,434	0,056
2	ЭКГ-10	7587	1592	3190	532	0,427	0,050
Восточно-Бейский разрез							
3	РС-3000	16853	4054	11816	2313	0,741	0,196
Вскрыша с погрузкой в ж/д транспорт							
Бородинский разрез							
4	ЭКГ-8ус	6037	1198	2594	430	0,436	0,058
Вскрыша бестранспортная							
Восточно-Бейский разрез							
5	ЭШ-10/70	8207	1994	7763	1608	0,971	0,241
Приемка вскрышных пород в отвалы							
Бородинский разрез							
6	ЭКГ-8И	6036	1224	2566	412	0,432	0,056
7	ЭКГ-10	7511	1497	3230	548	0,436	0,056
Добыча (отгрузка)							
Разрез «Бородинский»							
8	ЭРП-2500	4261	847	2054	347	0,49	0,066
9	ЭРП-1600	2484	495	1202	210	0,64	0,038
10	ЭРП-1250	2113	412	1021	172	0,49	0,065
11	ЭКГ-4У	1776	345	854	147	0,49	0,059

Анализ качества полученных энерготехнологических профилей (зависимостей) выполнен в соответствии с выражениями, приведенными в таблице 1. Корреляционные связи (в соответствии со шкалой Чеддока) характеризуются сильной связью (для связи между W_{cm} и Q_{cm}) и достаточно сильной связью (для связи между w_{cm} и q_{cm}). Проверка с применением t-критерия Стьюдента показала статистическую значимость коэффициентов корреляции и коэффициентов b_0 и b_1 . Проверка с применением F-критерия Фишера показала статистическую значимость коэффициентов детерминации. Точность энерготехнологических профилей, определенная по средним относительным ошибкам аппроксимации, которые не превысили 10-12%, является высокой. Проверка некоррелированности остатков (ϵ) и их независимости с применением критерия Дарбина-Уотсона (d) показала правомерность использования метода наименьших квадратов для определения уравнений корреляционных зависимостей.

Энерготехнологические профили позволяют повысить уровень обоснованности принимаемых решений по управлению процессом электропотребления, в том числе: при адресном планировании, оперативном управлении, оценке, а также при адресной отчетности за выполнение сменных заданий по удельному электропотреблению с учетом фактических выполненных объемов экскаваторных работ.

Таблица 3 – Энерготехнологические профили электропотребления выемочно-погрузочных работ

№ п/п	Экскаватор		Энерготехнологические профили					
	Тип	Номер	Зависимость	к-т r	к-т R ²	Зависимость	к-т r	к-т R ²
Вскрыша автотранспортная								
Разрез «Бородинский»								
1	ЭКГ-12,5	1	$W_{CM} = 1223,1 + 0,295 \cdot Q_{CM}$	0,776	0,602	$w_{CM} = 0,581 - 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,508	0,258
2	ЭКГ-12,5	2	$W_{CM} = 1352,0 + 0,275 \cdot Q_{CM}$	0,780	0,608	$w_{CM} = 0,595 - 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,591	0,349
3	ЭКГ-12,5	87	$W_{CM} = 1284,3 + 0,284 \cdot Q_{CM}$	0,791	0,626	$w_{CM} = 0,579 - 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,543	0,295
4	ЭКГ-10	262	$W_{CM} = 1056,9 + 0,281 \cdot Q_{CM}$	0,840	0,706	$w_{CM} = 0,574 - 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,618	0,382
Разрез «Восточно-Бейский»								
5	РС-3000	2	$W_{CM} = 5159,2 + 0,402 \cdot Q_{CM}$	0,894	0,799	$w_{CM} = 1,411 - 3,89 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,806	0,650
6	РС-3000	3	$W_{CM} = 5015,45 + 0,396 \cdot Q_{CM}$	0,501	0,251	$w_{CM} = 1,136 - 2,51 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,517	0,267
Вскрыша с погрузкой в ж/д транспорт								
Разрез «Бородинский»								
7	ЭКГ-8yc	21	$W_{CM} = 1088,7 + 0,252 \cdot Q_{CM}$	0,720	0,518	$w_{CM} = 0,633 - 3,2 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,615	0,378
8	ЭКГ-8yc	22	$W_{CM} = 733,2 + 0,307 \cdot Q_{CM}$	0,789	0,623	$w_{CM} = 0,556 - 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,451	0,203
9	ЭКГ-8yc	28	$W_{CM} = 1030,3 + 0,256 \cdot Q_{CM}$	0,758	0,575	$w_{CM} = 0,606 - 2,8 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,598	0,358
Вскрыша бестранспортная								
Разрез «Восточно-Бейский»								
10	ЭШ-10/70	301	$W_{CM} = 3015,069 + 0,598 \cdot Q_{CM}$	0,708	0,501	$w_{CM} = 1,328 - 4,139 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,362	0,131
11	ЭШ-10/70	338	$W_{CM} = 2857,64 + 0,578 \cdot Q_{CM}$	0,755	0,570	$w_{CM} = 1,441 - 5,88 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,459	0,211
Приемка вскрышных пород в отвалы								
Разрез «Бородинский»								
12	ЭКГ-8и	775	$W_{CM} = 938,8 + 0,269 \cdot Q_{CM}$	0,801	0,642	$w_{CM} = 0,602 - 2,8 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,617	0,381
13	ЭКГ-10	167	$W_{CM} = 1185,4 + 0,269 \cdot Q_{CM}$	0,771	0,594	$w_{CM} = 0,605 - 2,2 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,611	0,373
14	ЭКГ-10	287	$W_{CM} = 1067,1 + 0,291 \cdot Q_{CM}$	0,757	0,573	$w_{CM} = 0,595 - 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,508	0,258
Добыча (отгрузка)								
Разрез «Бородинский»								
15	ЭРП-2500	3	$W_{CM} = 804,4 + 0,291 \cdot Q_{CM}$	0,732	0,536	$w_{CM} = 0,681 - 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,561	0,315
16	ЭРП-2500	4	$W_{CM} = 816,7 + 0,291 \cdot Q_{CM}$	0,703	0,494	$w_{CM} = 0,695 - 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,563	0,317
17	ЭРП-2500	90	$W_{CM} = 608,4 + 0,339 \cdot Q_{CM}$	0,812	0,659	$w_{CM} = 0,624 - 3,2 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,482	0,232
18	ЭРП-1600	5	$W_{CM} = 326,2 + 0,329 \cdot Q_{CM}$	0,760	0,578	$w_{CM} = 0,641 - 7,1 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,478	0,228
19	ЭРП-1600	7	$W_{CM} = 531,5 + 0,298 \cdot Q_{CM}$	0,713	0,508	$w_{CM} = 0,674 - 6,4 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,529	0,280
20	ЭР-1250	72	$W_{CM} = 363,7 + 0,307 \cdot Q_{CM}$	0,736	0,542	$w_{CM} = 0,661 - 8,3 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,532	0,283
21	ЭР-1250	94	$W_{CM} = 370,0 + 0,312 \cdot Q_{CM}$	0,744	0,554	$w_{CM} = 0,684 - 8,9 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,559	0,312
22	ЭКГ-4У	19	$W_{CM} = 247,6 + 0,340 \cdot Q_{CM}$	0,816	0,666	$w_{CM} = 0,634 - 8,4 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,526	0,277
23	ЭКГ-4У	339	$W_{CM} = 257,3 + 0,338 \cdot Q_{CM}$	0,764	0,584	$w_{CM} = 0,642 - 8,6 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{CM}$	-0,482	0,232

В четвертой главе выполнено исследование процесса электропотребления с целью установления обобщенных вероятностных моделей и энерготехнологических профилей выемочно-погрузочных работ предприятий угольной отрасли.

Для анализа, оценки, планирования, нормирования эффективности экскаваторных работ с целью повышения уровня управления энергопотреблением предприятия, компании требуются характеристики (профили), отражающие групповые (обобщенные) энерготехнологические свойства экскаваторов, выполняющих определенные горные работы.

При исследовании обобщенных энерготехнологических профилей приняты статистические данные о: фактическом среднесменном объеме (производительности) работ $Q_{\text{ср.см}}$; коэффициенте среднесменной технической производительности, представляющем отношение фактической среднесменной производительности к технической (паспортной) среднесменной производительности $k_{\text{тп.ср.см}} = Q_{\text{ср.см}}/Q_{\text{т}}$; среднесменном удельном электропотреблении $w_{\text{ср.см}}$.

Группировка экскаваторов проводилась: по видам работ – вскрышные, добычные, отгрузочные; по типам экскаваторов – механические лопаты, драглайны; по маркам экскаваторов. Всего в исследовании обобщенных энерготехнологических характеристик выполнен анализ работы 139 экскаваторов, ведущих работы на десяти угольных разрезах Сибирской угольной энергетической компании.

Для формирования обобщенных статистических выборок для указанных выше групп экскаваторов, выполняющих однотипные виды работ, выполнена проверка на отсутствие значимых статистических различий в их индивидуальных выборках. Указанная проверка проведена с применением непараметрического критерия Ван-дер-Вардена для групп экскаваторов определенных типов на вскрышных, добычных и отгрузочных работах. Проверка гипотезы об отсутствии статистических значимых различий показала, что между индивидуальными статистическими выборками экскаваторов определенных типов и марок, выполняющих одни и те же виды работ на разных разрезах, нет статистически значимых различий. На этой основе сформированы обобщенные статистические выборки экскаваторов определенных типов и марок, выполняющих одинаковые виды горных работ.

При исследовании обобщенных энерготехнологических параметров – среднесменных объемов работ, среднесменного коэффициента технической производительности, удельного электропотребления вскрышных, добычных, отгрузочных работ определены: статистики распределений, вероятностные модели и энерготехнологические профили – корреляционные зависимости среднесменной удельного электропотребления $w_{\text{ср.см}}$, соответственно, от среднесменного объема работ $Q_{\text{ср.см}}$ и от коэффициента среднесменной технической производительности $k_{\text{тп.ср.см}}$.

Анализ полей рассеяния статистических данных в координатах среднесменный объем работ – среднесменное удельное электропотребление и коэффициент среднесменной технической производительности – среднесменное удельное электропотребление показал, что искомые корреляционные зависимости с достаточно высокой теснотой связи могут быть описаны:

- для зависимостей $w_{\text{ср.см}} = f(Q_{\text{ср.см}})$ линейными и гиперболическими уравнениями;
- для зависимостей $w_{\text{ср.см}} = f(k_{\text{тп.ср.см}})$ линейными и логарифмическими уравнениями.

Обобщенные энерготехнологические профили удельного электропотребления выемочно-погрузочных работ экскаваторов $w_{\text{ср.см}} = f(Q_{\text{ср.см}})$ и $w_{\text{ср.см}} = f(k_{\text{тп.ср.см}})$ приведены в таблицах 4 и 5.

Анализ качества полученных энерготехнологических профилей выполнен в соответствии с выражениями, приведенными в таблице 1. Полученные корреляционные связи (в соответствии со шкалой Чеддока) характеризуются сильной связью. Проверка с помощью t-критерия Стьюдента показала статистическую значимость коэффициентов корреляции. Проверка с помощью F-критерия Фишера показала статистическую значимость коэффициентов детерминации и полученных зависимостей в целом. Точность установленных зависимостей,

Таблица 4 – Обобщенные энерготехнологические профили удельного электропотребления выемочно-погрузочных работ $w_{\text{ср.см}} = f(Q_{\text{ср.см}})$

№ п/п	Марка экскаватора	Энерготехнологические профили (зависимости)	Коэффициент			
			Корреляции	Индекс корреляции	Детерминации	Индекс детерминации
Вскрышные работы						
Механические лопаты						
1	ЭКГ-4У	$w_{\text{ср.см}} = 1,319 - 0,0004 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,990	-	0,980	-
		$w_{\text{ср.см}} = 289,542 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,889}$	-	0,995	-	0,982
2	ЭКГ-5А	$w_{\text{ср.см}} = 1,234 - 0,0005 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,895	-	0,801	-
		$w_{\text{ср.см}} = 108,097 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,735}$	-	0,989	-	0,886
3	ЭКГ-8И	$w_{\text{ср.см}} = 1,030 - 0,0002 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,916	-	0,839	-
		$w_{\text{ср.см}} = 75,255 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,625}$	-	0,997	-	0,933
4	ЭКГ-10	$w_{\text{ср.см}} = 0,927 - 0,00001 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,999	-	0,997	-
		$w_{\text{ср.см}} = 44,862 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,534}$	-	0,992	-	0,962
5	ЭКГ-12,5	$w_{\text{ср.см}} = 0,983 - 0,0000007 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,997	-	0,993	-
		$w_{\text{ср.см}} = 34,42 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,474}$	-	0,995	-	0,951
6	ЭКГ-15	$w_{\text{ср.см}} = 0,996 - 0,00005 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,963	-	0,927	-
		$w_{\text{ср.см}} = 10,201 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,307}$	-	0,975	-	0,936
Драглайны						
1	ЭШ-10/70	$w_{\text{ср.см}} = 1,243 - 0,0001 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,907	-	0,823	-
		$w_{\text{ср.см}} = 19,518 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,388}$	-	0,991	-	0,919
2	ЭШ-11/70	$w_{\text{ср.см}} = 1,135 - 0,000068 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,999	-	0,998	-
		$w_{\text{ср.см}} = 10,814 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,305}$	-	0,992	-	0,920
3	ЭШ-13/50	$w_{\text{ср.см}} = 1,761 - 0,0002 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,946	-	0,895	-
		$w_{\text{ср.см}} = 29,637 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,406}$	-	0,995	-	0,951
4	ЭШ-15/80	$w_{\text{ср.см}} = 1,572 - 0,00009 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,985	-	0,970	-
		$w_{\text{ср.см}} = 15,030 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,306}$	-	0,997	-	0,986
5	ЭШ-20/90	$w_{\text{ср.см}} = 1,730 - 0,00005 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,998	-	0,996	-
		$w_{\text{ср.см}} = 9,825 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,223}$	-	0,996	-	0,954
Добычные работы						
1	ЭКГ-4У	$w_{\text{ср.см}} = 1,417 - 0,0010 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,989	-	0,978	-
		$w_{\text{ср.см}} = 182,383 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,848}$	-	0,991	-	0,920
2	ЭКГ-5А	$w_{\text{ср.см}} = 0,898 - 0,0002 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,929	-	0,863	-
		$w_{\text{ср.см}} = 91,380 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,716}$	-	0,990	-	0,920
3	ЭКГ-8И	$w_{\text{ср.см}} = 0,794 - 0,00008 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,789	-	0,623	-
		$w_{\text{ср.см}} = 20,921 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,467}$	-	0,798	-	0,615
Отгрузочные работы						
1	ЭКГ-4У	$w_{\text{ср.см}} = 0,697 - 0,0002 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,998	-	0,996	-
		$w_{\text{ср.см}} = 78,732 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,727}$	-	0,858	-	0,752
2	ЭКГ-5А	$w_{\text{ср.см}} = 1,208 - 0,0005 * Q_{\text{ср.см}}$	-0,853	-	0,728	-
		$w_{\text{ср.см}} = 237,306 * Q_{\text{ср.см}}^{-0,863}$	-	0,980	-	0,819

Таблица 5 – Обобщенные энерготехнологические профили удельного электропотребления выемочно-погрузочных работ экскаваторов $w_{\text{ср.см}} = f(k_{\text{тп.ср.см}})$

№ п/п	Марка экскаватора	Энерготехнологические профили (зависимости)	Коэффициент			
			Корреляции	Индекс корреляции	Детерминации	Индекс детерминации
Вскрышные работы						
Механические лопаты						
1	ЭКГ-4У	$w_{\text{ср.см}} = 0,982 - 1,061 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,990	-	0,980	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,167 - 1,234 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,992	-	0,989
2	ЭКГ-5А	$w_{\text{ср.см}} = 1,234 - 1,868 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,895	-	0,801	-
		$w_{\text{ср.см}} = -0,024 - 1,214 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,989	-	0,883
3	ЭКГ-8И	$w_{\text{ср.см}} = 1,030 - 1,13 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,916	-	0,839	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,176 - 0,943 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,996	-	0,931
4	ЭКГ-10	$w_{\text{ср.см}} = 0,927 - 0,876 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,999	-	-0,997	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,279 - 0,741 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,995	-	0,983
5	ЭКГ-12,5	$w_{\text{ср.см}} = 0,985 - 0,791 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,991	-	0,982	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,374 - 0,738 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,995	-	0,984
6	ЭКГ-15	$w_{\text{ср.см}} = 0,987 - 0,581 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,972	-	0,945	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,547 - 0,518 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,985	-	0,952
Драглайны						
1	ЭШ-10/70	$w_{\text{ср.см}} = 1,243 - 0,482 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,907	-	0,823	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,761 - 0,838 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,991	-	0,920
2	ЭШ-11/70	$w_{\text{ср.см}} = 1,135 - 0,317 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,999	-	0,998	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,761 - 0,838 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,999	-	0,995
3	ЭШ-13/50	$w_{\text{ср.см}} = 1,767 - 1,192 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,946	-	0,895	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,767 - 1,187 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,995	-	0,951
4	ЭШ-15/80	$w_{\text{ср.см}} = 1,554 - 0,429 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,980	-	0,961	-
		$w_{\text{ср.см}} = 1,118 - 0,808 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,995	-	0,978
5	ЭШ-20/90	$w_{\text{ср.см}} = 1,73 - 0,349 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,999	-	0,998	-
		$w_{\text{ср.см}} = 1,38 - 0,727 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,987	-	0,975
Добычные работы						
1	ЭКГ-4У	$w_{\text{ср.см}} = 1,417 - 2,906 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,989	-	0,978	-
		$w_{\text{ср.см}} = -0,219 - 1,479 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,985	-	0,981
2	ЭКГ-5А	$w_{\text{ср.см}} = 0,917 - 1,02 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,950	-	0,903	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,126 - 0,891 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,998	-	0,960
3	ЭКГ-8И	$w_{\text{ср.см}} = 0,793 - 0,685 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,756	-	0,572	-
		$w_{\text{ср.см}} = 0,284 - 0,59 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,762	-	0,559
Отгрузочные работы						
1	ЭКГ-4У	$w_{\text{ср.см}} = 0,698 - 0,629 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,998	-	0,996	-
		$w_{\text{ср.см}} = -0,179 - 0,678 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,998	-	0,994
2	ЭКГ-5А	$w_{\text{ср.см}} = 1,207 - 1,867 * k_{\text{тп.ср.см}}$	-0,847	-	0,717	-
		$w_{\text{ср.см}} = -0,142 - 1,353 * \log_{10}(k_{\text{тп.ср.см}})$	-	0,977	-	0,796

определенная по средним относительным ошибкам аппроксимации, которые не превысили 10-15%, является хорошей. Проверка некоррелированности остатков ϵ и их независимость с применением критерия Дарбина-Уотсона d показала правомерность использования метода наименьших квадратов для определения обобщенных энерготехнологических профилей.

Установленные обобщенные вероятностные модели и энерготехнологические профили позволяют обеспечить аналитическое описание режимов электропотребления для повышения уровня управления электропотреблением вскрышных, добычных и отгрузочных экскаваторных работ с целью повышения энергоэффективности.

В пятой главе выполнено исследование управления потреблением электроэнергии на предприятиях угольной отрасли, включая: состояние его развития, освоение контроля над эффективностью электропотребления, организационно-информационно-аналитическое обеспечение повышения энергоэффективности.

Выполнено исследование развития технических (к.п.д., учет электроэнергии, удельное электропотребление, коэффициент мощности, паспортизация) и управленческих (энергетическая политика, организационное, мотивационное, информационное, маркетинговое и инвестиционное обеспечение) составляющих управления электропотреблением с применением метода экспертных оценок. Оценка составляющих выполнялись по качественным шкалам с пятью уровнями (рангами) развития от нулевого до четвертого. В результате получены технические и организационные профили в области управления процессом электропотребления предприятий угольной отрасли в Республике Хакасия, Красноярском и Хабаровском краях.

Полученные оценки показывают, что уровень развития как технических, так и управленческих составляющих управления электропотреблением находится в диапазоне от 1 до 3. Среди технических составляющих наименьший уровень развития ($0,93 \div 1,5$) соответствует применению к.п.д. в управлении электропотреблением, наивысший ($1,43 \div 3,06$) – удельному электропотреблению. Среди управленческих составляющих наименьший уровень развития ($1,0 \div 2,0$) соответствует мотивационному обеспечению управления электропотреблением, наивысший ($1,5 \div 3,0$) – информационному обеспечению. Как технические, так и управленческие составляющие управления процессом электропотребления имеют значительный потенциал роста, реализация которого обеспечит условия для повышения энергоэффективности.

На предприятиях угольной отрасли освоен отдельный учет, мониторинг объемов работ основных производственных процессов и расхода электроэнергии на эти работы с применением систем учета, информационных систем. Но вместе с этим практически не освоен контроль, мониторинг показателя эффективности электропотребления этих процессов – удельного расхода электроэнергии. В этом случае персонал, ведущий технологические процессы (работы), не имеет условий для оперативного анализа, управления и отчетности по эффективности электропотребления. Это в существенной мере ограничивает управление эффективностью электропотребления. Для обеспечения условий управления эффективностью электропотребления целесообразно осуществить интеграцию данных мониторинга объемов работ и расхода электроэнергии в единой информационной базе данных с целью получения информации об удельном электропотреблении и предоставления ее участникам процесса электропотребления.

С учетом недостаточного освоения контроля над эффективностью электропотребления ответственность персонала, участвующего в процессе электропотребления, идентифицируется (зачастую в основном только в финансовых показателях) только до уровня руководителей центров финансовой ответственности и редко распространяется «вниз» по организационно-производственной схеме к местам (точкам) потребления электроэнергии. В этом случае информационное обеспечение персонала, в ведении которого находятся энергопотребляющие процессы, работы (экипажи экскаваторов, мастера смен, начальники участков, комплексов), имеет недостаточный уровень и не позволяет осуществлять оперативное управление и отчетность за поддержание и повышение энергоэффективности.

Для управления эффективностью электропотребления целесообразно обеспечить аналитическое описание зависимостей удельного электропотребления от объема выполняемых работ, других технических параметров, т. е. установить энерготехнологические профили аналогичные тем, что определены в гл. 3 и 4. Указанные энерготехнологические профили должны использоваться для повышения адресности планирования, оперативного управления и отчетности за электропотребление, тем самым создавая условия по информационно-аналитическому обеспечению управления повышением эффективности электропотребления.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что в настоящее время на предприятиях угольной отрасли не в полной мере созданы условия для информационно-аналитического обеспечения управления электропотреблением с целью повышения энергоэффективности.

В шестой главе разработаны рекомендации по повышению эффективности электропотребления предприятий угольной отрасли.

Выполненное с целью повышения энергоэффективности исследование процесса электропотребления как «человеко-машинного» – эргатического процесса, позволили разработать следующие рекомендации:

1. Исследование, оценку процесса электропотребления с целью повышения энергоэффективности целесообразно выполнять с использованием разработанных в работе методических положений, учитывающих как технические, так и управленческие аспекты управления.

2. Установленные вероятностные модели, индивидуальные $W_{см} = f(Q_{см})$, $w_{см} = f(Q_{см})$ и обобщенные $w_{ср.см} = f(Q_{ср.см})$, $w_{ср.см} = f(k_{тп.ср.см})$ энерготехнологические профили следует применять для повышения уровня аналитического описания процесса электропотребления с целью адресного планирования, нормирования, оперативного управления и отчетности по обеспечению, повышению энергоэффективности выемочно-погрузочных вскрышных, добычных и отгрузочных работ.

3. Полученные оценки технических и управленческих составляющих управления процессом электропотребления целесообразно использовать при определении направлений и разработке мероприятий по развитию систем энергетического менеджмента.

4. Организационное, информационное, мотивационное обеспечение повышения энергоэффективности должно осуществляться с объединением участников процесса электропотребления на базе единой информационно-аналитической платформы с применением программно-аналитических комплексов, реализующих условия для системного управления энергетическими ресурсами.

В числе основных функций программно-аналитических комплексов должны осуществляться:

– Сбор, систематизация, преобразование, распределение среди участников процесса электропотребления энерготехнологической информации – объемов выполняемых работ, расхода электроэнергии, удельного электропотребления на эти работы.

– Моделирование энерготехнологических профилей электропотребляющих объектов – статистических зависимостей сменного удельного электропотребления от объемов выполняемых работ.

– Визуализация графиков сменных объемов выполненных работ, расхода электроэнергии, удельного электропотребления по датам месяца на дисплеях персональных компьютеров (ПК) соответствующих участников процесса электропотребления, в ведении которых находятся электропотребляющие объекты.

– Обеспечение оперативной ежесменной выдачи заданий персоналу по удельному электропотреблению в соответствии с заданными объемами работ и отчета персонала по выполнению этих заданий с учетом фактически выполненных объемов работ с использованием смоделированных энерготехнологических профилей для каждого значимого электропотребляющего объекта.

– Формирование и визуализация таблиц энерготехнологической результативности работы электропотребляющих объектов с выводом на дисплеи ПК соответствующих

участников процесса электропотребления в сменном и накопленном по сменам за месяц форматах информации о фактических объемах выполненных работ и фактическом расходе электроэнергии, а также о плановом (заданном) и фактическом удельном электропотреблении и их отклонениях.

Блок-схема программно-аналитического комплекса, реализующего приведенные выше функции с использованием существующих на предприятиях угольной отрасли информационных систем, может быть реализована в соответствии с блок-схемой, приведенной на рисунке 2.

На ряде угольных предприятий Сибирской угольной энергетической компании в соответствии с вышеизложенными рекомендациями разработаны и внедрены программно-аналитические комплексы, по управлению энергоресурсами, являющиеся составной частью систем энергетического менеджмента. На рисунке 3 приведён скриншот дисплея ПК начальника участка, отражающий энерготехнологические результаты работы экскаватора РС-3000 Восточно-Бейского разреза. На рисунке 3 отображаются два графика сменного удельного электропотребления – планового задания (в соответствии с функцией $w_{см.пл} = f(Q_{см.пл})$, которая представлена внизу слева на рисунке) и фактического, которое определяется в сервере программно-аналитического комплекса по данным из информационных систем о выполненном сменном объеме работы ($Q_{см}$) и сменном потреблении электроэнергии ($W_{см}$). Под графиком располагается таблица энерготехнологических показателей, включая как сменный, так и накопленный в течение месяца форматы. В числе показателей разность между плановым заданием по удельному электропотреблению и фактическим исполнением задания, по которой определяется результативность эффективности электропотребления.

Информация о результатах эффективности электропотребления, аналогичная представленной на рисунке 3, предоставляется всем ключевым участникам процесса электропотребления в соответствии с их уровнем в организационно-производственной структуре предприятия.

Применение вышеизложенных рекомендаций позволяет обеспечить повышение уровня управления электропотреблением с целью повышения энергоэффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнено решение актуального научного вопроса повышения эффективности процесса электропотребления предприятий, осуществляющих открытую добычу угля, заключающееся: в установлении вероятностных моделей энерготехнологических параметров, энерготехнологических профилей вскрышных, добычных, отгрузочных работ, с разработкой концептуальных принципов информационно-аналитического обеспечения повышения энергоэффективности и структуры программно-аналитического комплекса по управлению энергетическими ресурсами.

Основными результатами, полученными в диссертационной работе, являются:

1. Обоснованы концептуальные принципы и разработана методика исследования эффективности процесса электропотребления предприятий угольной отрасли, отличительной особенностью которой является учет как технических, так и управленческих аспектов повышения энергоэффективности.

2. Установлены индивидуальные (для отдельных экскаваторов) вероятностные модели в виде нормальных законов распределения вероятностей энерготехнологических параметров (объемов работ, полного электропотребления, удельного электропотребления) различных технологических схем вскрышных работ (автотранспортной, бестранспортной вскрыши, вскрыши с погрузкой в железнодорожный транспорт и приемки вскрышных пород в отвалы), а также добычных работ для практически всех применяемых типов и марок экскаваторов.

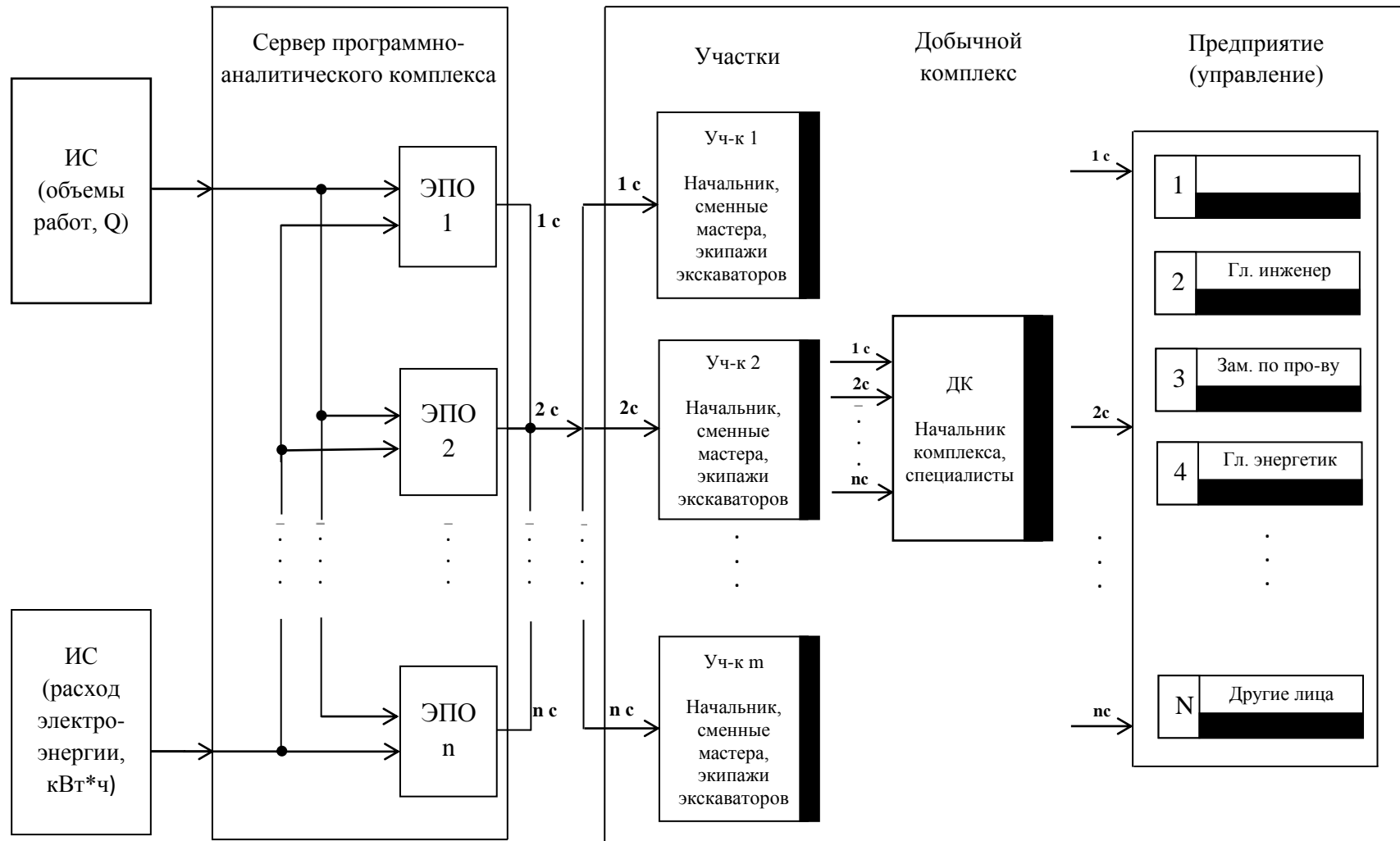


Рисунок 2 – Блок-схема программно-аналитического комплекса по управлению электропотреблением

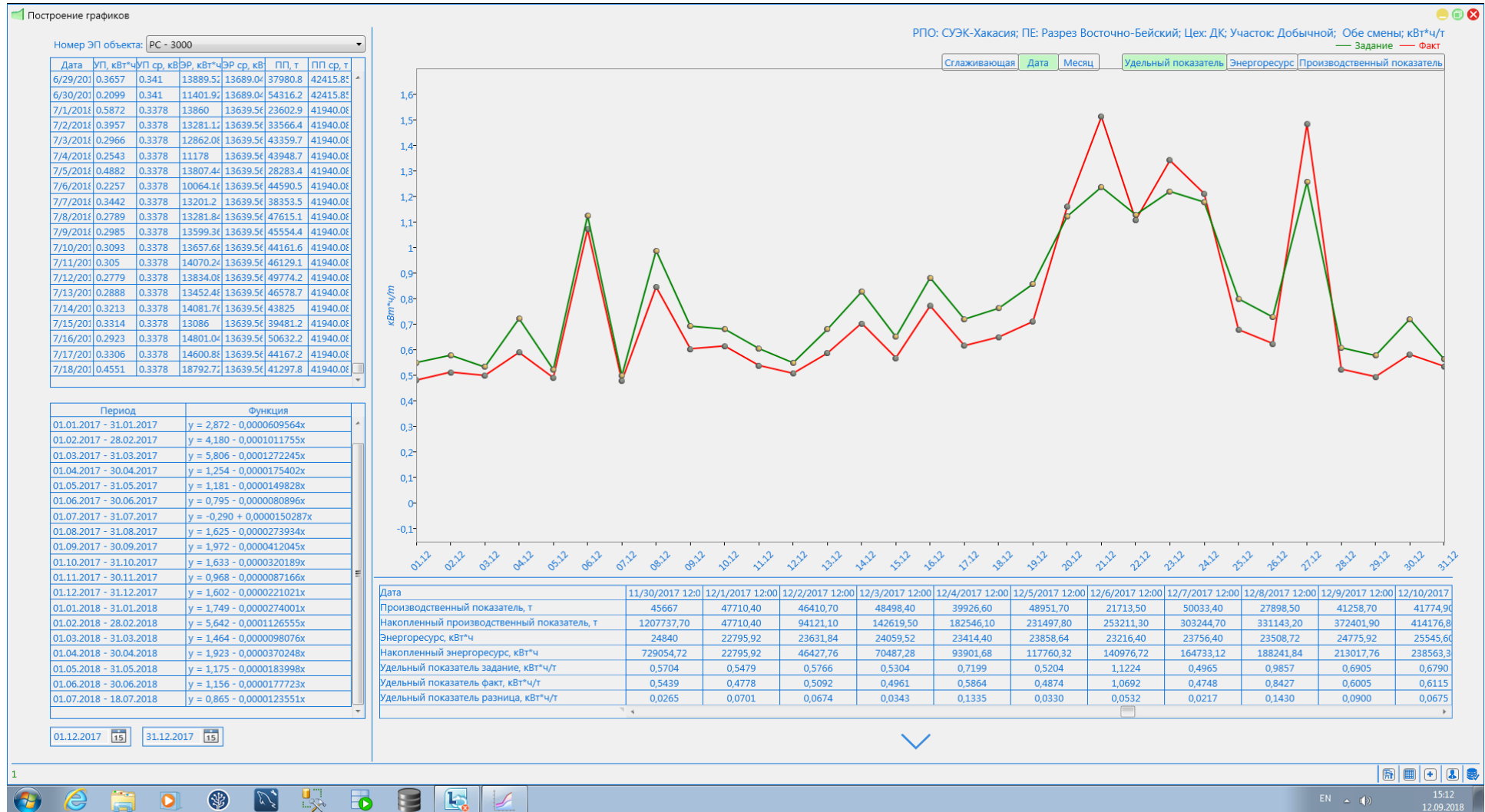


Рисунок 3 – Скриншот с дисплея ПК участника процесса электропотребления: — - заданное (плановое) значение; — - фактическое значение удельного электропотребления

3. Получены индивидуальные энерготехнологические профили в виде линейных корреляционных зависимостей полного и удельного электропотребления от объема вскрыши и добычи со статистически значимыми коэффициентами корреляции и детерминации, коэффициентами уравнений, с достаточно высокой математической точностью аппроксимации (в основном на уровне в 10%) по шкале Чеддока.

Коэффициенты эластичности энерготехнологических профилей показывают:

- при увеличении объемов вскрышных работ на 1% электропотребление экскаваторов увеличивается на $(0,55 \div 0,70)\%$, а удельное электропотребление снижается на $(0,29 \div 0,78)\%$;
- при увеличении объемов добычных работ на 1% электропотребление увеличивается на $(0,6 \div 0,7)\%$, а удельное электропотребление снижается на $(0,30 \div 0,45)\%$.

4. Установлены обобщенные (для групп экскаваторов определенного типа и марки) вероятностные модели в виде нормальных законов распределения вероятностей энерготехнологических параметров (среднесменного объема работ, коэффициента технической производительности, удельного электропотребления) вскрышных, добычных, отгрузочных работ для различных типов и марок экскаваторов.

5. Получены обобщенные энерготехнологические профили в виде корреляционных зависимостей удельного электропотребления от среднесменного объема работ и среднесменного коэффициента технической готовности. Обобщенные энерготехнологические профили описываются линейными, гиперболическими и логарифмическими уравнениями с достаточно высокой математической точностью аппроксимации (в основном на уровне в 10%) по шкале Чеддока.

6. Установленные вероятностные модели и энерготехнологические профили повышают уровень аналитического описания процесса электропотребления для управления энергоэффективностью вскрышных, добычных и отгрузочных работ.

7. Получены оценки уровней развития составляющих управления процессом энергопотребления в виде технических и организационных профилей, которые показывают, что на предприятиях угольной отрасли имеется значимый потенциал для повышения условий, обеспечивающих повышение энергоэффективности.

8. Обоснованы положения, концептуальные принципы информационно-аналитического обеспечения энергоэффективности и разработана структура программно-аналитического комплекса для управления энергетическими ресурсами, который позволяет объединить участников процесса электропотребления на базе единой информационно-аналитической платформы.

9. Результаты диссертационной работы в виде методических положений исследования эффективности процесса электропотребления, энерготехнологических профилей, оценок уровня развития составляющих управления процессом электропотребления, принципов и структуры программно-аналитических комплексов использованы на ряде предприятий Сибирской угольной энергетической компании при разработке систем энергетического менеджмента.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Петухов С.В., Ляхомский А.В., Кузнецов А.И. Энерготехнологические профили экскаваторных работ при разработке угольных месторождений. // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 6 (133). С. 30-33.

2. Петухов С.В., Ляхомский А.В. Энергоэффективность экскаваторных работ угледобывающих предприятий. // Промышленная энергетика. 2019. №1. С. 38-41.

Работы, опубликованные в других изданиях

3. Ляхомский А.В., Перфильева Е.Н., Петухов С.В. Энерготехнологические характеристики экскаваторов на открытых горных работах. // Вестник Энергоэффективности, №2, 2013 г. С. 25-29.

4. Ляхомский А.В., Перфильева Е.Н., Дьячков Н.Б., Петухов С.В., Миновский Ю.П. Интегрированная система управления энергоресурсами предприятий минерально-сырьевого комплекса. // ГИАБ №3/2014, препринт.

5. Ляхомский А.В., Петухов С.В., Коробкина Г.З., Перфильева Е.Н. Концептуальное проектирование и направления инжиниринга повышения энергоэффективности предприятий: исследования, технологии, кадры // Планирование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона. (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина) 2015. № 1. С. 139-145.

6. Ляхомский А.В. Перфильева Е.Н., Петухов С.В., Коробкина Г.З. Энергетический менеджмент – инновационный путь повышения энергоэффективности. //Материалы IX Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. (1-30 июня 2015 г., г. Пермь.), с.7-16.

7. Ляхомский А.В., Кудряшов А.П., Петухов С.В., Перфильева Е.Н. Развитие энергетического менеджмента – ключевая задача повышения энергоэффективности производства //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017 г. №39 (специальный выпуск 1). С.102-107. – М.: Издательство «Горная книга».

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты диссертации получены лично автором. Вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в том, что: в работе [1] определены статистические характеристики, вероятностные модели энерготехнологических параметров различных видов экскаваторных работ и их энерготехнологические профили; в работе [2] разработаны методические положения и установлены обобщенные профили вскрышных, добычных экскаваторных работ в виде корреляционных зависимостей среднесменного удельного электропотребления от объемов работ и коэффициента технической производительности; в работе [3] разработаны методические положения по исследованию энерготехнологических характеристик экскаваторов, установлены аналитические зависимости удельного электропотребления от объемов работ для экскаваторов различных типов и марок, выполняющих различные виды выемочно-погрузочных работ на горных предприятиях,; в работах [4-7] обоснованы концептуальные положения инновационного сценария развития энергоэффективности на предприятиях угольной отрасли, разработаны модель и блок-схема управления энергетическими ресурсами, обоснованы процедуры процесса управления энергетическими ресурсами с целью повышения энергоэффективности, определены функции программно-аналитических комплексов по управлению энергетическими ресурсами, реализованных на предприятиях, осуществляющих добычу угля.