

Государственное высшее учебное заведение
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Национальный технический университет Украины
«КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ШАХТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
СИСТЕМАХ**

Монография

**Днепропетровск
НГУ
2016**

УДК 621.311.004.14:622.012.2:622.33

ББК 31.2:33.1_в6

П42

Рекомендовано до видання вченою радою Державного ВНЗ «НГУ» як монографія (протокол № 9 від 05.07.2016).

Рецензенти:

П.І. Когут, д-р фіз.-мат. наук, проф. (Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара);

О.В. Новосельцев, чл.-кор., д-р техн. наук, провідний науковий співробітник (Інститут технічної теплофізики НАН України).

Повышение эффективности использования электроэнергии в шахтных производственных системах: монография / В.П. Розен, В.Д. Трифонов, В.В. Слесарев, Д.В. Трифонов ; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т, Киев. политех. ин-т. – Днепропетровск: НГУ, 2016. – 154 с.

ISBN 978-966-350-615-9

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований задач энергосбережения, обеспечивающие эффективность использования электроэнергии в шахтных производственных системах. Рекомендованы новые направления повышения энергоэффективности, например энергетический аудит, как способ улучшения развития производства, снижение себестоимости и повышение качества продукции. Представлен новый комплексный таксономический показатель оценки энергоэффективности угольных шахт и методика энергетического аудита, которые обеспечивают качество работы и достоверность принимаемых группой энергоаудиторов при обследовании и анализе функционирования как отдельных участков, так и шахтной производственной системы в целом.

Для специалистов в области разработки, проектирования и эксплуатации шахтных производственных систем по критерию энергопотребления, а также может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам электроэнергетических специальностей вузов.

УДК 621.311.004.14:622.012.2:622.33

ББК 31.2:33.1_в6

© В.П. Розен, В.Д. Трифонов, В.В. Слесарев,
Д.В. Трифонов, 2016

© Державний ВНЗ «НГУ», 2016

© Нац. техн. ун-т «КПІ», 2016

ISBN 978-966-350-615-9

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
Глава 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШАХТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ	7
1.1. Основные положения	7
1.2. Общие принципы и подходы повышения эффективности использования электроэнергии на угольных шахтах	9
1.3. Информационно-методическое и математическое обеспечение энергетического аудита (электрическая часть).....	15
1.3.1. Основные пути повышения уровня информационно-методического и математического обеспечения энергетического аудита	15
1.3.2. Комплексная оценка энергоемких потребителей угольных шахт.....	22
1.4. Модели и методы повышения энергоэффективности угольных шахт.....	28
1.4.1. Общие сведения	28
1.4.2. Комплексная модель угольной шахты	30
1.4.3. Экономико-математическая модель энергоэффективности подземных электрических сетей.....	36
1.4.4. Анализ моделей и методов повышения энергоэффективности угольных шахт	42
1.5. Методологические аспекты повышения эффективности методического и математического обеспечения энергетического аудита	48
1.5.1. Энергетический аудит – перспективное направление повышения энергоэффективности угольных шахт	48
1.5.2. Системно-структурный подход повышения уровня эффективности энергетического аудита	54
Глава 2. ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ БАЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА.....	58
2.1. Теоретико-информационный подход при проведении энергетического аудита угольных шахт	58
2.2. Формализация факторных взаимосвязей объекта исследования	66

2.2.1. Экспертно-статистические методы установления и отбора приоритетных информативных факторов.....	67
2.2.2. Анализ и формирование факторного пространства энергоэффективности угольных шахт	75
2.3. Типологическая классификация угольных шахт	79
2.4. Определение однородности однотипных угольных шахт по электроиспользованию	87

Глава 3. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА СТАДИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА... 96

3.1. Критерии энергоэффективности угольных шахт	96
3.2. Эффективный подход к экономии электроэнергии на угольных шахтах .	98
3.3. Разработка многокритериальной оптимизационной модели энергоэффективности угледобывающих предприятий	105
3.4. Определение оптимальных параметров добычных участков угольных шахт по критериям энергоэффективности	114

Глава 4. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГО-ЭФФЕКТИВНОСТИ ШАХТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ..... 119

4.1. Определение комплексного таксономического показателя энергоэффективности угольных шахт	119
4.2. Информационная система учета электроэнергии в шахте на основе специализированного комплекса	130
4.3. Моделирование и прогнозирование комплексного показателя энергоэффективности угольных шахт	135
4.3.1. Построение аналитической модели комплексного таксономического показателя энергоэффективности	136
4.3.2. Прогнозирование комплексного таксономического показателя энергоэффективности.....	139
4.4. Методика энергетического аудита (электрическая часть) шахтных производственных систем	145

Список литературы..... 149

ПРЕДИСЛОВИЕ

В общем комплексе проблем развития электроэнергетики Украины важное место в условиях нынешнего дефицита топливно-энергетических ресурсов занимают вопросы энергосбережения во всех отраслях промышленного производства, в том числе и на горнодобывающих предприятиях. При этом повышение эффективности использования электроэнергии является наиболее ответственным звеном в совершенствовании шахтных производственных систем (ШПС).

Существующие подходы к экономии электроэнергии на шахтах основываются на теоретических моделях, недостаточно адекватно описывающих процессы электропотребления и приводят к погрешностям в электротехнических расчетах. Вопросы экономии расхода электроэнергии зачастую решаются путем формального выполнения спускаемых “сверху” директивных указаний без достаточного учета и использования научно обоснованных и информативных показателей энергоемкости и энергобалансов технологических процессов, зависимостей режимов электропотребления от факторов горного производства.

Кроме того, они не в полной мере учитывают технологию угледобычи, связаны с ростом капитальных вложений, не снижают срок окупаемости и, что особенно важно, не всегда используют новые и перспективные направления повышения эффективности энергосбережения, например энергетический аудит (ЭА), которому в последние годы уделяется особое внимание как в Украине, так и за рубежом. Кроме того, за рубежом он является обязательным для всех предприятий как способ улучшения развития производства, снижения себестоимости и повышения качества продукции.

Однако консерватизм руководителей отдельных предприятий, недоверие к сторонним энергоаудиторам, низкий уровень технической подготовки собственного персонала, ограниченные финансовые возможности шахт создают неблагоприятные условия широкому внедрению ЭА в отрасли. Это в значительной мере сдерживает развитие позитивных изменений в угольной промышленности.

Предложенный в монографии ЭА в качестве перспективного стратегического направления повышения энергоэффективности угольных шахт учитывает сложную и неразрывную связь технологических процессов и электропотребления. Решение его задач базируется на системно-структурном анализе, составлении оптимизационных моделей с использованием таких определяющих критериев как удельное электропотребление, производительность и себестоимость функционирования добычных участков угольных шахт, которые адекватно отражают реальный процесс расхода электроэнергии и способствуют обоснованному принятию проектных и менеджерских решений по повышению энергоэффективности ШПС.

Глава 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШАХТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

1.1. Основные положения

Угольная промышленность относится к одной из энергоемких составляющих топливно-энергетического комплекса страны. Удельное электропотребление на разных шахтах составляет 15-80 кВт·ч/т и более, а в целом в Украине – одно из наивысших среди европейских стран. Затраты на электроэнергию в угольной отрасли за последние годы увеличились на 3,5 % и имеют тенденцию роста. Это непосредственно связано как со спадом и организацией производства, режимами работы технологических установок, так и необходимостью поддержания предприятий в рабочем состоянии в нынешних сложных кризисных условиях. Несмотря на это, имеются значительные возможности для экономии энергетических ресурсов, среди которых доля электроэнергии в энергосбережении составляет в среднем 25-30 % или примерно 2 % от уровня энергопотребления. Поэтому энергосбережение признано одним из приоритетных направлений повышения эффективности промышленного производства и возведено в ранг государственной политики Украины. Об этом свидетельствуют принятые в 1994 г. Верховным Советом Украины Закон «Об энергосбережении», в 1996 г. Комплексная программа энергосбережения и в 2005 г. Программа развития угольной промышленности [1-3].

В настоящее время особое внимание уделяется разработке перспективных программ энергосбережения в угольной отрасли с акцентом на повышение эффективности использования электроэнергии во всех звеньях ШПС. Последнее особенно актуально, однако невозможно без получения достоверной информации о потреблении энергоресурсов, глубокого анализа и использования научно обоснованных показателей энергоёмкости и электробаланса технологических процессов и оборудования. Решение этой задачи связано с проведением объемных комплексных исследований функционирования электрохозяйства угольных шахт, определением факторного поля, формирующего электропотребление с

учетом как их близкой структуры производства, практически однотипного оборудования, так и отличий из-за горно-геологических условий, технологии добычи угля, организации и др.. Это в свою очередь требует четкой многомерной классификации угольных шахт на группы с одинаковыми или сходными производственными условиями, в рамках которых и имеет смысл проводить анализ эффективности электроиспользования [4].

Кроме того, повышение энергоэффективности угольных шахт связано с обоснованием перспективных подходов и установлением доминирующих информативных факторов электроиспользования, необходимостью применения современных математических методов исследования (многокритериальной оптимизации, дискриминантного и кластерного анализа, теории распознавания образов, методов таксономического моделирования и др.).

В монографии это достигается с помощью перспективного подхода, и в частности, энергетического аудита, которому в последнее время отдаётся предпочтение при исследовании энергоэффективности шахтных производственных систем.. При этом выделяются его следующие основные этапы:

- формирование информационного поля;
- выделение базовых характеристик объекта исследований;
- анализ статистических междуфакторных связей;
- анализ состояния эффективности технологии исследуемого объекта;
- отчет аудиторской группы;
- рекомендации по контролю и планированию энергоэффективности;
- разработка мероприятий по экономии электроэнергии

Зарубежный опыт показывает, что в дальнейшем ЭА будет возведен в ранг важнейшего средства вскрытия резервов оптимизации режимов электропотребления и стратегического подхода к достижению эффективности использования электроэнергии во всех сферах народного хозяйства. Это, в свою очередь, требует разработки и внедрения энергетических стандартов и нормативов, методического, информационного и программного обеспечения энергетическо-

го аудита, научного обоснования комплексных показателей эффективного использования электроэнергии на базе современного математического аппарата.

В основу монографии положены результаты совместных исследований ГВУЗ «Национальный горный университет» и НТУ Украины «Киевский политехнический институт».

1.2. Общие принципы и подходы повышения энергоэффективности использования электроэнергии на угольных шахтах

Народное хозяйство Украины представляет собой сложную экономическую структуру, с различными отраслями промышленности. Потребление энергоресурсов в стране характеризуется относительно высокой энергоёмкостью и диспропорцией между энергоиспользованием и объемом выпускаемой продукции.

Энергоёмкость валового внутреннего продукта (ВВП) для Украины в настоящее время составляет 0,86 кг. условного топлива на гривну, что в 2,5 раз выше, чем в экономических развитых странах. По оценке уровня ВВП на душу населения этот показатель в Украине в 1,5 раз ниже, чем в Белоруссии и в 45 раз - чем в Японии. Потребление энергоресурсов в Украине на метр жилплощади на 60-70% больше, нежели в странах ЕС, а использование газа для отопления квадратного метра в 2-2,5 раза больше. Это связано с отсутствием в производственной среде эффективных стимулов энергоснабжения. И, как следствие, экономический эффект внедрения в 2014-15 г.г. энергосберегающих технологий в промышленности составил всего около 10 млн. грн. В тоже время известны примеры роста валового национального продукта (ВНП) и одновременного снижения энергоёмкости ВВП, что может быть достигнуто за счет рационального электропотребления [5].

Нынешняя ситуация в промышленной энергетике Украины достаточно сложная. В результате кризисного состояния экономики страны складывается тенденция к снижению эффективности использования топлива, электрической и тепловой энергии. Потребность в первичных энергоресурсах за счет собственного топлива Украина удовлетворяет менее чем на 45%. Наблюдается дина-

мика роста удельных расходов топливно-энергетических ресурсов на производство различных видов продукции. Энергетическая составляющая себестоимости продукции возросла практически по всем отраслям промышленного производства. Например, топливная составляющая в себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии (по данным за октябрь 2014г.) поднялась до 90% от общей величины, в то время как в предкризисный период (2008г.) эта величина составляла 60-65%.

Экономия электроэнергии – важнейшая проблема, которая должна решаться на всех уровнях, начиная от правительственного аппарата и включая сферу промышленности, производственных систем, энергокомпаний, коммунальных услуг и, в конечном счете – каждого человека. Она является особенно актуальной в настоящее время и встает с необычайной остротой в производственных системах при наличии дефицита мощности и тем более во время нынешнего энергетического кризиса. Необходимы меры, которые бы были обоснованы экономико-математически, осуществимы технически и приемлемы с экологической и социальной точек зрения [6].

В этих условиях необходимость выработки и реализации принципиально новой энергетической стратегии в Украине бесспорна. Наряду с разработкой программы развития отраслей топливно-энергетического комплекса, программы структурной перестройки экономики Украины, важнейшей составной частью этой стратегии является осуществление государственной политики энергосбережения, основой которой является эффективное использование энергетических ресурсов и сокращения их потерь. В Законе “Об энергосбережении” изложены основные принципы этой политики, приведен экономический механизм, даны положения о стандартизации, нормировании, экспертизе и контроле в сфере энергосбережения. Это система мер на современном этапе и в будущем, которая обеспечит повышение эффективности использования энергетических ресурсов. Основная роль при этом отводится экономии электроэнергии во всех отраслях промышленного производства. С целью реализации единой государственной политики в сфере энергосбережения создан Государственных Коми-

тет Украины по энергосбережению, разработана “Национальная программа энергосбережения”.

В угольной отрасли сосредоточен огромный производственный потенциал – сотни угледобывающих предприятий, десятки обогатительных фабрик и заводов угольного машиностроения, вспомогательные производства, относящиеся к довольно крупным потребителям энергетических ресурсов и, в частности, электрической энергии. По своему влиянию на производственный процесс этот вид энергии занимает прочное место на современных горнодобывающих предприятиях и является составной частью почти любого технологического процесса [7]. Из общего объема расходуемой в отрасли электроэнергии 74,5 % идет на добычу угля (64,8% – подземным способом, 9,7% – открытым способом), 8,2 % – на переработку (обогащение) угля и 15,8% на прочее производственное потребление. В балансе расхода топлива 86% составляют его твердые виды, 8 % – газ и 6% – топочный мазут. При подземном способе добычи электропотребление имеет следующую структуру распределения в процентах по элементам технологического процесса: выемка и доставка – 5-18; откатка – 2-10; подъем – 15-25; водоотлив – 20-40; вентиляция – 20-30; собственные нужды – 10-18; освещение общешахтное – 2-5.

В этих условиях соблюдение режима экономии электрической энергии встает с необычайной остротой при наличии дефицита мощности в системе электроснабжения и имеет решающее значение для всего народного хозяйства страны.

Наиболее часто рассматриваются такие подходы к экономии электрической энергии на шахтах: разработка новых ресурсосберегающих технологий; нормативный контроль, базирующийся на непрерывном учете удельной энергоемкости; повышение уровня информационного и методического обеспечения административных и диспетчерских служб, занимающихся управлением энергоемкими технологическими процессами [6].

Разработка новых ресурсосберегающих технологий относится к наиболее перспективным направлениям, обеспечивающим фундаментальное решение вопросов экономии энергоресурсов. При этом возможно достижение наибольшего эффекта в снижении энергоёмкости технологических процессов. В то же время использование принципиально новых технологий требует значительных капитальных вложений и не приводит к быстрой отдаче.

Налаженный нормативный контроль путем непрерывного учета удельной энергоёмкости позволяет выполнить постепенный ввод технологического объекта в заданные границы электропотребления, но из-за своей инерционности в условиях быстрой смены экономической и производственной ситуации на шахтах не обеспечивает оперативного отслеживания текущего состояния энергоёмких процессов.

В последнее время наметился особый интерес к системному подходу при повышении информационного и методического обеспечения большинства задач ЭА, и в частности, экономии электроэнергии на угольных шахтах. При этом подавляющее число исследователей отдаёт предпочтение многокритериальной оптимизации и построению факторных моделей объекта [8].

Кроме чисто технологических подходов осуществляются меры, позволяющие экономить электроэнергию при её передаче и преобразовании: повышение уровня напряжения в распределительных сетях поверхностного комплекса с 6 до 10 кВ, а в подземных – с 0,66 до 1,14 кВ, внедрение частотно-регулируемых приводов для конвейеров и вентиляторов, внедрение фильтро-компенсирующих устройств для сетей, питающих мощные тиристорные приводы и др.

При формировании технической политики в области экономии электроэнергии необходим критерий (общегосударственный и отраслевой) эффективности мероприятий. Он должен обеспечивать предельную величину капиталов- и материало- вложений, по экономии одного киловатт-часа. Очевидно, чисто стоимостной критерий рациональности устарел, поскольку не учитывает ограниченность источников энергии и материалов (медь, высококачественные стали

и др.). На угольных шахтах должен быть установлен также критерий эффективности использования электроэнергии для повышения производительности труда, учитывающий дефицит рабочей силы.

Неоднозначность путей повышения эффективности потребления электроэнергии обусловлена разнохарактерностью производственных условий, поэтому ее нельзя рассматривать в отрыве от технологического процесса. Сложная взаимосвязь технологии угледобычи и электроиспользования требует проведения как экспериментальных, так и теоретических исследований электрохозяйства угледобывающих производств с помощью современного математического аппарата.

Существует мнение, что основным рычагом проведения политики энергосбережения должен быть административный метод, включающий в себя инспекторский контроль, нормирование, проверку соблюдения норм и штраф за неэффективное использование энергоресурсов. Однако мировая практика показывает, что только таким путем решить эту сложнейшую проблему затруднительно. В условиях Украины нельзя полностью отказаться от такого метода повышения энергетической эффективности. В то же время только с помощью новых подходов к этой проблеме (применение экономико-математических методов влияния на процессы потребления энергии, длительной разъяснительной работы, обучения производственного персонала и др.) можно придать динамику этому направлению с последующим повышением энергоэффективности ШПС.

Опыт показывает, что в настоящее время на угледобывающих предприятиях целесообразно и необходимо внедрение энергетического аудита – тщательного обследования электрохозяйства, оценки энергоэффективности, выявление путей экономии электроэнергии, оказание практической помощи по внедрению энергосберегающих технологий, а также системы энергетического менеджмента. В этом случае необходима совместная работа энергетической и технологической службы [9, 10].

В связи с этим при Государственном Комитете Украины по энергосбережению создана центральная группа энергетического аудита, которая предусматривает подготовку и внедрение стандартов, нормативных документов, программ по энергосбережению и решение многих других организационных вопросов общегосударственного уровня. Это в свою очередь требует разработки методических материалов и соответствующего программного обеспечения [11, 12]:

- методики проведения ЭА у потребителей и анализа энергоснабжающих проектов;
- методики прогнозирования спроса на электрическую энергию;
- определения информативных параметров, описывающих состояния функционирования электрохозяйства предприятия;
- методики управления текущими параметрами нормального и нормально-дефицитного режима электроиспользования;
- стандартов по определению балансов электропотребления горных предприятий;
- автоматизированное рабочее место (АРМ) для выполнения проектного анализа, включающее сервисное программное обеспечение, пакет прикладных программ по проектному анализу и пакет программ для задач управления в реальном масштабе времени.

Повышая эффективность электроиспользования с помощью ЭА, потребитель может сэкономить ощутимые средства, а следовательно, повысить свою конкурентоспособность. В нем заложен как минимум 10 % -й потенциал энергосбережения. Оптимистическая же оценка потенциала в Украине находится в пределах 20-25 % [2,3].

Анализ показывает, что процессу эффективного использования энергоресурсов уже положено начало силами энтузиастов, как правило, среднего звена инженерных работников, а также инициативно создаваемыми группами инженерных центров по энергосбережению отраслевого уровня. В частности, впервые авторами в составе исследовательских групп (проф. Слесарева В.В.,

проф. Шкрабца Ф.П., доц. Чирвы В.Х., доц. Трифонова Д.В.) Национального горного университета Украины под руководством проф. Г.Г. Пивняка и (проф. Розена В.П., доцентов Соловья А.И., Находова В.Ф.) НТУ Украины “КПИ” под руководством проф. А.В.Праховника в 1997-2002 и 2008-2012 г.г. проведен ЭА электрохозяйства ряда угольных шахт ПАО ДТЭК “Павлоградуголь” [13-15].

В результате выполненных исследований построены комплексные модели угольных шахт, разработаны основные подходы к экономии электроэнергии на угольных шахтах Западного Донбаса, внедрены специализированные вычислительные комплексы серии СМ 1810.42 (шахта “Благодатная”), позволяющие решить вопросы информационного обеспечения и управления энергоёмкими технологическими процессами всей шахты [15].

1.3. Информационно-методическое и математическое обеспечение энергетического аудита (электрическая часть)

1.3.1. Основные пути повышения уровня информационно-методического и математического обеспечения энергетического аудита

Тщательное обследование и описание электрохозяйства современных ШПС требуют научно обоснованного поиска большого количества весьма разнообразных информативных факторов и показателей (технологических, энергетических, организационно-экономических и др.), многие из которых являются случайными величинами. Поэтому информационное обеспечение (получение объективной и достаточно полной информации о функционировании объекта управления) с учетом всего многообразия производственных условий, является важнейшей составляющей энергетического аудита и оказывает существенное влияние при повышении энергоэффективности ШПС.

Все информативные факторы могут быть сведены в следующие группы: контролируемые и управляемые, контролируемые и неуправляемые, неконтролируемые и неуправляемые, под воздействием которых формируется факторное пространство электропотребления угольных шахт. При этом сбор исходной информации и определение границ множества производственных условий, отражающих качественную и количественную характеристику функционирования

электрохозяйства, отыскание обобщенного подхода при построении и оценке энергоэффективности по технологическим факторам и базовым электрическим показателям, повышение уровня методического и информационного обеспечения ЭА

имеет первостепенное значение.

Осуществление контроля и управления энергосбережением ШПС на основе имеющегося методического обеспечения без его основательной переработки практически невозможно, поскольку оно ориентировано на применение упрощенных аналитических и эмпирических зависимостей, рассчитанных на одни и те же, независимо от условий, исходные данные. Поэтому целесообразно применение экспериментально-аналитического подхода.

С учетом этого ниже сформулированы основные пути повышения уровня информационно-методического и математического обеспечения ЭА объекта исследования [15]:

- теоретическое обоснование методологических положений ЭАи мониторинга эффективности электропотребления ШПС с помощью современных методов исследования, моделирования, оптимизации и прогнозирования;
- обоснование и определение информативных признаков и показателей энергоэффективности с помощью факторного анализа;
- проведение типологической классификации ШПС методом ранговой корреляции и дискриминантного анализа;
- установление однородности типовых групп угольных шахт по электроиспользованию методом кластерного анализа;
- построение математических регрессионных моделей и их оптимизация по критериям: удельного электропотребления, производительности и себестоимости добычных участков угольных лав;
- построение и прогнозирование комплексного показателя энергоэффективности ШПС с помощью аналитического и многофакторного анализа, методов классификации и анализа временных рядов;

- обеспечение надежного функционирования АРМ энергетика исследуемого объекта;
- разработка методики проведения ЭА угольных шахт с учетом специфических особенностей функционирования производства во времени и пространстве.

Реализация приведенных путей возможна на базе современного математического аппарата. При этом особое место занимает исходная информация об объекте исследования. Как правило, она характеризуется определенным пространством признаков, влияющих на эффективность электропотребления. В зависимости от поставленной цели могут быть выбраны разные признаковые пространства или области в них, в результате чего иногда при распознавании образов (объектов) одна и та же пара объектов оказывается отнесенной как к одному и тому же, так и к разным классам (группам). Поэтому к качеству исходной совокупности данных и группировке информативных признаков предъявляются жесткие требования [16].

Формальной процедуры задания исходной системы признаков пока не существует. Признаки, используемые при решении тех или иных задач, задаются лишь на основании опыта и интуиции специалиста. Чрезмерно большой объем информации может привести к тому, что степень представительности выборки окажется обратно пропорциональна размерности пространства факторов (признаков), что в конечном счете может не только не улучшить, но и даже ухудшить качество желаемого результата. Идеальным было бы не отыскание “информативного набора факторов”, а “полное описание” объектов, пригодное для любого варианта их классификации. Однако этого достичь невозможно, поскольку количество свойств любого доступного для исследования объекта или явления бесконечно.

Кроме того, выбор даже конечной, но избыточной для данной задачи системы описания не оправдан и противоречит естественному требованию минимума затрат [17]. Поэтому вопрос о представительности выборки для оценки информативности системы в задачах ЭА является чрезвычайно важным и реша-

ется методом аналитической группировки совокупности данных наблюдений с учётом статистических связей между ними. Характерной особенностью такой группировки является установление таких связей посредством числа получаемых групп угольных шахт с последующей проверкой их на однородность. При этом необходимо учитывать наполненность групп – главное условие аналитической группировки, выполнение которого зависит от объёма совокупности, характера варьирования факторов и от того, на сколько групп разбивается статистическая совокупность. Это особенно важно в условиях ограниченного объёма совокупности угольных шахт Западного Донбасса, когда такая группировка может не дать достаточной наполненности всех выделяемых групп объектов управления.

До недавнего времени подобных исследований не проводилось, поскольку это связано с выполнением трудоемких процедур, опирающихся на проверку статистических гипотез. Однако применение дискриминантного анализа, метода главных компонент и факторного анализа значительно облегчают разбиение всей совокупности исходных данных на однотипные и однородные подмножества (классы) угольных шахт, выявление сходства между ними, что значительно упрощает классификацию в целом. При этом во всех случаях оценка информативности признаков должна выполняться на основе теоретико-информационного подхода к решению задач типовой классификации и диагностики угольных шахт с использованием мер статистической связи между факторами – характеристиками некоторых свойств групп объектов (шахт) [18].

Для оценки полезности информативных параметров угольных шахт может служить среднее значение евклидова расстояния между математическими ожиданиями всех пар сочетаний образов [19]:

$$e_{cp} = \frac{\sum_{i,j=1, i \neq j}^k e_{ij}}{C_k^2}, \quad (1.1.)$$

где e_{ij} – евклидово расстояние между математическими ожиданиями i -го и j -го образов.

Для упрощения расчетов при качественно-количественном описании состояния электрохозяйства ШПС следует полагать, что все информативные факторы – категоризированные переменные, причем измеренные по номинальной шкале с указанием лишь градации признака X данного объекта, т.е. отнесения объекта к одному из классов по данному признаку. Градации номинальной шкалы должны быть образованы так, чтобы различия внутри классов были малы, а между классами – велики, при этом классы не должны перекрывать друг друга. Номинальные шкалы могут быть построены как для качественных, так и для количественных признаков. Они обладают только свойствами симметричности и транзитивности, что весьма важно при организации информационного обеспечения задач энергетического аудита. Симметричность означает, что отношения, существующие между градациями $X1$ и $X2$, имеют место и между $X2$ и $X1$; транзитивность – что если для отношения $RX1 = RX2$ и $RX2 = RX3$, то $RX1 = RX3$, то есть необходимо рассматривать все информативные признаки как качественные неупорядоченные, а информативность признака оценивать через количество информации по Шеннону [20].

Режимы электропотребления угольных шахт характеризуются большим разнообразием информативных признаков различного характера, которые в реальных условиях тем или иным образом измерены. Они формируют признаковое пространство, изучение структуры которого имеет практическое значение, поскольку влияет непосредственно на постановку задачи, выбор алгоритма классификации угольных шахт и др. Важную роль играет установление взаимосвязей и набора существенных признаков, которые позволили бы осуществить построение требуемой классификации без существенной потери информации.

Возможны два подхода к решению такой задачи. Первый базируется на так называемой группировке взаимокоррелированных признаков, когда, например, матрица связей преобразуется к блочно-диагональному виду, а затем из каждого блока (группы признаков) выбирается один признак, образующий в сочетании с подобными представителями других групп совокупность существенных признаков.

Особенность такого подхода – признаки, отбираемые как существенные, никак не преобразуются, а сохраняются в своем первоначальном виде (при отборе признаков нельзя действовать исходя исключительно из формальных критериев). В ряде случаев необходимо сохранить признак в пространстве описаний по содержательным соображениям, поскольку информативность признака, вообще говоря, относительна и зависит от целей исследования энергетического аудита.

По второму подходу, выбор и оценка существенности происходит не отдельных признаков, а “информативных по совокупности” с помощью факторного анализа, метода главных компонент и др. При этом оценку информативности признаков необходимо выполнять с позиций достаточности и необходимости некоторой их совокупности. Проверка набора признаков на необходимость имеет смысл для сокращения их числа, т.е. выделения существенных признаков, а на достаточность – это распознавание образов без учителя при условии, что классификация известна [19,21].

Кроме того, с учётом методологии системно-структурного анализа, нахождение разнородных информативных признаков и показателей и влияние каждого из них на режим электропотребления целесообразно производить не только дифференцированно, но и совместно, что значительно повысит точность классификации угольных шахт по критериям однотипности и однородности.

Математическое обеспечение энергетического аудита ШПС представлено на рис.1.1.

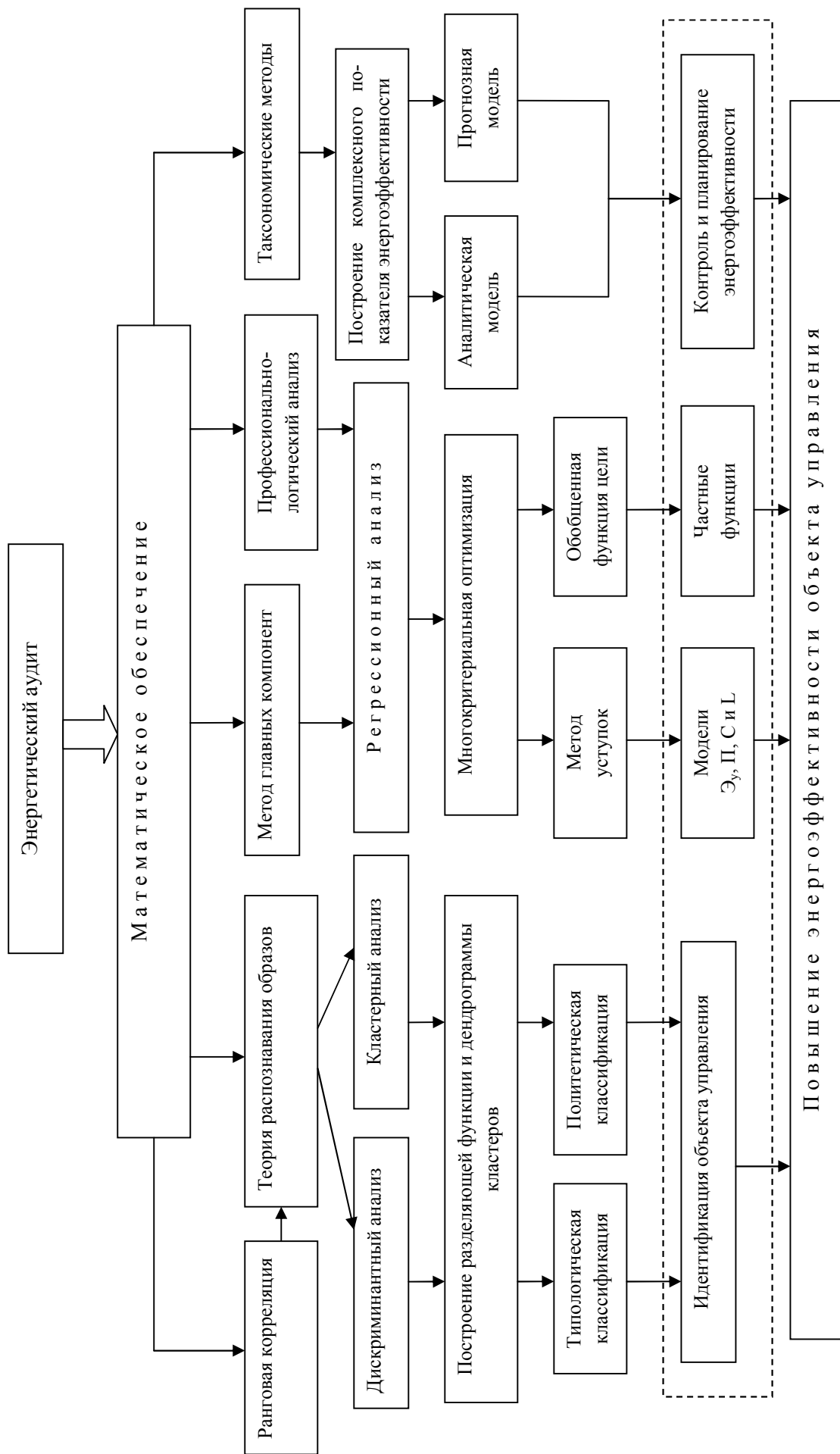


Рис.1.1. Структурная схема математического обеспечения энергетического аудита

1.3.2. Комплексная оценка энергоёмких потребителей угольных шахт

Горнодобывающие предприятия относятся к многомерным объектам, электропотребление которых представляет собой сложный и динамичный процесс, определяемый набором разнообразных информативных факторов и показателей. Это предъявляет повышенные требования к качеству анализа характеристик электропотребления, обеспечение которого связано с использованием комплексного подхода, учётом достаточно существенных показателей функционирования электрохозяйства, с оценкой энергоэффективности новыми методами. В связи с этим необходим критерий качества, т.е. некоторое математическое выражение, описывающее исследуемый объект управления. Причём количественная характеристика должна определяться некоторыми базовыми показателями качества, которые могут быть получены экспериментальным, расчётным и другими способами.

Под базовыми понимают реальную совокупность значений единичных показателей качественного анализа, принятых за исходные при сравнительных оценках электропотребления объекта управления. Традиционный подход, при котором для всей совокупности объектов–данных строится единая, общая функция регрессии, для оценки энергоэффективности угольных шахт даже при самых благоприятных условиях оказывается неэффективным [13].

Анализ показывает, что при комплексной оценке энергоэффективности угольных шахт весьма полезным и результативным оказывается корреляционный анализ в системе энергоёмких потребителей [14]. При этом, успешное решение задачи ЭА по ресурсосбережению зависит от полноты информации о состоянии энергоёмких технологических агрегатов для оценки которого требуются совместное рассмотрение как технологических, так и электрических показателей. Однако использование большого количества исходных данных увеличивает объем задачи и затрудняет оперативные расчеты. Ниже рассмотрено качественное и количественное описание совокупности технологических и электрических показателей для условий схемы электроснабжения угольной шахты. Для

уменьшения количества разнородной информации принята комплексная оценка энергоёмких потребителей угольных шахт на основе корреляционного анализа.

Выполним анализ собранных в ходе проведения обследований статистических данных по шахтам Западного Донбасса. В соответствии с известным методом качественные описания совокупности показателей возможно при наличии критической оценки статистических данных, однородности исследуемой совокупности и вариации признака [13].

Состав исходной совокупности основных технологических и электрических показателей является гетерогенным, т.е. содержит разнотипные физические единицы. Однако все показатели характеризуют энергоёмкие потребители шахты, поэтому можно принять гипотезу об однородности исследуемой совокупности данных. Поскольку для шахты характерно большое количество факторов, влияющих на электропотребление, поэтому при комплексной оценке энергоёмких потребителей сформированы три группы показателей, используемых для анализа [14].

В группу I вошли :

- средняя глубина залегания пластов;
- объем добычи;
- объем выдаваемой породы;
- количество подготовительных забоев;
- величина водопритока;
- объем проведения подготовительных работ;
- динамическая мощность пласта;
- газоносность;
- численность персонала;
- глубина залегания разрабатываемых пластов;
- количество одновременно разрабатываемых пластов;
- крепость боковых пород.

В группе II сосредоточены данные по расходу электроэнергии и удельным мощностям:

- расход электроэнергии вентиляторами главного проветривания;
- расход электроэнергии на угольный подъем;
- расход электроэнергии на породный подъем;
- расход электроэнергии на вспомогательный подъем;
- установленная мощность используемого оборудования;
- мощность потребителей-регуляторов;
- удельный расход электроэнергии.

Учет режимов работы технологического оборудования производился показателями группы III:

- среднее значение расхода активной энергии;
- среднее значение расхода реактивной энергии;
- дисперсия расхода активной энергии;
- дисперсия расхода реактивной энергии;
- среднее квадратическое отклонение расхода активной энергии;
- среднее квадратическое отклонение расхода реактивной энергии;
- коэффициент формы графика активной нагрузки;
- коэффициент формы графика реактивной нагрузки;
- коэффициент максимума активной нагрузки;
- коэффициент максимума реактивной нагрузки;
- коэффициент заполнения графика активной нагрузки;
- коэффициент заполнения графика реактивной нагрузки;
- коэффициент неравномерности графика активной нагрузки;
- коэффициент неравномерности графика реактивной нагрузки.

Для дальнейшего анализа сформированы три совокупности показателей:

первая совокупность состоит из показателей группы I;

вторая совокупность – группа I плюс группа II;

третья совокупность — группа I плюс группа II плюс группа III.

Таким образом, получены три статистических совокупности, содержащие 12, 19 и 33 разнородных показателя. Обязательное условие для их анализа заключается в наличии вариации признака т.е. в количественном изменении параметра у единиц совокупности. Коэффициенты вариации по приведенным показателям не превышают 100 %, что подтверждает гипотезу об однородности исследуемых данных [14].

Качественный анализ основывается на выявлении связей между анализируемыми показателями и оценки степени их воздействия на электропотребление. Степень связи между исследуемыми показателями оценивается коэффициентом корреляции. Для исключения ложных корреляционных связей соблюдены следующие условия: данные распределены по нормальному закону; динамические ряды не имеют ярко выраженных тенденций; ряды построены на однородных данных; из обрабатываемых рядов исключены аномальные значения.

Количественная оценка коэффициента корреляции между каждой парой анализируемых показателей определена согласно [13]. Матрица (половина корреляционной матрицы, поскольку она квадратная и симметричная) коэффициентов корреляции для первой совокупности показателей приведена в табл.1.1, из которой видно, что технологические показатели, взятые обособленно, слабокоррелированные величины. Наличие связи отмечается только между объемом добычи и численностью персонала, количеством выдаваемой породы и объемом проведения подготовительных работ, а также между глубинами, на которых ведутся очистные работы.

Условные результаты расчета парных корреляций для второй и третьей совокупностей показаны на рис.1.2, нумерация параметров, используемых для анализа, соответствует их положению в приведенных выше списках групп параметров. Цифрами показаны номер поля (числитель) и количество коэффициентов корреляции со значением больше 0,7 (знаменатель).

Таблица 1.1

Матрица коэффициентов корреляции

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0,42	-0,3	-0,1	-0,6	-0,6	-0,14	0,4	0,27	0,94	-0,4	-0,55
2		1	0,4	0,43	0,1	0,31	0,36	0,6	0,9	0,42	0,1	-0,55
3			1	0,34	0,61	0,78	0,18	0,6	0,44	-0,2	0,62	0,08
4				1	0,23	0,27	0,59	0,1	0,51	-0,3	0,16	-0,12
5					1	0,43	-0,1	0,1	0,13	-0,5	0,31	0,66
6						1	0,52	0,2	0,41	-0,4	0,5	0,08
7							1	0,2	0,44	-0,2	0,19	-0,3
8								1	0,58	0,46	0,33	-0,4
9									1	0,31	0,03	-0,3
10										1	-0,42	-0,5
11											1	0,01
12												1

На рис.1.2 зоны 1,3 и 6 отражают степень взаимосвязи анализируемых параметров внутри каждой группы, причем группа технологических параметров характеризуется низкой взаимозависимостью. У групп II и III тесная взаимосвязь между половиной параметров, что свидетельствует о возможности сокращения этих групп в 2 раза по количеству анализируемых параметров.

Зона 2 показывает связь между технологическими параметрами и значениями расхода электроэнергии. При этом зафиксировано 19 значимых коэффициентов корреляции. Выделяются два основных технологических показателя, существенно влияющих на процесс электропотребления, – объем добычи и глубина залегания разрабатываемых пластов. К дополнительным факторам можно отнести расход электроэнергии, которые может использоваться для контроля процесса электропотребления. По характеристикам графиков потребления активной и реактивной энергии, которые также целесообразно использовать для контроля, определены дисперсии их расхода.

В зоне 5 матрицы получено относительно небольшое количество значимых коэффициентов корреляции. Это фиксирует степень связи между расходом электроэнергии и графиками электропотребления. Здесь представляет интерес

выявленная взаимосвязь между удельным расходом электроэнергии и таким параметром, как дисперсия расхода активной энергии.

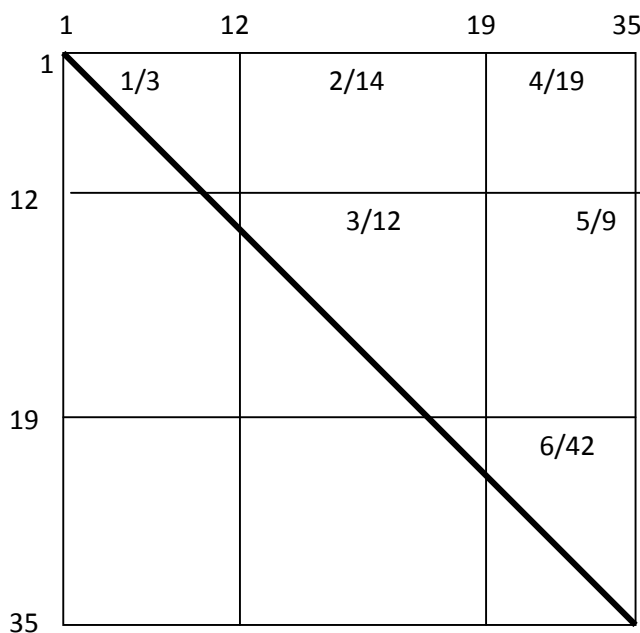


Рис.1.2. Условное представление корреляционной матрицы по исследуемым параметрам

Таким образом, по результатам корреляционного анализа для комплексной оценки энергоемких потребителей угольной шахты установлено, что основными технологическими параметрами, оказывающими решающее влияние на энергоемкость добычи, являются объем выемки и глубина, на которой разрабатывают пласт. Второстепенную роль играют газообильность и водоприток. Не всегда наличие многочисленных данных, содержащихся в статистической отчетности, различных плановых и технических документах является исчерпывающей информацией. В зависимости от природы решаемой проблемы и конкретных условий, кроме собранных статистических величин, информация должна включать значимые как технологические, так и энергетические показатели, используя которые можно осуществить контроль и управление энергоэффективностью. Это в свою очередь требует проведения экспериментальных исследований, и в частности, снятия графиков электрических нагрузок угольных шахт для опреде-

ления базовых электрических показателей и производных от них коэффициентов. Полученные при этом значительные количества информативных факторов, влияющих на режи электропотребления, сокращается с помощью метода главных компонент, а построенные на этой основе математические модели могут быть использованны для оперативно-диспетчерского управления.

1.4 Модели и методы повышения энергоэффективности

угольных шахт

1.4.1 Общие сведения

Разработка проекта любого промышленного объекта, в том числе и угледобывающих предприятий, до стадии рабочей документации занимает длительное время. Электротехнические подразделения проектных организаций принимают основные решения по проектированию электрохозяйства ШПС еще до того, как от технологов получены данные по количеству, размещению и мощности отдельных приемников электроэнергии и др. Это осложняется наличием большого числа электропотребителей на угольных шахтах, что обуславливает принципиальную невозможность получения проектировщиком к началу проектирования точных данных о мощностях, режимах работы отдельных электроприемников (ЭП).

Кроме того, влияние технологических параметров на режимы электропотребления, имеющих сложный и многообразный характер, еще больше усугубляет эту проблему. Поэтому для принятия решений необходимо использовать не только аналоги, предопределяющие существование классификации предприятий с позиции функционирования их электрохозяйства, но и теоретических моделей, адекватных исследуемым процессам. При этом ответственным этапом исследования является параметрическая идентификация математических моделей объектов и процессов [16].

Повышение энергоэффективности угольных шахт связано с максимальной экономией всех видов ресурсов и, в первую очередь, энергетических. В этом случае предусматривается снижение потерь электроэнергии в сетях и улучшение её качества в точках потребления. Резервы экономии энергетических ресурсов имеются практически во всех звеньях технологического процесса ШПС. При этом выделяют такие экономически целесообразные пути:

- технологический, направленный на усовершенствование технологического процесса, улучшения режимов работы ЭП, использование машин, оборудования устройств с более высокими показателями;
- снижение потерь в подземных электрических сетях до экономически целесообразных границ.

В последнее время особое внимание уделяется оптимизации потерь электроэнергии в подземных кабельных сетях 6 кВ путем компенсации реактивной мощности (КРМ) до определенных экономически целесообразных границ, устанавливаемых оптимизацией этих потерь [22]. Это требует построения экономико-математической модели распределения конденсаторных устройств (КУ) в этих сетях и разработки алгоритма имитационной модели нагрузки подземных распределительных пунктов (РП), центральных подземных подстанций (ЦПП) и параметров распределительной сети.

Анализ показывает, что практически все задачи ЭА, связанные с повышением энергоэффективности ШПС, требуют специальных методов математического моделирования, адекватно описывающих системой показателей состояния электрохозяйства угольной шахты. При этом для обеспечения достаточной степени точности применяют общесистемные и системные модели функционирования. Они служат для теоретических исследований и весьма полезны, поскольку выявляют общие закономерности, присущие широкому классу производственных систем. Часто пользуются так называемыми конструктивными моделями, которые являются хотя и менее общими, но позволяющими производить конкретные вычисления. Эти модели, в сущности, представляют

собой алгоритмы, пользуясь которыми можно определить значения одних переменных, характеризующих данную систему, по заданным или измеренным значениям других переменных. Они формируются поэтапно, следуя системотехнической цепочке из системных моделей преобразований “общесистемная модель - системная модель - конструктивная модель” и, как правило, оказываются качественными в смысле адекватности реальным процессам функционирования производственной системы. Считают, что такой истинно системотехнический подход является более обоснованным, чем априорное задание конструктивной модели исследователем, использующим для этого лишь свою интуицию и субъективные представления о возможностях тех или иных математических схем [23].

1.4.2 Комплексная модель угольной шахты

Одним из наиболее эффективных приемов математического моделирования при использовании ЭА, и в частности, при рассмотрении функционирования электрохозяйства угольных шахт во взаимосвязи с технологическими процессами участков является построение динамических оптимизационных моделей. Многообразие протекающих процессов в горных объектах представляет собой широкий спектр описаний взаимосвязи электрохозяйства с технологией угледобычи то есть описаний элементов оптимизационных моделей. В этих условиях целесообразно выделить модели энергоемких технологических процессов, управления и планирования, а также энергопотребления. Все они должны включать расчетные процедуры, обеспечивающие определение состояния элементов системы горных процессов с учетом их энергопотребления и управляющих воздействий[23].

В основу построения комплексной модели энергоемких технологических процессов угольной шахты (ЭТПШ) положены сформулированные выше три группы разнородных информативных показателей, характеризующих угледобычу, электропотребление (расход электроэнергии) и режимы работы технологического оборудования.

С учетом этого комплексная модель ЭТПШ запишется в виде [21]:

$$M(T) = \left\{ \bigcup_{i=1}^a M_i \right\}, \quad (1.2)$$

где T – линейно упорядоченное множество моментов времени;

M_i – подмодели процессов.

В нашем случае M_1, M_2, M_3 как подмодели энергоемких технологических процессов, энергопотребления, управления и планирования. Детерминирование динамического моделирования можно реализовать в два этапа. На первом этапе рассмотрим постановку задачи в общем виде. При этом формулируется следующим образом: необходимо найти такие значения независимых управляемых переменных x''_1, \dots, x''_s для каждого расчетного интервала, которые обеспечивали бы

$$\min \sum_{k=1}^s F_k(x'_k, x''_k, W_k) \Delta t_k, \quad (1.3)$$

при ограничениях

$$A_{ik}(x'_k, x''_k, W_k) = 0, \quad i \in I_1, \quad k = 1, \dots, s; \quad (1.4)$$

$$A_{ik}(x'_k, x''_k, W_k) \leq 0, \quad i \in I_2, \quad k = 1, \dots, s; \quad (1.5)$$

$$\sum_{k=1}^s B_{ik}(x'_k, x''_k, W_k) \Delta t_k - L_i = 0, \quad i \in I_3; \quad (1.6)$$

$$\sum_{k=1}^s B_{ik}(x'_k, x''_k, W_k) \Delta t_k - L_i \leq 0, \quad i \in I_4; \quad (1.7)$$

$$x_{ik} = D_{ik}(x'_k, W_k), \quad i \in I_5, \quad k = 1, \dots, s; \quad (1.8)$$

$$x_{i\hat{e}} = D_{i\hat{e}}(x'_1, \dots, x'_k, W_k, \dots, W_k), \quad i \in I_6, \quad k = 1, \dots, s; \quad (1.9)$$

$$C_{ik}^{\min}(W_k) \leq C_{ik}^{\max}(W_k), \quad i \in I_7, \quad k = 1, \dots, s; \quad (1.10)$$

где k – индекс интервала времени; F_k – целевая функция; x'_k, x''_k, W_k – векторы значений зависимых, управляемых и неуправляемых параметров k -го интервала; L_i – заданные величины, являющиеся компонентами вектора неуправляемых параметров; Δt_k – длительность k -го интервала; $A_{ik}, B_{ik}, D_{ik},$

$C_{ik}^{\min}, C_{ik}^{\max}$ – функции ограничений; I_1, \dots, I_7 – множество индексов; s – количество расчетных интервалов.

Входной вектор модели будет иметь вид:

$$X = \{X', X'', W\}. \quad (1.11)$$

Для условий моделирования энергоемких технологических процессов ШПС отдельные компоненты вектора x могут интерпретироваться следующим образом. В качестве независимых управляемых параметров выступают производительности отдельных участков шахты по горной массе. Тогда зависимыми управляемыми параметрами будет расход электроэнергии на технологические нужды, неуправляемыми – качественные характеристики угля, а также характеристические переменные технологических процессов шахты – минимальные и максимальные производительности оборудования, длина выработок и т.п.

На втором этапе определения системы математических моделей необходимо найти содержание подмоделей M_1, M_2 и M_3 . Подмодель M_1 обеспечивает формализацию основных энергоемких технологических процессов. Представим детерминированный вариант этой подмодели в виде [24]:

$$\sum_{k=1}^s a_j(t) \Delta t = g_j; \quad (1.12)$$

$$\sum_{k=1}^s Y_j(t) \Delta t = Q; \quad (1.13)$$

$$\left[\sum_{l=0}^{L_d} \sum_{k=1}^s Z_j^l(t) a_j(t) \Delta L \Delta t \right] / Q \leq Z_j^l; \quad j=1, \dots, N1; \quad (1.14)$$

$$Y_j^{\min} \leq Y_j \leq Y_j^{\max}; \quad (1.15)$$

$$Y_h^{\min} \leq Y_h \leq Y_h^{\max}; \quad h=1, \dots, N2; \quad (1.16)$$

$$\sum_{k=1}^s P_1(t) + \sum_{k=1}^s P_2(t) \leq \sum_{k=1}^s P_3(t) + \sum_{k=1}^s P_4(t), \quad (1.17)$$

$$\sum_{k=1}^s P_3(t) + \sum_{k=1}^s P_4(t) \leq \sum_{k=1}^s P_5(t), \quad (1.18)$$

где j – индекс добычного участка; L – пространственная характеристика добычного участка, м; a_j – производительность участка во времени k , созданного в момент $\tau, t/ч$; Y – задание участка по добыче, т; Q – план добычи по шахте, т; Z_j^j – ф-й качественный показатель угля, добываемого из j -го участка; Z^j – ограничения на ф-й качественный показатель угля по шахте в целом; γ – характеристическая переменная технологического процесса, имеющая двусторонние ограничения; $N1$ – количество используемых в расчете качественных показателей угля, подчиняющихся свойству аддитивности; $N2$ – количество характеристических переменных технологического процесса, используемых в расчетах; $P1, P2, P3, P4, P5$ – материальные потоки углей из очистных забоев, подготовительных забоев, конвейерного транспорта, локомотивного транспорта и подъема соответственно, т.

Для подмодели $M2$ в качестве основных энергоемких технологических процессов шахтных производственных систем рассматриваем добычу и транспортирование горной массы, подъем и водоотлив. Эти процессы выбраны из-за их сильной связи между собой, взаимообусловленности и возможности использования в качестве потребителей-регуляторов электрической энергии. В нашем случае $M2$ записываем так:

$$U_{TL} = \sum_{k=1}^s \left(\mathbf{e}_{11} + \sum_{j=2}^{P'_1} \mathbf{e}_{1j} a_j(k) \right) \Delta t \quad (1.19)$$

$$U_{Tk} = \sum_{k=1}^s \left(\mathbf{e}_{21} + \sum_{j=2}^{L_w} \mathbf{e}_{2j} a^j(k) + \sum_{j=P+1}^{P''_2} \mathbf{e}_{2j} L_w^j \right) \Delta t \quad ; \quad (1.20)$$

$$U_p = \sum_{k=1}^s \left(\mathbf{e}_{31} + \sum_{j=2}^{P'_3} \mathbf{e}_{3j} a^j(k) + \sum_{j=P'_3+1}^{P''_3} \mathbf{e}_{3j} H^j \right) \Delta t \quad ; \quad (1.21)$$

$$U_w = \sum_{k=1}^s \left(\mathbf{e}_{41} + \sum_{j=2}^{P'_4} \mathbf{e}_{4j} Q_w^j + \sum_{j=P'_4+1}^{P''_4} \mathbf{e}_{4j} H^j \right) \Delta t \quad ; \quad (1.22)$$

$$\mathfrak{U}_k = U_{TL} + U_{Tk} + U_p + U_w + U_A \quad , \quad (1.23)$$

где \hat{U}_k – расчетный график потребления электроэнергии, кВт·ч; $E = \{e_{ij}\}$ – матрица коэффициентов аппроксимирующих уравнений; $U_{TL}, U_{TK}, U_P, U_W, U_A$ – расход электроэнергии на забойное оборудование и транспортирование горной массы локомотивным транспортом, забойное оборудование и транспортирование конвейерным транспортом, подъем, водоотлив и другие производственные нужды, кВт·ч; a – текущий объем добычи угля, т/ч; L_w – длина выработок с локомотивным транспортом, м; H – глубина добычи угля, м; Q_w – значение водопритока, м³/ч; P'_i, P''_i – степени аппроксимирующих полиномов.

Приведенные уравнения (1.19-1.23) обеспечивают получение прогноза расхода электроэнергии на все процессы угольной шахты. В конкретных условиях значения P'_i и P''_i находятся в пределах 1-3. Значение U_A определяется на основе анализа предыстории процесса с использованием, например, метода экспоненциального сглаживания с прогнозом на s шагов. Возможная глубина управления электропотреблением за счет энергоемких технологических процессов шахтных производственных систем достигает 30 % общего электропотребления шахты.

Перейдем к рассмотрению подмодели МЗ. Как уже отмечалось, в рамках МЗ должны реализоваться процедуры координации системы технологических процессов и их электропотребления. Задаваясь принципом координации на основе прогноза взаимодействий, представим МЗ в следующем виде:

$$\hat{V}_{k+1} = V_k + \hat{U}_k - V_k^c, \quad (1.24)$$

$$\hat{P}_{k+1} = P_k + \hat{P}_\Sigma - P_k^c, \quad (1.25)$$

$$\hat{P}_\Sigma = P_1(k)\Delta t + \Gamma_1 P_2(k)\Delta t, \quad (1.26)$$

$$V_k^c = \begin{cases} \Psi_1, & \text{если } \hat{P}_k - P_k \geq e_1; \\ 0, & \text{если } \hat{P}_k - P_k < e_1; \end{cases} \quad (1.27)$$

$$P_k^c = \begin{cases} \Psi_2, & \text{если } \mathbf{P}_k - P_k \geq \mathbf{e}_2; \\ 0, & \text{если } \mathbf{P}_k - P_k < \mathbf{e}_2; \end{cases} \quad (1.28)$$

где \mathbf{V}_{k+1} и \mathbf{P}_{k+1} – прогноз расхода электроэнергии и добычи угля на следующем шаге управления, кВт·ч и т; V_k и P_k – данные о расходе электроэнергии и добыче угля на текущем шаге управления, кВт·ч и т; \mathbf{U}_k и \mathbf{P}_Σ – данные по расчетному графику потребления электроэнергии и добыче угля, кВт·ч и т; V_k^c и P_k^c – управляющее воздействие по ограничению потребления электроэнергии и добыче угля, кВт·ч и т; Γ_1 – ключевая функция, принимающая значение 1, если материальный поток угольный, и 0 – если породный; Ψ_1 и Ψ_2 – координирующие сигналы, кВт·ч и т; \mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 – заданная точность процедуры координации по каждому каналу, т.

Теперь можно сформулировать динамическую оптимизационную детерминированную модель энергоемких технологических процессов шахтных производственных систем:

$$m \min \sum_{j=0}^{L_d} \sum_{k=1}^s \left(C_j(r, \hat{v}) a(t) \Delta t \Delta r \right) / Q \quad (1.29)$$

при ограничениях, задаваемых M1, M2 и M3, где C – себестоимость добычи угля; r – индекс, учитывающий горно-геологические особенности залегания пород.

При этом вектор зависимых управляемых переменных будет иметь вид

$X' = \left\{ \hat{V}_k, V_k^c, P_k^c \right\}$, вектор независимых управляемых переменных $X'' = \{a_i\}$ и вектор

неуправляемых переменных $W = \left\{ Z_j, g_h, L_w, H_j \right\}$.

Анализ технологических схем и схем электроснабжения шахт Западного Донбасса позволил определить количество ограничений по задаче в диапазоне 25-40 параметров. Это дает матрицу ограничений размерностью (25–40)х(10–

30). Фактическое количество не нулевых элементов в матрице ограничений зависит от числа используемых в задаче характеристических переменных и качественных показателей угля, используемых в расчете. Нижние оценки размерности задачи получены для случая пяти очистных забоев, двух качественных показателей угля – зольность и сернистость и двух характеристических переменных – производительности добычи и производительности транспортных трактов. Приведенная комплексная модель энергоемких технологических процессов может использоваться в рамках АСУ ТП и АСУ энергетики угольных шахт [13].

1.4.3 Экономико-математическая модель энергоэффективности подземных электрических сетей

Известно, что для различных режимов работы электрической системы всегда имеет место баланс реактивной мощности, то есть суммарная генерируемая реактивная мощность всегда равна суммарной потребляемой мощности. Условия баланса сохраняются для каждого узла электрической сети и для всей электрической системы в целом. В зависимости от использования тех или иных источников баланс реактивной мощности может быть обеспечен различными мероприятиями. Отсюда возникает задача технически правильного и наиболее экономного выбора типа, мест размещения и режимов работы источников реактивной мощности как для каждого узла сети, так и для электрической системы в целом.

Во время передачи реактивной мощности от электростанции до места ее потребления в сети появляются дополнительные потери напряжения и электроэнергии. Наиболее эффективным способом снижения этих потерь является установление КУ у потребителей. Поскольку во время КРМ потери напряжения во внешней сети уменьшаются, то при определенных условиях регулируемый источник реактивной мощности может быть использован в качестве средства регулирования напряжения в сети.

Решение проблемы КРМ не только способствует возможности существования оптимальных режимов работы электрических сетей за счет обеспечения баланса реактивной мощности как в системе в целом, так и в отдельных ее узлах, но и существенно уменьшает затраты на сооружение и эксплуатацию сетей. Кроме того, она не требует дополнительных капиталовложений, достигается за счет методических усовершенствований и внедрения рационального организационного механизма реализации теоретических решений и поэтому особенно актуальна на текущей стадии развития электроэнергетики в стране, когда остро ощущается дефицит генерирующих мощностей.

Необходимо отметить, что для условий угольных шахт снижение потерь электроэнергии в подземных кабельных сетях, если предположить их корректный выбор, возможно только благодаря снижению полного тока. Это достигается повышением естественного коэффициента мощности, который по утверждениям многих ученых составляет не более 0,6 ... 0,75. Однако до настоящего времени отсутствуют научно обоснованные рекомендации экономически целесообразного объема КРМ в подземных сетях. Это достигается путем построения экономико-математической модели распределения КУ разработки алгоритма имитационной модели нагрузки подземных РП, ЦПП, с учетом параметров электрических сетей. При этом оптимизация потерь электроэнергии осуществляется по минимуму затрат на мероприятия, обеспечивающие их снижение [25].

Таким образом, повышение эффективности подземных электросетей 6 кВ возможно за счет снижения потерь электроэнергии путем использования КРМ в определенных экономически целесообразных пределах. В связи с этим необходима разработка методики определения экономически целесообразного снижения потерь электроэнергии в подземных сетях на основе КРМ. Это в свою очередь требует формирования базы данных по потерям электроэнергии в отдельных звеньях подземных кабельных сетей и разработки моделей оптимизации этих потерь.

Для обеспечения эффективности функционирования СЭС необходимо стремиться к уменьшению передачи реактивной мощности (РМ) в электрических сетях за счет снижения ее потребления электроприемниками, а также применения специальных технических мер КРМ.

Максимальное снижение РМ обеспечивается за счет рационального расположения КУ на разных ступенях СЭС. При этом может быть получен наибольший экономический эффект от снижения потерь активной энергии при передаче по распределительным сетям реактивной энергии, а также обеспечена максимальная скидка оплаты за электроэнергию.

Значительные потери электроэнергии в подземных сетях возникают в связи с низким коэффициентом мощности подземных электроприемников, который составляет $\text{tg}\varphi = 0,45 - 0,75$. Вариант расположения конденсаторных установок в подземных выработках шахт на распределительных пунктах обеспечивает максимальный эффект от компенсации. Расположение КУ в ЦПП шахт считается экономически выгодным, если это приводит к уменьшению необходимого количества ствольных кабелей или к увеличению подземной нагрузки при том же количестве этих кабелей [26].

Потери активной мощности в распределительных сетях, обусловленные передачей активной и реактивной мощности, определяются по выражению:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}; \quad (1.30)$$

или

$$\Delta P = \frac{P^2 \cdot R}{U^2} \cdot 10^{-3} + \frac{Q^2 \cdot R}{U^2} \cdot 10^{-3} = \Delta P_a + \Delta P_p, \text{ кВт}; \quad (1.31)$$

где P, Q – активная и реактивная мощность, кВт и квар; U, R – напряжение и сопротивление сети, кВ и Ом; $\Delta P_a, \Delta P_p$ – потери активной и реактивной мощностей, кВт и квар.

Потери ΔP_a остаются практически без изменений при компенсации, поэтому при сравнении потерь в вариантах их не учитывают, а для упрощения

обозначения в выражениях вместо ΔP_p принимают ΔP . Для радиальных и магистральных схем распределения электроэнергии маленькие ее потери определяются при выполнении условия:

$$(Q_i - Q_{ki}) \cdot R_i = (Q - Q_k) \cdot R_3,$$

где Q_1, Q_2, \dots - расчетные реактивные нагрузки РПП-6, квар; $Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots$ - общая расчетная реактивная нагрузка РПП-6, квар; Q_{k1}, Q_{k2}, \dots - оптимальные мощности КУ, подлежащие подключению к отдельным РПП-6, квар; $Q_{ki} = Q_{k1} + Q_{k2} + \dots$ - общая мощность подземных КУ, подлежащая распределению, квар; R_1, R_2 - активные сопротивления отдельных линий, питающих соответствующие РПП-6, Ом; R_3 - эквивалентное сопротивление линии, Ом, определяемое как

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots}; \quad (1.32)$$

Современные схемы СЭС шахт отличаются сложностью, поскольку содержат множество различных элементов, то есть радиальные, магистральные и смешанные. В таких случаях при расчетах и распределения конденсаторных установок необходимо осуществлять эквивалентирование смешанных схем (на магистральные и радиальные), после этого выполняется распределение конденсаторных установок.

В этом случае минимальные потери в электрических сетях от передачи реактивной мощности определяются по выражению:

$$\Delta P_{\min} = \frac{(Q - Q_k)^2}{U^2} * R_3 \quad (1.33)$$

Снижение потерь активной мощности с учетом установленных конденсаторных установок:

$$\Delta P_3 = \frac{[Q^2 - (Q - Q_k)^2]}{U^2} \cdot R_3 = \frac{-Q_k^2 + 2 \cdot Q Q_k}{U^2} \cdot R_3 = \frac{Q_k \cdot (2 \cdot Q - Q_k)}{U^2} \cdot R_3, \quad (1.34)$$

Для отдельного присоединения (РПП-6), подставляя значения в (1.34) получим:

$$\Delta P_{3pi} = \frac{2 \cdot Q P_{cp} (tgj_i - 0.25) - [P_{cp} (tgj_i - 0.25)]^2 \cdot R_i}{U^2}, \quad (1.35)$$

где $P_{cp} = \frac{T_{max}}{t_{кал}} \cdot P_p$ - средняя нагрузка за наиболее загруженную смену; P_p - расчетная нагрузка подземных электроприемников; $T_{max} = 4000-4800$ год. – количество часов максимума активной мощности; $t_{кол} = N \cdot n \cdot t = 7200$ год - количество часов работы подземных приемников; $N=300$; $n=4$; $t=6$ – количество рабочих дней за год, количество смен за сутки, продолжительность смены соответственно; tgj_i - коэффициент РМ линий; $tgj_i = 0,25$ – значение предельного коэффициента РМ, для которого отсутствует надбавка за потребление реактивной мощности при расчетах с энергосистемой.

Для упрощения расчетов по подземным электроприемникам принимаем:

$$T_{max} = 4500 \text{ год.}, U_H = 6 \text{ кВ}, tgj_i = 0.25, R_i = \frac{L_i}{g \cdot S_i}, \gamma = 50 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2.$$

Подставляя приведенные выше значения в формулу (1.34), получим:

$$\Delta P_n = \sum_{i=1}^n \frac{P_{pi}^2 \cdot (0.86 \cdot tgj_i^2 + 0.12 \cdot tgj_i - 0.024) \cdot L_i}{1800 \cdot S_i}. \quad (1.36)$$

Отсюда снижение удельных расходов электроэнергии (на 1 м линии сечением 1 мм²) с учетом КУ рассчитывается как:

$$\Delta P_{зн.н} = \frac{P_{pi}^2 \cdot (0.86 \cdot tgj_i^2 + 0.12 \cdot tgj_i - 0.024)}{1800}, \quad (1.37)$$

Результаты расчета удельных потерь мощности приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Снижение удельных потерь мощностей в подземных сетях шахт

Параметры	$P_p = 1000$	$P_p = 1500$	$P_p = 2000$	$P_p = 2500$	$P_p = 3000$
$\operatorname{tg} j_i - \cos j_i$	$\Delta P_{\text{зн.н}} \cdot 10^{-3}$ кВт	$\Delta P_{\text{зн.н}} \cdot 10^{-3}$ кВт	$\Delta P_{\text{зн.н}} \cdot 10^{-3}$ кВт	$\Delta P_{\text{зн.н}} \cdot 10^{-3}$ кВт	$\Delta P_{\text{зн.н}} \cdot 10^{-3}$ кВт
2,00-0,45	2000	4500	8000	12500	18000
1,4-0,58	1000	2250	4000	6250	9000
1,00-0,7	530	1200	2120	3300	4770
0,7-0,83	270	607	1080	1690	2430
0,44-0,92	100	225	400	625	900
0,25-0,96	0	0	0	0	0

На рис.1.3 приведена диаграмма снижения удельных потерь мощности в функции $\Delta P_n = f(P_{pi}, \operatorname{tg} j_i)$.

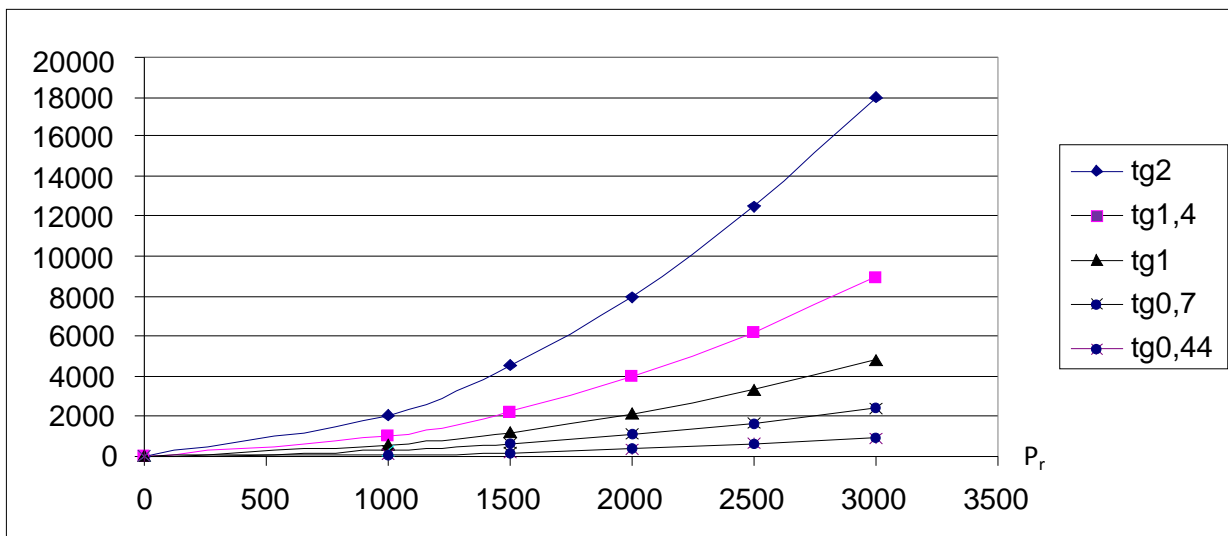


Рис.1.3 Диаграмма снижения удельных потерь мощности в подземных сетях

Снижение потерь мощности в целом для электрической сети определяется как:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ni} \cdot \frac{L_i}{S_i} . \quad (1.38)$$

В результате проведенных выше расчетов разработана программа имитационной модели нагрузки подземных сетей, с помощью которой определяется местоположение компенсирующих устройств в РПП-6 кВ, и потери электроэнергии в сетях 6 кВ. Кроме того, обоснованна программа, которая обеспечивает минимизацию потерь электроэнергии с учетом двух критериев: стоимости и потерь электроэнергии, а также потерь, связанных с приобретением и установкой технических средств по их снижению [26].

1.4.4 Анализ моделей и методов повышения энергоэффективности угольных шахт

Приведенная выше комплексная модель ЭТПШ отличается универсальностью, но вместе с тем характеризуется сложностью из-за учета при ее построении корреляционной зависимости результирующих параметров от большого количества различного рода исходных информативных факторов. С целью ее упрощения, как правило, выделяют наиболее существенные связи и устанавливают степень влияния отдельных параметров изучаемого процесса на технико-экономические показатели работы как производственных участков, так и угольных предприятий в целом. Это обеспечивается применением специальных математических методов и, в частности, факторного анализа, методов главных компонент и множественной корреляции, позволяющих выполнить решение задач энергетического аудита при снижении размерности исходных данных (“сжатии” информации) с установлением зависимости между результативным и факторным признаками путем построения оптимизационных факторных моделей.

В основу этих моделей должны быть положены множественные регрессионные зависимости, составляющие которых отражают влияние каждого фактора (например объем угледобычи, внутригодовое изменение расхода электро-

энергии, отдельные технологические параметры производственного участка и др.) на эффективность электроиспользования предприятия (рис.1.3).

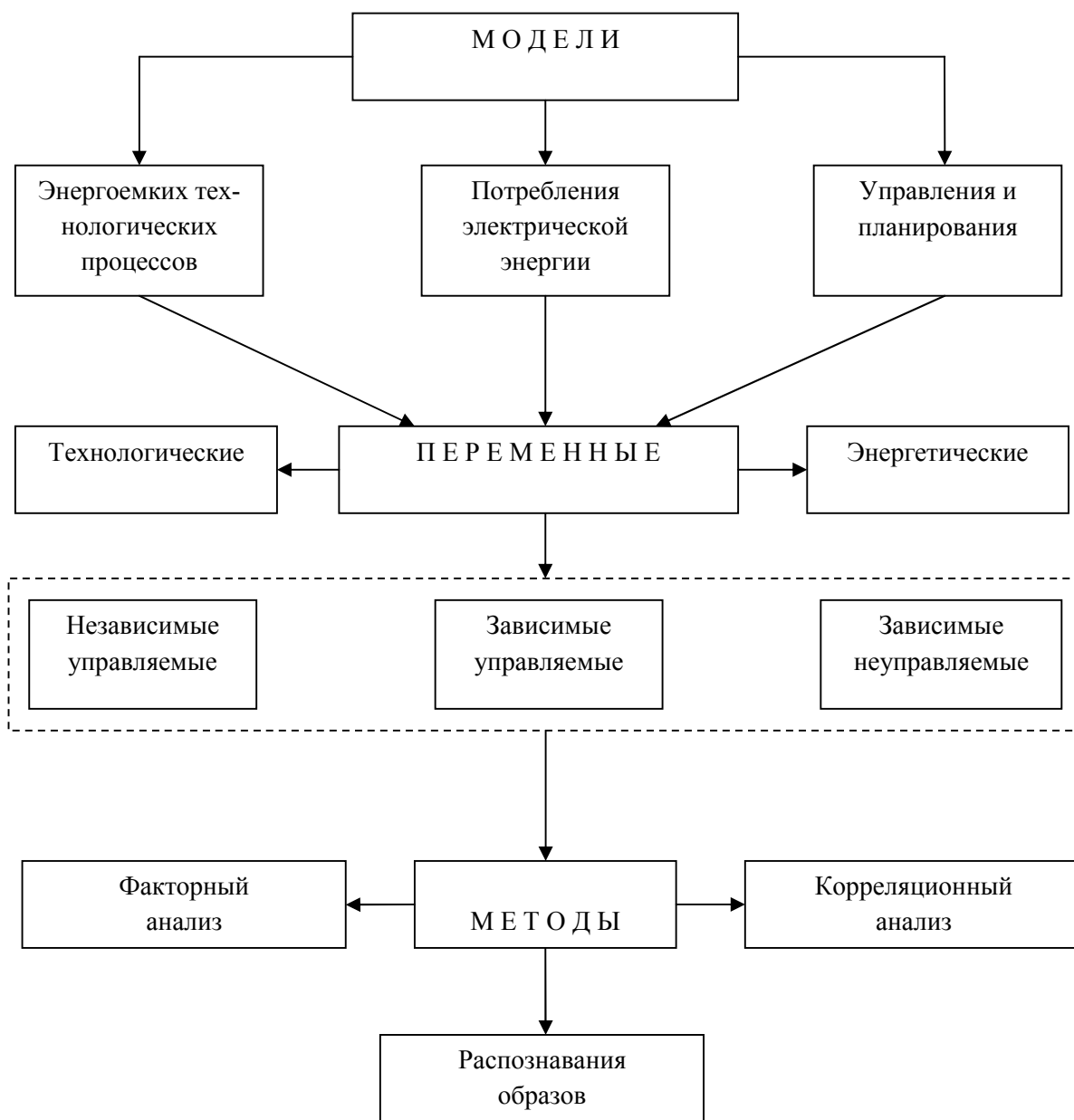


Рис 1.3. Структурная схема моделей и методов анализа функционирования электрохозяйства угольных шахт

Оптимизационные факторные модели широко используют при исследовании энергоемких технологических процессов предприятий различных отраслей промышленности как наиболее эффективное средство решения задач по

оценке влияния параметров на режимы электропотребления, установлению регулировочных возможностей предприятий и др.

Экономические модели, применяемые в задачах электроснабжения, хотя и отличаются простой структурой, однако имеется определенная трудность их использования, в частности, их описание характеризуется разнородностью, недостоверностью и неполнотой. Чаще всего в таких моделях приходится оперировать лишь качественной информацией и для их описания используют качественные методы [26].

Критерии эффективности и метод последовательных уступок. Как правило, большинство математических моделей для исследования режимов электропотребления горнодобывающих и других предприятий используют один–два основных критерия (показателя) оптимизации. В задачах энергетического аудита ШПС в первую очередь обеспечивают эффективность (качество) их решения, обычно характеризуемое несколькими частными критериями [28,29]. При наличии лишь одного критерия эффективности K_1 оптимальная стратегия (решение, действие) u^* определяется из условия

$$K_1(u^*) = \max_{u \in U} K_1(u), \quad (1.39)$$

где U – эффективность стратегии (степень достижения цели операции);

U – множество всех стратегий.

Опыт эксплуатации показывает, что эффективность работы ШПС более полно и точно можно охарактеризовать с помощью нескольких критериев: удельного электропотребления, производительности, себестоимости и др.

В связи с этим не один критерий эффективности, а целая совокупность частных критериев $\{K_i\}$, образующих векторный критерий $K = (K_1, K_2, \dots, K_s)$.

Существует ряд методов многокритериальной оптимизации: последовательных уступок, компромиссных решений (компромиссной целевой функции, многоцелевого программирования) и др.[29-30]. Поскольку математическая модель задачи оптимизации, как правило, включает три основные части: целе-

вую функцию, ограничения и граничные условия, то любой метод такой оптимизации должен быть сведен к использованию этих основных частей.

При решении задач ЭА предварительно производят строгое упорядочение частных критериев (показателей) исследуемого процесса по степени важности с помощью метода экспертных оценок. В этом случае целесообразно применение метода последовательных уступок, согласно которому принятые критерии располагаются и нумеруются в порядке убывания важности, так что главным является критерий K_1 , менее важен K_2 , затем следуют остальные частные критерии K_3, K_4, \dots, K_s .

Максимизируется первый по важности критерий K_1 и определяется его наибольшее значение Q_1 . Затем назначается величина “допустимого” снижения (уступки) $\Delta_1 \geq 0$ критерия K_1 и находится наибольшее значение Q_2 второго критерия K_2 при условии, что значение первого критерия должно быть меньше, чем $Q_1 - \Delta_1$. Снова назначается величина уступки $\Delta_2 \geq 0$, но уже по второму критерию, которая вместе с первой используется при нахождении условного максимума третьего критерия и т. д. Наконец, максимизируется последний по важности критерий K_s при условии, что значение каждого критерия K_r из $s - 1$ предыдущих должно быть не меньше соответствующей величины $Q_r - \Delta_r$; получаемые в итоге стратегии считаются оптимальными.

Таким образом, оптимальной считается всякая стратегия, являющаяся решением последней задачи из приведенных ниже:

$$\begin{aligned}
 &1) \text{ найти} \quad Q_1 = \sup_{u \in U} K_1(u); \\
 &2) \text{ найти} \quad Q_2 = \sup_{\substack{u \in U \\ K_1(u) \geq Q_1 - \Delta_1}} K_2(u); \\
 &3) \text{ найти} \quad \sup_{\substack{u \in U \\ K_r(u) \geq Q_r - \Delta_r \\ r = 1, 2, \dots, s-1}} K_s(u) = Q_s
 \end{aligned} \tag{1.40}$$

При таком подходе к решению задачи предполагается, что все K_r ограничены сверху (это условие, как показывают исследования, выполняется практически во всех случаях). Это гарантирует конечность всех величин Q_r и непротиворечивость ограничений во всех s заданных задачах при любых $\Delta_r \geq 0$.

Если критерий K_s на множестве стратегий, удовлетворяющих ограничениям задачи s , не достигает своего наибольшего значения Q_s , то решением многокритериальной задачи считают максимизирующую последовательность стратегий $\{u^k\}$ из указанного множества $\lim_{k \rightarrow \infty} K_s(u^k) = Q_s$.

Анализ показывает, что метод последовательных уступок является практически универсальным, поскольку при решении любой прикладной многокритериальной задачи выделяет в качестве оптимальных и эффективных стратегии. Более того, всякая максимизирующая последовательность, служащая решением этой задачи, также эффективна.

Если при решении задач ЭА условие единственности получения эффективности стратегий не будет выполняться, то для получения окончательного и положительного результата среди всех решений s достаточно найти:

$$\max_{\substack{u \in U, K_s(u) \geq Q_s \\ K_r(u) \geq Q_r - \Delta_r \\ r=1, 2, \dots, s-1}} \sum_{r=1}^s K_r(u), \quad (1.42)$$

На практике рекомендуется более удобный прием [31]: заменить в задаче s критерий K_s на $K_s^c = K_s + c \sum_{r=1}^{s-1} K_r$, где c – положительное число;

В результате формулируется следующая задача.

Найти:

$$\sup_{\substack{u \in U \\ K_r(u) \geq Q_r - \Delta_r \\ r=1, 2, \dots, s-1}} K_s^*(u) = Q_s(c), \quad (1.43)$$

Кроме того, метод последовательных уступок позволяет указать характеристическое свойство эффективных стратегий.

Таким образом, для решения многокритериальных задач ЭА вполне можно использовать метод последовательных уступок при условии, что все частные критерии упорядочены по степени важности, причём каждый из них настолько существенно более важен, чем последующий, что достаточно ограничиться только попарной связью критериев и выбирать величину допустимого снижения очередного критерия с учетом поведения лишь одного следующего критерия и допустимой погрешностью в пределах 5–10 % от наибольшей величины критерия [32].

Решение задачи ЭА (электрическая часть) связано не только с определением электроиспользования, но и идентифицированием конечных потребителей электроэнергии, установлением связи между технологическими параметрами и электропотреблением, а также выполнением анализа и рекомендациями по повышению его эффективности. Это значительно облегчается при наличии аналогов, получаемых при типологической классификации обследуемых объектов. При этом требуются иные способы и критерии оценки эффективности электропотребления. Исходя из этого ставится задача разработки комплексного показателя эффективности использования электроэнергии на основе таксономических методов исследования с учетом динамики функционирования ШПС.

Таким образом, для обследования и оценки энергоэффективности ШПС необходимы методические разработки, руководствуясь которыми можно было бы достаточно полно, объективно и в определенной последовательности провести анализ функционирования как электрохозяйства, так и других подразделений. При этом необходимо придерживаться некоторых общих требований:

- возможности применения методики ЭА для угольной отрасли;
- поэтапности обследования и оценки эффективности потребления электроэнергии
- снижения временных затрат по проведению ЭА путем стандартизации;
- возможности использования информации ЭА в условиях АРМ.

Выполнение этих требований, как указывалось ранее, связано с решением ряда таких важных задач как классификация угольных шахт по технологическим признакам; проверка полученных типовых групп (классов) шахт на однородность по электроиспользованию, т.е. получение аналогов, с помощью которых можно осуществлять сравнение исследуемых объектов и зачислять их с наименьшей вероятностью ошибки в ту или иную группу с известными характеристиками. При этом возникают трудности распознавания объектов, связанные с “размытостью” границ некоторых классов, когда отдельные объекты бывают “одинаково” похожи на представителей разных классов, поэтому вполне оправданно для решения поставленных задач энергетического аудита использовать теорию распознавания образов, и в частности, дискриминантного, факторного и кластерного анализа, метода главных компонент и т.п.

Анализ показывает, что комплексная оценка состояния электрохозяйства предприятия и эффективности его работы должна базироваться на новых подходах, учитывающих ряд наиболее существенных признаков и базовых электрических показателей с учетом уровня информативности параметров режимов электропотребления. Эту задачу можно реализовать с помощью *таксономического анализа*, на основе которого разрабатывается аналитическая модель и методика прогнозирования комплексного показателя для оценки эффективности использования электроэнергии на угольных шахтах.

1.5. Методологические аспекты повышения эффективности методического и математического обеспечения энергетического аудита

1.5.1 Энергетический аудит – перспективное направление повышения энергоэффективности угольных шахт

Повышение эффективности использования электроэнергии является первоочередной задачей как при проектировании, так и при эксплуатации систем электроснабжения угледобывающих предприятий. Это обеспечивается различными способами, мероприятиями, подходами.

Выше отмечалось, что в настоящее время все больший интерес и внимание в Украине и других странах СНГ вызывает перспективное направление повышения эффективности электроиспользования – энергетический аудит. Это объясняется тем, что возникновение и становление аудита обусловлено жизненной и экономической необходимостью [1, 34].

В общем случае аудитом называют систематический процесс объективного сбора и оценки свидетельств об экономических действиях и событиях с целью определения степени их соответствия установленным критериям и представление результатов заинтересованным пользователям. Другими словами, аудит означает проверку, ревизию. Проверка предусматривает существование некоего эталона, по отношению к которому она и осуществляется. Обычно таким эталоном служат международные стандарты МЭК и серии ИСО 9000, а также межгосударственные стандарты стран СНГ, Украины, но возможны проверки и по отношению к другим системам требований, например, зафиксированным в договорах между заказчиком и потребителем [33].

В международных нормативах по аудиту в зарубежной специальной литературе изложены его специфические методы и приемы, широко применяемые в мировой практике, но мало известные у нас или имеющие иное их толкование и особенности использования. Это такие методы как опрос, инспекция, запрос, анкетирование, тестирование и др. [33, 34].

Аудит базируется на оценке состояния соответствующих аспектов деятельности производственных систем – отдельных промышленных предприятий, горно-обогатительных комплексов, железнодорожного транспорта и др. Сфера аудиторской деятельности в современной практике существенно расширилась. Главное внимание уделяется повышению эффективности функционирования производственных систем. Системный подход подготовил основу для развития качественного аудита, т.е. аудиторские структуры значительно больше проникают в анализ и обработку технологических, энергетических и других режимов работы предприятий, в разработку предложений по повышению эффективности

хозяйственной деятельности, совершенствования организационных форм и методов учета, контроля и управления, а также информационной технологии.

Эти направления аудита, как правило, охватывают обследуемый объект в целом, позволяют дать общую объективную оценку эффективности его работы, определить размеры и характер отклонений фактических показателей от нормативных и плановых, измерить влияние отдельных факторов на отклонения, выявить внутрихозяйственные резервы развития производства, а также получить прогнозные экономические, энергетические и другие показатели режима работы всей производственной системы.

В настоящее время идет интенсивный поиск путей решения проблем аудиторской деятельности в Украине, разработки методологических основ и рекомендаций практического использования, прогнозирования развития производственных систем, отраслей промышленности. При этом важнейшим условием является правильное, качественное и с наименьшим риском проведения аудита или оказание аудиторских услуг (консультаций) и др. [34].

Повышение эффективности производства требует принятия ответственных решений, связанных со стратегией использования различных ресурсов. Очевидно, что наиболее целесообразно улучшать эффективность там, где можно получить положительный результат при минимальных затратах. В условиях ШПС и их энергетической эффективности, конечной целью этой деятельности является снижение уровня потребления энергии с сохранением объема производства. С этой целью вначале имеет смысл на предприятии провести энергетический аудит.

Таким образом, в широком смысле слова ЭА – это обследование, анализ и оценка эффективности энергопотребления с целью определения путей экономии энергии, их реализация и внедрение на предприятиях энергосберегающих технологий, а также системы энергетического менеджмента [8, 36] .

Словосочетание энергетический аудит вошло в обиход совсем недавно. Раньше термин “аудит” ассоциировался с финансовыми проверками и бухгал-

терским учетом. Однако, в настоящее время очевидно, что аудит играет ключевую роль в эффективном использовании энергии на промышленных предприятиях и в сфере обслуживания. Он оказывается средством для выработки корректирующих воздействий и оценки их эффективности. В последние годы встречается еще и проектный, экологический аудит, аудит качества, весьма близкие идеологически к ЭА [36].

Под объектами ЭА понимают отдельные и взаимосвязанные экономические, организационные, информационные или иные стороны функционирования исследуемых структур или производственной системы (например угледобыча, электрохозяйство и т.п.), состояние которых может быть оценено количественно и качественно. Основное внимание должно быть уделено наиболее энергоемким производственным участкам, технологическим процессам, агрегатам и системам, которые входят в перечень объектов, повышение эффективности электроиспользования которых составляет главную задачу ЭА.

Существует несколько различных систем организации, проведения ЭА и соответственно подготовки энергоаудиторов. Одна из таких систем, разработанных Американским Обществом Контроля Качества (АОКК, А50С), опробована и является наиболее перспективной, компактной и авторитетной в Украине.

Программы обеспечения качества основываются на предотвращении проблемы неэффективного использования энергии, прежде, чем она обнаруживается. А там, где эта проблемы уже есть, энергоаудиторы выявляют ее глубину и поиск коренной причины. Наличие неэффективности использования энергии, порождают неудовлетворенность производителя, уменьшение прибыли, ухудшение морально-психологического климата среди работающих и др.

Проведение ЭА обеспечивает обратную связь, основанную на фактических данных, и способствует соответствующим службам принимать обоснованные

ванные решения. Примером конкретных целей аудита может быть установление, что:

- энергия используется эффективно;
- соответствующие письменные инструкции существуют и применяются;
- нормативные и законодательные требования строго соблюдаются;
- недостатки по эффективному использованию энергии на объекте или в системах управления выявляются;
- выявленные случаи неэффективного использования энергии устраняются, т.е. корректирующие воздействия дают положительные результаты;
- информация для идентификации и снижения рисков неэффективного использования энергии собирается;
- эффективное и неэффективное применение энергетических ресурсов предприятия отслеживается;
- стандартизированные организационные приемы и методы улучшений существуют.

Таким образом, основная задача ЭА – повышение эффективности использования энергоресурсов, установление выполнения плановых заданий, правильности ведения учета электроэнергии и других видов топлива, составления отчетности, оценки технической помощи предприятию, а также соответствия режимов работы действующим нормам, правилам и т.п.

В настоящее время в Украине практически отсутствуют аудиторские организации для проведения анализа функционирования угольных шахт, а также методическое и программное обеспечение. Методика проведения аудита в целом не должна зависеть от вида выпускаемой продукции и применяемой технологии, однако обязательно учитывать специфические особенности функционирования производства во времени и пространстве.

При этом определяется не только объем электропотребления предприятием, но и идентифицирование конечных потребителей электроэнергии, установление связи между ним и технологическими параметрами, а также выполне

анализа и выдача рекомендации по повышению энергоэффективности. Это значительно облегчается при наличии аналогов, получаемых после типологической классификации обследуемых объектов. Однако, при системно-структурном подходе к решению задач ЭА требуются новые способы и критерии оценки эффективности электроиспользования. К ним, в первую очередь, следует отнести разработку комплексного показателя эффективности использования электроэнергии на основе таксономических методов исследования с учетом динамики функционирования ШПС.

Анализ показывает, что комплексная оценка состояния электрохозяйства предприятия и эффективности его работы должна базироваться на новых подходах, учитывающих ряд наиболее существенных признаков и базовых электрических показателей с учетом уровня информативности параметров режимов электропотребления. Это вполне реализуется с помощью таксономического анализа, на основе которого разрабатывается аналитическая модель и методика прогнозирования комплексного показателя для оценки эффективности использования электроэнергии на угольных шахтах.

Кроме того, ЭА энергоемких участков угледобычи включает некоторые задачи оптимизационного характера. Поэтому разработка методических основ этого вида аудита тесно связана с получением и решением математических оптимизационных моделей: удельного электропотребления; производительности и себестоимости добычных участков, наиболее характерных для оценки эффективности функционирования ШПС.

Как показывает анализ, в течение нескольких десятков лет многие термины и понятия эффективного электроиспользования применялись без ясных и четких определений, что вносило путаницу в язык специалистов, работающих в области энергосбережения. Поэтому появилась необходимость в стандартизации новых терминов, понятий и определений в области энергосбережения, обосновании показателей энергоэффективности, которые необходимы при разработке методики ЭА.

1.5.2 Системно-структурный подход повышения уровня эффективности энергетического аудита

Одной из важных методологических концепций современного научного исследования является системно-структурный подход к изучаемому объекту. В его основу положена идея целостности происходящих явлений, процессов, собственно объекта и представлений о взаимосвязи и взаимообусловленности явлений окружающего пространства; рассмотрение изучаемых объектов как элементов иерархической структуры с их существенными и устойчивыми связями с элементами нижнего уровня (подсистемы) и верхнего уровня (надсистемой). Сложность системы и ее связей обуславливается многоплановостью постановочных задач и многокритериальность задач оптимизации. Причем следует руководствоваться тем, что структура – это совокупность отдельных физических объектов, связей между ними, организация их функционирования и осуществления межобъектных связей. В зависимости от характера (специфики) функционирования физических объектов структуры могут иметь линейную, горизонтальную, вертикальную, иерархическую, древовидную и другую природу. Структура может быть простой, сложной, комплексной (смешанной). Она представляет собой конструктивный компонент – основу системы[23,38].

Горнодобывающие предприятия состоят из объектов, сформированных по административному (участки, цехи), территориальному (горизонты, крылья, шахты) и технологическому (водоотливные, компрессорные и др.) признакам. Кроме того, они могут быть представлены совокупностью отдельных систем: электроснабжения, автоматизации технологических процессов, организации производства и т.д. В сущности, предприятие представляется как самостоятельная структурная единица только с взаимодействием всех его систем в едином масштабе времени и в этом случае можно воспользоваться методологией системного анализа как режимов электропотребления объектов с учетом их взаимосвязи как с внешней средой, так и с предприятием[4,37].

Система электроснабжения (СЭС) угольной шахты включает ряд элементов, образующих через физические линии связи структуру, обеспечивающую передачу потоков электрической энергии регламентируемого качества к каждому ЭП из всего их множества, функционирующего в электрохозяйстве предприятия, и обладает всеми системотехническими свойствами, присущими каждой “системе”[37]:

- совокупность ЭП – это целостное образование, в котором каждый из них обладает системо-определенными свойствами;
- устойчивые связи – физические каналы, по которым производится обмен данными и распределение энергетических потоков; эти связи формируют обобщённые показатели электроиспользования предприятия, характеризующие “систему” в целом;
- актуализированные связи – физические каналы связи между элементами СЭС и ЭП, образующие единую “систему”; благодаря этим связям рассматриваемая “система” обладает достаточно высокой организацией (“система” существует и находится в устойчивом состоянии);
 - показатели электроиспользования предприятия формируются в процессе функционирования отдельных ЭП под воздействием внешних и внутренних факторов и являются интегративными показателями “системы”, а не отдельных ее элементов

Несмотря на многолетние исследования и разработки методологии системного анализа объектов (процессов) больших и малых систем, до настоящего времени однозначное толкование этого понятия отсутствует. Поэтому применительно к проблеме повышения эффективности использования электроэнергии ШПС предлагается следующее его трактование.

Системно-структурный анализ на горнодобывающих предприятиях является эффективным способом формализации процесса электропотребления, основанным на выявлении и учете взаимосвязей информативных признаков, формирующих исследуемые показатели. Ведущей концепцией системно-

структурного анализа по мнению многих исследователей является системный подход, который включает все срезы системы в их взаимосвязи и реализации перспектив достижения целей. Построение математических моделей можно считать базой всего системного анализа [39-41].

В отечественной горной практике системно-структурный подход при анализе энергоэффективности угольных шахтах впервые реализован в работах Национального горного университета Украины “НГУ” (проф. Пивняк Г.Г., проф. Слесарев В.В., доц. Трифонов Д.В.), в которых предложено решать эту задачу на основе классификации факторов, формирующих электропотребление, выявления и формализации их взаимосвязей [4, 42]. Такой подход существенно повышает эффективность решения оптимизационных режимных задач. Однако, сложность структуры и многогранность внешних и внутренних факторов, под воздействием которых формируются показатели электропотребления угольных шахт, требуют дальнейшего уточнения некоторых методологических понятий системного анализа энергоэффективности.

В частности, не следует смешивать понятие СЭС предприятия и производственной системы. Как правило, под системой понимают упорядоченную совокупность взаимосвязанных объектов (элементов), объединённых определёнными прямыми и обратными связями и подчинённых согласованному функционированию либо определённым правилам (алгоритмам). В систему могут входить некоторые подсистемы, разделённые по функциональным признакам. Например, системами являются угольная шахта, рудник, очистной забой, электровоз, горный комбайн и т.д. [4, 37]. Критерием для выделения совокупности элементов в систему служит степень связанности элементов внутри системы и собственно системы с внешним миром. Чем больше объединены элементы внутри системы и чем больше обособлена эта совокупность элементов от внешнего мира, тем больше оснований рассматривать ее в качестве самостоятельной системы. Поэтому вполне обоснованно можно назвать угольное предприятие производственной системой, объединяющей сложную и упорядочен-

ную совокупность элементов: электрохозяйство, угольный комбайн, обслуживающую его бригаду горнорабочих, очистной забой с машинами и людьми и т.д., каждый из которых при определенных условиях в свою очередь может рассматриваться как система.

Принятию решений в такой системе предшествует тщательный анализ и исследование изучаемого процесса, т.е. производится системный анализ значительного количества исходной информации различной природы. Определение шахтной производственной системы как совокупности элементов, обладающей информативными признаками, можно записать в упрощенном виде как:

$$S : \{ \{M\}, \{X\}, F \}, \quad (1.45)$$

где S – система; $\{M\}$ – совокупность элементов в системе; $\{X\}$ – совокупность связей; F – функция (новое свойство) системы.

Такой подход позволяет установить наиболее существенные связи и информативные параметры режимов электропотребления шахты, адекватно ставить и решать конкретные задачи энергетического аудита. Кроме того, системный анализ способствует формальному учету основных особенностей функционирования электрохозяйства ШПС, т.е. построению различных моделей, и в частности, знаковых – математических моделей позволяющих описать процесс электроиспользования с учетом влияния большого числа как технологических факторов, так и базовых электрических показателей, т.е. тем самым облегчая решение задачи многокритериальной оптимизации.

ШПС можно отнести к причинно-обусловленным, т.е. их существование и функционирование обусловлены объективными причинами. Они, как правило, характеризуются тремя видами информации: детерминированной (строго определенной и однозначной), вероятностной (заданной с некоторой достоверностью в виде вероятностных характеристик параметров и функций системы) и неопределенной (заданной в виде некоторых приблизительных “размытых” границ областей значений параметров и функций, причем вероятностные характеристики последних внутри этих областей неизвестны). Кроме того, иссле-

дуремые системы иерархичны и взаимосвязаны с внешней средой, отличаются многокритериальностью, достаточно большим разнообразием состояний и свойств. Это, в свою очередь, при решении проблемы повышения энергоэффективности ШПС обуславливает применение строгих математических методов, моделей и теории распознавания образов [43-45].

Глава 2. ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ БАЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА

2.1. Теоретико-информационный подход при проведении энергетического аудита угольных шахт

Эффективное использование ЭА находится в прямой зависимости от полноты получаемой и обрабатываемой информации о состоянии энергоемких технологических процессов и агрегатов исследуемого объекта. В то же время наличие большого количества исходных данных, содержащих информацию как о других элементах описания объектов, так и об их совокупности в целом, увеличивает размерность (объем) задачи и затрудняет ее решение [46].

В последнее время для оценки энергоэффективности угольных шахт намечается тенденция наиболее широкого использования как технологических, так и базовых электрических информативных показателей. При этом следует учитывать разнородность информации исследуемой совокупности исходных данных. Применение же статистических методов анализа и качественные с учетом детального описания электропотребления объектов требуют критической оценки информативных параметров, установления однородности и выявления приоритетных признаков и их вариации, т.е. количественного изменения конкретного параметра у единиц статистической совокупности многомерного объекта управления.

Для угольных шахт характерно значительное количество информативных факторов, влияющих на эффективность электроиспользования. Однако с учетом того, что состав совокупности основных технологических и базовых элек-

трических признаков гетерогенный, т.е. содержащий разнотипные физические единицы (например мощность, кВт, количество электропотребителей, шт, объем добычи, т и т.п.) и все они характеризуют в той или иной мере режим электропотребления, целесообразно принять гипотезу об однородности исследуемой совокупности данных [46,47].

Такое требование, однако, не сводится к ограничению (определению) объекта наблюдения. Любая реальная статистическая совокупность практически всегда внутренне дифференцирована и представляет собой своеобразный комплекс отличных друг от друга объектов или явлений. Это позволяет считать, например, такую задачу ЭА как классификация (распознавания образов) исследуемой совокупности на группы (частные совокупности) актуальной. Без выполнения такой группировки, как основного приема решения задач классификации объектов, за частую все обобщающие информативные показатели [47].

В статистических исследованиях группирование первичных информативных данных – основной способ установления правил отнесения объекта к одной или нескольким группам (категориям, классам) на основании измерения некоторого числа его характеристик (признаков) и построения описания классов. При этом не всегда удается однозначно установить степень принадлежности объекта управления к вполне определенному классу. Однако применение теории распознавания образов значительно облегчает применение теоретико-информационного подхода к решению одной из важных задач ЭА - классификации угольных шахт, сущность которой заключается в следующем [47,48].

Для некоторой совокупности исследуемых объектов $\Omega = \{\omega\}$, каждый из которых задан значениями своих признаков, можно записать:

$$\begin{aligned} W_1 &\rightarrow \bar{X}_1 = \{X_1^1, X_1^2, \dots, X_1^n\}, \\ W_2 &\rightarrow \bar{X}_2 = \{X_2^1, X_2^2, \dots, X_2^n\}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$W_z \rightarrow \bar{X}_z = \{X_z^1, X_z^2, \dots, X_z^n\}$$

Необходимо разделить объекты на типовые и однородные в некотором смысле группы (классы) – кластеры (таксоны, образы). Здесь нет обучающей выборки, т.е. неизвестно, какие объекты из множества $\Omega = \{\omega\}$ к каким группам относятся, однако что надлежит подразумевать под понятием “типовые” и “однородные” объекты, каковы закономерности структуры объектов в группах, должно быть задано. В частности, в основу типологической классификации положены технологические факторы, а политетической – положены базовые электрические показатели, с помощью которых устанавливается однородность типовых групп угольных шахт по электропотреблению[49].

При этом должны выдерживаться два определяющих положения: в один класс объединяются объекты, сходные между собой в некотором смысле; степень сходства между собой у объектов, принадлежащих к одному классу, должна быть больше, чем у объектов, относящихся к разным классам. Кроме того, следует учесть, что каждый из информативных факторов может в свою очередь характеризоваться еще несколькими показателями (горно-геологическими, горно-техническими и др.) различного характера. Это приводит к тому, что экспертные типологические группы одних и тех же объектов могут оказаться различными. В частности, различие естественных природных условий приводит к тому, что один и тот же расход электроэнергии не соответствует количеству добытого полезного ископаемого. Для угольных шахт влияние, например, горно-геологического фактора настолько велико, что необходимо считаться не только с региональными особенностями (ДТЭК ПАО “Укрзападуголь”, ДТЭК ПАО “Павлоградуголь”, ДТЭК ПАО “Донецкуголь” и др.), но и с различием внутри одного и того же бассейна[10]. При таком теоретико-информационном подходе к классификации угольных шахт с учетом технологии, режимов работы основных энергоемких агрегатов и объемов электропо-

требления, могут быть получены типовые, достаточно компактные и однородные группы угольных шахт по электропотреблению [50].

В целом задача классификации состоит в установлении правил отнесения объекта управления к одному из классов на основе анализа факторов, влияющих на эффективность электропотребления и построение описания классов. Под классом объекта управления понимают некоторое подмножество угольных шахт, выделенное при помощи решающего правила. При этом число классов неизвестно и определяется с помощью методов автоматической классификации. Собственно формализация задачи классификации угольных шахт основывается на объективно существующей общности шахт одного и того же класса, часто определяемое понятием “сходство”. Наиболее употребительной мерой сходства является евклидово расстояние [19].

Всё многообразие информативных факторов, формирующих электропотребление исследуемых объектов, можно разделить на ряд характерных групп: горно-геологические, климатические, организационно-экономические, технологические, энергетические, технические. Причем одни и те же факторы могут быть внешними и внутренними для конкретного предприятия. Это определяется иерархическим уровнем и технологической спецификой электропотребителей. Структура и взаимосвязь информативных факторов приведены на рис.2.1. В основу положена схема “Исикава”, используемая для выявления состава факторов на объект анализа и определения значимости этих факторов. Схема представляет собой графическое упорядочение многообразных факторов, влияющих на объект анализа, и в частности, на энергоэффективность. Она дает наглядное представление не только о совокупности различных факторов (характеристик), но и о причинно-следственных связях этих факторов[50,51].

При построении такой схемы к центральной горизонтальной стрелке, изображающей объект анализа, присоединяют большие (первичные) векторы, характеризующие главные факторы, влияющие на исследуемый объект. Далее к каждому первичному вектору присоединяют векторы второго порядка, затем к

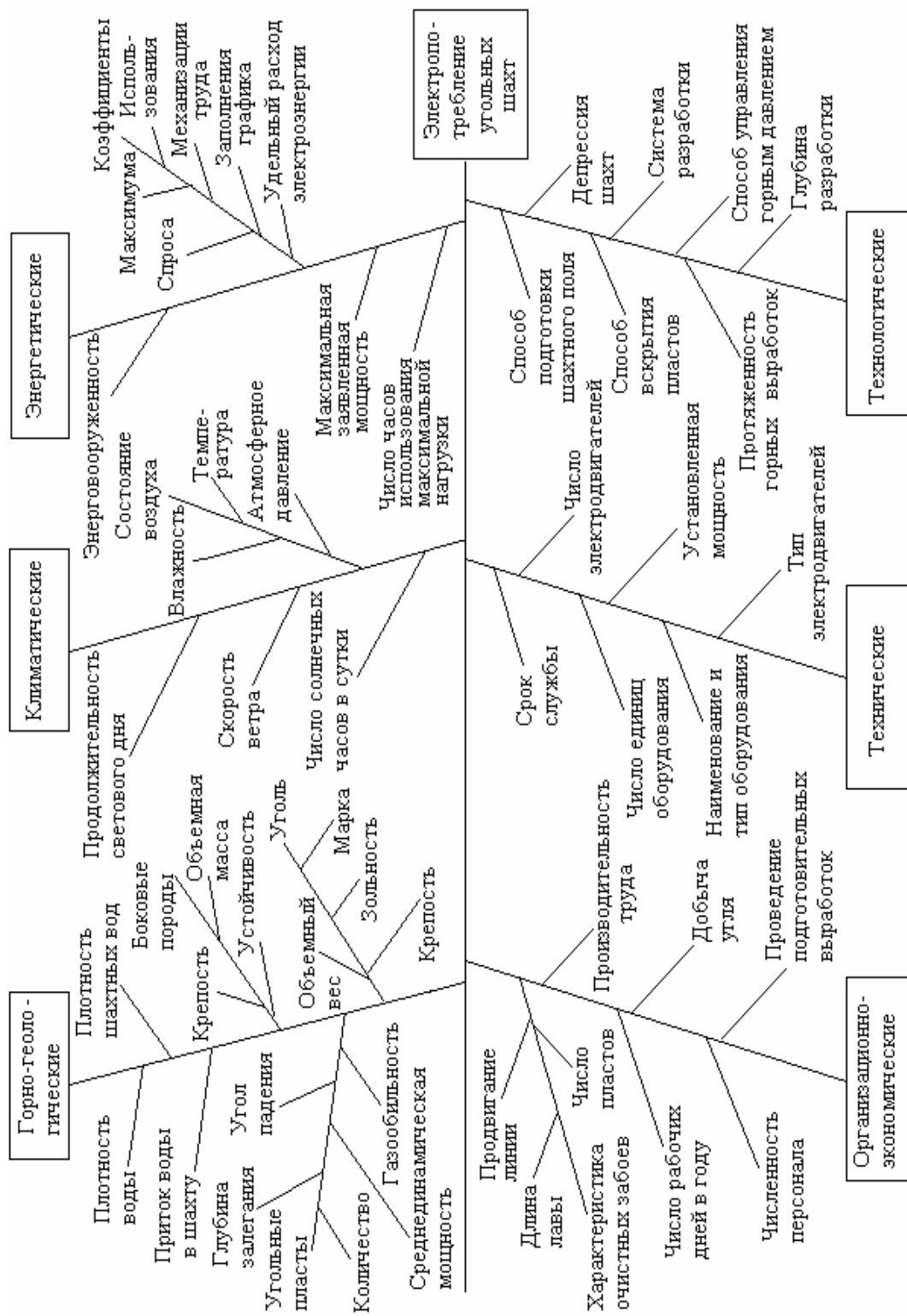


Рис.2.1.1 Совокупность факторов, влияющих на электропотребление угольных шахт

ним - векторы третьего порядка и так до тех пор, пока на схему не будут нанесены все факторы, оказывающие заметное влияние на объект анализа в конкретных производственных условиях. При этом не существует определенных правил в последовательности расположения и угла наклона векторов. Главное при построении схемы – обеспечение правильной соподчиненности и взаимозависимости факторов, а также четкость оформления схемы.

Анализ показывает, что при таком большом разнообразии информативных факторов и показателей получить полную классификацию угольных шахт затруднительно. Требуется участие соответствующих специалистов (инженерно-технических работников) различного профиля – энергетиков, технологов, организаторов производства и др., поскольку их результативность будет зависеть от их компетентности.

Оценка уровня компетентности того или иного специалиста является довольно сложной задачей и до сих пор не существует объективных способов ее решения. Поэтому для подбора экспертов может быть применен метод самооценки специалистами уровня своей компетентности и компетентности своих коллег. Кроме того, зачастую оценку уровня значимости компетентности экспертов осуществляют с помощью статистических критериев, например, F-критерия Фишера. Полученное в результате обработки мнений специалистов-экспертов факторное поле может быть положено в основу формирования математической модели энергоэффективности объектов управления.

Однако мнение специалистов о степени влияния различных информативных факторов на эффективность электропотребления любого предприятия едва ли можно считать однозначным, поскольку такая оценка будет носить субъективный характер. Поэтому для успешного формирования исходного факторного поля, влияющего на исследуемый процесс производственной системы, применяют метод экспертных оценок, позволяющий придать значительную долю объективности мнениям специалистов – экспертов.

Точность и надежность этого метода (процедуры ранжирования) в значительной степени зависят от количества объектов (факторов). Чем меньше таких факторов, тем выше их “различимость” с точки зрения эксперта, а следовательно, тем более надежно можно установить ранг фактора. Во всяком случае количество исследуемых факторов не должно быть больше 20, а наиболее эффективна эта процедура, когда этих факторов меньше 10 [52].

Таким образом, в задачу классификации входит установление степени принадлежности исследуемых объектов к тому или иному классу, т.е. необходимо идентифицировать объекты управления с полученными классами.

Пусть исследуемая совокупность состоит из S классов, полученных в результате классификации. Тогда каждому объекту $Z \in U$ необходимо поставить в соответствие S действительных неотрицательных чисел $\mu(S_{e/z})$ ($e = 1, 2, \dots, n$), означающих вероятность того, что объект Z относится к k -му классу. Очевидно, что $\sum_{i=1}^n \mu(S_{e/z}) = 1$. Для каждого класса можно рассчитать оценку вероятности того, что объект, обладающий e -й градацией признака x_r из описания класса, принадлежит данному классу:

$$P_k(x_r^e) = \frac{n_k(x_r^e) + 1}{n_k(x_r) + e(x_r)}. \quad (2.2)$$

Здесь $n_k(x_r^e)$ – число объектов, обладающих e -й градацией x_r в k -том классе; $e(x_r)$ – число градаций признака x_r ; $n_k(x_r)$ – число объектов в k -м классе, имеющих любое из значений x_r .

Соответственно вероятность принадлежности объекта к k -му классу с учетом всей совокупности признаков из описания будет равна произведению вероятностей $P_k(x_{er})$ с числом сомножителей, равным числу признаков описания.

Оценка априорных вероятностей каждого класса записывается как:

$$p(S_k) = n_k / n. \quad (2.3)$$

Используя формулу Байеса, получим выражение для оценки $\mu (S_k/z_i)$ – степени принадлежности объекта z_i с измерениями $\{x_n^i\}$ к k -му классу:

$$m(S_k / z) = \frac{p(S_k) P_k(z_i)}{\sum_{k=1}^n p(S_k) P_k(z_i)} . \quad (2.4)$$

Здесь $P_k(z_i) = \prod_{(r)} P_k(x_r^i)$, а $P_k(x_r^i)$ вычисляется по формуле (2,2) с учетом категории, к которой относится объект z_i по признаку x_r .

Задача классификации угольных предприятий состоит не только в получении отдельных однотипных групп шахт. Чаще всего на стадии проектирования требуется отнести ту или иную единицу угольной шахты к одному из имеющихся классов (групп), т.е. решить задачу диагностики. При этом представляет интерес оценка различимости выделенных классов, называемая иногда оценкой ошибки диагностирования. Если предположить, что признаки-компоненты описания классов независимы, то эту оценку можно получить как отношение функций принадлежности :

$$g_{k,k+1} = \frac{m(S_k / z)}{m(S_{k+1} / z)} \approx \frac{p(S_k) P_k(z)}{p(S_{k+1}) P_{k+1}(z)} , \quad (2.5)$$

где $P_k(z) = \prod_{(j)} P_k [r_j(k)]$.

По аналогии с теорией проверки статистических гипотез рассмотрим критерий согласия χ^2 ,

При этом, через α обозначим вероятность ошибки, заключающейся в принятии класса (группы) S_k за S_{k+1} при идентификации объекта, а через β – ошибку признания S_{k+1} за S_k .

Если

$$\frac{a}{1-b} < g_{k,k+1} < \frac{1-a}{b} , \quad (2.6)$$

то классы не различимы по последовательности информативных признаков $x_1, \dots, x_j \dots, x_q$ с заданной степенью надежности. Выражение (3) может служить

дополнительным критерием оценки при построении иерархической типологической классификации, а последовательность значимых признаков, удовлетворяющая (3), оказывается достаточной в смысле информативности и является дискриминирующей по отношению к k-му классу [44,53].

При построении и исследовании классификаций производственных систем рекомендуется следующая схема рис 2.1

Приведенный теоретико-информационный подход может применяться для решения других задач ЭА, и в частности, построения типологической классификации действующих угольных шахт с учетом состава природных, технологических, энергетических и других информативных факторов. Полученную совокупность факторов, влияющих на электропотребление угольных шахт, можно применять для решения самых разнообразных производственных задач, в том числе и связанных с повышением энергоэффективности, входящих в энергетический аудит угольных шахт.

2.2. Формализация факторных взаимосвязей объекта исследования

Классификация угольных шахт связана с формализацией факторных взаимосвязей (технологических, технических, энергетических и других показателей) с помощью различных математических методов (ранговой корреляции, оптимизации и др.). Она требует учета большого количества переменных информативных факторов, что затрудняет анализ степени их влияния на формирование электропотребления. Поэтому в первую очередь необходимо нахождение наиболее приоритетных и постоянных факторов.

Для шахт Западного Донбасса характерна относительная стабильность показателей технологических процессов и систем разработки [8]. Это позволяет при формализации факторных взаимосвязей производить выбор из них основных с достаточной надежностью и точностью. Наиболее эффективно, при этом, применение экспертно-статистических методов и метода главных компонент [4,10].

2.2.1 Экспертно-статистические методы выявления и отбора приоритетных информативных факторов.

Для выявления приоритетных (значимых) информативных факторов энергоэффективности угольных шахт принят метод ранговой корреляции, в основу которого положена аргументированность суждения высококвалифицированных специалистов в данной отрасли. При системном подходе к получению экспертных оценок состав этих факторов наиболее точно устанавливается согласно следующему алгоритму [54,56]:

- выделение из сравнительно большой совокупности приоритетных технологических факторов, формирующих электропотребление;
- установление формы проведения опроса (по анкетам, анонимно);
- формирование экспертной группы, в которую входят специалисты, занимающиеся изучением эффективности использования электроэнергии (количественный состав экспертной группы составляет в пределах $5 \leq n \leq 10$);
- формирование правил и порядка работы экспертной группы, основанных на принципах системы экспертных оценок.

Схема принятия решений при распознавании объекта представлена на рис.2.2.

С учетом принятого экспертиза проводилась по специально разработанной опросной анкете, в которую на основании теоретического анализа технологического процесса и оперативных сведений включено 12 информативных факторов: x_1 – годовая добыча; x_2 – общий объем проведенных выработок; x_3 – количество очистных забоев; x_4 – нагрузка на очистной забой; x_5 – мощность пласта; x_6 – приток воды; x_7 – количество метана на 1 тонну добычи; x_8 – численность персонала; x_9 – скорость проведения подготовительных выработок; x_{10} – уровень комбайнового проведения выработок; x_{11} – длина лавы; x_{12} – глубина разработки [56].

В качестве экспертов выступили ведущие специалисты энергетической и технологической служб, организаторы производства, работники соответствующих отделов ДТЭК ПАО “Павлоградуголь”. Причем опрос специалистов-экспертов выполнен в несколько упрощенной форме по сравнению с требованиями классического метода экспертных оценок. В каждой из предложенных анкет шесть экспертов, независимо от своих коллег, качественно оценивали тот или иной фактор электропотребления.

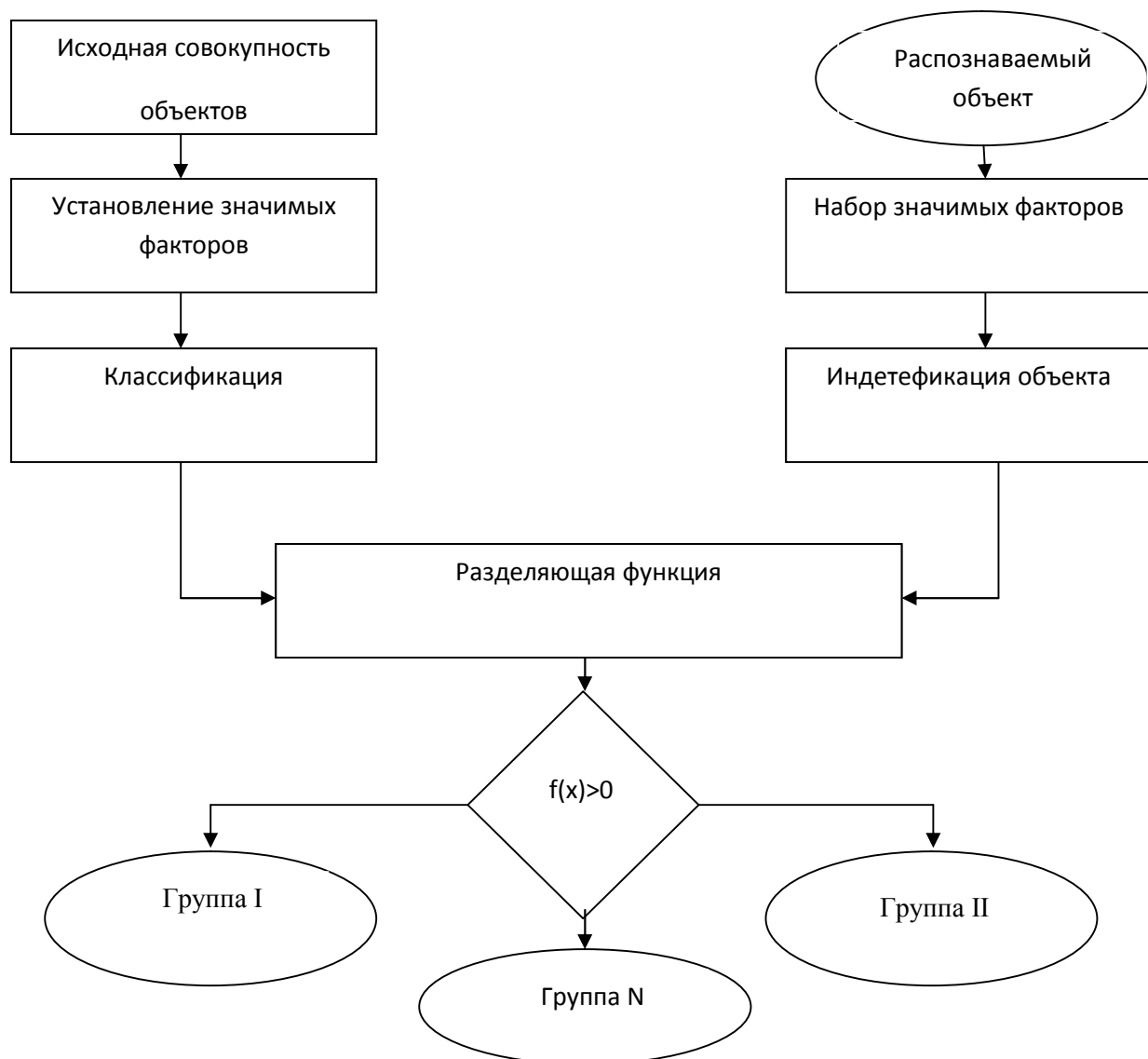


Рис. 2.2 Схема принятия решений при распознавании объекта

В табл.2.1 приведен пример заполнения опросной анкеты для шахты “Терновская”. В основу экспертной оценки положена семибальная шкала, со-

гласно которой 12-ти принятым факторам присваивается соответствующий номер (ранг). При этом наиболее значимому фактору приписывается первый ранг, а наименее важному – седьмой. Для удобства последующей обработки полученной от экспертов информации ранги соответствующим факторам присваивались только в виде натуральных чисел (в анкете не должно содержаться нулевых или дробных рангов)

В табл.2.1 по сути приведена первоначальная (исходная) матрица рангов, полученная на основе анкет шести экспертов. Поскольку не все эксперты установили ранговое различие между несколькими смежными факторами (разным факторам присвоен один и тот же ранг), оказалось, что число рангов N не равно числу ранжируемых объектов (факторов) n . В таких случаях объектам приписывают так называемые стандартизированные ранги.

Таблица 2.1

Первоначальная матрица рангов (мест)

Эксперт $j = 1, m$	Информативный фактор $i = 1, n$											
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
1	3	6	6	3	4	1	2	3	7	3	2	1
2	1	6	7	3	3	3	2	4	7	3	3	3
3	2	5	4	2	5	1	4	3	6	4	2	3
4	1	5	6	4	4	2	3	3	5	3	2	2
5	1	4	5	3	3	2	4	4	7	4	3	2
6	2	7	4	2	3	3	4	4	5	4	2	1

Общее их число рангов полагают равным n , а объектам, имеющим одинаковые ранги, присваивают стандартизированный ранг, который представляет собой среднее значение суммы рангов (мест), поделенных между факторами одинакового ранга. Поэтому исходная матрица была преобразована таким образом (табл.2.2), чтобы выполнялось условие [57]:

$$S_N = \sum x_i = n(n + 1) / 2, \quad (2.7)$$

где S_N – сумма рангов, полученная в результате ранжирования принятых факторов; x_i - ранг (место) i - го фактора среди остальных $(n - 1)$ факторов строки.

Таблица 2.2

Преобразованная матрица рангов (мест)

Эксперт $j = 1, m$	Информативный фактор $i=1, n$												W
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	
1	6,5	10,5	10,5	6,5	9,0	1,5	3,5	6,5	12	6,5	3,5	1,5	78
2	1	10	11,5	5,5	5,5	5,5	2	9	11,5	5,5	5,5	5,5	78
3	3	10,5	8	3	10,5	1	8	5,5	12	8	3	5,5	78
4	1	10,5	12	8,5	8,5	3	6	6	10,5	6	3	3	78
5	1	8,5	11	5	5	2,5	8,5	8,5	12	8,5	5	2,5	78
6	3	12	8,5	3	5,5	5,5	8,5	8,5	11	8,5	3	1	78
$\sum_{j=1}^m x_{ij}$	15,5	62	61,5	31,5	44	19	36,5	44	69	43	23	19	468
Место	1	11	10	5	8	2	6	9	12	7	4	3	
\bar{x}_i	5	1,2	1,3	2,4	1,8	4,1	2,1	1,8	1,1	1,1	3,4	4,1	

Групповая экспертная оценка считается достаточно надежной только при условии хорошей согласованности мнений специалистов. Вот почему статистическая обработка информации, полученная от экспертов, должна включать в себя оценку степени согласованности (конкордации) мнений экспертов о влиянии перечисленных выше факторов на процесс электропотребления угольных шахт.

В качестве критерия такой оценки принят коэффициент конкордации Кенделла W, т.е. общий коэффициент ранговой корреляции для группы из m специалистов-экспертов, который рассчитывается как [52]:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (2.8)$$

где S – сумма квадратов разностей (отклонений) рангов от их среднего значения,

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m x_{ij} - a_{ij} \right]^2; \quad (2.9)$$

$\sum_{j=1}^m x_{ij}$ – сумма рангов по каждому фактору, полученная от всех экспертов;

a_{ij} – среднее значение рангов по всей преобразованной матрице,

$$a_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad (2.10)$$

Очевидно, что величина S имеет максимальное значение S_{\max} в случае, когда все эксперты дают одинаковые оценки, т.е. наблюдается наилучшая согласованность мнений экспертов.

Тогда коэффициент конкордации

$$W = \frac{S}{S_{\max}} \quad (2.11)$$

может изменяться от 0 до 1. Считают, что при $W = 1$ все мнения специалистов-экспертов согласуются полностью и при $W = 0$ – расходятся [57].

При “связанных” рангах, когда какой-либо эксперт не может установить ранговое различие между несколькими смежными факторами и приписывает им одинаковые ранги, коэффициент конкордации

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j} \quad (2.12)$$

где $T_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)$ – число одинаковых (совпавших) рангов в i -м ранжировании.

В рассматриваемом случае для шахты “Герновская” коэффициент конкордации равен 0,88. Поэтому мнения специалистов можно считать согласованными. Значимость коэффициента W проверяют по критерию Пирсона χ^2 [52]. Для этого вычисляется фактический параметр критерия Пирсона $\chi_{\Phi}^2 = m(n-1)W$.

При “связанных” рангах

$$c_{\Phi}^2 = \frac{12S}{m n(n+1) - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^m T_i} \quad (2.13)$$

Затем находится табличное значение χ_{τ}^2 , которое при заданной доверительной вероятности (надежности) $P = 0,95$ и числе степеней свободы $f = n - 1 = 11$ составляет 4,57 [58].

Как видно, $\chi_{\Phi}^2 = 58,1 > \chi_{\tau}^2 = 4,57$, т.е. подтверждается достаточно высокая степень согласованности мнений экспертов по всей совокупности рассматриваемых характеристик.

Аналогичные расчеты выполнены для остальных угольных шахт ДТЭК ПАО “Павлоградуголь” и их результаты приведены в табл. 2.3, из которой следует, что коэффициент конкордации располагается в области положительных значений, отличных от нуля. Это свидетельствует о согласованности мнений экспертов по всем исследуемым угольным шахтам.

На рис. 2.3 представлена априорная гистограмма распределения сумм рангов экспертных оценок и аппроксимирующая ее зависимость между значимыми технологическими факторами и эффективностью работы угольной шахты [56].

Относительный уровень значимости факторов z_i определен как

$$z_i = \frac{S_N}{\sum_{j=1}^m X_{ij}}, \quad (2.14)$$

Гистограмма распределения информативных факторов по значимости их влияния на эффективность работы угольной шахты условно разбита на две совокупности: $z_i > 1,81$ для факторов I совокупности (наиболее значимые), $z_i < 1,81$ для факторов II совокупности (менее значимые). Графическая интерпретация разделения z_i представлена на рис. 2.3.

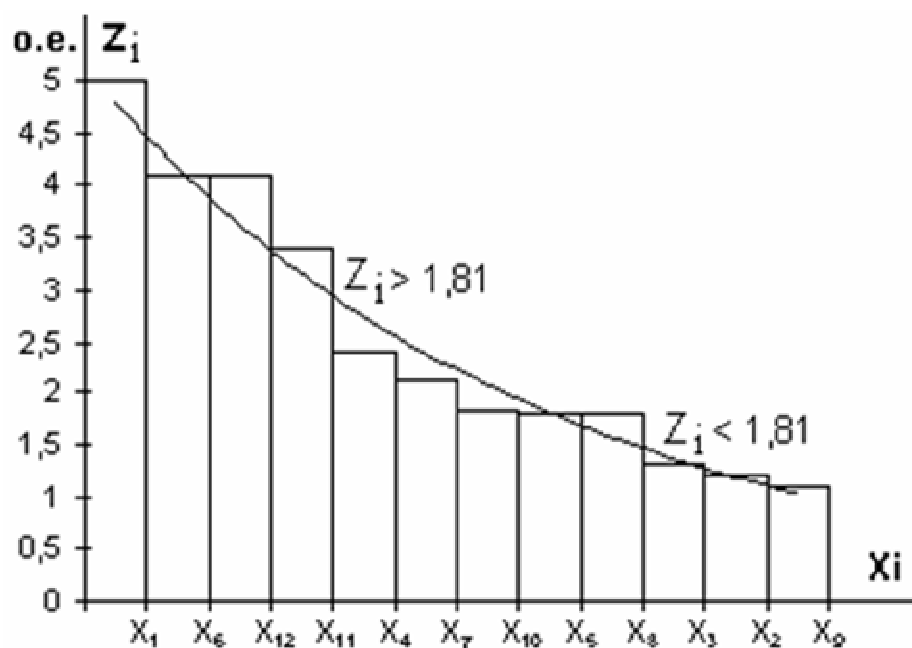


Рис. 2.3. Гистограмма распределения значимости информативных факторов

Таблица 2.3

Результаты расчета и проверки коэффициента конкордации W

Шахта	W	χ^2_{Φ}	χ^2_{τ}
“Благодатная”	0,82	52,80	4,57
им.Героев Космоса	0,84	52,14	4,57
“Днепровская”	0,82	54,12	4,57
им.Сташкова	0,87	57,74	4,57
“Самарская”	0,86	56,48	4,57
“Юбилейная”	0,82	54,20	4,57
“Степная”	0,81	53,40	4,57
“Павлоградская”	0,87	57,70	4,57
“Терновская”	0,88	58,10	4,57
“Западно-Донбасская”	0,80	52,80	4,57

Относительный уровень значимости факторов z_i определен как

$$z_i = \frac{S_n}{\sum_{j=1}^m x_{ij}}. \quad (2.15)$$

Все технологические факторы по значимости их влияния на эффективность работы угольной шахты условно разбиты на две группы: $z_i > 1,81$ – для факторов I (наиболее значимые), $z_i < 1,81$ – для факторов II (менее значимые). Графическая интерпретация разделения z_i представлена на рис.2.4.

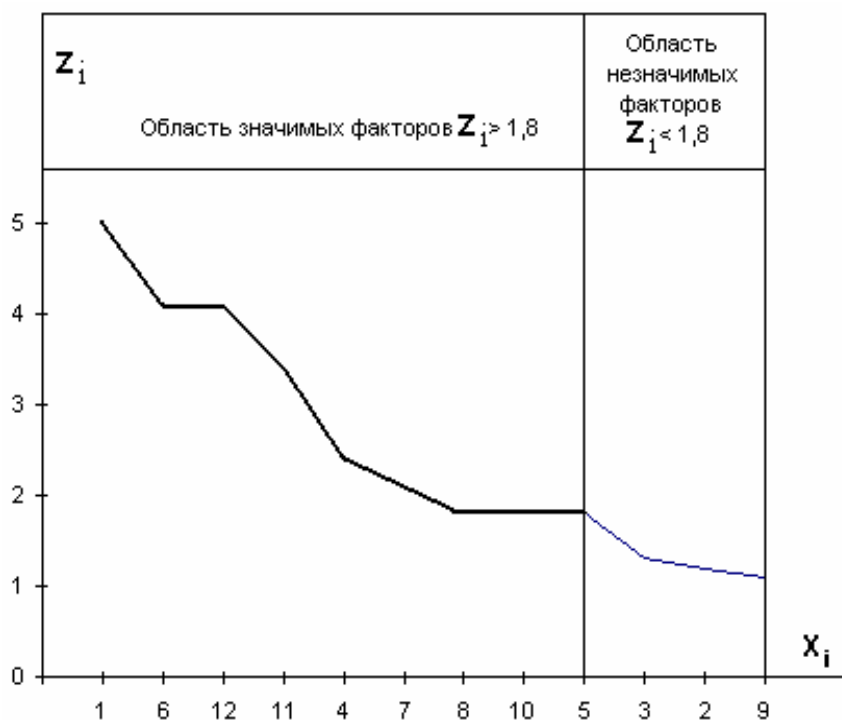


Рис. 2.4. Графическая интерпретация разделения областей z_i

Анализ показывает, что наиболее существенное влияние на эффективность электропотребления оказывают шесть технологических факторов: годовая добыча, нагрузка на очистной забой, длина лавы, количество метана на 1 тонну добычи, глубина разработки, приток воды в шахту. Однако такие факторы, как количество метана на 1 тонну, приток воды в шахту и глубина разработки, хотя и имеют достаточный вес в общем факторном поле, но могут не учитываться, поскольку являются неуправляемыми.

Таким образом, с помощью экспертно-статистического метода выявлена достаточная согласованность мнений специалистов; произведен выбор совокупности факторов и установлена их предпочтительность; предопределена воз-

возможность формирования факторного пространства энергоэффективности угольных шахт на базе управляемых факторов (годовая добыча, нагрузка на очистной забой, длина лавы), которые могут быть использованы при построении многокритериальных оптимизационных моделей объекта управления.

2.2.2 Анализ и формирование факторного пространства энергоэффективности угольных шахт.

Угледобывающие предприятия относятся к сложным производственным объектам n - мерного выборочного пространства с большим числом исходных многомерных признаков, каждый из которых в отдельности может характеризоваться несколькими показателями количественного и качественного выражения. В настоящее время еще не разработана система факторов для однозначно описания признакового пространство, установление формы и величины их воздействия на эффективность функционирования ШПС [28].

В связи с этим при формировании факторного пространства необходимо проводить тщательный анализ и обработку замеряемого на исследуемых объектах множества признаков с учетом многогранного их описания, взаимосвязанности и в значительной мере дублирования. Зачастую информативные характеристики лишь в косвенной форме отражают наиболее существенные, но не поддающиеся непосредственному наблюдению и измерению внутренние, скрытые свойства объектов. В таких случаях очевидна попытка концентрации информации, т.е. выражения большего количества исходных косвенных признаков через меньшее, но с более емкими внутренними характеристиками.

К новой системе признаков предъявляются различные требования: максимальная информативность с точки зрения правильного разграничения на классы, взаимная некоррелированность и др. Выполнение этих требований возможно только с использованием строгих математических методов. В настоящее время для указанных целей широко применяется многомерный статистический анализ, с помощью которого устанавливаются неявные закономерности, объективно существующие в изучаемых явлениях. Наиболее перспективным и при-

емлемым для условий угольных шахт являются факторный анализ, и в частности, метод главных компонент [59,60]. Он позволяет перейти от некоторого множества изучаемых объектов, заданных большим набором косвенных непосредственно измеряемых признаков, к описанию меньшим числом максимально информативных глубинных переменных, отражающих наиболее важные свойства явления; без искажения исходной информации сокращать факторное поле энергоэффективности, выделить и обосновать целостную систему факторов, существенно влияющих на режим электроиспользования, отделить взаимозависимые факторы от независимых, приоритетные от малозначимых [59].

Такой анализ не требует априорного подразделения переменных на зависимые и независимые, поскольку позволяет одновременное исследование сколь угодно большого числа взаимосвязанных переменных; исключает допущение “о неизменности всех прочих условий”, свойственного многим другим методам статистического анализа. В связи с этим при исследовании явления во всем многообразии его реальных взаимосвязей факторному анализу отдается предпочтение [59].

Применительно к горнодобывающим предприятиям признаковое поле, формирующее их электропотребление, включает следующие показатели: годовую добычу, общий объем проведения выработок, количество очистных забоев, суточную нагрузку на очистной забой, среднединамическую мощность пласта, приток воды в шахту, количество метана на 1т. добычи угля, среднесписочную численность персонала, общий объем вскрывающих и подготовительных выработок, длину лавы, глубину разработки, уровень комплексной механизированной добычи и нагрузку на нее. При этом они представлены как множество исследуемых признаков $y^{(1)}, \dots, y^{(p)}$, каждый из которых получен в результате некоторой линейной комбинации непосредственно измеренных на объектах исходных признаков $x^{(1)}, \dots, x^{(p)}$. Новые признаки $y^{(1)}, \dots, y^{(p)}$ обладают рядом удобных статистических свойств. Например, они упорядочены по степени рассеяния в изучаемой совокупности объектов; первый признак обладает наи-

большой степенью рассеяния, т.е. наибольшей дисперсией. Поэтому во многих задачах обработки многомерных наблюдений и, в частности, в задачах классификации представляют интерес в первую очередь лишь те признаки, которые обнаруживают наибольшую изменчивость при переходе от одного объекта к другому.

В методе главных компонент основными являются уравнения:

$$\mathbf{x} = \hat{\mathbf{a}} \mathbf{w}_{ir} \mathbf{z}_r \quad (i, r = 1, 2, \dots, p), \quad (2.16)$$

где \mathbf{z} – величина r -ой компоненты; w – доля r -ой компоненты в i -ой переменной.

Предположим, что исследуемые признаки $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$ извлечены из некоторой p -мерной генеральной совокупности, определяемой соответствующей вероятностной мерой. При этом существенное значение в данном случае из всех характеристик генеральной совокупности имеет лишь ковариационная матрица $\hat{\mathbf{a}} = [s_{ij}]$, где $s_{ij} = \mathbf{M}(\mathbf{x}^{(i)} - \mathbf{a}^{(i)}) * (\mathbf{x}^{(j)} - \mathbf{a}^{(j)})$; $i, j = 1, 2, \dots, p$. Здесь $\mathbf{a}^{(i)}$ - компоненты вектора \mathbf{a} средних значений признаков $\mathbf{x}^{(i)}$. Элементы s_{ij} матрицы $\hat{\mathbf{a}}$ не изменяются при замене признаков $\mathbf{x}^{(i)}$ признаками $\hat{\mathbf{x}}^{(i)} = \mathbf{x}^{(i)} - \mathbf{c}^{(i)}$ ($\mathbf{c}^{(i)}$ - произвольные постоянные числа), поэтому считаем, что вектор средних значений $\mathbf{a} = \mathbf{0}$.

Ковариационная матрица $\hat{\mathbf{a}}_y$ главных компонент $y^{(1)}, \dots, y^{(p)}$ будет иметь вид:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_2 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \mathbf{I}_4 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Изменение относительной доли дисперсии (веса компоненты) определяется как [61]:

$$q(p') = (\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \dots + \mathbf{I}'_p) / (\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \dots + \mathbf{I}_p), \quad (2.18)$$

Нормирование данных производится по формулам:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

$$D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (2.19)$$

$$X'_i = \frac{X_i - \bar{X}}{D_x^{1/2}}.$$

Алгоритм “сжатия” методом главных компонент представлен на рис.

2.5

Для обработки исходной информации о функционировании десяти шахт ДТЭК ПАО “Павлоградуголь” составлена программа на алгоритмическом языке “Паскаль”. Полученные результаты представлены в табл.2.4, из которой видно, что наиболее существенные влияния на формирование электропотребления оказывают: годовая добыча, нагрузка на очистной забой, приток воды в шахту, численность персонала и длина лавы.

Таким образом, применение метода главных компонент позволило предельно “сжать” исходную информацию и для дальнейших исследований рекомендовать перечисленные выше технологические факторы, оказывающие влияние на формирование электропотребления: годовая добыча, нагрузка на очистной забой, приток воды в шахту, численность персонала и длина лавы.

Таблица 2.4

Результаты вычисления доли ω_{ir} в i -той переменной

Номер компоненты	Название компоненты	Вес, %
1	Годовая добыча	31
2	Общий объем проведения выработок	1
3	Количество очистных забоев	1
4	Нагрузка на очистной забой	8

5	Среднединамическая мощность пласта	2
6	Приток воды в шахту	19
7	Количество метана на 1 т. Угля	4
8	Среднесписочная численность персонала	12
9	Скорость проведения подготавливающих выработок	0
10	Уровень комбайнового проведения выработок	4
11	Длина лавы	16
12	Глубина разработки	2

Кроме того, он является базовым в решении таких важных задач ЭА как нормирование и планирование электропотребления, управление электрической нагрузкой, определение оптимальных параметров добычных участков угольных шахт и др.

2.3 Типологическая классификация угольных шахт

Современные угольные шахты являются высокомеханизированными горнодобывающими предприятиями со сложным электроэнергетическим хозяйством. Они характеризуются большим разнообразием технологических процессов, существенно влияющих на эффективность использования электроэнергии. Для ее оценки необходима классификация угольных шахт на отдельные группы на основе широкого набора взаимосвязанных информативных факторов. При этом шахты, вошедшие в одну группу, должны быть сходными в каком-либо фиксированном отношении или близкими по некоторому критерию “похожести”[49]. Угольные предприятия можно классифицировать по:

- административной принадлежности (шахты, относящиеся к различным угольным бассейнам, “Павлоградуголь”, “Донецкуголь”, “Артемуголь” и др.);
- одному из информативных признаков, например, годовому объему добычи (крупные, свыше 1500 тыс.т., и мелкие, менее 700 тыс.т.);
- потребляемой электрической мощности и т.д.

Такая классификация взаимосвязана, однако не отражает всего комплекса специфических особенностей функционирования угольных шахт и применяемой ими технологии. В этом случае целесообразно проведение так называемой типологической классификации и диагностики угольных шахт с использованием, в первую очередь, технологических признаков. Возникающие при этом трудности распознавания объектов, связанные с “размытостью” границ отдельных классов (групп), когда некоторые из них бывают похожими на представителей разных классов, вполне можно преодолеть, используя теорию распознавания образов, дискриминантный анализ, метод главных компонент и др. [49].

Обоснование многомерной типологической классификации угольных шахт на группы с одинаковыми или сходными производственными условиями, в рамках которых имеет смысл проводить анализ эффективности электроиспользования, является одной из важных задач энергетического аудита.

Для проведения типологической классификации приняты угольные шахты ДТЭК ПАО “Павлоградуголь”: 1 – “Благодатная”; 2 – им. Героев Космоса; 3 – “Днепровская”; 4 – им. Сташкова; 5 – “Самарская”; 6 – “Юбилейная”; 7 – “Степная”; 8 – “Павлоградская”; 9 – “Терновская”; 10 – “Западно-Донбасская”, а в качестве исходных принято 12 информативных технологических факторов (см. п.2.2.1).

Применение метода главных компонент позволило предельно сжать исходную информацию и для дальнейших исследований принять 9 информативных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на формирование электропотребления шахтами: $x_1, x_4, x_5, x_6, x_7, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$ [8].

Для решения поставленной задачи использован дискриминантный анализ, с помощью которого состояние проектируемого объекта характеризуется вектором технологических параметров (прямых и косвенных): $x [x_1, \dots, x_n]$. При введении управляющего воздействия $u \in U$ можно вычислить значения функционала $\varphi(x, u)$, характеризующего эффективность функционирования произ-

водства. Всякому состоянию x соответствует оптимальное управление $u = u(x)$, реализующее $\sup \{ \varphi(x, u) : u \in U \}$.

Предположим, что элементы u (их природа при описываемом подходе не имеет значения) составляют конечное множество $U = \{ u_1, \dots, u_m \}$. Множество M всех возможных состояний процесса разбиваем на m подмножеств M_1, \dots, M_m так, что всякому $x \in M_j$ соответствует оптимальное управление $u(x) = u_j$. Нахождение оптимального управления в таком случае следует понимать как задачу установления разбиения $M = \bigcup_{j=1}^m M_j$, если известны конечные подмножества $M'_j \subset M_j$ ($j = 1, \dots, m$), т.е. для конечного множества ситуаций известны оптимальные управления.

Для каждой шахты на основе дискриминантного анализа составляется система соотношений относительно неизвестной функции f класса F ($f \in F$), называемой разделяющей или дискриминантной. Если A и B – конечные множества векторов исследуемых объектов из пространственного поля R^n , то искомая функция $f(x)$ из некоторого класса функций должна быть такой, чтобы

$$f(a) < 0 \quad (\forall a \in A), \quad f(b) > 0 \quad (\forall b \in B),$$

где \forall – квантор общности объектов; a, b – параметры, характеризующие объект.

Решение задачи относительно разделения угольных шахт на однотипные группы при определенных условиях можно получить с помощью алгоритма линейной коррекции, что требует больших затрат времени и труда [61]. Целесообразнее свести решение к упрощенному виду, когда F – класс линейных функций, и составлению системы соотношений, являющейся по сути системой линейных неравенств. Использование линейных функционалов в качестве разделяющих оправдывается их простой структурой и технической реализуемостью, экономией времени, а также тем, что для решения задачи можно применять все известные методы теории линейных неравенств и, в частности, симплекс-метод.

Это позволит осуществлять детальный математический анализ, строгое обоснование и организацию вычислительных процедур.

Принятый для решения задачи метод дискриминантного анализа позволяет эффективно строить поверхности, разделяющие конечные множества в пространствах высокой размерности.

Постановка задачи. С помощью метода дискриминантного анализа определить классы (группы) угольных предприятий с одинаковой эффективностью работы. В качестве прогнозируемых показателей эффективности могут выступать производительность, себестоимость, расход электроэнергии и другие признаки.

Пусть известно конечное множество суждений экспертов следующего вида:

$$x_j > y_j, j = 1, \dots, m,$$

где $x_j \in R^n$, $y_j \in R^n$ – векторы, изображающие факторы (x_j предпочтительнее y_j).

Тогда множества в пространстве R^{2n} запишутся так:

$$M = \{ [x_j; y_j] : j = 1, \dots, m \},$$

$$N = \{ [y_j; x_j] : j = 1, \dots, m \}.$$

С помощью дискриминантного анализа можно получить разбиение пространства R^{2n} :

$$R^{2n} = A \cup B, A \cap B = \emptyset, A \supset M, B \supset N.$$

При этом, если $[x; y] \in A$, то делают прогноз $x > y$, а если $[x; y] \in B$, то $x < y$. Очевидно, что при $[x; y] \in A$ можно считать, что $[y; x] \in B$.

Для условий угледобывающих предприятий согласно суждениям специалистов-экспертов известны конечные множества состояний $A, B, M, N \subset R^n$, в n -мерном пространстве. Каждое множество векторов изображает объекты соответствующего рода (образа) и составляет базу для исследования, т.е., анализируя вид множества векторов, можно выбрать решающее правило, согласно ко-

тому всякий новый объект, представленный n -мерным вектором, будет отнесен либо к первому, либо ко второму, или иному образу (группе).

Другими словами, задача дискриминантного анализа состоит в нахождении поверхности T из заданного класса поверхностей, разделяющих два (или несколько) конечных множества M и N в n -мерном векторном пространстве R^n . Разделяющая поверхность имеет две стороны – “положительную” и “отрицательную”, причем множество M находится на положительной, а множество N – на отрицательной стороне от поверхности [44].

Следовательно, для того чтобы классифицировать любые новые объекты, надо лишь установить, на какой стороне от построенной поверхности находится соответствующая точка фазового пространства.

Найдем поверхность T из некоторого класса поверхностей, разделяющих множества M и N . Пусть произвольный элемент из множеств M и N имеет вид n -мерного вектора

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Поверхность T должна состоять из тех точек пространства R^n , которые удовлетворяют уравнению

$$f = (x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

где f – функция от n переменных.

С учетом условия определенности можно считать, что для точек множества M должно выполняться неравенство $f(x) > 0$, а для множества N – $f(x) < 0$. При этом поверхность T выбирается из некоторого заранее определенного класса поверхностей. Этот класс определяется заданием совокупности F функций f . В нашем случае важен класс линейных функций вида $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_1 \cdot x_1 + 2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n + a_0$, которым соответствуют поверхности (гиперплоскости)

$$T = \{ x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n : a_1 \cdot x_1 + 2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n + a_0 = 0 \}.$$

Такая постановка определяет детерминированную задачу дискриминантного анализа, решение которой позволяет получить искомую поверхность

$$T = \{ x \in R^n, : f(x) = 0 \}$$

и классифицировать всякий новый объект $d = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ по правилу: d относится к первому образу, если $f(d) > 0$, и ко второму образу, если $f(d) < 0$, т.е. однозначно идентифицировать угольную шахту с каким-либо из известных классов (групп).

В случае вероятностного подхода к решению этой задачи можно считать, что x принадлежит тому или иному образу, а разделяющая поверхность должна быть построена так, чтобы при классификации новых угольных шахт математическое ожидание числа ошибок было бы возможно меньшим.

Множества $M \cup N$ составляют исследуемые угольные предприятия; координаты a_1, a_2, \dots, a_n вектора s – значения технологических признаков; совокупность классифицируемых шахт после построения разделяющей поверхности – классы (группы) объектов.

Переходя к модели дискриминантного анализа, можно записать систему

$$\langle a, x \rangle + 1 \leq 0 \quad (\forall a \in A); \quad (2.20)$$

$$\langle b, x \rangle - 1 \leq 0 \quad (0 (\forall b \in B),$$

которая представляет собой частный случай системы линейных неравенств вида

$$\langle c_j, x \rangle - \beta_j \leq 0, \quad (j = 1, \dots, m). \quad (2.21)$$

С другой стороны, всякая система вида (2.21), в которой $\beta_j \neq 0 (\forall j)$, может быть приведена к виду (2.20) и поэтому интерпретирована как задача дискриминантного анализа для разделяемых множеств. Действительно, она

$$\langle \frac{c_j}{b_j}, x \rangle - \frac{\beta_j}{|b_j|} \leq 0, \quad (j = 1, \dots, m) \quad (2.22)$$

эквивалентна системе (2.21) при $\beta_j \neq 0 (\forall j)$.

Итак, выражение (2.21), где $\beta_j \neq 0$ (\forall_j), трактуется как задача дискриминации множеств векторов

$$\left\{ \frac{c_j}{|b_j|} : b_j > 0 \right\} \text{ и } \left\{ \frac{c_j}{|b_j|} : b_j < 0 \right\}. \quad (2.23)$$

Предполагая, что они являются частью всех возможных множеств векторов эффективности работы угольного предприятия, можно их отличать по присущим им признакам, отнесенным к технологическому процессу. При этом угольные шахты функционируют с достаточной степенью эффективности, принимаемой в расчетах, равной себестоимости выпускаемой продукции. Тогда можно записать следующие конечные множества векторов эффективности их работы:

$$N = \{x^1, x^2, x^3, x^4, x^5, x^6\} \subset R^9; \quad (2.24)$$

$$M = \{x^7, x^8, x^9, x^{10}\} \subset R^9. \quad (2.25)$$

Таким образом, для построения разделяющей множества поверхности составлена система соотношений:

$$\begin{cases} f(x^7) > 0, f(x^8) > 0, f(x^9) > 0, f(x^{10}) > 0; \\ f(x^1) < 0, f(x^2) < 0, f(x^3) < 0, f(x^4) < 0, f(x^5) < 0, f(x^6) < 0. \end{cases} \quad (2.26)$$

С учетом принятого класса F линейных функций, т.е.

$$f(x) = f(x_1, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_{10}, x_{11}, x_{12}) = a_1 x_1 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_7 x_7 + a_8 x_8 + a_{10} x_{10} + a_{11} x_{11} + a_{12} x_{12} \quad \text{и}$$

подстановки значений информативных факторов $x_1, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_{10}, x_{11}, x_{12}$, система (2.26) запишется как (2.27).

Решая систему неравенств (2.27) относительно девяти неизвестных симплекс-методом получим коэффициенты разделяющей функции:

$$a_1 = -3,5; \quad a_4 = 6; \quad a_5 = -2500; \quad a_6 = -11; \quad a_7 = 274; \quad a_8 = 0; \quad a_{10} = 24; \quad a_{11} = 14; \quad a_{12} = -6,5.$$

Тогда разделяющая функция примет вид[49]:

$$f(x) = -3,5x_1 + 6x_4 - 2500x_5 - 11x_6 + 274x_7 + 24x_{10} + 14x_{11} - 6,5x_{12}.$$

$$\left. \begin{aligned} &1116a_1 + 530a_4 + 1,04a_5 + 314a_6 + 11,8a_7 + \\ &+ 1942a_8 + 99,2a_{10} + 150a_{11} + 270a_{12} > 0; \\ &1100a_1 + 500a_4 + 0,93a_5 + 48a_6 + 17,6a_7 + \\ &+ 2446a_8 + 98,6a_{10} + 173a_{11} + 497a_{12} > 0; \\ &1210a_1 + 618a_4 + 0,99a_5 + 197a_6 + 12,02a_7 + \\ &+ 2047a_8 + 84,3a_{10} + 165a_{11} + 292a_{12} > 0; \\ &1220a_1 + 585a_4 + 1,03a_5 + 265a_6 + 9,95a_7 + \\ &+ 2064a_8 + 99,6a_{10} + 165a_{11} + 235a_{12} > 0; \\ &1359a_1 + 685a_4 + 0,83a_5 + 871a_6 + 7,6a_7 + \\ &+ 1930a_8 + 95a_{10} + 178a_{11} + 265a_{12} < 0; \\ &1104a_1 + 525a_4 + 0,915a_5 + 60a_6 + 4,5a_7 + \\ &+ 2430a_8 + 99,6a_{10} + 172a_{11} + 582a_{12} < 0; \\ &1324a_1 + 565a_4 + 1,00a_5 + 194a_6 + 11,4a_7 + \\ &+ 2322a_8 + 99,6a_{10} + 174a_{11} + 330a_{12} < 0; \\ &1538a_1 + 642a_4 + 0,99a_5 + 943a_6 + 4,7a_7 + \\ &+ 2556a_8 + 98,9a_{10} + 173a_{11} + 225a_{12} < 0; \\ &1142a_1 + 546a_4 + 0,91a_5 + 257a_6 + 13,4a_7 + \\ &+ 1930a_8 + 95a_{10} + 157a_{11} + 265a_{12} < 0; \\ &927a_1 + 438a_4 + 0,91a_5 + 918a_6 + 7,9a_7 + \\ &+ 1867a_8 + 90,9a_{10} + 175a_{11} + 330a_{12} < 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Таким образом, с помощью экспертных оценок, дискриминантного анализа и симплекс-метода можно из n-мерного признакового пространства угольных шахт выделить две однотипные группы, близкие или одинаковые, например, по условиям угледобычи, организации производства: группа I – шахты 7, 8, 9, 10; группа II – шахты 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Результаты типологической классификации могут быть использованы при прогнозировании развития горнодобывающих предприятий и, в частности, при проектировании новых угольных шахт, поскольку позволяют специалисту заранее подобрать исходные технологические параметры в зависимости от класса (группы) объекта и быть уверенным в эффективности его работы. Наличие групп с практически одинаковыми (сходными) производственными условиями позволяет проводить анализ и оценку эффективности использования электроэнергии в процессе эксплуатации ШПС.

2.4 Определение однородности однотипных угольных шахт по электроиспользованию

Выше отмечалось, что анализ и оценка эффективности использования электроэнергии в процессе эксплуатации угольных шахт невозможны без проведения их классификации по наиболее существенным взаимосвязанным информативным технологическим признакам. Так, для угольных шахт ДТЭК ПАО «Павлоградуголь» на основе математико-статистических методов (главных компонент и дискриминантного анализа) выполнена типологическая классификация. Построена разделяющая функция и выделены две однотипные и достаточно компактные группы угольных шахт с практически одинаковыми (сходными) производственными условиями (угледобыча, режимы электропотребления, организация производства и др.) [49].

Однако эффективность электроиспользования однотипными группами угольных шахт характеризуется большим многообразием электрических показателей, взаимосвязанных в свою очередь с технологическими факторами. Поэтому установление тесноты взаимосвязи между ними, однородности однотипных групп угольных шахт по использованию электроэнергии, а также выявление регулировочных возможностей этих групп с учетом конкретных особенностей каждой из них является составной частью задач ЭА [62].

Кроме того, поскольку регулирование режимов электропотребления является одним из способов экономии электроэнергии, нельзя не считаться с наличием таких общих и объединяющих угольные предприятия факторов, как применение в качестве основных средств регулирования режимов электропотребления водоотливных установок и подъемно-транспортных агрегатов, большое число часов использования максимума нагрузки, формирование постоянной составляющей графика электропотребления режимом работы оборудования добычных забоев и вентиляционного комплекса и др. [63].

Решение поставленной задачи требует применение специальных приемов из теории распознавания образов, и в частности, политетической классифика-

ции, в основу которой положен большой набор значимых технологических или электрических обобщенных показателей, именуемых иногда факторами, компонентами, характеризующими электропотребление шахты. При этом значительно упрощается сравнительная оценка электропотребления среди однотипных объектов с учетом определяющего предположения: однородные объекты должны иметь одинаковые или близкие характеристики по электроиспользованию, что весьма важно при регулировании режимов электропотребления угольной шахты. Причем при установлении сходства объекта за эталон принимается то значение электропотребления, которое с некоторым (принятым) доверительным интервалом является минимальным среди однотипной группы объектов. В этом случае целевая функция должна минимизировать некоторый параметр, определенный на множестве объектов (например, комплексный показатель, отражающий режимы работы, объемы электропотребления, регулировочные возможности шахты и др.). Поскольку в неявном виде этот показатель учитывает значительное количество взаимосвязанных и дополняющих друг друга признаков, характеризующих эффективность работы угольной шахты, по существу, он является латентным фактором – основанием классификации объектов, входящих в ту или иную группу [62].

Анализ показывает, что установление однородности групп однотипных угольных шахт наиболее эффективно выполнить методом кластерного анализа, который позволяет получить так называемые “естественные” типы, т.е. выделить соответствующие группы объектов сходные друг с другом по наиболее информативному числу показателей, существенно влияющему на процесс электропотребления. У этого метода отсутствует обучающая выборка, поэтому группировку однородных шахт целесообразно произвести с помощью иерархической схемы этого метода, обладающего таким свойством: если на некотором уровне два объекта попадают в один кластер, то они остаются в этом кластере и на более высоком уровне [65].

Как правило, при разбиении множеств объектов и построения кластеров используют принцип иерархических процедур, сущность которого состоит в последовательном объединении в класс сначала самых близких, а затем и все более отдаленных друг от друга элементов. Большинство из этих кластер-процедур исходит из матрицы сходства (расстояний), а каждый отдельный элемент рассматривается вначале как отдельный кластер. Общая схема такой иерархической группировки может быть представлена как повторяющееся приложение трех операций к мерам расстояния объект (кластер) – объект (кластер):

- найти наименьшее расстояние d_{pq} между объектом (кластером) p и объектом (кластером) q ;
- объединить p и q в один кластер, присвоив общий индекс, например r ;
- вычислить расстояние d_{rs} от кластера r до любого другого объекта (кластера) s как

$$d_{rs} = \alpha_p d_{ps} + \alpha_q d_{qs} + \beta d_{pq} + \gamma [d_{ps} - d_{qs}],$$

где α_p , α_q , β , γ - параметры, определяющие конкретный алгоритм; d_{ps} , d_{qs} , d_{pq} - расстояния между соответствующими кластерами.

Иерархические кластер-процедуры позволяют решать самые разнообразные задачи классификации: определение неизвестного числа классов, разбиение на заранее заданное число классов, анализ однородности полученных кластеров, выбор оптимальной классификации и др.

Наиболее ответственным моментом для таких процедур является выбор меры сходства (близости) между объектами-метриками. Существуют такие меры сходства: коэффициенты подобия; коэффициенты связи (корреляции); показатели расстояния в метрическом пространстве. При этом любая мера сходства представляет собой некоторую функцию, ставящую в соответствие каждой паре точек (x_i, y_i) некоторое число ρ_{ij} , характеризующее степень сходства между объектами u_i, u_j .

В общем случае принятая метрика должна удовлетворять таким требованиям:

– расстояние от объекта u_i до самого себя минимально, т.е.

$$\rho_{ij}(u_i, u_j) \geq \rho_{ij}(u_i, u_i);$$

– расстояние от объекта u_i до объекта u_j равно расстоянию от u_j до u_i , т.е.

$$\rho_{ij}(u_i, u_j) = \rho_{ij}(u_j, u_i);$$

– расстояние между двумя объектами, измеренное по прямой, короче расстояния, измеренного по любой другой линии, т.е.

$$\rho_{ij}(u_i, u_j) \leq \rho_{il}(u_i, u_l) + \rho_{lj}(u_l, u_j).$$

Последнее требование означает, что признаковое пространство, в котором будет проходить классификация, метрическое. В качестве меры сходства будем использовать одну из наиболее распространенных в задачах кластер-анализа метрику – взвешенное евклидово расстояние, которое позволяет учитывать различную важность признаков:

$$\rho_{ij}(u_i, u_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m \omega_k (x_i^{(k)} - x_j^{(k)})^2},$$

где m - число признаков, по которым производится классификация объектов; ω_k - вес k -го признака.

Расстояние между группами объектов вычисляют как расстояние между центрами ближайших объектов этих групп [66]:

$$\rho(S_i, S_j) = \min \{ r_{ij}(u_k, u_l) \},$$

$$u_k \in S_i$$

$$u_l \in S_j.$$

Здесь S_i - i -я группа объектов.

Центры групп определяются признаками

$$X_{ij}^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} x_i^{(k)}}{N_j},$$

где N_j - количество объектов в j -й группе.

При анализе структуры исследуемых объектов количество групп принимается равным количеству объектов $S_j = \{u_j\}$, $j = 1, 2, \dots, M$. Согласно иерархической кластер-процедуре используют пошаговый алгоритм, при котором рассчитывается матрица попарных расстояний $R = [\rho_{ij}(u_i, u_j)]$, находится минимум этих расстояний для $i \neq j$ и ближайшие группы объединяются в новый класс $S'_j = S_i$ и S_j . Пересчитываются центры групп. Затем находится новый минимум расстояний, но больший предыдущего, соответствующие группы объединяются и процедура повторяется. При этом на каждом шаге фиксируются расстояния между объединяемыми кластерами $d_l = \min(\rho_{ij})$, $l = \overline{M, 1}$ и вычисляется приращение расстояния $\Delta d_l = d_l - d_{(l-1)}$.

Таким образом, на каждом последующем шаге объединяются все более удаленные друг от друга группы. При $l=1$ все объекты объединяются в одну группу. Анализируя функции минимальных межклассовых расстояний, можно оценить качество классификации объектов. Оптимальное число групп соответствует номеру шага, который предшествует шагу с максимальным Δd_l , поскольку дальнейшее объединение объектов является вынужденным.

По алгоритму описанной процедуры, осуществляется построение иерархического классификационного дерева – дендрограммы, которая отражает процесс последовательного объединения групп с учетом меры кластеризации. По дендрограмме и графику минимальных межклассовых расстояний выбирается окончательный вариант классификации угольных шахт. Для выделения наиболее информативных признаков и уменьшения признакового пространства воспользуемся статистическим методом выбора [67,68].

Авторами выполнен анализ статистических связей между тремя совокупностями групп информативных показателей (технологических, режимных и электроиспользования), характеризующих работу электрохозяйства угольных шахт [13]. Для тех пар показателей, у которых $r_{ij} \geq 0,5$, учитывается только лишь

один информативный признак. Это позволило осуществить классификацию на основании сравнительно небольшого числа значимых показателей: W – объем электропотребления, кВт·ч; P_m – максимум нагрузки, кВт; T_m – годовое число часов использования максимальной нагрузки, ч; P_c – средняя мощность, например установленного электродвигателя, кВт; $n_э$ – количество электродвигателей, шт; $Э_t$ – электровооруженность труда, кВт·ч/чел; $Э_p$ – производительность труда электротехнического персонала, кВт·ч/чел. Первые три показателя характеризуют режим работы, четвертый и пятый – состав электрооборудования, шестой и седьмой – штаты исследуемого объекта.

В качестве основного информативного признака для определения однородности классифицируемых объектов предлагается ввести латентный показатель $K_{об}$, в который в неявном виде входят компоненты обобщающего скрытого фактора: режимы работы оборудования шахты, ее мощность и т.п. [62,64]:

$$K_{об} = \frac{(24 - t_n) b_i k_i}{24 n_i a_i + (24 - t_n) b_i k_i},$$

где t_n - время простоя электропотребителей с непрерывно-циклическим режимом работы; n_i - количество электропотребителей мощностью a_i с непрерывным режимом работы; k_i - количество электропотребителей мощностью b_i с непрерывно-циклическим режимом работы.

Значения показателя $K_{об}$ для каждой шахты находятся в пределах от нуля до единицы. Если на этих объектах установлены электропотребители только с непрерывно-циклическим режимом работы, показатель $K_{об} = 1$.

Выделенные в качестве основных информативные признаки характеризуются различными единицами величин и диапазонами изменения. В связи с этим для исключения возможности превосходства некоторых признаков при вычислении расстояний, поскольку они выражаются большими числовыми значениями, и для получения более устойчивых результатов классификации проведено нормирование признаков: их значения центрированы относительно

средней величины по совокупности и отнесены к средним квадратическим отклонениям

$$x_{ij} = \frac{(x_{ij} - \bar{x}_j)}{s_j},$$

где $\bar{x}_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_{ij}$ – среднее значение j-го признака; s_j – среднее квадратическое от-

клонение j-го признака.

Результаты обработки признакового поля для угольных шахт ДТЭК ПАО “Павлоградуголь” (1 – “Благодатная”; 2 – им. Героев Космоса; 3 – “Днепро-ская”; 4 – им. Сташкова; 5 – “Самарская”; 6 – “Юбилейная”; 7 – “Степная”; 8 – “Павлоградская”; 9 – “Терновская”; 10 – “Западно-Донбасская”) приведены в табл.2.5.

Таблица 2.5

Нормированные значения информативных признаков

№ шахты	W	Pм	Tм	Nэ	Эт	Ээ	$K_{об}$
1	0,75	0,55	0,83	1,43	-0,60	-0,34	0,08
2	0,22	0,31	-0,10	-0,37	0,74	1,36	-0,18
3	-1,48	-1,42	-2,58	-0,94	-1,94	-1,92	2,59
4	-0,28	-0,25	0,10	-0,02	-0,67	-1,01	-0,23
5	-0,84	-0,77	-0,27	-0,59	-0,67	-0,42	0,22
6	-0,60	-0,70	1,11	-0,49	-0,09	0,08	0,34
7	-0,16	-0,15	0,22	-0,75	1,27	0,27	-0,71
8	-0,55	-0,56	0,36	-0,92	1,23	1,33	-0,71
9	1,92	2,03	-0,08	1,81	0,50	0,58	-0,71
10	1,03	0,94	0,42	0,83	0,23	0,09	-0,71

Пользуясь значениями двух приоритетных признаков $K_{об}$, T_m , получены достаточно компактные однородные группы угольных шахт с близкими режимами электропотребления и регулировочными возможностями. По результатам расчета построена дендрограмма кластеров, из которой наглядно видны число и состав группируемых угольных шахт (рис.2.5.): в первый кластер J_1 объединились шахты 7,8,9,10; во второй J_2 – 1,2,4,5,6 и в третий J_3 – 3.

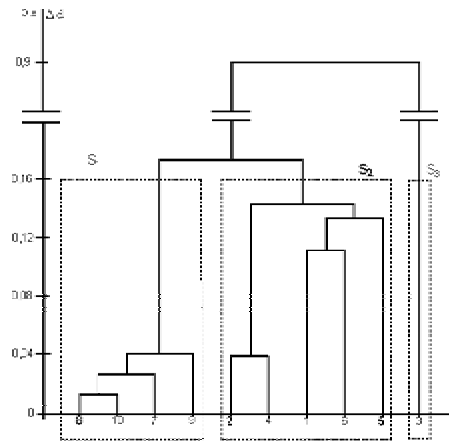


Рис. 2.5. Дендрограмма однородных групп угольных предприятий

С учетом того, что исследуемая совокупность угольных шахт небольшая и фиксирована (10 шахт), а признаковое пространство включает помимо принятых в расчет двух значимых факторов $K_{об}$, T_M и ряд других неучтенных базовых электрических показателей, третью группу можно объединить со второй. Тем более, что согласно профессионально-логическому и изотоническому анализу по уровню значений некоторых параметров (производительность, потребляемая мощность и др.) шахта № 3 значительно ближе к объектам группы J_2 . Оценка возможности объединения групп J_2 и J_3 по критерию близости – минимальной разности между усредненными значениями и суммой экспертных оценок – оказывается вполне допустимой и приемлемой.

Сопоставление результатов типологической и политехнической классификации показывает, что номера шахт однотипных групп, полученных методом дискриминантного анализа, и однородных по электроиспользованию групп, образованных на основе кластерного анализа, совпадают, т.е. шахты однотипных групп являются в то же время однородными по электроиспользованию и регулировочным способностям [62].

Следовательно, в дальнейших исследованиях исходное множество объектов $U = \{u\}$ в принятом признаковом пространстве $x = \{x_1, \dots, x_m\}$ разделяется на две компактные однотипные и однородные по характеристикам электроиспользования группы угольных шахт (табл. 2.6.).

Анализ показывает, что в процессе проведения ЭА могут встречаться и другие варианты набора исходных данных статистической совокупности и, естественно, иные типологические группы, не адекватные группам политетической классификации по однородности электроиспользования.

Однако алгоритм выделения и идентификации угольных шахт к тому или иному классу (группе) остается прежним, т.е. сохраняется универсальный характер теоретико-информационного подхода к классификации ШПС [50].

Каждая классификация имеет конкретное и вполне самостоятельное значение, а совместное использование полученных результатов позволяет сформировать окончательные характерные группы (классы) исследуемых объектов, которые являются аналогами распознавания образов (шахт) и, в конечном счете, значительно упрощают аудиторской группе задачу сравнения эффективности по электропотреблению.

Таблица 2.6.

Результаты типологической и политетической классификации угольных шахт ДТЭК ПАО “Павлоградуголь”

Номер шахты	Классификация		Группа
	Типологическая	Политетическая	
	Дискриминант-ный анализ	Кластерный анализ	
1	II	II	II
2	II	II	II
3	II	III	II
4	II	II	II
5	II	II	II
6	II	II	II
7	I	I	I
8	I	I	I
9	I	I	I
10	I	I	I

Кроме того, наличие классификации угольных шахт позволяет аудиторской группе привести все многообразие наблюдаемых факторов и показателей в систему ранжированных уровней (классов) и не только проводить эффективный анализ, но и формировать базу данных о расходах электроэнергии на угольных

шахтах. Так из двух полученных компактных групп одна (шахты 7, 8, 9, 10) имеет более высокую эффективность, а вторая (шахты 1, 2, 3, 4, 5, 6) меньшую эффективность электропотребления, а, следовательно, существуют условия для ее повышения.

Результаты выполненной классификации могут быть использованы при разработке методики ЭА для проведения обследования электрохозяйства и комплексной оценки эффективности использования электроэнергии ШПС.

Глава 3. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРО- ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА СТАДИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА

3.1. Критерии энергоэффективности угольных шахт

Энергосбережение представляет актуальную задачу для всех стран вне зависимости от уровня развития экономики, поскольку существенно влияет на энергетическую безопасность, конкурентоспособность продукции и экологическое состояние. В Украине оно признано одним из приоритетных направлений государственной политики и рассматривается не как очередная компания, а как долгосрочная и чётко спланированная программа действий [1].

В условиях нынешнего дефицита энергетических и материальных ресурсов и крайне нерационального использования электроэнергии вопросы энергосбережения охватывают практически все отрасли промышленности, в том числе и горнодобывающие предприятия. Недостаточный уровень эффективности использования электроэнергии приводит к увеличению себестоимости добычи угля или к снижению качества продукции. Экономия электрической энергии позволяет покрыть часть энергетического дефицита в энергосистемах без дополнительных расходов энергоресурсов. При этом повышение эффективности использования является основой её экономии.

Выделяют два основных направления повышения эффективности использования энергоресурсов: снижение затрат энергии (главным образом за счёт ис-

ключения непроизводительных потерь, связанных с перетоками реактивной мощности, несимметрией, высшими гармониками и т.д.) и интенсификация технологических процессов, направленная на опережение роста производительности по сравнению с ростом общего расхода электроэнергии. В обоих случаях достигается снижение удельных расходов электроэнергии на технологический процесс. Непроизводительные потери, как правило, очевидны, и если для их устранения не требуется значительных капитальных вложений, проводят организационно-технические мероприятия по экономии электроэнергии. Однако достичь существенного снижения энергозатрат при этом не удаётся, хотя это принципиально возможно, в первую очередь за счёт приведения технического состояния и условий эксплуатации потребителей в соответствии с ПТЭ. Кроме того, особенности технологии подземных горных работ ограничивают возможности снижения удельных расходов электроэнергии путём интенсификации технологических процессов.

Анализ показывает, что значительное снижение удельного расхода электроэнергии наблюдается при создании энергосберегающих технологий путём установления такого уровня некоторых параметров технологического процесса, связанных с режимом электропотребления, которые обеспечивают минимум затрат электроэнергии при сохранении объёма выпускаемой продукции.

Рациональное использование электроэнергии не обязательно должно обуславливаться уменьшением её абсолютного расхода. Это увеличение при уменьшении удельного расхода может быть вызвано ростом объёма выпуска продукции, поэтому такой расход также считается рациональным и эффективным.

В последнее время вопросы экономии электроэнергии рассматривают не только во взаимосвязи с режимами электропотребления, нормативного контроля, расширения новых ресурсосберегающих технологий, но и с учётом повышения уровня информационно-методического обеспечения административных и диспетчерских служб управления энергоёмкими технологическими агрегатами и др. [10,64].

3.2. Эффективный подход к экономии электроэнергии на угольных шахтах

Анализ показывает, что угольные шахты Западного Донбасса характеризуются относительной стабильностью показателей технологических процессов и систем разработки. Это позволяет найти обобщенный подход, при использовании информационно-методического и математического обеспечения задачи ЭА по экономии электроэнергии на угольных шахтах [8].

При этом методические аспекты подразумевают совокупность специальных вычислений, связывающих основные технологические процессы с показателями их ресурсоемкости. Добыча углей в Западном Донбассе производится 11 шахтами при годовой их мощности 0,5— 1,5 млн. т. Удельные затраты электроэнергии на разных шахтах составляют 22,1—42,3 кВт·ч/т..

Характеристики грузопотоков шахт таковы, что возможен только статистический прогноз их интенсивности [8]. Остановки по производственным причинам и в результате отказов забойного оборудования составляют около 80% от всего времени не технологических простоев. Очевидно, что основной источник неравномерности грузопотоков — технологические процессы добычи и транспортирования углей в совокупности со сложными горно-геологическими условиями (завалы и обрушения — около 20% времени простоев).

В нашем случае шахта может быть представлена как технологический комплекс с заданной сетью материальных потоков. Практикой установлены их характерные особенности: производство и накопление материала только в узлах сети; наличие материальных потоков по ветвям, соединяющим различные пары узлов; ограниченная пропускная способность ветвей; ограничения на производство и накопление в узлах сети. Рассмотрим формализацию такого сетевого объекта [7,8].

Объект сетевого типа с ненаправленным потокораспределением представляется в виде ненаправленного графа (рис.3.1), состоящего из n узлов и m ветвей.

Модель объекта составляется для случая отклонений от исходного режима, который необходимо задать. Первоначальное направление потоков в сети задается произвольным образом, однако для определенности обозначим положительные направления потоков в виде стрелок рядом с соответствующей ветвью. Поставим в соответствие индексам $i=1, 2, \dots, n$ узлы сети, а индексам $j=1, 2, \dots, m$ — ветви, соединяющие пары узлов с индексами i, L . Тогда топология сети может быть задана блочной матрицей инцидентий A^M . Каждый из узлов сети представляет собой также сеть из N^i узлов и M^i ветвей, заданную матрицей $A^{b,i}$. Узел в матрице инцидентий отображается строкой, а ветвь — столбцом; ее элементы $A_{ij}=1$, если поток по ветвям с индексом j направлен к узлу i , и -1 — поток направлен от i к j , и d — если ветвь не примыкает к узлу.

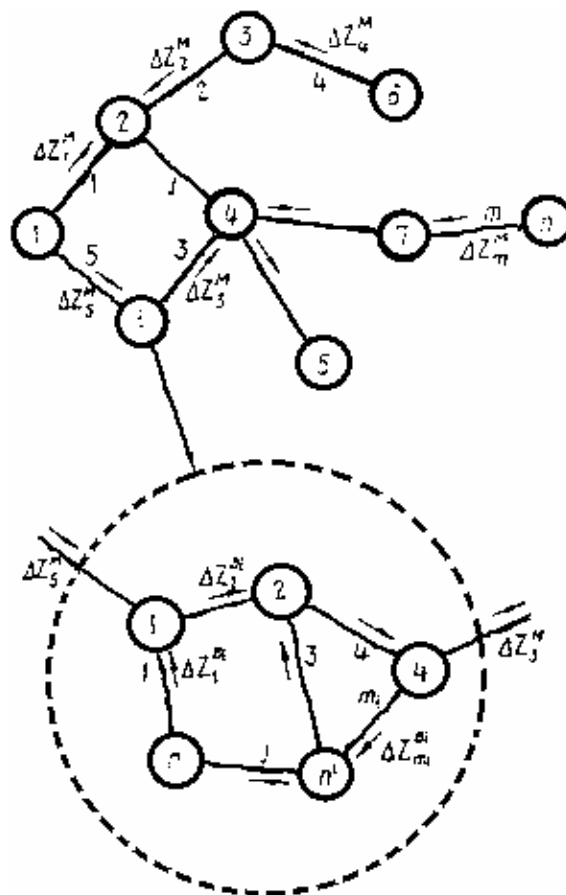


Рис.3.1 Структура двухуровневой сети

Сеть, описанная матрице A^M , образует объект верхнего уровня, а сеть A^{bi} - объекты нижнего. Связи узла с индексом i нижнего уровня с внешними ветвями систем заданы матрицей. A_i^M при $i=1, 2, \dots, n$.

Как правило, с учетом требований, предъявляемых к модели объекта сетевого типа рассматриваемого класса, математическая модель каждой подсистемы может быть представлена в виде линейной системы дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$X^i = F^i X^i + B^i \Delta U^i + D^i A^M \Delta \sum^M ; \quad (3.1)$$

$$\Delta Z^{bi} = C^i X^z, \quad X^i(0) = X_i^z,$$

где X_i - вектор выходных переменных, т. е. отклонение потоков по внутрисистемным ветвям размерности N_c^i ; ΔZ^{bi} - управляющих воздействий подсистемы размерности M^i ; ΔU^i - вектор управляющих воздействий i -й подсистемы размерности N_c^i ; $A_i^M \Delta Z^M$ — вектор, характеризующий топологию связей; i -го подпроцесса с соседними посредством связующих входов(межсистемных потоков); F^i - устойчивая матрица объекта размерности $(N_c^i \times N_o^i)$; B^i, C^i, D^i - матрицы с размерностями $(N_c^i \times N^i), (M^i \times N_c^i), (M^i \times N_i)$ соответственно, характеризующие структуру и параметры сети.

Для перехода в системе (3.1) к математической модели, описывающей состояние системы по прошествии достаточно большого промежутка времени с момента подачи возмущения (это возможно, когда частота возмущений на энергоемкие процессы добычи угля меньше собственных частот объекта): положим, что $X = 0$.

Тогда после преобразований коэффициенты чувствительности по управляющим переменным и связующим входам будут иметь вид:

$$a_{\Delta U}^i = -C^i (F^i)^{-1} B^i ; \quad (3.2)$$

$$a_{\Delta Z} = -C^i (F^i)^{-1} D^i A^M . \quad (3.3)$$

Физический смысл матричных коэффициентов $a_{\Delta U}^i$ заключается в том, что они связывают между собой изменения управляющих воздействий внутри i -го подпроцесса и изменения потоков по внутрисистемным ветвям. Коэффициенты определяют изменение внутрисистемных потоков в зависимости от отклонений потоков по межсистемным линиям, примыкающим к данной подсистеме. Система уравнений (3.1) с учетом (3.2 и 3.3) позволяет установить отклонения внутрисистемных потоков в зависимости от входных воздействий без учета ограничений на пропускные способности ветвей и резервы управления:

$$\Delta Z^{bi} = a_{\Delta U}^i \Delta U^i + a_{\Delta Z}^i \Delta Z^M \quad (3.4)$$

По технологическим условиям добычи и транспортирования горной массы на работу оборудования, пропускные способности ветвей, резервы материала в накопительных емкостях наложены прямые и функциональные ограничения:

$$Z_{min}^{bi} < Z_T^{bi} + \Delta Z^{bi} < Z_{max}^{bj}; \quad (3.5)$$

$$\Delta Z^{Mi} = \alpha_{\Delta U}^i \Delta U^i + \alpha_{\Delta Z}^i \Delta Z^M; \quad (3.6)$$

$$Z_{max}^{Mi} < Z_T^{Mi} + \Delta Z^{Mi} < Z_{max}^{Mi}; \quad (3.7)$$

$$U_{min}^i < U_T^j + \Delta U^i < U_{max}^i, \quad (3.8)$$

где $Z_T^{bi}, Z_{max}^{bi}, Z_{min}^{bi}, Z_T^{Mi}, Z_{max}^{Mi}, Z_{min}^{Mi}$ - векторы текущих и предельно допустимых верхних и нижних значений потоков по внутрисистемным и межсистемным ветвям, размерностей соответственно m_c^i и m_c^{Mi} ; $U_T^i, U_{max}^i, U_{min}^i$ - векторы текущих и предельно допустимых значений управляющих воздействий размерности n^i .

Система линейных уравнений – неравенств (3.5) – (3.8) отражает основные физические и технологические свойства модели объекта сетевого типа и учитывает требования, предъявляемые к ней. Для математического описания сети верхнего уровня применим аналогичный подход. Как показал анализ тех-

нологических схем шахт Западного Донбасса, размерность сети верхнего уровня принимает значения 9—16 узлов, а нижнего не более 6.

Основным компонентом сети является конструкция вида «Узел 1» — «Ветвь» — «Узел 2». Для условий шахты возможны два варианта раскрытия компонентов сети: забой — транспортирование горной массы — бункер; бункер — транспортирование горной массы — бункер.

Функционирование этого компонента зависит прежде всего от интенсивности грузопотока из элемента «Узел 1», надежности работы транспортной ветви и ограничений на ее производительность, а также от емкости элемента «Узел 2».

Неравномерность грузопотока по ветвям будем оценивать с помощью коэффициента

$$k_n = 1 + g + 1/n \sum_{i=1}^n V_i, \quad (3.9)$$

где g - вероятность отказа транспортных средств; n - количество забоев; V_i - коэффициент вариации грузопотока от i -го забоя.

Задаваясь значением $g=0,055$ и принимая среднее значение вариации грузопотока $V_i = 0,7$, получим оценку $k_n = 1,755$. Тогда необходимая емкость накопителя «Узел 1» определяется выражением

$$W_n = \frac{k_n}{k_n} (T_{см} - T_{тп}) (P_{max} - Q_{min}), \quad (3.10)$$

где k_n - коэффициент использования бункера; $T_{см}$ - продолжительность смены, ч; $T_{тп}$ - продолжительность технологических перерывов в течение смены, ч; P_{max} - максимальный грузопоток надбункерной транспортной ветви, т/ч; Q_{min} - минимальный грузопоток подбункерной транспортной ветви, т/ч.

Перейдем к выявлению эффекта неравномерности грузопотоков через нахождение граничного значения коэффициента неравномерности по фактической емкости накопителя ($W_{ф}$) «Узел 2» [64]:

$$k_H^{rp} = \frac{k_H W_\Phi}{(\tau_{cm} - \tau_{tm})(P_{max} - Q_{min})}. \quad (3.11)$$

Сравнение граничного значения коэффициента k_H^{rp} и неравномерности грузопотока с фактическим его значением k_H , которое зависит от Vi , обеспечивает расчет допустимых величин P_{max} или P_{min} в зависимости от выбранного канала управления энергоемкими технологическими процессами. Расчет управляющих воздействий ΔZ^{bi} и ΔZ^{mi} должен производиться таким образом, чтобы учитывать фактор резерва времени

$$t_p = W_\Phi / (P_{max} - Q_{min}). \quad (3.12)$$

Использование фактора резерва зависит от совпадения производственных циклов добычи и транспортирования горной массы с периодами ограничений по потреблению электроэнергии. Например, за время t_p до начала прохождения утреннего максимума нагрузки необходимо перейти на режимы работы, когда производительность надбункерных ветвей будет минимальной, а подбункерной – максимальной в рамках конкретной производственной ситуации. Максимальное использование бункерного хозяйства в периоды ограничений на потребление электроэнергии обеспечит общее снижение удельной энергоемкости.

Реализация изложенных положений полностью зависит от уровня информационного обеспечения, который целесообразно рассматривать с использованием понятия ключевого элемента в рассмотренной выше конструкции «Узел 1» — «Ветвь» — «Узел 2» [70]. Для условий шахты в качестве ключевого элемента может использоваться бункер, оснащенный средствами контроля уровня заполнения. В минимальном наборе эти средства представляют собой датчики наличия горной массы на надбункерной и подбункерной транспортных ветвях, датчики состояния приводов конвейеров непосредственно примыкающих к ключевому элементу, а также датчик верхнего уровня материала в бункере. Максимальное использование производственных резервов в задаче экономии электроэнергии возможно при организации контроля состояния ключевого элемента по вычислительной схеме [71].

Количество транспортных средств, входящих в конструкцию «Ветвь», не имеет значения, если они технологически заблокированы. Транспортная сеть шахты может «проявляться» для задачи экономии электроэнергии введением в выбранные участки средств контроля и формированием ключевых элементов, т.е. возможно последовательное насыщение ключевыми элементами технологической схемы шахты.

Чтобы сохранить возможность использования сетевого описания, нужно выдерживать определенный порядок ввода в схему расчета отдельных ключевых элементов. В первую очередь вводятся объекты верхнего уровня, к которым относятся угольные и породные бункеры, а также участки разгрузки вагонов отдельных горизонтов. В дальнейшем должны вводиться ключевые элементы нижнего уровня бункеры и разгрузочно-погрузочные пункты, расположенные в магистральных выработках. При этом следует придерживаться максимальной связности транспортной сети, что позволит использовать в расчетах рассмотренный выше аналитический аппарат.

Для технической реализации приведенных положений по информационно-методическому обеспечению задачи ЭА по экономии электроэнергии и управлению энергоемкими технологическими процессами шахты целесообразно использовать специализированные информационно-вычислительные комплексы. В состав комплекса в дополнение к базовому набору технических средств нужно включать устройства связи с объектом для обработки дискретной и число-импульсной информации. Количество этих модулей и их модификация зависят от типа используемых датчиков, методов контроля ключевых элементов и их числа. Технические возможности, одного специализированного комплекса, например СМ1810.42, позволяют решить вопросы информационного обеспечения управления энергоемкими технологическими процессами всей шахты[8,14].

Таким образом, для решения задачи ЭА по экономии электроэнергии необходимо использовать методическое обеспечение, базирующееся на сетевом

двухуровневом описании процессов добычи и транспортирования горной массы. Рассмотрение технологически заблокированного оборудования в виде конструкции «Узел 1» — «Ветвь» — «Узел 2» позволяет выполнить привязку сетевого описания к конкретной конфигурации технологической схемы. Определение резервов экономии электроэнергии на конкретном участке может производиться путем определения эффекта неравномерности грузопотоков через емкость накопительных устройств.

Информационно-методическое обеспечение задачи ЭА по экономии электроэнергии связано с контролем состояния ключевых элементов технологической схемы добычи и транспортирования горной массы. В зависимости от схемы контроля можно использовать как имеющиеся датчики состояния поточно-транспортной системы, так и устанавливать дополнительные контрольно-измерительные средства[8].

3.3 Разработка многокритериальной оптимизационной модели энергоэффективности угледобывающих предприятий

Одной из важнейших задач повышения энергоэффективности ШПС является установление влияния параметров технологического процесса на электропотребление угледобывающих предприятий, что достигается построением простых и надежных оптимизационных моделей энергоэффективности объекта управления.

При этом в первую очередь важен выбор наиболее существенных управляемых факторов, формирующих многокритериальную математическую модель. Она должна не только иметь реальный смысл, обладать компактностью, наиболее полно отражать некоторую математическую конструкцию, адекватную исследуемому объекту по принятым критериям, ориентированной на использование определенных методов, но и быть удобным инструментом для управления процессом – моделью принятия эффективных решений.

Анализ информативного факторного поля, влияющего на режим электропотребления угольных шахт, показывает целесообразность включения в мате-

матические модели следующего набора важнейших управляемых в определенном диапазоне факторов: годовой добычи угля x_1 , длины лавы x_2 , суточной нагрузки на очистной забой x_3 и численности персонала x_4 [7].

Тогда с учетом принятых выше критериев и управляемых факторов многокритериальную задачу можно представить в общем виде [15]:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_y &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ @ } \min, \\ \Pi &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ @ } \max, \\ C &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ @ } \min, \end{aligned} \quad (3.13)$$

при ограничениях

$$x_{in} \leq x_i \leq x_{iv}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где \mathcal{E}_y , Π и C – удельное электропотребление, производительность труда рабочего (за месяц) и себестоимость 1 т. угля; x_1, \dots, x_n - искомые технологические параметры с нижним x_{in} и верхним x_{iv} допустимыми уровнями.

Используя статистические данные за определенную ретроспективу, строятся необходимые целевые функции, оптимизируемые при определенных ограничениях, накладываемых на регулируемые (управляемые) переменные. Пределы, в которых изменяются принятые управляемые факторы, представляют собой ограничения первого рода и определяются на основе статистических данных за рассматриваемый период.

В основу построения оптимизационной модели положен множественный регрессионный анализ, позволяющий качественно и количественно определить влияние на принятые критерии энергоэффективности (удельное электропотребление, себестоимость, производительность) угольных шахт всего набора одновременно действующих и в свою очередь взаимозависимых факторов. При этом, как правило, учитывают статистические связи между несколькими величинами одновременно. Однако для практических целей достаточно рассмотрения трёх видов уравнений:

$$x_1 = a_1 + a_2 x_2 + \dots + a_p x_p; \quad (3.14)$$

$$x_1 = b_1 * x_2^{b_2} * x_3^{b_3} * \dots * x_p^{b_p}; \quad (3.15)$$

$$x_1 = b_1 * b_2^{x_2} * b_3^{x_3} * \dots * b_p^{x_p}. \quad (3.16)$$

Рассмотрим случай, когда уравнение имеет вид линейной множественной регрессии (3.13). Тогда можно использовать следующую методику построения математической регрессионной модели.

1. Для всех x_j находим средние значения и средние квадратические отклонения по формулам:

$$x_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n} \quad (3.17)$$

$$\sigma x_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_{ji}^2}{n} - (x_j)^2}, \quad (3.18)$$

где n - число значений x_j .

2. Вычисляем внутренние коэффициенты линейной корреляции, характеризующие тесноту связи между переменными x_j и x_k , по формуле ($j; k = 1, 2, 3, \dots, p$):

$$r_{x_j; x_k} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_{ji} \cdot x_{ki} - \sum_{i=1}^n x_{ji} \cdot \sum_{i=1}^n x_{ki}}{\sqrt{([n \cdot \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{ji})^2] \cdot [n \cdot \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{ki})^2])}}$$

При этом следует иметь в виду, что

$$r_{x_{j_i} x_j} = r_{x_j x_j} \quad \text{и} \quad r_{x_j x_j} = r_{x_k x_k} = 1.$$

3. С учётом полученных коэффициентов $r_{x_j x_k}$ образуем систему линейных уравнений:

$$r_{x_1 x_2} = b_2 + b_3 * r_{x_3 x_2} + \dots + b_p * r_{x_p x_2}$$

$$r_{x_1 x_3} = b_2 * r_{x_2 x_3} + b_3 + b_4 * r_{x_4 x_3} + \dots + b_p * r_{x_p x_3} \quad (3.19)$$

$$r_{x1x4} = b_2 * r_{x2x4} + b_3 * r_{x3x4} + b_4 + \dots + b_p * r_{xp x4}$$

.....

$$r_{x1xp} = b_2 * r_{x2xp} + b_3 * r_{x3 xp} + b_4 * r_{x4 xp} + \dots + b_p,$$

где b_2, b_3, \dots, b_p - коэффициенты, определяемые по данной системе уравнений.

4. Коэффициенты $a_1, a_2 \dots a_p$ выражения (3.20) определяем по формулам:

$$a_2 = b_2 \frac{Sx_1}{Sx_2}; \quad a_3 = b_3 \frac{Sx_1}{Sx_3}; \quad a_\delta = b_\delta \frac{Sx_1}{Sx_\delta}; \quad (3.20)$$

$$a_1 = x_1 - a_2 * x_2 - a_3 * x_3 - \dots - a_p * x_p;$$

5. Подставляем полученные значения коэффициентов в исходное уравнение (3.13), получим

$$\tilde{X}_{ji} = a_1 + a_2 * x_{2i} + \dots + a_p * x_{pi}, \quad (3.21)$$

6. Определяем теоретические значения x_{ji} путём последовательной подстановки в формулу (3.22) последовательно всех значений \tilde{X}_{ji} при $i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p$.

7. Вычисляем среднюю квадратическую ошибку приближения как:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\sum (x_{1i} - \tilde{x}_{1i})^2}{n - 1}} \quad (3.22)$$

Анализ показывает, что с помощью обычных математических приёмов уравнения множественной степенной и показательной регрессий преобразуются в уравнение линейной множественной регрессии, что позволяет пользоваться методикой, приведенной для уравнения этой регрессии (3.13).

Тогда для поставленной многокритериальной задачи регрессионные модели имеют вид:

$$\mathcal{E}_y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + a_3; \quad (3.23)$$

$$P = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + a_n ; \quad (3.24)$$

$$C = s_1x_1 + s_2x_2 + s_3x_3 + s_4x_4 + a_c, \quad (3.24)$$

где b_1, b_2, b_3, b_4 – неизвестные постоянные коэффициенты регрессии, модели \mathcal{E}_y ; c_1, c_2, c_3, c_4 – то же, но модели P ; s_1, s_2, s_3, s_4 – то же, но модели C ; x_1, x_2, x_3, x_4 – наблюдаемые значения регулируемых переменных; a – неизвестная случайная ошибка для регулируемых переменных.

Ниже приведены расчётные значения коэффициентов моделей \mathcal{E}_y, P и C для угольных шахт Западного Донбасса (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Расчет значения коэффициентов регрессивных моделей \mathcal{E}_y, P и C

Мо- дель	\mathcal{E}_y				P				C			
	b_1	b_2	b_3	b_4	c_1	c_2	c_3	c_4	s_1	s_2	s_3	s_4
Знач. коэф.	0,8 x x 10 ⁻²	-0,121	-0,3 x x 10 ⁻¹	0,11x x 10 ⁻¹	0,4 x x 10 ⁻¹	-0,2 x x 10 ⁻¹	0,24x x 10 ⁻¹	-0,13x x 10 ⁻¹	-0,3 x x 10 ⁻¹	-0,154	-0,5 x x 10 ⁻¹	0,31 x x 10 ⁻¹

Для установления адекватности оптимизационных моделей \mathcal{E}_y, P и C реальным условиям шахтной производственной системы, т.е. обоснования правильности выбора их вида и степени полезности параметров b_i, c_i, s_i принят совокупный (множественный) коэффициент корреляции R . Он позволяет производить измерения тесноты связи результативного признака более чем с двумя факторными признаками. При этом предполагается наличие линейных связей как между результативным признаком и всеми факторами в отдельности, так и между самими факторными признаками. Совокупный коэффициент корреляции R всегда положителен и изменяется от 0 до 1. Чем больше R , тем выше значимость (качество предсказания) данной моделью опытных данных [72].

Коэффициент множественной корреляции определяют по формуле:

$$R = \sqrt{1 - \frac{S_{ocm}^2}{S_n^2}}, \quad (3.25)$$

где $\overline{S_{\text{ост}}}^2$ – остаточная дисперсия; \overline{S}_y^2 – дисперсия среднего значения.

Если число наблюдений при расчёте совокупного коэффициента корреляции невелико, то величина R имеет тенденцию к завышению показателя тесноты связи. Поэтому полученное значение R корректируют:

$$R = \sqrt{1 - \frac{n-1}{n-p-1} [1 - R_k^2]}, \quad (3.26)$$

где R_k – скорректированное значение R по количеству наблюдений и числу факторов.

Однако искомый совокупный коэффициент корреляции лучше изобразить с помощью матриц, в которых подстрочные индексы – цифры означают номер матрицы, так что 1 отображает резульативный признак, последующие цифры – факторные признаки по их последовательности.

Например, $R_{1,2,3}$ обозначает совокупный коэффициент корреляции между резульативным признаком и 2-м и 3-м факторными, r_{12} – парный коэффициент между резульативным признаком и 1-м факторным и т.д.

Совокупный коэффициент корреляции между резульативным (1) и 2, 3, ..., n признаками через парные коэффициенты выразится формулой

$$R_{1,2,3,\dots,n} = \sqrt{\frac{\Delta^*}{\Delta}}, \quad (3.27)$$

где Δ^* и Δ – квадратные матрицы.

$$\Delta^* = \begin{vmatrix} r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1n} & 0 \\ 1 & r_{23} & \dots & r_{2n} & r_{21} \\ r_{32} & 1 & \dots & r_{3n} & r_{31} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n2} & r_{n3} & \dots & 1 & r_{n1} \end{vmatrix}, \quad (3.28)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & r_{23} & \dots & r_{2n} \\ r_{32} & 1 & \dots & r_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n2} & r_{n3} & \dots & 1 \end{vmatrix}, \quad (3.29)$$

Матрица – числитель отличается от матрицы – знаменателя лишь тем, что во второй матрице отсутствует первая строка и последний столбец.

Расчёт совокупного коэффициента корреляции, выражающего зависимость удельных расходов электроэнергии $1(\mathcal{E}_y)$ выполнен от четырёх факторов: $2(\mathbf{x}_1)$; $3(\mathbf{x}_2)$; $4(\mathbf{x}_3)$; $5(\mathbf{x}_4)$ с учетом парных для неё коэффициентов. Парные коэффициенты для модели \mathcal{E}_y приведены в табл.3.2

Таблица 3.2

Парные коэффициенты корреляции по данным 10 шахт
ДТЭК ПАО «Павлоградуголь»

Признаки	1(\mathcal{E}_y)	2 (\mathbf{x}_1)	3 (\mathbf{x}_2)	4(\mathbf{x}_3)	5 (\mathbf{x}_4)
1(\mathcal{E}_y)	1	-0,865	0,725	-0,486	0,326
2 (\mathbf{x}_1)		1	0,667	0,465	-0,438
3 (\mathbf{x}_2)			1	0,621	0,311
4(\mathbf{x}_3)				1	0,231
5 (\mathbf{x}_4)					1

Тогда получим соответствующие матрицы:

$$\Delta^* = \begin{bmatrix} -0,865 & 0,725 & -0,486 & 0,326 & 0 \\ 1 & 0,667 & 0,465 & -0,438 & -0,865 \\ 0,667 & 1 & 0,621 & 0,311 & 0,725 \\ 0,465 & -0,438 & 1 & 0,621 & -0,456 \\ -0,438 & 0,311 & 0,231 & 1 & 0,326 \end{bmatrix}$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0,667 & 0,465 & -0,438 \\ 0,667 & 1 & 0,621 & 0,311 \\ 0,465 & -0,438 & 1 & 0,621 \\ -0,438 & 0,311 & 0,231 & 1 \end{bmatrix}$$

Произведя вычисления соответствующих матриц, определив их отношение и корень квадратный из него, получим численное значение совокупного коэффициента корреляции $R_s = 0,863$.

Аналогичные вычисления произведены для моделей Π и C , для которых $R_n = 0,791$ и $R_c = 0,784$.

Квадратическая ошибка совокупного коэффициента корреляции R исчисляется по соотношению:

$$S_R = \frac{1 - R^2}{\sqrt{n - p - 1}}, \quad (3.30)$$

Аналогично определяются и пределы “истинного” коэффициента корреляции R_0 , который находится в определённых границах с некоторой вероятностью, зависящей от t – доверительного числа:

$$R - t S_R \leq R_0 \leq R + t S_R, \quad (3.31)$$

Достоверность вывода определяется по отношению $t = R : S_R$ с теми же условиями, что и при линейном коэффициенте парной корреляции.

Ошибка совокупного коэффициента корреляции связи с результативного признака с четырьмя факторными признаками составляет:

$$S_R = \frac{(1 - 0,863)^2}{\sqrt{20 - 4 - 1}} = 0,067 \quad (3.32)$$

$$t = \frac{0,863}{0,067} = 11,8 > 3 \quad (3.33)$$

Таким образом, совокупный коэффициент корреляции отражает характер изучаемых связей на шахтах ДТЭК ПАО «Павлоградуголь».

Существенность совокупного коэффициента корреляции можно проверить по F – критерию Фишера, который представляет собой соотношение факторной и случайной дисперсий. При этом величина F рассчитывается по формуле:

$$F_R = \frac{R^2(n - p - 1)}{(1 - R^2)p}, \quad (3.34)$$

где R^2 – множественный коэффициент детерминации.

Затем полученное значение F_R сравнивают с табличным $F_{табл}$ при выбранном уровне значимости и числах степеней свободы $n_1 = n - p - 1$ и $n_2 = p$. Если расчётное значение превышает табличное, достоверность вывода по сово-

купному коэффициенту корреляции R о наличии существенной связи подтверждается.

В табл.3.3 приведены результаты оценки меры эффективности коэффициентов R оптимизируемых моделей \mathcal{E}_y , \mathcal{P} и \mathcal{C} и существенности F рассчитанных совокупных коэффициентов корреляции $R_{\mathcal{E}}$, $R_{\mathcal{P}}$ и $R_{\mathcal{C}}$ [10].

Таблица 3.3

Результаты расчёта значений R и F оптимизационных моделей \mathcal{E}_y , \mathcal{P} и \mathcal{C}

Совокупный коэффициент корреляции			Значение F- критерия			
$R_{\mathcal{E}}$	$R_{\mathcal{P}}$	$R_{\mathcal{C}}$	$F_{\text{расч.э}}$	$F_{\text{расч.п}}$	$F_{\text{расч.с}}$	$F_{\text{таб. 15;4;5\%}}$
0,863	0,791	0,784	10,84	6,25	5,97	5,86

Принято считать, что при $R < 0,3$ связь между функцией и аргументом слабая, при $R = 0,3 \dots 0,7$ – средняя, при $R > 0,7$ – сильная [29]. Из табл.3.3 видно, что получены относительно высокие значения совокупных коэффициентов корреляции, что свидетельствует о достаточно тесной связи между признаками. Кроме того, можно заключить, что при исследовании и решении задачи проектного аудита ШПС учтены основные доминирующие факторы, влияющие на расход электроэнергии и объективно характеризующие взаимосвязь показателей эффективности работы \mathcal{E}_y , \mathcal{P} и \mathcal{C} угольных шахт с базовыми параметрами производства[10].

Надёжность коэффициента корреляции μ определяется по формуле:

$$m = \frac{R \sqrt{n}}{1 - R^2}, \quad (3.35)$$

При $\mu \geq 2,6$, согласно теореме Ляпунова, можно утверждать, что связь между показателями (признаками) надёжная и зависимость считается объективной, обоснованной, систематической, а не случайной.

Подставляя данные, взятые из табл.3.3, в уравнение (3.36), получим значения $\mu_{\text{э}} = 14,99$, $\mu_{\text{п}} = 9,46$, $\mu_{\text{с}} = 9,11$ соответственно для моделей Э, П и С, т.е. связь между анализируемыми показателями надёжная.

Кроме того, из табл.3.3 видно, что при 5 % - м уровне значимости и числе степеней свободы $n_1 = 15$ и $n_2 = 4$ расчётные значения критериев Фишера $F_{\text{расч.э}} = 10,84$, $F_{\text{расч.п}} = 6,25$, $F_{\text{расч.с}} = 5,97$ больше табличного $F_{\text{таб. 15;4;5\%}} = 5,86$ [52]. Следовательно, предложенные уравнения регрессионных моделей Э, П и С адекватно отражают статистическую связь между принятыми показателями факторного пространства групп однородных по электропотреблению угольных предприятий.

Таким образом, для формирования энергосберегающих технологий угледобывающих предприятий первоначально необходимо исследование технологических факторов, в значительной мере определяющих электропотребление, и на этой основе построение оптимизационных математических моделей энергоэффективности объекта управления.

Реализация такого подхода требует не одного, а нескольких критериев, существенно влияющих на эффективность работы угольной шахты: удельное электропотребление, производительность и себестоимость. В качестве управляемых в определенном диапазоне приняты пять факторов: годовая добыча угля, длина лавы, суточная нагрузка на очистной забой и численность персонала.

Кроме того, с помощью множественного коэффициента корреляции установлено и по F – критерию Фишера обоснована адекватность оптимизационных моделей реальным условиям функционирования предприятия.

3.4. Определение оптимальных параметров добычных участков угольных шахт по критериям энергоэффективности

При исследовании энергоэффективности ШПС приходится решать ряд оптимизационных (вариационных) задач по установлению основных критериев

С[10]. Тогда согласно методу последовательных уступок один из оптимизируемых параметров, например \mathcal{E}_y , принимают в качестве целевой функции, а для других ($\mathbf{П}$ и $\mathbf{С}$) задают некоторые предельные значения граничных условий. Задача решается в нескольких вариантах, которые отличаются друг от друга предельно задаваемыми значениями. Затем такая процедура производится для параметров $\mathbf{П}$ и $\mathbf{С}$.

Принимаем в качестве целевой функции удельное электропотребление при условии, что влияющие на него факторы не должны превышать заданные значения $\mathbf{П}_{\text{зад}}$ и $\mathbf{С}_{\text{зад}}$. Тогда эту задачу можно записать в виде математической модели:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_y &= 0,008x_1 - 0,121x_2 - 0,03x_3 + 0,011x_4 \rightarrow \min \\ 0,04x_1 - 0,02x_2 + 0,024x_3 - 0,013x_4 &\geq \mathbf{П}_{\text{зад}} \\ -0,03x_1 - 0,0154x_2 - 0,05x_3 + 0,031x_4 &\leq \mathbf{С}_{\text{зад}} \\ 700 &\leq x_1 \leq 2000 \\ 100 &\leq x_2 \leq 200 \\ 250 &\leq x_3 \leq 1000 \\ 1500 &\leq x_4 \leq 3500 \\ x_i &\geq 0, \quad i = 1 \dots 4 \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

Результаты решения этой задачи для различных значений $\mathbf{П}_{\text{зад}}$; $\mathbf{С}_{\text{зад}}$ приведены в табл.3.4.

Анализ данных показывает, что удельное электропотребление снижается по мере роста производительности и незначительного увеличения себестоимости.

Для случая минимизации удельного электропотребления \mathcal{E}_y при ограничении по производительности $\mathbf{П}$ и себестоимости $\mathbf{С}$ математическую модель (3.38) в общем виде можно записать:

Таблица 3.4.

Результаты оптимизации модели удельного электропотребления \mathcal{E}_y

Заданные значения		Расчетные значения				
$\Pi_{\text{зад}}$	$C_{\text{зад}}$	x_1	x_2	x_3	x_4	\mathcal{E}_y
25	20	700	200	1000	1500	38,15
30	25	762,5	200	1000	1500	37,65
35	30	887,5	200	1000	1500	36,65
40	35	1012,5	200	1000	1500	35,65
45	40	1137,5	200	1000	1500	34,65
50	45	1262,5	200	1000	1500	33,65
55	50	1387,5	200	1000	1500	32,65
60	55	1512,5	200	1000	1500	31,65

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_y &= \sum_{i=1}^n b_i x_i \rightarrow \text{m in} \\ \Pi &= \sum_{i=1}^n c_i x_i \geq \Pi_{\text{зад}} \\ C &= \sum_{i=1}^n s_i x_i \leq C_{\text{зад}} \\ d_i &\leq x_i \leq D_i \end{aligned} \right\} \quad (3.38)$$

где d_i, D_i – предельные значения параметров x_1, x_2, x_3, x_4 моделей \mathcal{E}_y, Π, C .

Аналогично выполняется построение математических моделей Π и C общего вида.

Можно максимизировать производительность при наложении ограничений на удельное электропотребление и себестоимость. Тогда математическая модель имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \Pi &= 0,04x_1 - 0,02x_2 + 0,024x_3 - 0,013x_4 \rightarrow \max \\ 0,008x_1 - 0,121x_2 - 0,03x_3 + 0,011x_4 &\leq \mathcal{E}_{y \text{ зад}} \\ -0,03x_1 - 0,0154x_2 - 0,05x_3 + 0,031x_4 &\leq C_{\text{зад}} \\ 700 &\leq x_1 \leq 2000 \\ 100 &\leq x_2 \leq 200 \\ 250 &\leq x_3 \leq 1000 \\ 1500 &\leq x_4 \leq 3500 \\ x_i &\geq 0, i = 1..4 \end{aligned} \right\} \quad (3.39)$$

Анализ результатов решения задачи при различных значениях $\mathcal{E}_{узад}$ и $\mathcal{C}_{зад}$ показывает, что оптимальное значение производительности достигается при $x_1=2000$; $x_2= 100$; $x_3= 1000$; $x_4= 1500$.

Для случая минимизации себестоимости \mathcal{C} математическая модель запишется как:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{C} &= -0,03x_1 - 0,0154x_2 - 0,05x_3 + 0,031x_4 \rightarrow \min \\ 0,008x_1 - 0,121x_2 - 0,03x_3 + 0,011x_4 &\leq \mathcal{E}_{узад} \\ 0,04x_1 - 0,02x_2 + 0,024x_3 - 0,013x_4 &\leq \mathcal{П}_{зад} \\ 700 &\leq x_1 \leq 2000 \\ 100 &\leq x_2 \leq 200 \\ 250 &\leq x_3 \leq 1000 \\ 1500 &\leq x_4 \leq 3500 \\ x_i &\geq 0, i = 1..4 \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Результаты решения этой задачи при некоторых задаваемых значениях $\mathcal{E}_{узад}$ и $\mathcal{П}_{зад}$ свидетельствуют о том, что минимальное значение себестоимости обеспечивается при $x_1=2000$; $x_2= 100$; $x_3= 1000$; $x_4= 1500$.

Анализ показывает, что полученные регрессионные модели \mathcal{E}_y , $\mathcal{П}$ и \mathcal{C} адекватно отражают режим электроиспользования в реальных условиях и позволяют охарактеризовать зависимость энергоэффективности ШПС от основных параметров угледобычи и отражают реальные процессы функционирования угольных шахт (рис.3.2).

Структурная схема определения параметров добычных участков показана на

Как правило, при решении задачи многопараметрической оптимизации производят оценку вклада частных функций в обобщенную функцию цели. В нашем случае это осуществляется путем введения в функцию цели \mathbf{F} весовых коэффициентов \mathbf{a} [70,71]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{a}_1\mathbf{f}_1 + \mathbf{a}_2\mathbf{f}_2, \quad (3.42)$$

где $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ – весовые коэффициенты функции цели, изменяющиеся от 0 до 1 ($\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 = 1$); $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2$ – составляющие целевой функции, в качестве которых приняты \mathcal{E}_y и \mathcal{C} .

Тогда при заданной производительности и наложении ограничений на параметры x_1, x_2, x_3, x_4 можно записать

$$F = a_1 f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) + a_2 f_2(x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow \min \quad (3.43)$$

Задаваясь значениями a_1 и a_2 , получим решение поставленной оптимизационной задачи, которое представлено в графическом виде (рис.3.3).

Таким образом, результаты оптимизации способствуют обоснованному принятию проектных и энергоменеджментских решений по повышению энергоэффективности в условиях использования ЭА угольных шахт .

Глава 4. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ШАХТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

4.1 Определение комплексного таксономического показателя энергоэффективности угольных шахт

В последние годы для оценки энергоэффективности производственных систем возрос интерес к таксономическим методам анализа и моделирования [74]. Они являются современными приемами эконометрических исследований при комплексном подходе к оценке эффективности функционирования предприятий и базируются на информации о совокупности так называемых статистических единиц, или объектов Ω , а также совокупности описывающих изучаемые явления свойств, или показателей φ , т.е. при эконометрическом подходе учитываются два вида исходных совокупностей [75]:

-совокупность объектов $\Omega = \{ \Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_s, \dots, \Omega_S \}, \quad (4.1)$

где S – число изучаемых объектов,

- совокупность свойств $\varphi = \{ \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \dots, \varphi_N \}, \quad (4.2)$

где N – число изучаемых свойств.

В большинстве случаев применение этих методов оправдано, если исследуемый объект является многомерным, т.е. представляет собой статистическую (структурную) единицу, определяемую набором большого числа значений информативных признаков.

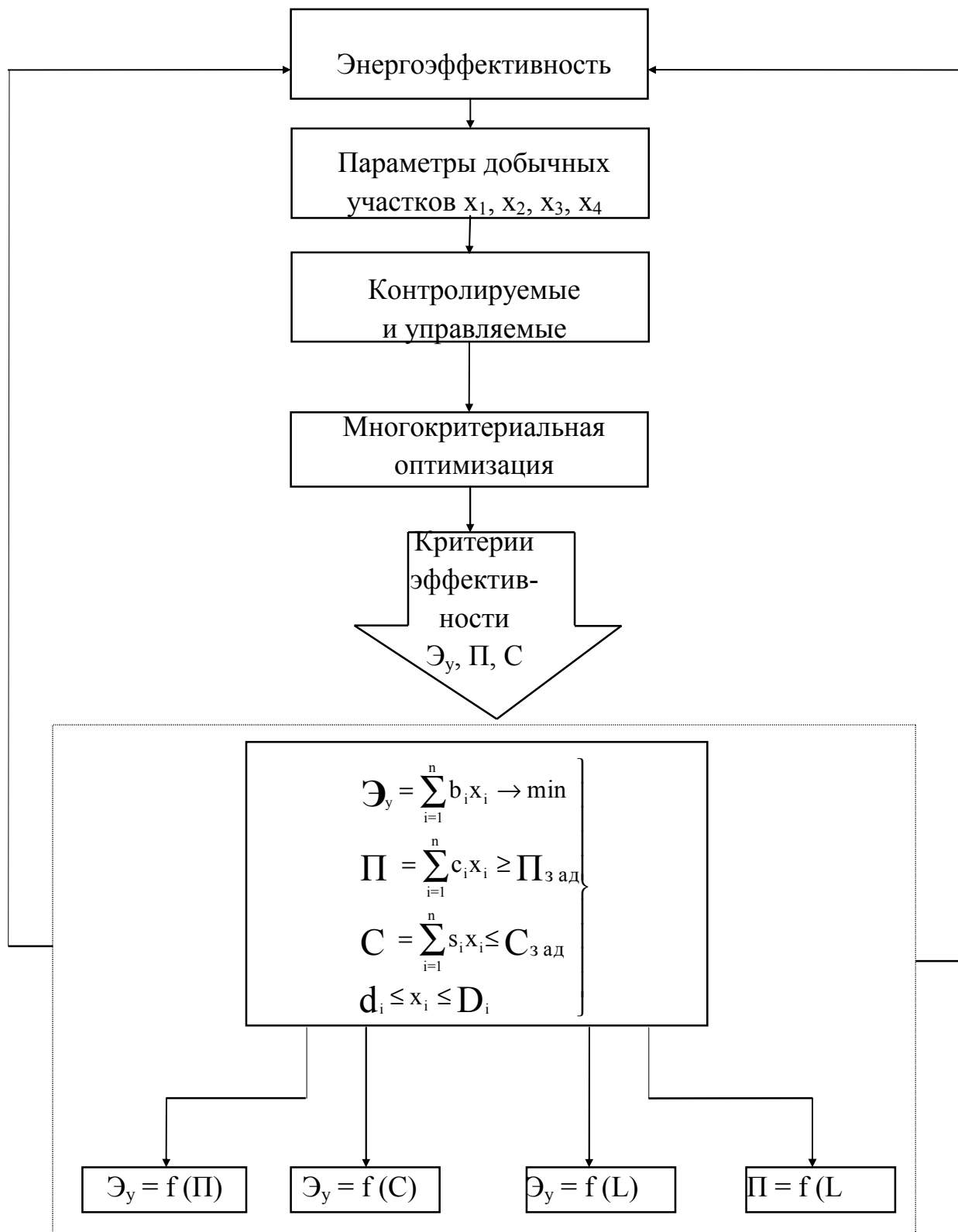


Рис.3.2. Структурная схема определения оптимальных параметров добычных участков

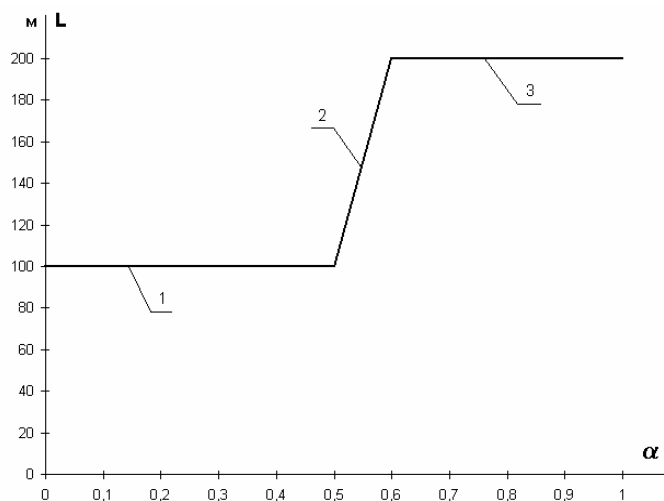


Рис.3.3 Области относительной важности частных функций цели:

1 – область большего влияния себестоимости и меньшего удельного электропотребления ($0 \leq \alpha_1 \leq 0,5$); 2 – область равного влияния в обобщенную функцию цели ($0,5 \leq \alpha_1 \leq 0,6$); 3 – область большей важности удельного электропотребления и меньшей себестоимости ($0,6 \leq \alpha_1 \leq 1$).

Традиционные статистические способы обработки исходных данных некоторых совокупностей либо не всегда позволяют оценить параметры эконометрической модели, либо не всегда дают удовлетворительные результаты, поскольку процесс исследований проводится не непосредственно на объектах или свойствах, а на реализациях свойств, величины которых образуют соответствующую матрицу исходных данных. При этом объекты управления различаются как по уровню значений, описывающих их характеристик, так и по структуре их величин [75].

Следует учесть, что многофакторный сравнительный анализ в таксонометрическом моделировании предполагает, что исследуемые объекты, принадлежащие одному и тому же множеству (подмножеству), однородны в смысле изотропности, т.е. мало отличаются друг от друга по уровню и структуре значений параметров. Это усложняет оценку энергоэффективности объекта или делает её просто трудновыполнимой. Необходим подбор наиболее существенных энергетических информативных факторов, которые удовлетворяли бы не-

которому принятому критерию и обеспечивали снижение размерности исходных признаков и однородность исследуемых групп подмножества объектов.

В таком случае применение в качестве критерия оценки энергоэффективности принят таксономический показатель, который представляет собой синтетическую величину, образованную из всех значимых электрических признаков исследуемой однородной совокупности угольных шахт. Источником такой информации являются реальные графики режимов электропотребления, а также статистические данные о расходах электроэнергии за длительный период, предоставляемые энергетическими службами объекта исследования.

В монографии показано, что для условий угольных шахт снижение размерности исходных признаков, характеризующих режим электропотребления, выполнено методом главных компонент, а однородность полученных в результате типологической классификации групп шахт обоснована методом кластерного анализа. Кроме того, определены базовые электрические показатели и коэффициенты функционирования электрохозяйства ШПС. Поэтому для комплексной оценки энергоэффективности угольных шахт вполне обосновано принят таксономический метод.

При построении таксономического показателя применяется матрица данных, которую можно представить в общем виде:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ik} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{w1} & x_{w2} & \dots & x_{wk} & \dots & x_{wn} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

где n - число признаков-показателей режима электропотребления; x_{ik} - значение признака k , определяющего режим электропотребления, для единицы i .

Поскольку элементами матрицы служат значения признаков, выраженные в специфических единицах измерения, производится их стандартизация, т.е. преобразование по формуле:

$$y_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{S_k}, \quad (4.4)$$

причем

$$\bar{x}_k = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W x_{ik}, \quad (4.5)$$

$$S_k = \left[\frac{1}{W} \sum_{i=1}^W (x_{ik} - \bar{x}_k)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.6)$$

где $k = 1, 2, \dots, n$; \bar{x}_k - среднее арифметическое значение признака k ; S_k - стандартное отклонение признака k ; y_{ik} - стандартизованное значение признака k для единицы i .

В результате этого в реализациях стандартизованных признаков выделяются две компоненты: уровень и структура значений признаков, т.е. стандартизация признаков приводит не только к элиминированию стоимостных и натуральных единиц измерения, но и выравниванию дисперсий (каждая дисперсия становится равной единице), а также значений признаков (все средние арифметические равны нулю). Последнее нежелательно, поскольку из-за этого каждый признак в одинаковой мере влияет на результаты анализа и происходит потеря информации. Поэтому в некоторых случаях вводят иерархию признаков с помощью коэффициентов иерархии, дифференцирующих признаки по их важности. Они определяются на основе качественного анализа, упорядочиванием признаков по их значимости, либо с помощью других методов.

В выделенной совокупности признаков могут встречаться стимуляторы и дестимуляторы, оказывающие положительное, стимулирующее или тормозящее влияние на уровень энергоэффективности объекта исследования. Их следует привести к одному типу, например преобразовать в стимуляторы как

$$x_{ij} = 1 - y_{ij} \quad \text{или} \quad x_{ij} = \frac{1}{y_{ij}},$$

где y_{ij} - i -я реализация j -го признака - дестимулятора.

Разделение признаков на стимуляторы и дестимуляторы связано с построением так называемого эталона эффективности, который представляет собой точку \mathbf{P}_0 с координатами

$$\mathbf{z}_{01}, \mathbf{z}_{02}, \dots, \mathbf{z}_{0n},$$

где
$$\mathbf{z}_{0s} = \max_r \mathbf{z}_{rs}, \text{ если } \mathbf{S} \hat{=} \mathbf{I},$$

$$\mathbf{z}_{0s} = \min_r \mathbf{z}_{rs}, \text{ если } \mathbf{S} \check{=} \mathbf{I} \text{ (S=1, \dots, n),}$$

\mathbf{I} - множество стимуляторов, \mathbf{z}_{rs} - стандартизованное значение признака \mathbf{S} для единицы r .

Расстояние между отдельными точками-данными (единицами) и точкой \mathbf{P}_0

$$c_{i0} = \sqrt{\sum_{s=1}^n (z_{is} - z_{0s})^2}, \quad (\mathbf{i}=1, \dots, \omega), \quad (4.7)$$

После исчисления расстояния между всеми единицами данной совокупности получим матрицу вида:

$$c = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} & \dots & c_{1i} & \dots & c_{1p} & \dots & c_{1w} \\ c_{21} & 0 & \dots & c_{2i} & \dots & c_{2p} & \dots & c_{2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{i1} & c_{i2} & \dots & 0 & \dots & c_{ip} & \dots & c_{iw} \\ c_{p1} & c_{p2} & \dots & c_{pi} & \dots & 0 & \dots & c_p \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{w1} & c_{w2} & \dots & c_{wi} & \dots & c_{wp} & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

где c_{ij} - символ расстояния между элементами \mathbf{i} и \mathbf{j} .

Элементы этой матрицы служат основой для проведения исследований с помощью таксономических процедур, обладающих следующими свойствами:

$$c_{rs} = 0; \quad (4.9)$$

$$c_{rs} = c_{sr}; \quad (4.10)$$

$$c_{rs} \leq c_{rL} + c_{Ls} \quad (4.11)$$

Полученные значения c_{i0} являются исходными величинами при расчете таксономического показателя:

$$K_{T_i}^* = \frac{c_{i0}}{c_0}, \quad (4.12)$$

здесь

$$c_0 = \bar{c}_0 + b S_0, \quad (4.13)$$

$$\bar{c}_0 = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W c_{i0}, \quad (4.14)$$

где

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{W} \sum_{i=1}^W (c_{i0} - \bar{c}_0)^2}, \quad (4.15)$$

β - некоторое положительное число, выбираемое таким, чтобы значения показателя $K_{T_i}^*$ изменялись в интервале от 0 до 1.

На основе известного в статистике правила “трех” (двух) стандартных отклонений, чаще всего принимают, что $\beta = 3$ или 2. Характерным свойством показателя $K_{T_i}^*$ является то, что почти все его значения находятся в интервале от 0 до 1. Очевидно, что интерпретация таксономического показателя не согласуется с интуитивными представлениями, поэтому на практике его удобно представить в виде модифицированного показателя эффективности:

$$K_{T_i}^* = 1 - \frac{c_{i0}}{c_0}, \quad (4.16)$$

При этом данная единица совокупности имеет тем большую эффективность использования, чем ближе значение показателя к единице, т.е. он принимает высокие значения при больших значениях стимуляторов и низкие - при малых значениях стимуляторов.

Показатель эффективности служит характеристикой множества объектов. С его помощью можно оценить достигнутый в некоторый период или момент времени “средний” уровень значения признаков, характеризующих исследуемый процесс электропотребления. Однако проведение анализа изменений, происходящих за некоторый период времени, оказывается несколько затруднительным, поскольку, нормирующая величина c_0 , а также координаты эталона подвергаются изменениям. В целом рассматриваемый показатель эффективно-

сти описывает динамику изменений исследуемых наборов информативных признаков.

Таким образом, для расчета таксономического показателя эффективности электроиспользования угольных шахт необходимо провести следующие предварительные операции:

- выделить набор существующих параметров, характеризующих режим электропотребления шахты;
- произвести нормирование параметров;
- построить матрицу расстояний всех ее элементов.

С учетом Государственного стандарта Украины “Энергосбережение” на номенклатуру показателей энергоэффективности и порядка их внесения в техническую документацию [76], опыта эксплуатации и рекомендаций настоящей работы по отбору информативных факторов, характеризующих электропотребление угольных шахт [7,56], для определения таксономического показателя принята следующая совокупность базовых информативных показателей (табл. 4.1).

Анализ показывает, что совокупность в табл.4.1 потенциальных информативных показателей велика, а некоторые из них одинаково или практически похоже отражают одни и те же свойства электропотребления и, кроме того, являются составляющими коэффициентов, характеризующих график электрических нагрузок угольных шахт. Поэтому целесообразно свести эту совокупность признаков к нескольким основным, которые удовлетворяли бы требованиям, предъявляемым к диагностическим информативным факторам.

Таблица 4.1.

Базовые информативные показатели потребления электроэнергии на угольных шахтах

№ п.п.	Информативные показатели	усл. обозн.	Единица измерения
1	Установленная мощность	$P_{ном}$	кВт
2	Средняя активная нагрузка за сутки	P_c	кВт
3	Удельное электропотребление	\mathcal{E}_v	кВт·ч/т
4	Электровооруженность труда	\mathcal{E}_T	кВт·ч/чел·ч
5	Число часов использования максимальной нагрузки	T_m	ч

6	Заявленный максимум	P_m	кВт
7	Персонал шахты	N_s	чел
8	Количество электропотребителей	n	шт.
9	Объем электропотребления	W	кВт·ч
10	Коэффициент максимума графика активной нагрузки	K_m	о.е.
11	Коэффициент использования графика активной нагрузки	K_n	о.е.
12	Коэффициент формы графика активной нагрузки	K_f	о.е.
13	Коэффициент использования оборудования	$K_{но}$	о.е.
14	Коэффициент заполнения	K_z	о.е.
15	Коэффициент спроса	K_c	о.е.

В качестве примера представлены ежемесячные значения в течение года совокупности из 15 показателей для шахты “Терновская” ДТЭК ПАО “Павлоградуголь” за 2014г. (табл.4.2).

Таблица 4.2.

Значения информативных показателей электропотребления шахты “Терновская”

Факторы Месяцы	P_n , кВт	P_m , кВт	P_c , кВт	W , тыс. кВт·ч	N_s , чел	T_m , ч	Σy , кВт·ч т	Σt , кВт·ч чел	K_n , о.е.	K_c , о.е.	K_z , о.е.
январь	31,5х 10 ³	6420	3469	2581	2827	400	27,9	0,90	0,11	0,20	0,54
февраль			4318	2902	2896	452	31,2	1,00	0,14		0,67
март			4055	2990	2908	466	29,6	1,03	0,13		0,63
апрель		6590	3988	2872	2943	436	31,2	0,98	0,13	0,21	0,61
май			3811	2744	2943	416	28,6	0,93	0,12		0,58
июнь			3852	2744	2942	416	25,6	0,93	0,12		0,58
июль		6420	4008	2884	2642	450	25,3	1,09	0,13	0,20	0,62
август			4126	2971	2683	463	29,4	1,10	0,13		0,64
сентябрь			3997	2778	2681	433	27,8	1,04	0,13		0,62
октябрь		6750	4148	2920	3073	433	27,0	0,95	0,13	0,21	0,61
ноябрь			4037	2931	3072	434	27,7	0,95	0,13		0,60
декабрь			4140	2928	3066	434	27,1	0,95	0,13		0,61

Выделенные основные факторные показатели входят в систему отчетности угледобывающих предприятий и легко поддаются учету и измерению.

Тогда результирующая матрица приоритетных информативных показателей запишется в общем виде:

$$c = \begin{bmatrix} T_{M11} & \mathcal{E}_{y12} & \mathcal{E}_{r13} & K_{и14} & K_{C15} & K_{316} \\ T_{M21} & \mathcal{E}_{y22} & \mathcal{E}_{r23} & K_{и24} & K_{C25} & K_{326} \\ T_{M31} & \mathcal{E}_{y32} & \mathcal{E}_{r33} & K_{и34} & K_{C35} & K_{336} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{M111} & \mathcal{E}_{y112} & \mathcal{E}_{r113} & K_{и114} & K_{C115} & K_{3116} \\ T_{M121} & \mathcal{E}_{y122} & \mathcal{E}_{r123} & K_{и124} & K_{C125} & K_{3126} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

После подстановки значений приоритетных показателей (табл. 4.4) в матрицу (4.17), рассчитаны расстояния каждого показателя от эталона эффективности P_0 , построение которого выполнено с учетом диагностического набора стимуляторов и дестимуляторов. За основу отнесения показателей к той или иной группе принят характер их воздействия на исследуемый процесс электропотребления. В рассматриваемом случае практически все электрические показатели этого набора воздействуют на эффективность электроиспользования положительно и поэтому их можно включить в группу стимуляторов. При этом координаты искомого эталона эффективности P_0 для угольных шахт Западного Донбасса образуют наибольшие значения каждого из стимуляторов-показателей.

Ниже выполнены расчеты комплексного таксономического показателя эффективности ежемесячного в течение 2014 г. электропотребления для 10-и шахт ДТЭК ПАО “Павлоградуголь”(табл.4.3). Этот показатель является статистической характеристикой энергоэффективности угольной шахты, а также синтетически характеризует динамику значений показателей, направление и масштабы изменений электропотребления ШПС.

Таблица 4.3

Расчетные значения комплексного таксономического показателя энергоэффективности

Шахта	Значения таксономического показателя											
	М е с я ц ы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	0,795	0,770	0,328	0,461	0,54	0,480	0,40	0,39	0,19	0,67	0,59	0,68
2	0,765	0,604	0,717	0,883	0,59	0,252	0,66	0,715	0,30	0,27	0,66	0,67
3	0,863	0,816	0,800	0,621	0,37	0,512	0,55	0,516	0,38	0,40	0,36	0,91

4	0,294	0,362	0,301	0,353	0,36	0,147	0,38	0,416	0,45	0,50	0,51	0,71
5	0,461	0,129	0,447	0,609	0,56	0,480	0,60	0,484	0,78	0,86	0,73	0,81
6	0,510	0,102	0,565	0,549	0,50	0,573	0,38	0,633	0,55	0,73	0,62	0,35
7	0,380	0,156	0,447	0,401	0,34	0,333	0,42	0,278	0,55	0,47	0,22	0,63
8	0,647	0,586	0,584	0,323	0,36	0,326	0,28	0,271	0,33	0,63	0,63	0,66
9	0,128	0,425	0,555	0,663	0,49	0,447	0,74	0,621	0,71	0,79	0,73	0,77
10	0,547	0,227	0,561	0,585	0,55	0,43	0,72	0,611	0,80	0,78	0,20	0,49

Годовой график изменения комплексного таксономического показателя $K_T = f(t)$ энергоэффективности шахты “Терновская” ДТЭК ПАО “Павлоград-уголь” приведен на рис.4.1.

Анализ показывает, что комплексный таксономический показатель энергоэффективности является величиной положительной, учитывая динамику изменения базовых электрических показателей в течение месяца, квартала, года, специфические особенности электрохозяйства. Практически он положителен и изменяется в пределах от 0 до 1 и лишь с вероятностью, близкой к нулю, может оказаться больше единицы [81].

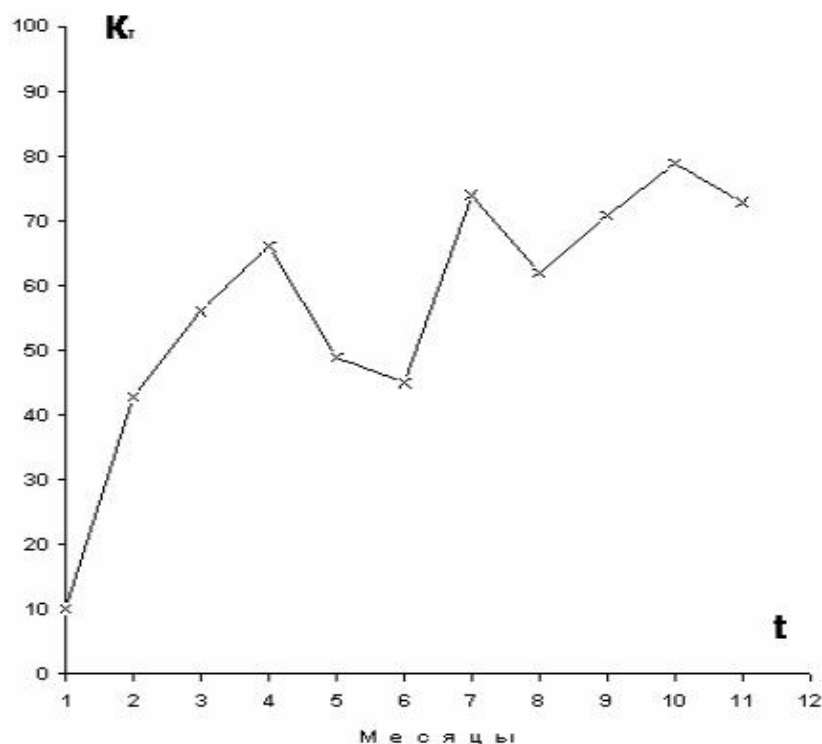


Рис.4.1. Годовой график изменения комплексного таксономического показателя энергоэффективности

Таким образом, применение таксономических методов упрощает комплексную оценку энергоэффективности угольных шахт как объектов, характеризующихся множеством случайных величин n-мерного пространства, задаваемого совокупностью базовых электрических показателей.

4.2. Информационная система учета электроэнергии шахты на основе специализованного комплекса

Эффективное решение задач ресурсосбережения должно сопровождаться созданием систем учета. Для угольных шахт актуально создание автоматизированных систем, обеспечивающих коммерческий и технический учеты потребляемой электроэнергии, а также формирование информационной базы [14]. Состав и содержание такой базы определяются стандартом ГОСТ 24.205-80. Она должна быть достаточной для выполнения функций системы и иметь резерв ее функционального развития.

Информационная база АСУ энергетики шахты состоит из внутримашинной и немашинной информационной базы. Внутримашинная включает в себя массивы информации, расположенные в оперативной памяти и на магнитных носителях. Доступ к данным информационной базы обеспечивается системой управления файлами программно или командами оператора. Система управления файлами защищает информацию на системном и файловом уровнях. Внутримашинная информационная база представлена перечнем массивов и содержанием каждого файла. Немашинная информационная база состоит из входных и выходных сообщений и документов табл.4.4

Таблица 4.4

Состав немашинной информационной базы

Файлы	Шифр
Паспортов и параметров	PASP
Расхода электроэнергии по вводам за сутки по сменам	FSM
Расхода электроэнергии по вводам за месяц по суткам	FSUT
Расхода электроэнергии по вводам за год по месяцам	FGD
Условно постоянной информации	FUPI

Взаимосвязь информационных и программных модулей показана на рис.4.19. Алгоритм ввода и обработки информации SOI реализуется на про-

граммном уровне путем вызова последовательности, содержащей информацию о том, какой канал необходимо опрашивать и какой буферный накопитель информации при этом будет использоваться. Информация считывается с модулей МВВЧИС и записывается в определенные зоны паспортов технологических параметров, где производится их обработка. Алгоритм осуществляет первичную обработку каждого введенного параметра, проверяет их на верхнюю и нижнюю границы и, если параметр выходит за границы, выдает сообщение. Также производится накопление информации о расходе электроэнергии за смену, сутки, месяц. Частота реализации алгоритма 2 — 5 мин.

Алгоритм учета текущего расхода электроэнергии по вводам ТЕКС предназначен для формирования данных о текущем электропотреблении шахты за смену, сутки, месяц в целях определения допустимого общего расхода электроэнергии. Выходная реализация может быть представлена на дисплей по запросу диспетчера шахты или энергомеханической службы. Периодичность реализации алгоритма — по запросу.

Алгоритм общего учета расхода электроэнергии за смену, сутки и месяц формирует данные об электропотреблении шахты за эти периоды. Полученная информация может использоваться для анализа работы шахты и для формирования отчетных документов. Алгоритм (периодичность реализации 6 ч) формирует три файла — PSWM, FSUT, FGOD. Для формирования PASP и тестирования работы алгоритма общего учета расхода электроэнергии за смену, сутки, месяц используется программный модуль FORM.

Алгоритмы учета расхода электроэнергии должны реализовываться в реальном масштабе времени. Программная реализация на комплексе СМ 1810.42 в среде БОС 1810 представлена модулем USHET, а также таймером и терминалом. Техническая реализация информационной системы приведена на рис. 4.20. Модуль USHET обеспечивает циклический опрос модулей МВВЧИС, которые через линии связи соединены со счетчиками расхода активной и реактивной энергии. При этом формируются переменные части записей в файле PASP. На-

Для прерывания набрать УПР-С». В этом сообщении содержится информация о переходе к запуску второго модуля, для чего после команды УПР-С необходимо набрать команду: R/SU.86. Предполагается, что все программные и информационные модули находятся в директории R.

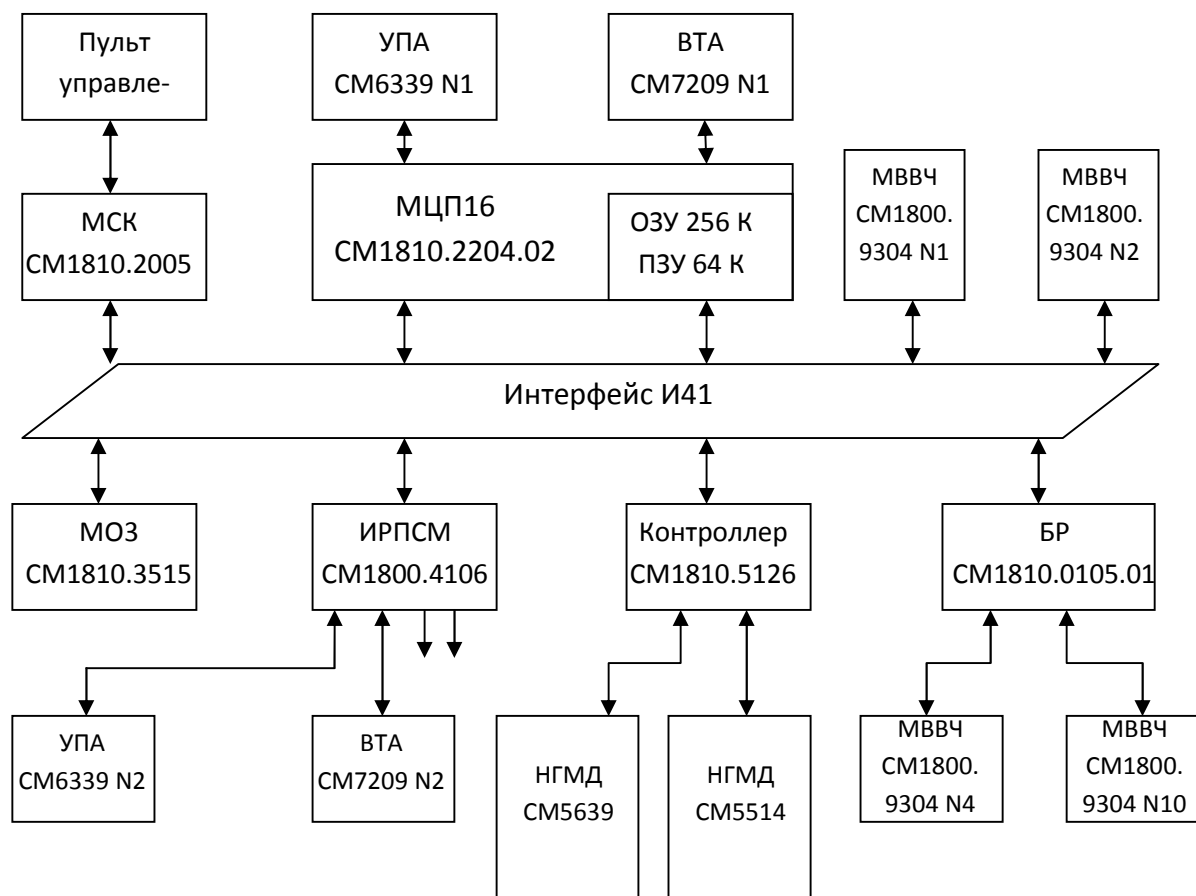


Рис.4.20 Техническая реализации информационной системы.

Функционально модуль SU предназначен для вывода данных и начального заполнения файлов базы данных, а также их последующей коррекции. Непосредственно после запуска на экран дисплея выдается словесное меню для выбора вариантов дальнейшей работы:

"Для вывода данных на дисплей наберите 1;

Для вывода данных на печать наберите 2;

Для формирования массива PASP наберите 3:

Для формирования массива FUPI наберите 4".

По первому варианту работы (набирается 1) выдается следующее подменю: "Если вы хотите получить информацию о текущем расходе электроэнергии за смену — наберите 1; за сутки — наберите 2; за месяц — наберите 3". Вывод информации на дисплей будет производиться в соответствии с выбранным вариантом.

При работе по второму варианту главного меню на экран выдается сообщение: "Если вы хотите вывести информацию на печать, можете скопировать ее из файла R/FSUT". Название файла для копирования будет изменяться в соответствии с вариантом подменю.

Формирование файла PASP осуществляется в режиме диалога. При этом последовательно запрашивается следующая информация: "Введите номер ввода. Если вас устраивает предыдущее значение параметра — введите отрицательное число". Выдается сообщение: " Вы вводите данные по i -му вводу — активная энергия; реактивная энергия; информация в файле отсутствует. Если вы хотите продолжить, наберите пробел, если нет, — любую другую клавишу".

В дальнейшем необходимо уточнить вводимую информацию с помощью следующих запросов: "Предыдущее значение"; "Масштабный коэффициент"; "Предыдущее немасштабированное значение"; "Текущее немасштабированное значение"; "Адрес порта ввода"; "Ограничение по мощности"; "Суммарное значение с начала смены"; "Значение за 30 мин"; "Суммарное значение с начала суток"; " Суммарное значение с начала месяца".

При формировании массива FUPI запрашивается последовательно 15 значений для каждой записи. После завершения работы с модулем выдается сообщение: "Запустите в работу программу учета электроэнергии командой R/USHET.86".

Рекомендуется выполнять формирование начальных значений массивов вне рамок реального масштаба времени, а после первого запуска модуля USHET вызов и работа с модулем SU не должны продолжаться более 5 мин, т.е. возможно выполнение только операций по выводу и коррекции информации.

С помощью специализированного комплекса СМ 1810.42 осуществляется контроль потребления активной и реактивной энергии по 98 каналам, что позволяет одним комплексом решать все задачи учета электроэнергии в рамках шахты. Информационная система на этой основе может использоваться в составе АСУ ТП или АСУ энергетики угольной шахты[8,15].

Однако использование перспективных принципиально новых технологий, хотя и связано с существенным эффектом снижения энергоёмкости технологических процессов и экономии электроэнергии в целом, но требует при этом значительных капитальных вложений и не приводит к быстрой окупаемости. Налаженный нормативный контроль путём непрерывного учёта удельной энергоёмкости позволяет выполнить постепенный ввод технологического объекта в заданные границы электропотребления, но из-за своей инерционности в условиях быстрой смены экономической и производственной ситуации не обеспечивает оперативного обслуживания текущего состояния энергоёмких процессов. Для технической реализации методического и информационного обеспечения задач управления требуются специальные вычислительные комплексы, устройства связи с объектом, дополнительные контрольно-измерительные средства.

4.3. Моделирование и прогнозирование комплексного показателя энергоэффективности угольных шахт

Одной из важных и трудоёмких задач математического обеспечения ЭА является построение аналитической модели комплексного показателя энергоэффективности и его прогнозирование в процессе эксплуатации электрохозяйства предприятия.

Для условий угольных шахт оценку энергоэффективности рекомендуется производить в зависимости от единичных базовых электрических показателей, полученных экспериментально. Применяемые при этом экспертно-статистические методы хотя и не требуют большой выборки исходных данных, но в то же время позволяют достоверно определить вид и параметры аналити-

ческой (математической) модели комплексного таксономического показателя эн, являющегося функцией от единичных базовых информативных параметров режима электропотребления ШПС. При этом, зная динамику их изменения в процессе эксплуатации энергоёмких потребителей, можно осуществлять прогнозирование этого показателя и с его помощью оценивать уровень энергоэффективности объекта управления.

4.3.1 Построение аналитической модели комплексного таксономического показателя энергоэффективности

В целом аналитическая модель комплексного таксономического показателя энергоэффективности определяется набором значений единичных базовых электрических показателей и производных от них коэффициентов, т.е.

$$\begin{aligned} K_{\tau} &= f (P_1, P_2, \dots, P_n, a_1, a_2, \dots, a_m); \\ K_{\tau} &= f (q_1, q_2, \dots, q_n, a'_1, a'_2, \dots, a'_m), \end{aligned} \quad (4.18)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n – единичные базовые электрические показатели; $a_1, a_2, \dots, a_m, a'_1, a'_2, \dots, a'_m$ – параметры (коэффициенты весомости) модели, полученные при экспертно-статистической обработке графиков электрических нагрузок ($m \geq n$); q_1, q_2, \dots, q_n – относительные единичные показатели эффективности.

При построении аналитической модели комплексного таксономического показателя принят ряд общих требований [77]:

- репрезентативность (представительность), согласно которой комплексного показатель должен включать базовые характеристики режима электропотребления, уровень его эффективности;
- монотонность – строгая зависимость таксономического показателя от единичных базовых характеристик, вследствие которой улучшение (изменение) любой из них при фиксированных остальных показателях (коэффициентах)

должно вызвать соответствующее повышение значения K_T и эффективности электропотребления;

– критичность (чувствительность) к варьируемым параметрам, в соответствии с которой комплексный таксономический показатель эффективности должен реагировать на изменение каждого из единичных базовых показателей, что особенно важно, когда последний выходит из допустимых пределов (при этом он может уменьшить свое значение);

– нормированность, согласно которой численное значение комплексного таксономического показателя заключено между максимальным и минимальным значениями относительных показателей эффективности, т.е.

$$\min_{\{i\}} q_i \leq K_T(q_1, q_2, \dots, q_n) \leq \max_{\{i\}} q_i \quad (4.19)$$

Требование (4.19) не влияет на результат оценки уровня энергоэффективности; имеет чисто нормировочный характер и определяет размах комплексных показателей.

Таким образом, аналитическая (математическая) модель комплексного таксономического показателя энергоэффективности прежде всего должна адекватно отражать его физический смысл: значение K_T низкой эффективности электроиспользования должно увеличиваться с улучшением значений единичных базовых показателей режима электропотребления. Насколько это реализуется, устанавливается при анализе аналитической модели комплексного таксономического показателя. При этом определяется значимость ее отдельных параметров. Она может быть найдена путем вычислений коэффициентов корреляции между комплексными и единичными базовыми показателями или методами дисперсионного анализа.

Параметры аналитической модели комплексного таксономического показателя энергоэффективности a_1, a_2, \dots, a_m определяются методом наименьших квадратов, после чего производится качественный и количественный анализ

полученных результатов. Общий вид аналитической модели можно принять линейным по векторам параметров a и единичных показателей P [78]:

$$K_T = \sum_{i=1}^n a_i \cdot P_i \quad (4.20)$$

Параметры зависимости (4.20) определяются методом наименьших квадратов путем минимизации функционала

$$J = \sum_{i=1}^k [K_{ti} - f(P_{1i}, P_{2i}, \dots, P_{mi}, a_1, a_2, \dots, a_m)]^2, \rightarrow \min, k > m \quad (4.21)$$

по вектору параметров $a = (a_1, \dots, a_m)$.

С учетом этого, а также на основании данных о режимах электропотребления угольных шахт ДТЭК ПАО “Павлоградуголь” аналитическая модель комплексного таксономического показателя энергоэффективности будет иметь вид:

$$K_i = 0,455 + 0,122P_1 - 0,142P_2 + 0,093P_3 + 0,121P_4 + 0,013P_5 - 0,008P_6 \quad (4.22)$$

Значимость параметров аналитической модели определена путем вычислений коэффициента корреляции между величиной K_T и единичными базовыми электрическими показателями при достаточно полном описании характера электропотребления исследуемого объекта.

Анализ зависимости (4.22) показывает, что наибольшее влияние на величину K_T оказывают параметры P_1 , P_2 и P_4 , т.е. число часов использования максимума нагрузки T_m , удельное электропотребление \mathcal{E}_y и коэффициент использования $K_{из}$, а математическая модель правильно отражает физический смысл комплексного таксономического показателя энергоэффективности. Кроме того, она позволяет аудиторской группе выделить факторы, за счет которых происходит неэффективное потребление электроэнергии и разработать управляющие воздействия для его повышения.

4.3.2 Прогнозирование комплексного таксономического показателя энергоэффективности

Важным этапом проведения энергетического аудита ШПС в условиях реструктуризации угольной отрасли является разработка методики прогнозирования комплексного таксономического показателя энергоэффективности. С учетом этого, в монографии предложена математическая модель прогнозирования, позволяющая предвидеть возможные пути и результаты предпринимаемых действий по экономии электроэнергии, а также в пределах требуемой точности оценить степень влияния того или иного фактора (показателя, параметра) на режим электропотребления и др. При этом требуется применение методов прогнозирования, наиболее полно учитывающих специфику функционирования электрохозяйства угольных предприятий.

Существует большое многообразие методов прогнозирования (статистический, экспоненциального сглаживания, движущейся средней и др.), связанных с особенностью применения, точностью прогнозирования, объемом и достоверностью информации, ограниченными ресурсами в вычислительной техники на предприятиях. Несмотря на это при разработке прогнозных моделей придерживаются следующего порядка: постановка задачи и выбор метода прогнозирования; построение прогнозной модели и определение ее параметров; вычисление прогноза на требуемый интервал времени; оценка ошибок прогноза.

Одним из наиболее распространенных методов прогнозирования, основанных на экстраполяции тенденций роста (т.е. продлении в будущем тенденций), наблюдавшихся в прошлом являются методы выделения временного тренда [79,80]. При этом под трендом понимают гладкую кривую, которой соответствует некоторая функция времени, свободная от случайных воздействий. Она описывает некоторую усредненную за достаточно протяженный период наблюдения тенденцию развития. Практически всегда полученная траектория связывается исключительно со временем, т.е. механизм влияния всех основных факторов, воздействующих на прогнозируемую характеристику, в явном виде

не учитывается, а предполагается, что время – агрегированный фактор, аккумулирующий это влияние[8,82].

Этот принцип, обладающий простотой и наглядностью при определении вида тренда, положен в основу предлагаемого метода взвешенного выделения временного тренда для прогнозирования комплексного таксономического показателя энергоэффективности. Метод реализован при различной информационной значимости уровней базисного динамического ряда. С учетом этого в отличие от классической модели временного тренда прогнозную модель можно записать в общем виде:

$$F(y_t) = \sum_{j=1}^n g_j F_j(t) + e_t, \quad j = \overline{1, n} \quad (4.23)$$

где $F(y_t)$ – оператор преобразования; y_t – t -й уровень временного ряда; g_j – неизвестный коэффициент при j -м операторе преобразования; e_t – случайная составляющая.

Для анализа приведены следующие модели, используемые при прогнозировании комплексного таксономического показателя энергоэффективности [83,84]:

$$y = At^2 + Bt + C$$

$$y = 1/(At^2 + Bt + C)$$

$$y = t/(At^2 + Bt + C)$$

$$y = B + A/t$$

$$y = Ae^{(Bt + Ct^2)}$$

$$y = Ae^{(Bt)}$$

$$y = AtBe^{(Ct)}$$

$$y = AB^t$$

$$y = AtB$$

$$y = A + B \ln t$$

$$y = AB^{(Ct)}$$

$$y = 1 / (A + BC^t)$$

$$y = 1 / (B + Ae^{(-t)})$$

$$y = Be^{(At)}$$

$$y = B10^{(A/t)}$$

$$y = B10^{(At)}$$

Значения неизвестных коэффициентов A , B , C находим методом наименьших квадратов случайных отклонений e_t :

$$\sum_{i=1}^n e_t^2 = \sum_{i=1}^n [y_t - f(t)]^2 \rightarrow \min \quad (4.24)$$

По данным, табл. 4.2, построены модели прогноза комплексного таксономического показателя (шахты “Терновская”) и определены их параметры A , B , C (табл. 4.6).

Для учета различной “ценности” или, как принято в терминологии прогнозирования и информатики “веса” информации в различные моменты времени применяют метод наименьших квадратов с весами и метод экспоненциального сглаживания. Метод наименьших квадратов с весами состоит в том, что каждому отклонению e_t придается вес $b_t < 1$, причем веса возрастают для то-

чек, находящихся ближе к моменту прогнозирования. Следовательно, чем дальше наблюдение отстоит от момента прогноза, тем меньший вес оно имеет, тем меньшее влияние оказывает на формирование уровня прогнозного значения показателя.

Для определения веса b_t использовано выражение

$$b_t = I^{n - (t-1)}, \quad (4.25)$$

где λ – некоторое число меньше единицы (в модельных расчетах 0,2 – 0,9); n – число временных уровней.

Чем меньше λ , тем меньше ранние наблюдения влияют на прогноз. Условие метода наименьших квадратов записывается в виде:

$$Q = \sum_{t=1}^n b_t [y_t - f(t)]^2 \rightarrow \min \quad (4.26)$$

Для сравнения прогнозных моделей проводились расчеты методом экспоненциального сглаживания, согласно которому временной ряд сглаживается взвешенной скользящей средней, а собственно веса подчиняются экспоненциальному закону. Причем чем дальше от момента прогноза находится точка ряда, тем меньше ее участие в формировании прогнозного значения комплексного показателя. В качестве критерия точности расчетов принята относительная ошибка прогноза e_n , которая вычислена для различных моделей с учетом фактического $K_{тф}$ и прогнозного $K_{тп}$ показателей энергоэффективности [85]:

$$e_n = \frac{K_{тф} - K_{тп}}{K_{тф}} 100 \%$$

и приведена в табл. 4.6.

Следует учесть, что для решения задач контроля и управления электропотреблением с целью повышения энергоэффективности необходимо, чтобы принятая окончательно модель прогнозирования позволяла:

– более точно описывать текущие данные о процессе электропотребления;

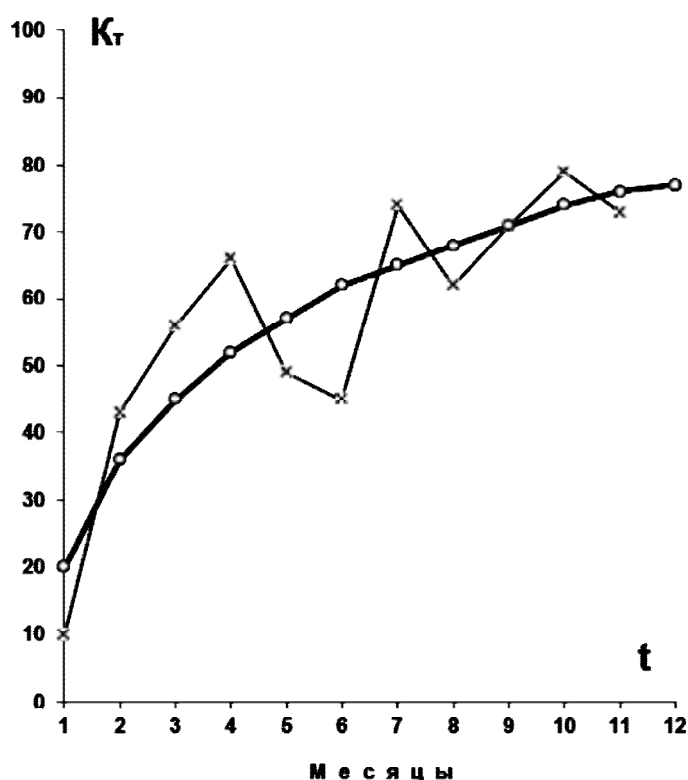
- следить за изменением параметров временных рядов комплексного показателя энергоэффективности;
- адаптацию по ходу изменения комплексного таксономического показателя энергоэффективности;
- простоту, возможность коррекции констант модели в темпе прогнозирования;
- обеспечивать достаточную точность прогноза.

Анализ данных табл.4.6. показывает, что наиболее полно этим условиям удовлетворяет математическая модель вида (рис.4.2):

$$y = A + B \ln t ,$$

Значения параметров А, В, С моделей прогноза комплексного показателя энергоэффективности

№ функции экстраполяции	А	В	С	Среднеквадрат. отклонение	Доверительный интервал	Прогнозное значение	Ошибка прогноза
1	-6,49E-03	1,28E-01	8,86E-02	6,72E-02	6,11E-02	6,89E-01	11,5
2	1,44E-01	-2,19	9,01	4,11E-01	3,74E-01	2,91E-01	9,5
3	7,49E-02	-8,38E-02	7,3	7,19E-02	6,54E-02	7,02E-01	10,2
4	-6,47E-01	7,42E-01	0	5,09E-02	4,63E-02	6,86E-01	11,5
5	1,1E-01	4,73E-01	-2,87E-02	1,09E-01	9,92E-02	5,17E-01	8,6
6	2,32E-01	1,29E-01	0	1,34E-01	1,22E-01	1,09	7,2
7	2,06E-01	3,8E-01	4,8E-02	9,87E-02	8,97E-02	9,42E-01	6,5
8	6,49E-03	1,14	0	1,34E-01	1,22E-01	1,09	5,4
9	2,32E-01	6,92E-01	0	9,91E-02	9,01E-02	9,34E-01	4,2
10	1,69E-01	2,44E-01	0	5,04E-02	4,58E-02	7,76E-01	1,28
11	1,24E-11	-6,65E-11	7,45E-15	1,02E-10	9,27E-11	-8,57E-19	4,0
12	1,82E+29	-8,22E+34	1,15E+12	1,26E-35	1,14E-35	-1,63E-15	3,9
13	2,19E+01	1,32	0	1,04E-01	9,47E-02	7,56E-01	3,8
14	1,29E-01	2,32E-01	0	1,34E-01	1,22E-01	1,09	3,75
15	-9,1E-01	8,94E-01	0	5,00E-02	4,54E-02	7,51E-01	3,7
16	5,6E-02	2,32E-01	0	1,34E-01	1,22E-01	1,09	3,5



— реальный процесс; — кривая прогноза

Рис.4.2 Прогнозирование комплексного показателя энергоэффективности

Кроме того, с помощью математической модели комплексного показателя энергоэффективности, энергослужба получает прогнозную оперативную информацию и осуществляет упреждающий контроль за эффективностью электропотребления объекта управления.

4.4 Методика энергетического аудита (электрическая часть)

шахтных производственных систем

Угледобывающие предприятия являются крупными потребителями электрической энергии со сложным электроэнергетическим хозяйством. Установленная мощность отдельных электроприемников шахт составляет десятки тысяч киловатт при годовом потреблении электроэнергии в десятки и даже сотни миллионов киловатт-часов, единичная мощность отдельных машин достигает нескольких тысяч киловатт [86]. В общем энергопотребление на угольных шах-

тах основным видом является электрическая энергия, эффективное использование которой безусловно имеет существенное значение.

Расход электроэнергии на единицу продукции должен быть минимальным. Для выполнения такого требования необходимо осуществлять ряд мероприятий по эффективному использованию электроэнергии в условиях эксплуатации систем электроснабжения и всего комплекса электрооборудования шахты. При этом одним из важнейших современных направлений экономии электроэнергии на угольных шахтах является энергетический аудит[4].

Экспериментальная группа Национального технического университета Украины “КПИ” (проф. Розен В.П., доц. Соловей А.И., Находов В.Ф. и асп. Трифонов Д.В.) под руководством профессора Праховника А.В. выполнила обследования электрохозяйств ДТЭК ПАО «Павлоградуголь» шахт “Самарская”, “Терновская”, “Павлоградская”, “Павлоградуголь”. Это предопределило разработку методики ЭА шахтных производственных систем с учетом специфических особенностей и режимов их работы, результатов классификации (распознавания образов), статистических и таксономических исследований при комплексной оценке и прогнозировании энергоэффективности угольных шахт, а также соответствия нормативным документам по энергосбережению.

В общем случае схема проведения ЭА включает: описание угольного предприятия; установление ключевых цифр; обзор потоков энергии; определение (путем измерений и вычислений) электропотребления; анализ баланса энергопотребления; определение уровня энергоэффективности и разработка предложений по ее повышению; практическая помощь в повышении эффективности энергоиспользования; внедрение системы энергетического менеджмента; содействие во внедрении энергетически оптимальной эксплуатации и обслуживания оборудования; помощь в организации закупок энергетически эффективного оборудования.

Настоящая методика разработана на кафедре электроснабжения НТУ Украины “КПИ” и подготовлена в соответствии с Законом Украины “Об энерго-

сбережений” от 1 июня 1994 г. и Национальной энергетической программы Украины, а также программы технической помощи Агенства международного развития США (региональная USAID миссия по энергетике, RCG/Hagler Bailly, Inc.).

В основу методики ЭА положены обобщенные результаты научно-исследовательских работ и трудовых соглашений по нормализации расхода электроэнергии в условиях новых тарифов и дефицита топливно-энергетических ресурсов, по регулированию режимов электропотребления и другие мероприятия по экономии электроэнергии угольных шахт. В ней содержатся цели и задачи, решаемые при обследовании энергохозяйства угледобывающих предприятий, состав информации, организация проведения обследования, комплексная оценка эффективности электроиспользования.

Предлагаемая методика может быть использована научно-исследовательскими и проектными институтами и организациями Минуглепрома при проведении ЭА, с целью повышения энергоэффективности действующих ШПС, а также предприятий других отраслей промышленности. Она позволит обеспечить качество работы энергоаудиторов и может быть полезна при составлении частных методик ЭА родственных производственных систем (рис.4.3).

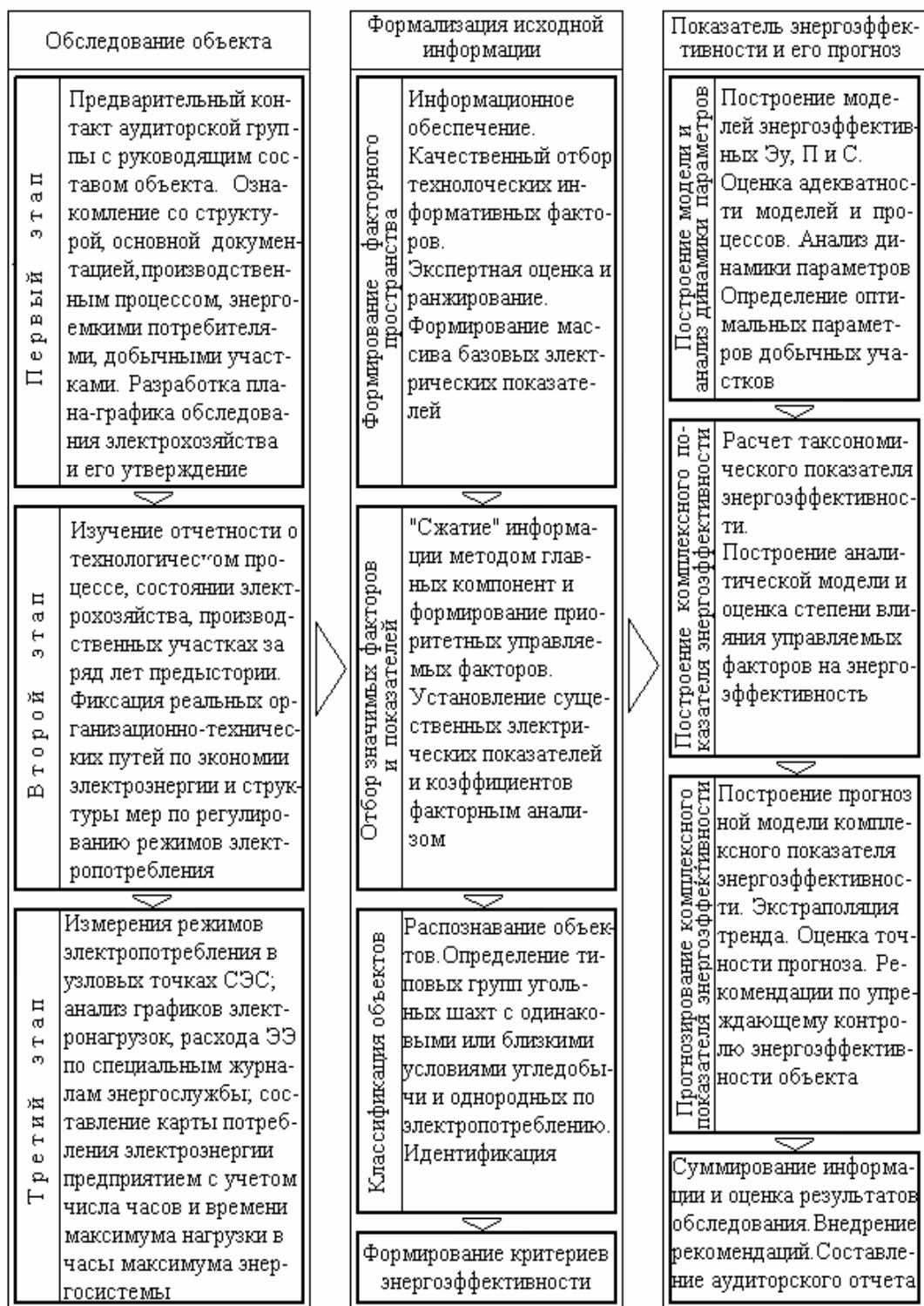


Рис.4.3. Алгоритм и методика проведения энергетического аудита

Список литературы

1. Энергосбережения – приоритетный напрямок державної політики України Ковалко М.П., Денисюк С.П.; Відпов. ред. Шидловський А.К. – КиЖВУЕЗ, 1998. – 506 с.
2. Промышленность Украины: Путь к энергетической эффективности. ЕС – Energy Centre Kiev, Ukraine, 27/6 Institutskaya Str. Apt. 45, Kiev – 21, Ukraine, 1995. – 199 с.
3. Тонкаль В.Е., Гнедой Н.В., Усик А.Ф. Проблемы электросбережения в Украинской ССР // Труды Всесоюзн. Научн.-техн. конф. «Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта». – Днепропетровск: ДГИ, 1990. – с.250-251.
4. Трифонов В.Д., Трифонов Д.В. К вопросу повышения эффективности использования электроэнергии в производственных системах // Науковий вісник НГУ. – 2005. - № 10. – С. 74-78.
5. Разумний Ю.Т., ЗаЖкаВ.Т., Степаненко Ю.В. Энергосбережения: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 166 с.
6. Пивняк Г.Г., Слесарев В.В. Условия эффективного решения задач экономии электроэнергии на шахтах Западного Донбасса// Уголь Украины . 1995. - №6. – С.26-29.
7. Розен В.П., Трифонов Д.В. Определение признаков пространства, формирующего электропотребление горно-добывающих предприятий// Уголь Украины. – 1995. - №6. – с.29-30.
8. Пивняк Г.Г., Слесарев В.В. Эффективный подход к экономии электроэнергии на шахтах Западного Донбасса// Уголь Украины . 1995. - №6. – С.26-29.
9. Трифонов В.Д., Трифонов Д.В., Ворохов Л.П., Анфёров Д.В. Установление критериев и построения оптимизационной модели энергоэффективности и угледобывающих предприятий // Науковий вісник НГУ. – 2009. - № 8. – С. 79-83.
10. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. – М.: Недра, 1985. – 232 с.
11. Украина. Энергосбережение в пищевой промышленности. – ЕС – Energy Centre Kiev, Ukraine, 26/6 Institutskaya Str. Apt. 45, Kiev – 21, Ukraine 1995. – 199 с.
12. Закон Украины «Об энергосбережении»// Ведомости Верховного Совета Украины. – 1994. - №30. – С.893-904

13. Слесарев В.В., Трифонов Д.В., Чирва В.Х. и др. Комплексная модель угольной шахты \ Уголь Украины.- 1997.-№4.-С.26-27
14. Шкрабец Ф.П., Слесарев В.В., Трифонов Д.В. и др. Корреляционный анализ систем энергоёмких потребителей на угольных шахтах // Уголь Украины. – 1996. - №5-6. – с. 32-34.
15. Слесарев В.В., Трифонов Д.В., Чирва В.Х. и др. Информационная система учёта электроэнергии в шахте на основе специализированного комплекса // Уголь Украины. – 1997. - №7. – с. 14-15.
16. Боярский А.Я. Теоретические исследования по статистике. – М.: Статистика, 1974. – 304 с.
17. Кадибур Т.С., Елисеева И.И. Вопросы методики аналитической группировки. – Л.: Научные записки ЛФЭИ, выпуск 42, 1975. – с.216-223.
18. Трифонов В.Д., Трифонов Д.В., Теоретико-информационный подход к решению задач энергетического аудита// Гірничя електромеханіка та автоматика . – 2005. - №75. – с.28-33.
19. Загаруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. – М.: Советское радио, 1972. – 208 с.
20. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике (Пер. с англ.) – М.: Иностран.лит., 1963. – 830 с.
21. Васильев В.И. Распознающие системы (справочник). – К.: Наукова думка, 1983. – 310 с.
22. Трифонов Д.В.; Ковальов О.Р.; Кумпін О.О. Підвищення ефективності використання електроенергії у виробничих системах// Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-тех. зб. – 2015. – Вип. 94 – С. 135-139
23. Губанов В.А., Захаров В.В., Коваленко А.Н. Введение в системный анализ. Учебное пособ./ Под ред. Л.А. Петросяна. – Л.: ЛГУ, 1988 – 232с.
24. Цой А.Н. Динамические модели объектов горного производства / Институт горного дела АН КазССР. – Алма-Ата: Наука, 1990. – 80с.
25. Гительсон С.М. Экономические решения при проектировании электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1971. – 198 с.
26. Константинов Б.А. Компенсация реактивной мощности. – М.: Энергия, 1976. – 104 с.
27. Waltz F.M. An engeneering approach: hierarchical optimization criteria. – “Trans. IEEE”, 1967, V.AC – 12, № 2. – 179. – 180.
28. Сивый В.Б. Метод множественной корреляции в анализе и планировании. – К.: Техника, 1964. – 224с.
29. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. – М.: Сов.радио, 1975. – 192с.

30. Растрингин Л.А., Эйдук Я.Ю. Адаптивные методы многокритериальной оптимизации // Автомеханика и телемеханика. – 1985. - №1. – с.5 – 26.
31. Benayoun R., Tergny J. Criteres multiples en programmation mathematique: une solution dans le cas lineaire. – “Revue francaise d’informatique et de recherche operationnelle”, 1969, № 3 V – 2.
32. Курицкий Б.Я. Оптимизация вокруг нас. – Л. : Машиностроение, Ленинград. отд-ие, 1989. – 144с.
33. Аудит Монтгомери / Ф.Л. Дефлиз, Г.Р. Дженик, В.М. О’Рейли, М.Б. Хирш; Пер. с англ. под ред. Я.В. Соколова. - М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997.- 542 с.
34. Аудит: Практическое пособие / А. Кузьминский, Н. Куженный, Е. Петрик и др.; Под ред. А. Кузьминского. - К. : Учетинформ, 1996. - 283 с.
35. Розен В.П., Иншеков Е.Н., Соловей А.И. Отличие энергетического аудита от инспекторской проверки по эффективности использования электроэнергии. Сб. Материалов научн. практич. конференции “Эффективность систем электроэнергетики”. - К. : 28.11.96.
36. Праховник А.В., Калинин В.П., Экель П.Я. К управлению электропотреблением в условиях дефицита энергоресурсов // Изв. вузов. Энергетика. – 1986. - №10. – с. 12-15.
37. Ливенцов В.В. Кибернетика горных предприятий. - М.: МГИ, 1973. - 104 с.
38. Голубков Е.П. Системный анализ как направление исследований // Системные исследования. - М. : Наука, 1977. - с. 114 - 130.
39. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях / АН УССР Ин-т пробл. Моделирования в энергетике. – К.: Наук. думка, 1987. – 198с.
40. Квейд Э. Методы системного анализа // Новое в теории и практике управления производством в США: Пер. с англ. / Под общ. ред. Б.З.Мильнера. - М. : Прогресс, 1971. - с. 78 – 99.
41. Поспелов Д.А. Логические методы анализа и синтеза схем. - 3-е изд., пере- раб. и доп. - М. : Энергия, 1974. - 368 с.
42. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мелашкин Л.Д. Прикладная статистика: Основны моделирования и первичная обработка данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471с.
43. Pearson J.D. Decomposition, coordination and multilevel system. - “IEEE Trans. Syst. Sei and Cybernet”, 1966, V.2.

44. Дж. Ту, Р. Гонсалес. Принципы распознавания образов. (Пер. с англ.). - М. : Мир, - 1978.-411 с.
45. Елкина В.Н., Загоруйко Н.Г. Об алфавите объектов распознавания. - В кн.: Вычислительные системы. Новосибирск, вып. 22, 1966. - с. 180-185.
46. Боннер Р.Е. Некоторые методы классификации. В сб.: Автоматический анализ ложных изображений. – М.: Мир, 1969. – с.32-36.
47. Елисеева И.И., Рукавишников В.О. Группировка, корреляция, распознавание образов (Статистические методы классификации и измерения связи). - М. : Статистика, 1977. - 144 с.
48. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипкин В.А. «Современное состояние проблемы распознавания образов», - М. : Радио и связь, 1985. - 166 с.
49. Трифонов В.Д., Трифонов Д.В., Бондаренко В.П., Степаненко В.П. Типологическая классификация угольных шахт// Науковий вісник НГУ. – 2006. - № 2. – С. 70-72.
50. Трифонов В.Д., Трифонов Д.В. Анализ моделей и методов повышения энергоэффективности горнодобывающих предприятий // Науковий вісник НГУ. – 2005. - № 10. – с. 79-82.
51. Методы обеспечения качества продукции в Японии. – М.: Изд-во стандартов, 1970. – 58с.
52. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. - М. : Физмат гиз, 1961. - 364 с.
53. Лбов Г.С., Котюков В.И., Манохин А.. Об одном алгоритме распознавания в пространстве разнотипных признаков. СБ трудов ИМ СО АН СССР. – «Вычислительные системы». Вып. 55, 1993. – с. 108 – 110.
54. Китов Н.И. Групповые экспертные оценки. – М.: Знание, 1975. – 180 с.
55. Галямов М.Н., Олифер С.Л., Султанов Л.Г. Применение ЭВМ в добыче нефти. – М.: Недра, 1982. – 118 с.
56. Трифонов В.Д., Трифонов Д.В. Выявление и отбор приоритетных информативных факторов энергоэффективности угольных шахт. \ \ Збагачення корисних копалин, 2005.- вип. 24(65) с. 105-109
57. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. - М. : Статистика, 1980. - 263 с.
58. Плескунин В.И., Воронина Е.Д. Теоретические основы организации и анализа выборочных в эксперименте / Под ред. А.В. Башарина. - Л. : ЛГУ, 1979. - 320 с.
59. Жуковская В.М., Мучник И.Б. Факторный анализ в социально-экономических исследованиях. - М. : Статистика, 1976. - 152 с.

60. Андерсон Т.В. Введение в многомерный статистический анализ. - М. : Физ- матгиз, 1963. - 500 с.
61. Мазуров В.Д. Метод комитетов в задачах оптимизации и классификации. - М. : Наука, 1990. - 248 с.
62. Слесарев В.В., Трифонов В.Д., Трифонов Д.В., Кигель А.Г., Митасов И.А. Определение однородности однотипных угольных шахт по электроиспользованию // Научовий вісник НГУ. – 2007. - № 3. – С. 67-70.
63. Разумный Ю.Г., Герасимович В.Н. Методические основы определения применения потребителей-регуляторов электрической нагрузки на угольных шахтах // Горная электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч. - техн. сб.- 1989. - Вып. 54.-с. 33 -39.
64. Разумный Ю.Г., Герасимович В.Н. Определение экономической целесообразности регулирования режимов электропотребления на технологическом процессе добычи и транспортирования угля на шахтах // Горная электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч. - техн. сб. - 1987. - Вып.50. - с.35- 44.
65. Маркин Б.Г. Проблема группового выбора. - М.:Наука, 1974 – 228 с.
66. Александров В.В., Горский Н.Д. Алгоритмы и программы структурного^ метода обработки данных. - Л. : Наука, - 1983. - 208 с.
67. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. - М. : Физмат гиз, 1961. - 364 с.
68. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В. Классификация многомерных наблюдений. – М.:. Статистика, 1974. – 240 с.
69. Лазорин А.И., Слесарев В.В., Литманович И.М. Состояние сырьевой базы коксохимических заводов и обогатительных фабрик, совершенствование методов ее расчёта // Изв. ДГИ. – М.: Недра, 1990 – С.212 – 215.
70. Лазорин А.И., Слесарев В.В., Харь Т.А. Разработка алгоритмических цепей системы учета материальных потоков в условиях коксохимического завода // Обогащение руд. – 1992. - № 5. – С. 25 – 27.
71. Лазорин А.И., Слесарев В.В. Совершенствование вычислительных схем контроля заполнения бункеров сыпучими материалами. Горная электромеханика. //Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1991. Вып. 59. – с. 60. – 64.
72. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. - М. : Высш. шк., 1982. - 224 с.
73. Реклайтис Т. Оптимизация в технике. - М. : Мир, 1986. - Т.І. - 349 с. Т.ІІ. -320с.
74. Смирнов Е.С. Таксономический анализ. - М. : Наука, 1969. - 316 с.

75. Плюта В. Сравнительный многомерный анализ в эконометрическом моделировании. - М. : Финансы и статистика, 1989. - 175 с.
76. Аничкина В.А., Погожаев И.Б. Определение коэффициентов весомости при комплексной оценке качества по номинальным и предельно допустимым значениям показателей. // Стандарты и качество, 1972. - №12 - с.25-29.
77. Королев Ю.Г. Метод наименьших квадратов в социально-экономических исследованиях. - М.: Статистика, 1980.
78. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. - М. : Статистика, 1977. - 216 с.
79. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. - М. : Мир, 1974. - 218 с.
80. Прогнозирование спроса электроэнергии методом взвешенного выделения временного тренда / Праховник А.В., Розен В.П., Атие Н.М.; Нац. техн. ун-т Украины "Киев, политехи, ин-т." - Киев, 1995. - 5 с. - Библиогр. : 5 назв. - Рус. - Деп. в ГНТБ Украины. 19.09.1995. № 2086 - Ук. 95.
81. Хауштейн Г. Методы прогнозирования в социалистической экономике. - М. : Прогресс, 1971. - 398 с.
82. Учет, контроль и прогнозирование потребления электроэнергии в реальном масштабе времени / Замидра В.Н., Лепорский В.Д., Прокопенко В.В. и др. - Вестник Киевского политехнического института. Серия электроэнергетики, 1978. - №15. - с.33-41.
83. Ковалева Л.Н. Многофакторное прогнозирование на основе рядов динамики. - М. : Статистика, 1980. - 102 с.
84. Кильдишев Г.С., Френкель А.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. - М. : Статистика, 1973. - 104 с.
- 86.Риман Я.С., Соловей А.И. Устройство и эксплуатация электрооборудования стационарных установок шахт: Справочник рабочего. – М. : Недра, 1991. – 284 с.
87. Електрифікація гірничого виробництва: Підручник для ВНЗ: у 2-х т. – Вид.2-ге, перероб. Та допов./ за ред. Л.О. Пучкова і Г.Г. Півняка. – Д., Нац. Гір. ун-т, 2010. – Т. 2. – 599с.: іл.

Наукове видання

Розен Віктор Петрович
Трифонов Володимир Данилович
Слесарєв Володимир Вікторович
Трифонов Дмитро Володимирович

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
В ШАХТНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ**

Монографія

Видано в редакції авторів.

Підписано до друку 01.08.2016. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 8,6.
Обл.-вид. арк. 8,6. Тираж 70 пр. Зам. № .

Підготовлено до друку та видруковано
у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19