

Костанайский региональный университет имени  
А.Байтурсынова

**ПРИМЕНЕНИЕ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
СОЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Монография**

Г.А. Хабдуллина,  
Т.И. Глущенко



2022

**Костанайский региональный университет имени А.Байтурсынова**

**Кафедра электроэнергетики**

**Г.А. Хабдуллина,  
Т.И. Глущенко**

**ПРИМЕНЕНИЕ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
СОЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Монография

Костанай, 2022

**УДК 621.31;621.47**  
**ББК 31.2 я73**

**Авторы:**

Хабдуллина Гульдана Абдухалыковна, магистр технических наук, докторант ОП 8D07101 -Электронергетика;

Глущенко Татьяна Ивановна, кандидат экономических наук, ассоциированный профессор кафедры электроэнергетики инженерно-технического института имени А.Айтмухамбетова КРУ им.А.Байтурсынова

**Рецензенты:**

Кравченко Руслан Иванович - доктор PhD, доцент кафедры машин, тракторов и автомобилей инженерно-технического института имени А.Айтмухамбетова КРУ им.А.Байтурсынова;

Бедыч Татьяна Витальевна – к.т.н., ассоциированный профессор, заведующая кафедры энергетики и машиностроения Костанайского инженерно-экономического университета имени М. Дулатова.

Хабдуллина Г.А., Глущенко Т.И.

**X 12** Применение возобновляемых источников энергии для повышения эффективности электроснабжения социальных объектов. Монография. Костанай: КРУ им.А.Байтурсынова, 2022.- 96с.

**ISBN 978-601-356-184-4**

Исследование посвящено развитию и повышению эффективности электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии, применительно к социально значимым объектам. Борьба за экологию, стремление повысить энергоэффективность экономического развития способствовали активизации усилий в мире по созданию более зеленой энергетики, движению к низко углеродной экономике.

**ББК 31.2 я73**

Утверждено и рекомендовано к изданию Научно-техническим советом Костанайского регионального университета имени А.Байтурсынова, 26.05.2022 г. протокол №

**ISBN 978-601-356-184-4**

© Хабдуллина Г.А., 2022  
© Глущенко Т.И., 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ</b> .....	4
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЯ</b> .....	5
<b>ОБОЗНАЧЕНИЕ И СОКРАЩЕНИЯ</b> .....	6
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	7
<b>1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В КАЗАХСТАНЕ</b> .....	100
1.1 Современные тенденции развития возобновляемой энергетики.....	100
1.2 Проблемы электроснабжения социальных объектов .....	166
1.3 Пути повышения эффективности электроснабжения социальных объектов.....	221
1.4 Наличие потенциала возобновляемой энергии .....	244
1.5 Выводы по главе.....	277
<b>2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И ОЦЕНКА ИХ РЕСУРСОВ</b> .....	288
2.1 Математическое моделирование возобновляемых источников энергии.....	288
2.2 Моделирование солнечной энергии .....	30
2.3 Моделирование энергии ветра.....	362
2.4 Моделирование энергии биомассы .....	406
2.5 Выводы по главе.....	40
<b>3. МЕТОДОЛОГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ВАРИАНТОВ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ</b> .....	41
3.1 Свойство недостаточной определённости исходной информации при оптимизации энергетических систем.....	41
3.2 Общая схема комплексного использования возобновляемых источников энергии в энергетических системах .....	433
3.3 Критерии эффективности использования возобновляемых источников энергии ...	466
3.3.1 Иерархия целей системы энергоснабжения с возобновляемыми источникам энергии .....	436
3.3.2 Выполнение заданных функций. ....	48
3.3.3 Потребность в финансовых ресурсах.....	50
3.3.4 Потребность в энергетических ресурсах. ....	51
3.3.5 Ущерб от перерывов в энергоснабжении. ....	52
3.3.6 Экологический ущерб.....	55
3.3.7 Социальный ущерб.....	58
3.4 Анализ решений по выбору эффективных вариантов вовлечения возобновляемых источников энергии в энергобаланс .....	62
3.5 Выводы по главе.....	666
<b>4. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ О ВКЛЮЧЕНИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ</b> .....	677
4.1 Определение множества допустимых решений задачи вовлечения возобновляемых источников энергии.....	677
4.2 Оптимальное решение задачи вовлечения возобновляемых источников энергии на основе теории полезности .....	73
4.3 Структура программного комплекса, реализующего разработанную методику .....	81
4.4 Выводы по главе.....	888
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	90
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	92

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В магистерской диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

Закон Республики Казахстан «О поддержке использования возобновляемых источников энергии» от 4 июля 2009 года № 165-IV (с изменениями и дополнениями по состоянию на 28.12.2016 г.);

Закон Республики Казахстан «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности» от 13 января 2012 года № 541-IV (с изменениями и дополнениями по состоянию на 28.12.2016 г.);

Программа «Энергосбережение - 2020». Постановление Правительства Республики Казахстан от 29 августа 2013 года №904.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В магистерской диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

**Электрическая энергия** — физический термин, широко распространённый в технике и в быту для определения количества электрической энергии, выдаваемой генератором в электрическую сеть или получаемой из сети потребителем.

**Электрическая сеть** — совокупность электроустановок, предназначенных для передачи и распределения электрической энергии от электростанции к потребителю.

**Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии** — источники электрической и тепловой энергии, использующие энергетические ресурсы рек, водохранилищ и промышленных водостоков, энергию ветра, солнца, редуцируемого природного газа, биомассы (включая древесные отходы), сточных вод и твердых бытовых отходов.

**Модель** — это система, исследование которой служит средством для получения информации о другой системе, представление некоторого реального процесса, устройства или концепции.

**Математическая модель** — это математическое представление реальности. Является частным случаем понятия модели, как системы, исследование которой позволяет получать информацию о некоторой другой системе.

**Ветрогенератор** — устройство для преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения ротора с последующим её преобразованием в электрическую энергию.

**Солнечная батарея** — несколько объединённых фотоэлектрических преобразователей-полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток, в отличие от солнечных коллекторов, производящих нагрев материала-теплоносителя.

**Биогазовая установка** — это комплексное решение утилизации отходов пищевой промышленности, агропромышленного комплекса, производство тепловой, электрической энергии, и удобрений.

**Топливо-энергетические ресурсы** — совокупность всех природных преобразованных видов топлива и энергии, используемых в хозяйственной деятельности.

## ОБОЗНАЧЕНИЕ И СОКРАЩЕНИЯ

- ВИЭ — возобновляемые источники энергии;
- ВИЭ — нетрадиционные и возобновляемые источники энергии;
- ТНУ — теплонасосная установка;
- ВЭУ — ветроэнергетическая установка;
- ВЭС — ветроэнергетическая станция;
- ДЭУ — дизельная энергетическая установка;
- БЭУ — бензиновая энергетическая установка;
- ТЭ — топливный элемент;
- АБ — аккумуляторная батарея;
- МИРЭК — Мировой энергетический комитет;
- ЕНРА — Европейская ассоциация по тепловым насосам;
- ТЭЦ — тепло — электроцентраль;
- КПД — коэффициент полезного действия;
- ЭК — энергетический комплекс;
- ВДЭК — ветродизельный энергетический комплекс;
- ВДУ — ветродизельная установка;
- ВА—ветровой агрегат;
- АГ — асинхронный генератор;
- СШ — сборные шины;
- РН — регулируемая нагрузка;
- ДД—дизельный двигатель;
- СГ — синхронный генератор;
- АЭ — аккумулятор энергии;
- РК – Республика Казахстан
- ИА — инерционный аккумулятор;
- В — выпрямитель;
- ИН — инвертор;
- СМ—соединительная муфта;
- ТА — тепловой аккумулятор.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность проблемы.** Борьба за экологию, стремление повысить энергоэффективность экономического развития способствовали активизации усилий в мире по созданию более зеленой энергетики, движению к низкоуглеродной экономике. Альтернативная энергетика в настоящее время активно развиваются многими странами, в основном развитыми странами Европы и Америки и занимают важное место в мире энергетики, необходимо ограничить влияние хозяйственной деятельности человека на промышленную экологию. Ключевым фактором использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в республике является необходимость снижения негативного воздействия энергетики на окружающую среду. В стране 85% выработанной электроэнергии получается путем сжигания топлива, которое имеет экологические и экономические выгоды. Использование ВИЭ для выработки и поставки электроэнергии в сетевые энергосистемы является экономически выгодным в энергодефицитных районах Казахстана, а, следовательно, возобновляемая энергетика может стать основным фактором развития отдаленных регионов республики. ВИЭ сейчас позиционируются Казахстаном одним из векторов развития энергетического комплекса. Этому свидетельствует усиленное внимание к процессу их внедрения государством и бизнес структурами. Масштабность и возможность освоения отдельных видов ВИЭ зависит от наличия ресурсов и степени адаптивности технологий, от себестоимости получаемой энергии, которая не должна быть высокой ни для самих производителей, ни для потребителей. Эта отрасль стратегическая, при этом важен баланс между рыночным механизмом ценообразования и регулирующим участием государства. В инновационном подходе в реализации проектов по внедрению ВИЭ, эффективным с точки зрения технологически и экономически, является совместное использование энергии воды, ветра, солнца, которая требует финансовых затрат и научных исследований. В РК России и СНГ имеются природные условия для комбинированного использования ВИЭ. Функционирование систем энергоснабжения на базе ВИЭ невозможно без государственной поддержки, включая поддержку гибкого ценообразования. Использование и развитие ВИЭ – имеет экологический аспект. Экологические проблемы, связанные с развитием как традиционной и возобновляемой энергетики страны мира самостоятельно не справятся с эрозией почв, с истощением запасов пресной воды, с выбросами парниковых газов, опустыниванием, разрушением озонового слоя, исчезновением видов флоры и фауны и т.д. Отсутствие энергетической альтернативы негативно порявится в глобальном масштабе: быстрое истощение традиционных энергоносителей и ужесточение экологических требований приведут к удорожанию удельных капиталовложений в строительство традиционных генерирующих мощностей и т.д. РК является участником Киотского Протокола и разделяет амбициозные цели международного соглашения. Планируется сократить объем выбросов парниковых газов в атмосферу до 2020 г. на 15% в области развития ВИЭ. Получение энергии из нетрадиционных источников имеют следующие плюсы:



возобновляемость ресурсов и экологичность. «Подготовку к Всемирной выставке ЭКСПО-2017 в Астане надо использовать для создания центра изучения и внедрения лучшего мирового опыта по поиску и созданию энергии будущего и зеленой экономики. Специалисты под эгидой Назарбаев Университета осуществляют эту деятельность. Создаются условия для перевода общественного транспорта на экологически чистые виды топлива, внедряются электромобили и создаются для них соответствующие инфраструктуры. Все это повлияло на повышенный интерес Вузов Казахстана к возобновляемым источникам энергии. Для эффективного внедрения и использования новых видов энергии необходимы высококвалифицированные кадры.

#### **Цель исследования:**

Разработка методики оценки эффективности вовлечения возобновляемых источников энергии электроснабжения социальных объектов на основе принципов и методов системного подхода.

#### **Основные задачи исследований:**

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы и решены следующие задачи:

- Выбор системы математических моделей, позволяющих оценивать поступление и потенциал различных ВИЭ, включая определение переменных параметров, области применимости и точности моделей, верификацию моделей на конкретных примерах;

- Разработка методологии оценки эффективности комплексного применения ВИЭ в системе электроснабжения социальных объектов, включая иерархическое представление целей системы энергоснабжения с ВИЭ, исследование методов выбора критериев эффективности, определяющих степень достижения целей и формализацию процесса выбора эффективных вариантов вовлечения ВИЭ;

- исследование технико-экономические характеристик практически применяемых технологий преобразования ВИЭ с учетом их дальнейшего развития;

- разработка алгоритмов процесса выбора эффективных вариантов вовлечения ВИЭ в электроснабжение социальных объектов, включая алгоритм получения множества допустимых решений в условиях неполной исходной информации и методику применения теории полезности для оптимизации вариантов, принадлежащих множеству допустимых решений;

- создание пакета прикладных программ для ЭВМ, позволяющих полностью автоматизировать расчетную и частично автоматизировать интерактивную часть разработанных алгоритмов;

- применение разработанной методики на конкретном примере, интерпретация и анализ полученных результатов.

#### **Научная новизна работы.**

Результаты расчетно-теоретических исследований, представляемые к защите, являются обобщением работы автора в области применения возобновляемых источников энергии для повышения эффективности электроснабжения социальных объектов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- разработка методологии оценки эффективности комплексного применения ВИЭ в системе электроснабжения социальных объектов;
- разработка алгоритмов процесса выбора эффективных вариантов вовлечения ВИЭ в электроснабжение социальных объектов, включая алгоритм получения множества допустимых решений в условиях неполной исходной информации и методику применения теории полезности для оптимизации вариантов, принадлежащих множеству допустимых решений;
- создание пакета прикладных программ для ЭВМ, позволяющих полностью автоматизировать расчетную и частично автоматизировать интерактивную часть разработанных алгоритмов;

Большой вклад в решение различных аспектов задач методики оценки эффективности вовлечения возобновляемых источников энергии электроснабжения социальных объектов на основе принципов и методов системного подхода внесли ученые: D.Blumberga, T. Cho, Fishburn P.C. , Keeney R.L., Raiffa H., Pratt J.W и т.д.

Несмотря на значительное число работ в этой области [1-8,21,24-39,43], методики оценки эффективности вовлечения возобновляемых источников энергии электроснабжения социальных объектов на основе принципов и методов системного подхода и их практическая реализация еще не получили должного развития.

#### **Практическая значимость.**

Нахождение оптимальных параметров, который состоит из множества элементов, представляет собой достаточно трудоемкую задачу.

Созданная методика и программное обеспечение позволяют автоматизировать процесс технико-экономического обоснования, который может состоять из ветровых, солнечных и позволяет оценивать варианты вовлечения возобновляемых источников в энергетический баланс на основе ясных ценностных установок и понятного для широкого круга групп и лиц процесса выбора решений

# 1 Анализ современного состояния электроэнергетики в Казахстане

## 1.1 Современные тенденции развития возобновляемой энергетики

Площадь Казахстана составляет 2,7 млн. км<sup>2</sup>, на этой территории проживает примерно 17,4 миллиона человек, причем 47% составляют сельские жители[1].

Континентальный климат страны с суровой зимой и жарким летом требует отопления в зимний период, когда температура опускается до -20° С и ниже на севере страны, и до -5° С – на юге, а летом средняя температура составляет 28,4° С [2]. Такие климатические условия демонстрируют потребление электрической и тепловой энергии в течение года.

Потребление энергии демонстрирует влияние сложного континентального климата с суровой зимой, что требует отопления помещений, а также жаркого летнего кондиционирования воздуха, что увеличивает спрос на источники питания. Экономика Казахстана извлекает выгоду из своих природных ресурсов (особенно нефти, газа и урана), тяжелой промышленности (черных и цветных металлов) и сельского хозяйства. Нефтяная и горнодобывающая промышленность составляла 33% ВВП в 2014 году и 82% экспорта. По мере развития страны ВВП увеличился с 16,9 млрд. долларов США в 1999 году до 224,4 млрд. долларов США в 2018 году [3], а благоприятная экономическая среда и быстрый рост доходов на душу населения способствовали впечатляющему сокращению бедности с 47% от общей численности населения, живущего за чертой бедности в 2001 году, до 2 % в 2017 году. Однако, как и многие развивающиеся страны, быстрый экономический рост за последнее десятилетие привел к резкому росту потребления электроэнергии и нехватки электроэнергии в зимние периоды, когда спрос на электрические нагрузки потребовал ограничения на потребление, которые оказали негативное воздействие на региональные экономические развития.

Потребление первичной энергии возросло с 26,92 млрд. кВт·ч в 1999 году до 97,6 млрд кВт·ч в 2017 году. Общая установленная мощность составляет 19,8 ГВт, а доступная мощность составляет около 15 ГВт, главным образом, из-за устаревшего оборудования и отсутствия обслуживания. Приблизительно 13% электроэнергии Казахстана генерируется гидроэлектростанциями вдоль реки Иртыш, а 87% - тепловыми электростанциями (75% угольными электростанциями и 12% газовыми заводами).

Возобновляемые источники, такие как ветер, солнечная энергия, малая гидроэнергетика и биоэнергия, в настоящее время составляют менее 1% энергетического баланса Казахстана, однако существует значительный потенциал в производстве возобновляемой энергии, и правительство ожидает, что общая доля производства возобновляемой энергии вырастет до 11% к 2030 году с 1040 МВт возобновляемых источников энергии к 2023 году. 80% всей электроэнергии производится на промышленном севере электростанциями, расположенными вблизи угольных шахт, однако, сети электропередач по всей

стране неэффективны, а потери при передаче и распределении оцениваются примерно в 15% от произведенной энергии, хотя фактическое значение может быть выше.

Система передачи и распределения электроэнергии разделена на три сети с двумя на севере, соединенными с Россией, а одна на юге связана с Единой энергетической системой Центральной Азии. Ожидается, что к 2030 году рост спроса на электроэнергию достигнет 120 - 180 ТВт·ч. Учитывая быстрый экономический рост Казахстана и связанный с этим рост спроса на электроэнергию, к 2023 году необходима значительная модернизация существующих энергетических объектов в дополнение к строительству новых электростанций мощностью ~ 20 ГВт. Важное значение имеет также повышение энергоэффективности: недавнее исследование показало, что повышение эффективности систем электро- и теплоснабжения может сократить почти одну треть потребления электроэнергии и тепла в жилых и коммерческих секторах Казахстана при средней стоимости для конечных пользователей около 1 долл. / ГДж [4]. В настоящее время на промышленный сектор приходится около 70% общего объема потребления электроэнергии, с жилым сектором 10%, коммерческий сектор и сектор услуг в совокупности 9%, транспорт 6% и сельское хозяйство 2%.

Казахстанский энергетический сектор произвел 275 млн т CO<sup>2</sup> в 2011 году, из которых 80% приходится на энергетический сектор от производства тепла и электроэнергии из-за низкой эффективности, старения и сетевых активов. В целях сокращения выбросов и удовлетворения растущего спроса на электроэнергию срочно необходима децентрализованная, эффективная и экологически безопасная система энергоснабжения на основе разнообразных возобновляемых ресурсов. Возобновляемые источники энергии являются важным механизмом для достижения устойчивого развития, а в Казахстане имеются богатые ресурсы (солнечная радиация, энергия ветра, гидроэнергетика, биомасса и органические отходы и остатки), предполагающие, что адекватное использование этих ресурсов может покрыть существенную часть всех затрат энергосистемы. Возобновляемая энергия также способствует значительному сокращению выбросов парниковых газов, местному загрязнению воздуха и сводит к минимуму воздействие на ландшафт и физическую, географическую и природную среду. Казахстан обладает значительными запасами нефти, газа, угля и урана. Эти ресурсы распределены неравномерно по всей стране, а их производство, транспортировка и использование были сложными для организации сети снабжения, окружающей среды и региональной геополитики.

Анализ отечественной и зарубежной литературы в научно – технических, в популярных изданиях показывает, что применение нетрадиционных возобновляемых источников энергии колеблется от восторженных до умеренно пессимистических. “Зелёные” призывают заменить всю традиционную топливную и атомную энергетику на использование ВИЭ. Мнения специалистов, учёных, инженеров разное.

Рассмотрим применение ВИЭ на примерах статей из журналов: “Альтернативная энергетика и экология”, “Энергосбережение”, “Промышленная энергетика” и др. изданий.

В статьях Беляева Ю.М. [5,6] и Некрасова В. Г. [6] ” рассуждается о плюсах и минусах ВИЭ. Они выделяют такие положительные качества ВИЭ как: экологическая чистота и бесплатность энергии с одной стороны, а с другой - рассматривают отрицательные признаки: погодные условия, отдалённость территорий, большая себестоимость энергоносителей.

Поскольку природа и технология преобразования ВИЭ различны,

Геотермальная энергетика – проявления тепловой энергии недр, нагретых газов и паров, теплоты некоторых горных пород и вулканической теплоты, которая независима от времени года, суток, метеорологических условий.

Рассмотрим её применение в России на примерах Байкальского региона, Камчатки и Краснодар, используя статью Бутузова В.А. ”Геотермальная система теплоснабжения с использованием солнечной энергии и тепловых насосов” )журнал “Промышленная энергетика”, 2008 год, № 9.

СССР была первой страной в мире, в которой в 1967 году создали ГеоЭС с бинарным циклом (Паратунская станция, Камчатка), а Паужетская ГеоЭС более 30 лет производит дешёвую электроэнергию на Камчатке. В 1999 году на Камчатке была возведена Верхне – Мутновская ГеоТЭС .

Применении геотермальной энергетике имеет и минусы. В атмосферу выбрасываются водяные пары, соединения серы, бора, ртути и других веществ, загрязняется почва и вода. Поэтому освоение геотермальной энергетике должно проводиться в комплексе мер по защите окружающей среды.

Ветроэнергетика – это экологически безопасный и эффективный, мощный и доступный источник энергии, не требующий угля, газа и других дорогостоящих энергоносителей. К главным факторам, определяющим возможность использования ветра, относят метеорологические условия, выбор оптимального расположения ВЭУ, метод преобразования кинетической энергии ветра в электрическую и экономическая эффективность.

Наиболее благоприятные районы Казахстана для развития ветроэнергетики – Алматинская область, Карагандинская область, Костанайская область.

Бежан А. В. [7] в своей статье “Теплоснабжение с применением ветроэнергетических установок”, рассматривает возможности организации теплоснабжения с участием ветроэнергетических агрегатов разной мощности, и даёт оценку получаемого при этом энергосберегающего эффекта.

Интересная статья Сыркина В. В. [8] “Ветроэнергетика – из прошлого через настоящее в будущее” , где представлены развёрнутые исторические сведения по развитию ветроэнергетики от глубокой древности человеческой цивилизации до наших дней.

Солнечная энергетика – отрасль науки и техники, разрабатывающая основы, методы и средства использования солнечного излучения или солнечной радиации для получения электрической, тепловой и других видов энергии.

Солнечная электроэнергетика развита в Казахстане слабо, по сравнению с ветроэнергетикой, которая обладает большим капиталовложением в солнечные электростанции и энергоустановки.

Много статей посвящено использованию солнечной энергетики в различных регионах страны.

Статья Матвеева А.В. [9] "Энергоэффективный дом с системой солнечного горячего водоснабжения". В статье говорится о проекте "Энергоэффективный дом", который частично обогревается за счёт солнечной водонагревательной установки. Это даёт возможность сократить расход энергии на отопление не менее чем на и промышленное производство почти всех видов необходимого для этого оборудования, имеется научно – технический потенциал. С другой стороны, противостоят тормозящие факторы: шаткое состояние экономики, трудности с инвестициями, проблемы в законодательной и нормативной базе и т.д.

Авторы статьи «Оптимальное планирование и планирование энергетического центра при наличии ветра, хранения и реагирования спроса в условиях неопределенности» Samaneh Pazouk, Mahmoud-Reza Haghifam от 2 Февраля 2014 года. Концентратор (ЕН) энергетический подход упрощает взаимосвязь разнородных энергетических инфраструктур. понимание облегчает интеграцию возобновляемых источников энергии (RERS) к инфраструктуре. Состоящий из различных технологий, ЕН удовлетворяет требованиям выхода концентратора путем передачи, преобразования или хранения ИНГ ступиц носителей ввода энергии. Общая производительность системы питания зависит от оптимальной реализации ЕНС. В этой статье, математическая формулировка представляется, для оптимальной планировки, развитой ЕН с учетом эксплуатационных ограничений. Две целевых функции (OFS) представлены для детерминированных, и стохастических условий ветровой энергии, цены на электроэнергию, а также концентратором спроса. Нефтесервисные включают в себя расходы, связанные с инвестиционной, эксплуатации, надежности и выбросов. ЕН строится трансформатор (Т), комбинированного производства тепла и электроэнергии (ТЭЦ), котел (В), и тепловое хранение (TS). ЕН разработан ветротурбины (WT), Место для хранения энергии (ES), и спрос Программы реагирования (DR). Носители ввода Концентратор энергии электричество, газ и воду. Выходной концентратор требования являются электричество, тепло, газ и воду. CPLEX ПАМС используется для решения смешанного Целочисленного линейного программирования (MILP) модель разработанного концентратора. Моделирование методом Монте-Карло используется для генерации сценарии деревьев для ветра, цены и спроса. SCENRED инструмент и назад / вперед техника ГАМС сократить сценарии до лучших десяти сценариев. Результаты моделирования показывают, какие технологии с тем, что Емкость должна быть установлена в ЕН. Результаты обоснования минимальных / максимальных значений мощности концентратора технологии, должны быть установлены в ступице. Проявляются когда и сколько энергии несущей должен выработать, чтобы минимизировать затраты относящиеся к инвестициям при эксплуатации, надежности и выбросов.

Эффективность WT, ES, и DR в детерминированный и стохастические обстоятельства, и влияние неопределенности ветра, цены и спроса оцениваются по планированию концентратора. Влияние пропускной способности сети газа и ТЭЦ оценивается по планированию концентратора.

Сектор (ВИЭ) превратился из экспериментальной области, нуждающейся в серьезной государственной поддержке, в неотъемлемую часть энергетического баланса большего количества стран.

Активное развитие «новых» возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветряная энергетика, началось в Японии и Германии. Самым успешным примером комплексной программы поддержки новых источников энергии стал закон о ВИЭ в Германии (EEG – Erneuerbare-Energien-Gesetz). Страна превратилась в центр мировой экспертизы по развитию зеленой энергетике.

Гидроэнергетика, являясь возобновляемым источником, исключается из заявленных долгосрочных целей и показателей, так как считается, опробованная и коммерчески доступная технология. В развивающихся странах, развитие гидроэнергетики поощряется и поддерживается государственными программами.

Согласно прогнозу Frost & Sullivan, доля ВИЭ (включая гидроэнергетику) в общих установленных мировых мощностях вырастет до 38% к 2030 году и 30% в 2017 году. Новые источники ВИЭ будут расти большими темпами, в среднем (10–14)% в год.

В 2030 году совокупная доля «новых» ВИЭ возрастет до 46% от общей установленной мощности ВИЭ, включая гидроэнергетику. Ветряная и солнечная энергия составит большую часть мощностей ВИЭ. Европа уступает место азиатским странам в темпах роста и остается лидером по общей установленной мощности.

«Зеленая энергетика» появилась в Европе, распространилась на другие континенты и страны. Произошло это удешевлению производства, технологий и оборудования для ветряных и солнечных электростанций. Снижение капитальных вложений, возможность быстрого введения подобных электростанций в эксплуатацию, а также международные обязательства по снижению эмиссий парниковых газов. Данные факторы делают ВИЭ привлекательными активами в общей энергосистеме.

В азиатских странах лидерами на рынке ВИЭ являются Китай и Индия. Значительные вложения в развитие сектора ожидаются в Латинской Америке и Африке. К 2030 году Европа будет сохранять статус лидера по общей установленной мощности, во многом благодаря первому старту подобных инициатив.

Основным фактором развития ВИЭ является продуманная и комплексная государственная программа поддержки. Евросоюз планирует довести долю возобновляемых источников энергии до 20% к 2020 году. Китай до 8% от общей установленной мощности к 2030 году.

Другим фактором является финансовая поддержка инвесторов в домохозяйстве, устанавливающие солнечные панели на крыши своих домов,

частные инвесторы, вкладывающие большие капиталовложения в ветряную энергию или на электростанцию, работающую на биотопливе. Накопленный опыт и анализ систем стимулирования инвестиций в ВИЭ позволяет выделить фиксированные зеленые тарифы (feed-in tariffs), являющиеся успешным способом стимулирования развития рынка. Разработанная и опробованная в Германии, сбалансированная, долгосрочная система зеленой энергии вывела Германию в мировые лидеры по объему инвестиций в возобновляемые источники энергии и количеству установок, работающих на энергии ветра, солнца или биотопливе.

Дополнительным фактором является отлаженная, функциональная система получения всех необходимых разрешений на строительство электростанции на основе ВИЭ и ее подсоединения к сети. Имеются страны, несмотря на наличие ресурсов и господдержки, сектор ВИЭ не начал развиваться из-за труднопреодолимых бюрократических проблем. Эта ситуация, сложилась в Греции, несмотря на один из самых высоких зеленых тарифов и высокий уровень инсоляции, сектор солнечной энергии развивается очень медленно. После изменений, введенных в 2012 году на малые системы для домохозяйств, рынок начал расти более быстрыми темпами.

Применение автономных энергосистем с использованием ВИЭ сталкивается с большим количеством проблем, которые затрудняют и тормозят развитие. Эти проблемы можно разделить на группы.

Необходимо рассмотреть и изучить проблему, связанную с технико-экономическими характеристиками автономных энергосистем с применением ВИЭ и попытаться разобраться в причинах ее возникновения и способов устранения. Автономная энергосистема с применением ВИЭ состоит из нескольких агрегатов. В основном используется комплекс ветрогенератора и солнечной батареи, но в некоторых случаях солнечная батарея или ветрогенератор используются в сочетании с дизельгенератором. Основной проблемой считается тот фактор, что стоимость электроэнергии, получаемой от солнечных батарей и ветрогенератора, в разы превышает стоимость электроэнергии получаемой от традиционных источников энергии. Это обусловлено низкой плотностью солнечного излучения и низким КПД фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Кроме того, в связи с отсутствием солнечного излучения в ночное время возникает необходимость в аккумулировании поступающей электроэнергии, что существенно сказывается на конечной стоимости оборудования в целом [11].

При использовании ветрогенератора возникает необходимость в устранении ряда существенных недостатков: при порывах ветра ускорение, частота вращения и динамические перегрузки существенно превышают допустимые величины. Для устранения этих недостатков существует несколько способов: совершенствование конструкции рабочих органов, повышение инерционности механической части, повышение надежности преобразовательного агрегата, автоматический контроль основных параметров, характеризующих работу ВЭУ и автоматизация процессов переключения



основных элементов преобразовательного агрегата в соответствии с изменением скорости ветра и нагрузки инвертора [12].

Институциональные проблемы применения и использования автономных энергосистем:

–недостаточная законодательная база в области поддержки освоения ВИЭ; неэффективная система мер по принуждению выполнения экологического законодательства, что не способствует росту заинтересованности в развитии использования более экологически чистых видов энергии, к которым относятся ВИЭ;

–нежелание органов местного самоуправления участвовать в финансировании инвестиционных проектов по освоению ВИЭ, поскольку долгосрочные выгоды трудно обратить на пользу себе в краткосрочной перспективе.

Проанализировав вышеперечисленные проблемы использования и применения автономных энергосистем, можно сделать вывод о необходимости влияния на данную сферу энергетики со стороны государственных органов. Так, например, во многих развивающихся странах основным двигателем для развития технологий ВИЭ является существующая система энергоснабжения, которая характеризуется доминирующей долей ископаемых видов топлива, обеспечивающих почти 80 % энергетической потребности, и высокой зависимостью от импорта энергоносителей. Так же важной причиной, стимулирующей переход на альтернативные источники энергии, является проблема глобального изменения климата.

## **1.2 Проблемы электроснабжения социальных объектов**

Объекты гражданской инфраструктуры делятся на следующие категории:

– Жилые здания. К ним относятся многоквартирные дома и загородные коттеджи, гостиницы, общежития.

– Административные здания и бизнес-центры. Это торговые комплексы, банки, центры обработки данных.

– Учреждения здравоохранения, образования и культуры. Это больницы, поликлиники, медицинские центры, школы, детские сады, театры, музеи, выставочные комплексы и спортивные арены.

– Транспортная инфраструктура. Железнодорожные, речные и автовокзалы, аэропорты, станции.

У объектов городской инфраструктуры, принадлежащих к той или иной категории, существуют свои особенности построения систем электроснабжения. Был сделан запрос у специалистов электротехнической отрасли назвать и прокомментировать самые важные критерии создания энергетических установок гражданских зданий.

Энергосберегающие лампы, телевизоры, компьютеры, принтеры, кондиционеры — все эти устройства потребляют ток, по форме не

соответствующий синусоиде напряжения, в итоге появляются высшие гармоники. Ток, по форме не соответствующий синусоиде напряжения, приводит к появлению высших гармоник, которые станут приводить к перегревам и перегораниям кабелей, появлению больших токов в нейтральных проводах, возникновению резонанса в сети и т.д.. Правильное использование данных о гармонических составляющих сети и своевременные меры по снижению их влияния улучшают качество электроэнергии, сокращают затраты и предотвращают выход из строя дорогостоящей техники. В настоящее время при обустройстве электросетей гражданских объектов чаще используются анализаторы сети.

В электроустановках современных жилых и общественных зданий присутствует большое количество однофазных потребителей и, как следствие, несимметрия нагрузки по фазам. В составе электроустановки присутствуют асинхронные двигатели насосов и лифтов, которые критичны к несимметрии питающего напряжения. Наличие сложной инженерной техники приводит к повышенным требованиям защиты от импульсных перенапряжений.

Администраторы в кафе, ресторанах и гостиницах, менеджеры торговых залов, офисные работники в бизнес-центрах—имеют доступ в большинство помещений здания, в котором трудятся, в щитовые или подсобные комнаты, где установлены распределительные шкафы. Однако этот персонал не обладает необходимыми электротехническими знаниями, но вмешивается в работу электрооборудования. Электроустановка любого гражданского здания должна обеспечивать максимальную защиту людей от поражения электрическим током, которому способствуют оболочки с двойной изоляцией, пластиковые боксы, системы заземления с разделенной рабочей и защитной нейтралью и аппараты защиты от токов утечки.

Данная особенность присуща потребителям первой и особой категории, к которым относятся центры обработки данных и больницы. Имеются особые требования на показатели безопасной работы, ремонтпригодность и время восстановления электрооборудования накладывают наличие операционных и палат интенсивной терапии. Главным является не стоимость построения системы и ее эксплуатация, а сохранение человеческих жизней. В медицинских учреждениях применяются приборы, имеющие прямой контакт с телом пациента. А значит, необходимо применение системы заземления типа IT, где нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через устройства с большим сопротивлением.

Электроснабжение любого социального объекта начинается с трансформаторной подстанции. В низковольтную часть электроустановки входит главный распределительный щит. С него напряжение подается на вводное распределительное устройство (ВРУ) в здание, которое распределяет питание на нескольких уровнях - на этажные щиты. Завершается распределение на уровне электроустановочных изделий для подключения освещения, бытовой и офисной техники, других нагрузок.

В основу построения схемы электроснабжения зданий городской инфраструктуры должны закладываться следующие принципы:

– Наличие резервных источников снабжения, дизельных электростанций или источников бесперебойного питания, которые обезопасят системы здания от внеплановых отключений.

– Схема основной электрической сети должна обладать достаточной гибкостью, позволяющей осуществлять поэтапное развитие и обеспечивать возможность приспособливаться к изменению условий роста нагрузки и развитию электросетей. Должна обеспечиваться управляемость электрической сети.

– Схема сети должна соответствовать требованиям охраны окружающей среды. При ее построении необходимо ориентироваться на уменьшение площадей подлежащих изъятию земельных участков, ограничение выбросов оксидов серы, оксидов азота и летучей золы, а также предотвращение вредных воздействий на близлежащие водоемы.

Создание электроустановки объекта требует определенных финансовых вложений. Складываются из средств, затраченных на проектирование, стоимости комплектующих, затрат на сборку и ввод в эксплуатацию. Содержание электроустановки также отдельная статья бюджета.

Излишняя экономия в процессе создания электроустановки обойдется в колоссальные затраты при ее содержании. Эксперты обнаружили следующие проблемы, встречающиеся в жизни:

- ремонт в процессе эксплуатации;
- замена неисправного оборудования;
- регламентные работы;
- дополнительные потери электроэнергии в системе;
- финансовые потери из-за простоя во время ремонта.

Все элементы системы должны иметь запас прочности и быть рассчитаны на возможные отклонения параметров работы, иметь широкий температурный диапазон, быть стойкими к вибрациям, влажности и прочим внешним воздействиям.

Для потребителей первой и особых категорий Правила устройства электроустановок (ПУЭ) предусматривают необходимость применения автоматического ввода резерва (АВР). Перерывы в электроснабжении таких важных систем, как аварийное освещение, пожаротушение и дымоудаление, охранная сигнализация, могут представлять угрозу для людей, а также привести к материальным потерям. «В случае отключения основного источника питания устройство АВР должно сработать максимально быстро и точно. В противном случае важнейшие системы безопасности и жизнеобеспечения здания выйдут из строя. Для повышения надежности всей системы, устройство АВР на базе реверсивных выключателей с моторным приводом комплектуется блоком управления ОМД. Он контролирует напряжение и частоту, имеет уставки задержки по времени переключения АВР для пуска и останова генератора, обладает возможностью задания приоритета линий и может работать в одно- и трехфазных сетях».

В электроустановке следует предусматривать:

- защиту от поражения электрическим током (заземление доступных для прикосновения частей, двойная изоляция, ограничение доступа в щитовые);
- наличие устройств автоматического отключения при возникновении дифференциальных токов, что позволяет обезопасить людей от косвенного прикосновения к токоведущим частям;
- защиту от перегрузок и короткого замыкания.

Для обеспечения высокого уровня безопасности, аппаратура, применяемая в низковольтных комплектных устройствах, должна соответствовать требованиям действующих стандартов.

В широком понимании, качество электроэнергии — это совокупность ее свойств, определяющих воздействие на электрооборудование и аппараты. Качество электроэнергии оценивается показателями, как уровни электромагнитных помех в системах электроснабжения по частоте, действующему значению напряжения, форме его кривой и др.

Плохие показатели КЭ приводят ко многим негативным последствиям. Наиболее неприятными для объектов гражданской инфраструктуры являются сокращение срока службы оборудования, отказы в работе элементов системы, а также дополнительные потери электроэнергии. В таблице 1.1. дано сравнение электроснабжения гражданских и промышленных объектов.

Комфортную работу всех систем и нагрузок гражданского здания может обеспечить применение устройств, повышающих КЭ. К ним относят:

- источники бесперебойного питания (ИБП), исключаяющие просадку напряжения;
- активные фильтры, устраняющие искажение кривых токов и напряжений;
- конденсаторные батареи, компенсирующие реактивную мощность, а также устраняющие просадки напряжения.

Энергосистема современного здания — достаточно тонкая и сложная структура, требующая высококвалифицированного сопровождения. В электрической сети должна быть система диспетчеризации, которая имеет прямую связь со всеми элементами энергосистемы, позволяет осуществлять мониторинг и управление ими. Применяемое оборудование должно обеспечивать раннюю диагностику отказов, включать средства, позволяющие осуществлять постоянный контроль оборудования и предупредить аварийные ситуации.

Таблица 1.1 - Сравнение электроснабжения гражданских и промышленных объектов

Критерий сравнения	Гражданские объекты	Промышленные предприятия
Доля потребления от общего объема вырабатываемой энергии, %	30–50	50–70
Ориентировочное значение потребляемой мощности	Квартиры с газовыми плитами — до 25 кВт Квартиры с электроплитами — до 35 кВт Коттедж с электроплитами — до 40 кВт Жилые и общественные здания — от 100–200 кВт до 1 МВт	Основная часть предприятий — 30–150 МВт Крупные предприятия (машиностроение, черная металлургия и др.) — 300–500 МВт и более.
Основные типы потребителей электроэнергии (ПЭ)	Осветительные приборы, нагревательные приборы, холодильники, кондиционеры, электронные приборы (аудио-, видеотехника, компьютеры)	Асинхронные и синхронные двигатели (60–90%), электротехнологические и выпрямительные установки (печи, электросварочные агрегаты и др.)
Коэффициент мощности	0,9–0,95	0,7–0,8
Надежность электроснабжения	Значительная часть ПЭ относится ко II категории надежности электроснабжения. Ряд ПЭ (лифтовые и пожарные установки высотных жилых зданий, крупные учебные и медицинские учреждения) относятся к I категории и должны обеспечиваться автоматическим вводом резервного питания (АВР) в течение 1,5–2 с.	Большая часть промышленных ПЭ относится к I категории надежности электроснабжения. Ряд производственных процессов нефтеперерабатывающей, электронной и других видов промышленности требуют практически бесперебойного электроснабжения (особая категория).

Ограниченность и стоимость энергоресурсов заставляют человечество серьезно задуматься об их эффективном использовании. Если взять жилое или офисное здание, то можно найти места для внедрения энергоэффективных технологий. Например, централизованные системы водоснабжения, вентиляции и отопления. Насосное оборудование с частотно-регулируемыми приводами в совокупности со шкафами управления позволяет экономить электрическую энергию, а также снижает уровень потребления воды. Вторая, не менее существенная часть, которую можно оптимизировать, — это освещение и комфортная температура в помещениях.

В отличие от аварий на электроустановках промышленных предприятий, перебои в энергоснабжении зданий социальных объектов не приводят к экологическим катастрофам и, как правило, не влекут за собой потери человеческих жизней. Необходимо позаботиться о качественной и безопасной системе электроснабжения социальных объектов.

### **1.3 Пути повышения эффективности электроснабжения социальных объектов**

В настоящее время во всем мире особо важную роль в улучшении бизнес климата и устойчивого развития экономики страны играет электроэнергетика. А качество и надежность электроснабжения напрямую влияет на работу всего производственного цикла и жизнедеятельности человечества в целом.

В соответствии с поручением Главы государства по вопросам кардинального улучшения условий для предпринимательской деятельности в стране, Министерством энергетики Республики Казахстан с 2015 года проводится работа по улучшению качества и надежности поставок электрической энергии, а также условий подключения к системе электроснабжения.

Электроэнергетика. Реформы, реализованные в 2015 году

В целях упрощения процедуры подключения к сетям электроснабжения, Министерством энергетики РК были внесены ряд изменений в законодательные акты в области электроэнергетики. В том числе в Закон РК «Об электроэнергетике», Закон РК «Об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности», Правила пользования электрической энергией (утверждены приказом Министра энергетики РК от 25 февраля 2015 года № 143).

В соответствии с внесенными изменениями были упразднены 2 процедуры при подключении к сетям электроснабжения: исключена необходимость получения разрешения на строительно-монтажные работы. Теперь проектировщику достаточно в электронной форме направить уведомление о начале работ в управление государственного архитектурно-строительного контроля. Кроме того, исключена необходимость получения разрешения на подключение к электросетям от органа по госэнергонадзору и контролю. Недельный срок заключения договора на электроснабжение с энергоснабжающей организацией сокращен до трех дней.

Сокращены сроки выдачи технических условий на подключение к системе электроснабжения, сроки согласования проектных решений потребителей с энергопередающей организацией, а также сроки заключения договора на электроснабжение.

1) Сокращены сроки выдачи технических условий на подключение к электрическим сетям потребителей с установленной мощностью электроустановок до 200 кВт сокращены с 14 до 5 рабочих дней. пункт 13 Правил пользования электрической энергией, утвержденных приказом Министра энергетики РК от 25 февраля 2015 года №143: Энергопередающая или энергопроизводящая организация после получения заявки от потребителя выдает технические условия на подключение вновь вводимых или реконструируемых электроустановок в следующие сроки: мощностью до 200 килоВатт (далее — кВт) — в течение 5 рабочих дней; мощностью от 200 до 1000 кВт — в течение 10 рабочих дней; мощностью свыше 1000 кВт — в течение 15 рабочих дней.

2) Сроки согласование проектных решений с энергопередающей/снабжающей организацией сокращены с 20 до 3 рабочих дней. пункт 15 Правил пользования электрической энергией, утвержденных приказом Министра энергетики РК от 25 февраля 2015 года №143: Согласование проектных решений электроустановок осуществляется на предмет их соответствия выданным техническим условиям в следующие сроки:

- на электроустановки мощностью до 200 кВт — в течение 3 рабочих дней;
- на электроустановки мощностью от 200 кВт до 1000 кВт — в течение 7 рабочих дней;
- на электроустановки мощностью свыше 1000 кВт — в течение 12 рабочих дней.

3) Исключена необходимость получения разрешения на строительномонтажные работы от управления государственного архитектурно-строительного контроля. Данная процедура переведена на уведомительный порядок. При этом уведомление направляется в электронном виде через центры обслуживания населения или посредством сайта электронного лицензирования [elicense.kz](http://elicense.kz), о начале производства строительномонтажных работ по подключению к сетям энергоснабжения технически несложных объектов, в соответствии с внесенными изменениями, вправе уведомлять проектировщик.

4) Исключена необходимость получения разрешения на подключение к электрическим сетям, которая ранее выдавалась органом по государственному энергетическому надзору и контролю (выдавалось в течение 7 рабочих дней).

5) Сроки заключения договора на поставку электрической энергии сокращены с 7 до 3 рабочих дней. пункт 23 Правил пользования электрической энергией, утвержденных приказом Министра энергетики РК от 25 февраля 2015 года №143: энергопередающая или энергопроизводящая организация осуществляет осмотр внешнего подключения и системы коммерческого учета электроэнергии с заключением о возможности ввода в эксплуатацию — в течение 1 (одного) рабочего дня, последующего после представления

потребителем материалов на подключение электроустановок; энергопоставляющая организация уведомляет энергопередающую (энергопроизводящую) организацию о заключении договора на электроснабжение – в течение 1 (одного) рабочего дня; энергопередающая (энергопроизводящая) организация осуществляет подачу напряжения на электроустановки потребителя – в течение 1 (одного) рабочего дня последующего после подписания договора на электроснабжение.

В рамках Закона от 29 марта 2016 года «О внесении изменений и дополнений в некоторые законодательные акты Республики Казахстан по вопросам сокращения разрешительных документов и упрощения разрешительных процедур» были внесены ряд дополнений в Закон РК от 9 июля 2004 года «Об электроэнергетике» и Кодекс РК об административных правонарушениях, согласно которым энергопередающие организации несут ответственность за превышение показателей надежности электроснабжения, а именно:

Закон РК «Об электроэнергетике»:

1) компетенция уполномоченного органа в области электроэнергетики дополнена разработкой и утверждением нормативных значений показателей надежности электроснабжения, а также порядка их определения (подпункт 47-1) статьи 5);

На основании данной компетенции Министерством энергетики РК утверждены нормативные значения показателей надежности электроснабжения, а также определен порядок, в соответствии с которым энергопередающие организации будут рассчитывать данный показатель. В качестве показателей надежности электроснабжения, используемых для оценки надежности услуг электроснабжения, применяются средний показатель количества отключений на одного потребителя в сети электроснабжения (SAIFI) и показатель средней продолжительности отключений на одного потребителя в сети электроснабжения за один календарный год (SAIDI). SAIDI и SAIFI составляют 0,85 часов и 1,15 отключений соответственно. При этом наблюдается ежегодное улучшение данных показателей. В связи с чем, значение SAIFI менее 1 отключения будет достигнуто за счет технических мероприятий, проводимых на объекте.

2) статья 12 (Права и обязанности участников производства и передачи электрической энергии) дополнена обязанностью энергопередающих организаций о не превышении утвержденных показателей надежности электроснабжения.

Кодекс РК об административных правонарушениях: Дополнен статьей 300-1 предусматривающей ответственность руководителей энергопередающих организаций за превышение утвержденных показателей надежности электроснабжения штрафом в размере 125 МРП.

В целях дальнейшего улучшения условий подключения к системе электроснабжения в соответствии с Приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 8 декабря 2016 года № 521 «О внесении изменения в приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 25 февраля 2015 года №



143 «Об утверждении Правил пользования электрической энергией» (Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 20 января 2017 года № 14710) исключена необходимость прохождения энергетической экспертизы после завершения строительно-монтажных работ. Данная норма вступила в силу 11 февраля текущего года.

Одним из факторов является снижение количества технологических нарушений в стране по сравнению с 2013 годом на 24%. Надежность электроснабжения в РК значительно улучшилась.

В регионах на постоянной основе проводятся круглые столы с участием представителей энергопередающих и энергоснабжающих организаций, национальной палаты предпринимателей Казахстана и потребителей, где осуществляется разъяснение проводимых законодательных реформ.

На постоянной основе проводится опрос потребителей электрической энергии во всех регионах страны. Опросник размещен в открытом доступе на официальном интернет ресурсе Комитета атомного и энергетического надзора и контроля Министерства энергетики РК.

Как отмечают потребители электрической энергии на сегодня отмечается улучшение работы энергопередающих и энергоснабжающих организаций, также улучшения имеются качества поставок электрической энергии.

Стоит отметить, что и в международных рейтингах наша страна оценивается по качеству электроснабжения и по подключению к системе электроснабжения.

Примером, является рейтинг Всемирного банка «DoingBusiness», где по итогам 2016 года Казахстан по показателю подключения к системе электроснабжения занял 75-е место, поднявшись с 102-го, среди 190 стран мира. По данному показателю Казахстан обогнал такие страны СНГ, как Азербайджан – 105-е место, Кыргызстан – 163-е место, Украина – 130-е место. Напомним, что Казахстан в данном рейтинге расположился между Японией и Румынией, опередив такие государства, как Россия, Бельгия и Италия. Также, как отмечают Эксперты Всемирного Банка, Казахстан осуществил наибольшее количество реформ в данной сфере.

#### **1.4 Наличие потенциала возобновляемой энергии**

Развитие возобновляемой энергетики названо одним из приоритетных направлений формирования отраслей «экономики будущего».

По мнению казахстанских экспертов, несмотря на то, что экономика республики высокообеспечена традиционными видами топлива, построение новой энергетической модели – на основе ВИЭ – крайне важно для страны по двум причинам.

Первое – критическая необходимость снижения выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ, основным продуцентом которых является топливно-энергетический комплекс РК, преимущественно работающий за счет сжигания ископаемых видов топлива (угля, нефти и газа).

Второе – нарастающий энергодефицит, способный стать сдерживающим фактором развития экономики республики.

Стоит также отметить, что показатель удельного потребления энергии на единицу ВВП в РК равен 1,9, что в несколько раз превышает данный показатель в развитых странах-членах ОЭСР. Высокая энергоемкость экономики имеет негативные последствия, такие как снижение конкурентоспособности производимых товаров и существенное загрязнение окружающей среды. По данным Министерства охраны окружающей среды Казахстана, республика занимает первое место в мире по объемам выбросов парниковых газов к ВВП (3,38 кг на каждый доллар ВВП).

Являясь участником Рамочной конвенции ООН по изменению климата (с 1995 года) и ратифицировав в 2009 году Киотский протокол к данной конвенции, Казахстан взял на себя обязательства по снижению выбросов парниковых газов. Введение в энергобаланс Казахстана возобновляемых источников энергии представляется одним из эффективных способов снижения вредного воздействия энергетического сектора на окружающую среду и диверсификации генерирующих мощностей.

Несмотря на огромные возможности использования ВИЭ, доля данного сектора в общем объеме вырабатываемой электроэнергии в Казахстане по-прежнему остается небольшой: 12,5% с учетом традиционных крупных ГЭС, притом из них всего 0,5% приходится на нетрадиционные виды ВИЭ. Для сравнения, в Дании и Исландии показатель использования ВИЭ (без учета крупных ГЭС) равен 29%, Португалии и Китае – 18%, Испании – 42,2%, США – 10%, России – 1,5%, а в мировой структуре производства электроэнергии ВИЭ занимают около 19-20%.

В то же время, по оценкам экспертов, технический потенциал альтернативной энергетики Казахстана только по ветру составляет около 1820 млрд. кВтч в год, что многократно превышает существующие потребности. Данный потенциал реализован на 0,05%.

В настоящее время развитие альтернативной энергетики в Казахстане наиболее перспективно в следующих направлениях:

Гидроэнергетика. Мощность существующих ГЭС составляет 2068 МВт с ежегодной выработкой электроэнергии 8,32 млрд. кВтч. Теоретический гидропотенциал составляет около 170 млрд. кВтч, при этом экономически эффективно может вырабатываться (27-30) млрд. кВтч. Большая часть гидроэнергетических ресурсов расположена в Восточном и Юго-Восточном регионах республики.

Особенно актуальны для энергодефицитного Южного региона малые ГЭС (менее 35 МВт), имеющие низкую себестоимость производства и оказывающие незначительную нагрузку на окружающую среду. Наиболее перспективными для гидроэнергетического строительства являются следующие реки региона: Или, Чарын, Чилик, Каратал, Коксу, Тентек, Хоргос, Текес, Талгар, Большая и Малая Алматинки, Усек, Аксу, Лепсы, Ырғайты. Установленные малые ГЭС смогут вырабатывать около 8 млрд. кВтч в год и

способны полностью удовлетворить спрос, покрываемый в настоящее время за счет импорта из стран Центральной Азии.

Ветроэнергетика. Благодаря географическому месторасположению в ветровом поясе северного полушария и наличию сильных воздушных течений, Казахстан обладает обширными возможностями для развития ветроэнергетики. В некоторых районах страны среднегодовая скорость ветра составляет более 6 м/с, что делает привлекательным для развития данной отрасли. По экспертным оценкам, ветроэнергетический потенциал Казахстана составляет 929 млрд. кВтч в год.

На данный момент Министерством инвестиций и развития РК выбраны 10 площадок для строительства ветровых электростанций (ВЭС). Будут использованы для строительства крупных ВЭС общей мощностью до 1000 МВт с целью коммерческого производства электроэнергии в объеме (2-3) млрд. кВтч.

Гелиоэнергетика. В Казахстане имеются благоприятные климатические условия для развития солнечной электроэнергетики. По данным экспертов, количество солнечных часов составляет (2200-3000) в год, энергия солнечного излучения – (1300-1800) кВт на м<sup>2</sup> в год. Наиболее подходящими местами для размещения солнечных электростанций являются Южно-Казахстанская, Кызылординская области и район Приаралья.

Развитие альтернативной энергетики в Казахстане сдерживается высоким уровнем начальных капитальных вложений и долгим сроком окупаемости. Принимая во внимание наличие значительных и относительно недорогих запасов углеводородов, государству необходимо создать условия, при которых инвесторам было выгодно вкладывать деньги в строительство объектов ВИЭ.

Учитывая значительные затраты, необходимые для постройки объектов ВИЭ, а также разработки, покупки и установки необходимого оборудования, следует рассмотреть возможность непосредственного финансирования проектов за счет республиканского и местного бюджета по схеме государственно-частного партнерства.

Инвестиционные риски в этом случае могут быть пропорционально разделены между государством и частным партнером, а ответственность за производственные расходы и непосредственное управление объектом будет осуществляться частной стороной. При таком сотрудничестве государство сможет получить объект с меньшими затратами, при этом сумма инвестиций бизнес-партнера также будет более доступной для поиска. Этот механизм не предусматривает значительного повышения тарифа, потому что частный инвестор должен будет окупить свою вложенную долю, соответственно стоимость энергии будет соразмерно меньше.

Необходимо рассмотреть возможность введения определенных налоговых льгот для банков, поддерживающих «зеленые» технологии. Этот экономический стимул подтолкнет банки к разработке новых видов кредитования, к развитию риск-менеджмента и аналитических служб в области альтернативной энергетики.

## **1.5 Выводы по главе**

1. В условиях, когда себестоимость добычи ископаемых ресурсов постоянно растет, а уровень выбросов вредных веществ остается недопустимо высоким, становлению возобновляемой энергетике в Казахстане необходимо уделять большое внимание. При комплексной государственной поддержке и создании экономических стимулов для инвесторов данный сектор сможет занять прочную позицию в электроэнергетическом балансе Казахстана.

2. Приведены современные тенденции развития возобновляемой энергии в РК, в ближнем и дальнем зарубежье. Определены достоинства и недостатки. Существующих возобновляемых источников энергии

3. Показаны основные проблемы электроснабжения и приведены основные принципы построения схем электроснабжения объектов социальных сфер.

4. В главе дан анализ и приведено основное сравнение электроснабжения гражданских и промышленных объектов и показаны основные пути повышения эффективности электроснабжения социальных объектов.

5. Определено, что возобновляемая энергетика является одним из приоритетных направлений формирования отраслей «экономики будущего».

6. Показана необходимость увеличения парка возобновляемых источников энергии за счет государственного и частного партнерства и возможности рассмотрения финансирования проектов за счет республиканского и местного бюджета.

## **2. Моделирование возобновляемых источников энергии и оценка их ресурсов**

### **2.1 Математическое моделирование возобновляемых источников энергии**

В данной главе проводится выбор системы математических моделей возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для их использования при проведении системных энергетических исследований.

В основе моделирования лежит теория подобия, которая утверждает, что абсолютное подобие может иметь место лишь при замене одного объекта другим. При моделировании абсолютное подобие не имеет места и стремятся к тому, чтобы модель достаточно хорошо отображала исследуемую сторону функционирования объекта. В качестве одного из первых признаков классификации видов моделирования можно выбрать степень полноты модели и разделить модели в соответствии с этим признаком на полные, неполные и приближённые. В основе полного моделирования лежит полное подобие, которое проявляется как во времени, так и в пространстве. Для неполного моделирования характерно неполное подобие модели изучаемому объекту. В основе приближённого моделирования лежит приближённое подобие, при котором некоторые стороны функционирования реального объекта не моделируются совсем [10,11].

Для исследования характеристик процесса функционирования любой системы математическими методами, включая и машинные, должна быть проведена формализация этого процесса, т.е. построена математическая модель.

Под математическим моделированием понимается процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью, и исследование этой модели, позволяющее получать характеристики рассматриваемого реального объекта. Вид математической модели зависит как от природы реального объекта, так и от задач исследования объекта и требуемой достоверности и точности решения этой задачи. Любая математическая модель описывает реальный объект лишь с некоторой степенью приближения к действительности. Математическое моделирование для исследования характеристик процесса функционирования систем можно разделить на аналитическое, имитационное и комбинированное [11,12,13].

Для аналитического моделирования характерно то, что процессы функционирования элементов системы записываются в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, интегрально-дифференциальных, конечно-разностных и т.п.) или логических условий.

Аналитическая модель может быть исследована следующими методами:

- аналитическим, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости для искомых характеристик;

- численным, когда, не имея возможности решить уравнения в общем виде, стремятся получить численные результаты при конкретных начальных данных;

- качественным, когда, не имея решения в явном виде, можно определить некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения).

При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени, причём имитируются элементарные явления, составляющие процесс с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определённые процессы времени, дающие возможность оценить характеристики системы [14]. Метод имитационного моделирования позволяет решать задачи анализа больших систем, включая задачи оценки вариантов структуры системы, эффективности различных алгоритмов управления системой, влияния изменений различных параметров системы. Имитационное моделирование может положено в основу структурного, алгоритмического и параметрического синтеза больших систем, когда требуется создать систему с заданными характеристиками при определённых ограничениях, которая будет являться оптимальной по некоторым критериям оценки эффективности [15].

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование при анализе и синтезе систем позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей проводится предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы, и для тех из них, где это, возможно, используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Комбинированный подход позволяет охватить качественно новые классы систем, которые не могут быть исследованы с использованием только аналитического или имитационного моделирования в отдельности [16,12,17].

Моделирование системы энергоснабжения с ВИЭ представляет собой синтез математических моделей, описывающих процессы поступления энергии от различных источников, преобразования энергии в энергоустановках и потребления энергии нагрузкой. При построении таких моделей в той или иной степени необходимо применять каждый из описанных выше типов математического моделирования.

Оценка комплексного потенциала ВИЭ в исследуемом районе является важным этапом при исследовании возможностей эффективного вовлечения ВИЭ в энергобаланс, позволяющим получить множество возможных вариантов вовлечения. Естественные потоки возобновляемой энергии, как непрерывные физические процессы, могут быть представлены в виде универсальных аналитических моделей с переменными параметрами, зависящими от специфики природных и техногенных условий исследуемой местности. Для количественной оценки потенциала ВИЭ целесообразно производить независимое для каждого источника выделение районов исследуемой мест-

ности с постоянными параметрами моделей (характерных районов по снабжению рассматриваемым видом возобновляемой энергии). Оценка параметров моделей для характерных по снабжению каждым видом ВИЭ районов может производиться на основе существующих для большинства территорий стандартных климатических, метеорологических и других статистических данных и, таким образом, в большинстве случаев не требует проведения специальных натуральных измерений, [15,33].

В главе приведены математические модели некоторых ВИЭ, которые представляются наиболее подходящими для оценки потенциала ВИЭ при исследовании возможностей их эффективного вовлечения в энергобаланс и успешно прошли верификацию для условий конкретного региона.

## 2.2 Моделирование солнечной энергии

В предположении, что орбита Земли является круговой суммарная суточная солнечная радиация (СР), приходящая на горизонтальную плоскость вне атмосферы Земли определяется из соотношения [18]:

$$H'_0 = \left( \frac{t_s G_0}{\pi} \right) \left[ \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta \right], \quad (2.1)$$

где  $G_0$  - солнечная постоянная вне атмосферы ( $1.340 \text{ Вт/м}^2$ );  
 $\varphi$  - географическая широта местности;

$$\delta = \frac{23,45}{180} \text{ тышт} \left[ \frac{284 + n}{365} 2\pi \right] - \text{склонение, } n - \text{номер дня года;}$$

$$t_s = 480 \arccos(\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\delta) - \text{продолжительность дня в секундах;}$$

$$\omega_s = \arccos(\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\delta) - \text{часовой угол на закате в градусах.}$$

Вследствие слабой эллиптичности орбиты реальная внеатмосферная суммарная суточная СР определяется соотношением [19]:

$$H_0 = \left[ 1 + e \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] H'_0 \quad (2.2)$$

где  $e = 0,033$  – эксцентриситет орбиты,  
 $n$  - номер дня года.

Введём индекс ясности  $K_T$ , который представляет собой отношение суммарной суточной СР, пришедшей на горизонтальную площадку на поверхности Земли, к суммарной суточной СР, пришедшей на параллельную площадку вне атмосферы:

$$K_T(n) = \frac{H(n)}{H_0(n)}, \quad (2.3)$$

Тогда доля диффузной радиации определится на основании соотношения [29]:

$$\frac{H_D}{H} = 1,39 - 4,03 \cdot K_T + 5,53 \cdot K_T^2 - 3,11 \cdot K_T^3, \quad (2.4)$$

Суммарная суточная СР, приходящая на поверхность с заданным углом наклона  $\beta$ , определяется из соотношения [29]:

$$H_\beta = H \left[ 1 - \left( \frac{H_D}{H} \right) R + \frac{H_D}{H} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \right], \quad (2.5)$$

где  $\rho$  - альbedo местности;

$$R = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta}. \quad (2.5)$$

Из приведённых выше соотношений следует, что необходимыми входными данными для построения модели являются географическая широта района моделирования  $\varphi$ ; статистические данные измерений дневных сумм полной  $H$  (МДж/м<sup>2</sup>) солнечной радиации, поступившей на горизонтальную поверхность, и отражённой  $H_R$  (МДж/м<sup>2</sup>) солнечной радиации; угол наклона воспринимающей поверхности  $\beta$ . Выходными параметрами модели являются дневные суммы солнечной радиации, поступившей на поверхность заданной ориентации.

Исходной информацией для верификации модели являлись данные, полученные на метеостанции Рудненского индустриального института (г. Рудный, Костанайская область) ( $\varphi = 45^\circ$  с.ш.) за 2016 год. Результаты верификации приводятся на рисунке 2.1.

В соответствии с проведённой верификацией модели величина относительной ошибки за год составляет около 4 %. Это является приемлемой точностью для данного исследования, что позволяет сделать вывод о применимости в данной работе описанной модели расчёта суточных сумм солнечной радиации на поверхность заданной ориентации для моделирования поступления и потенциала солнечной энергии в исследуемом районе.



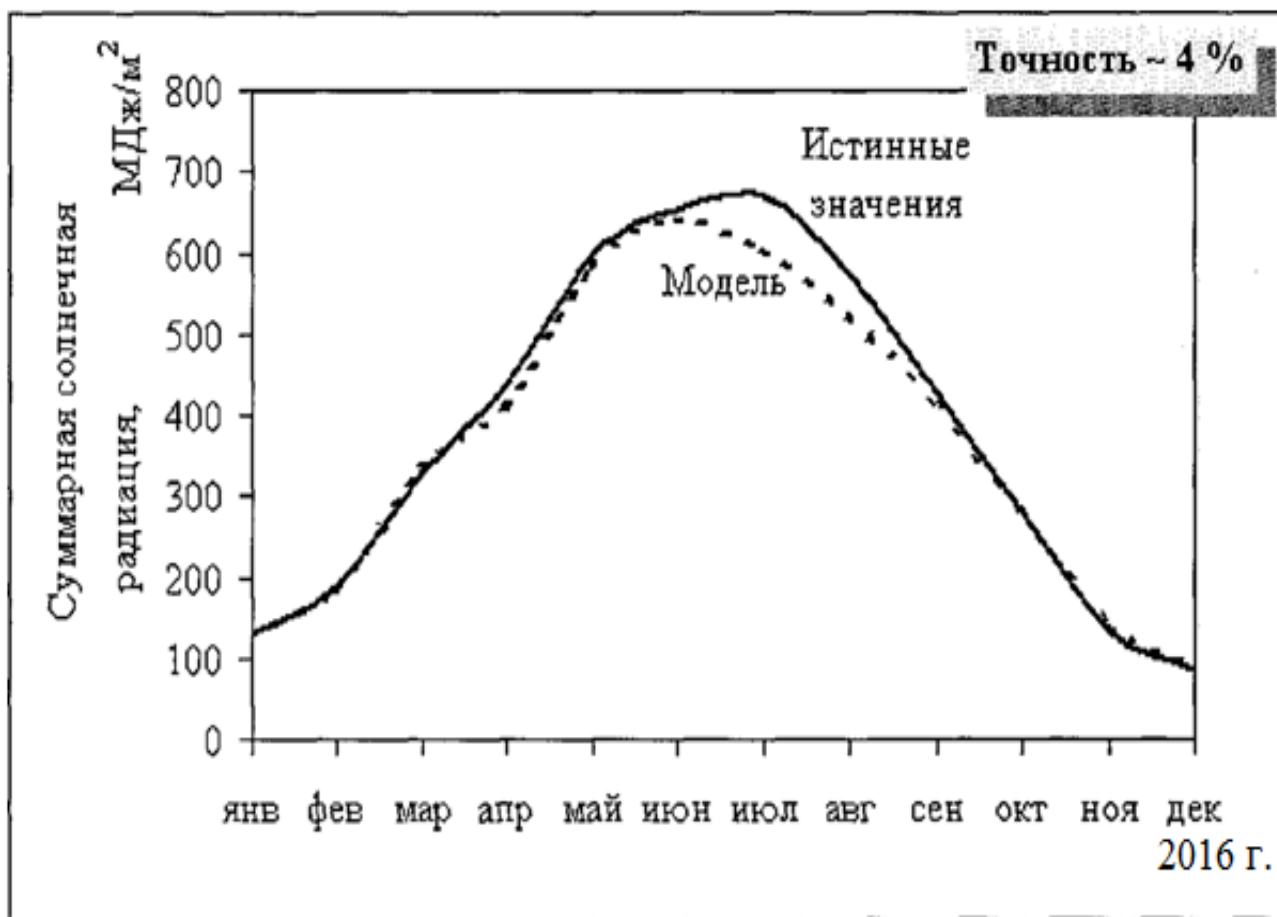


Рисунок 2.1 – Оценка модели по среднемесячным значениям суммарной солнечной радиации г. Рудного

### 2.3 Моделирование энергии ветра

Для предварительных оценок ветровых ресурсов предлагается ввести районирование исследуемой местности по классам ветровой активности от первого до седьмого. Каждый класс представляет собой диапазон величин среднегодовой скорости ветра на определённой высоте (таблица 2.1) [20]. В такой терминологии районы четвёртого и высших классов являются благоприятными для установки современных промышленных ВЭУ, районы третьего класса, возможно, подойдут для установки ВЭУ следующего поколения, районы первого и второго классов не подходят для установки ВЭУ [21].

Определение вертикального профиля скорости ветра в диапазоне высот 5 - 50 м можно производить, используя экспоненциальный закон Хелма-на, в соответствии с которым скорость ветра на заданной высоте определяется по формуле [51]:

$$V_{H_2} = V_{H_1} \cdot \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^b, \quad (2.6)$$

где  $H_1$  - высота, для которой произведена обработка статистики (как правило 10 м);

$H_2$  - заданная высота;

$b$ - показатель, характеризующий вертикальный профиль и рельеф поверхности ( $b = 0.14-0.30$ ).

Таблица 2.1– Классы ветровой активности

Класс	1	2	3	4	5	6	7
Высота, м	Скорость ветрового потока, м/с						
10	<4.4	4.4-5.1	5.1-5.6	5.6-6.0	6.0-6.4	6.4-7.0	>7.0
30	<5.1	5.1-5.9	5.9-6.5	6.5-7.0	7.0-7.4	7.4-8.2	>8.2
50	<5.6	5.6-6.4	6.4-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.8	>8.8

Площади внутри выделенных районов с высоким потенциалом ветровой энергии, на которых возможна установка ВЭУ, определяются на основе рельефа местности и экологических ограничений и составляют от 90% для относительно плоских территорий до 5% для гористой местности. Оценки площадей, исключаемых из рассмотрения, производятся для различных типов земель: лесных, сельскохозяйственных, городских и т.д. К экологическим ограничениям относятся государственные земли (включая парки, памятники, заповедные и другие охраняемые государством территории), где установка ВЭУ будет запрещена или строго ограничена. Дополнительные ограничения должны учитывать автомагистрали, частные земли и т.п. [20].

Для расчёта количества энергии, вырабатываемой ВЭУ, предлагается использовать следующую методику [19]. Энергией, переданной ветровым потоком ВЭУ, является энергия на валу ветроколеса. Пусть  $E$  - энергия потока, переданная ветроколесу за время  $T$  (как правило, в расчётах используется  $T=24$  часа), а  $E_U$  - часть этой энергии, переданной ветровым потоком со скоростью  $u$  в единичном скоростном интервале.

Тогда

$$E = \int_{u=0}^{\infty} E_u du = \int_{u=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{2} \rho A u^3 C_p \Phi_u T \right] du, \quad (2.7)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха;  $A$  - площадь, ометаемая ветроколесом;  
 $C_p$  - параметр, характеризующий эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока и называемый коэффициентом мощности (для идеальной ВЭУ  $C_p = C_{pmax} = 0.59$ );  
 $\Phi_u$  — функция распределения вероятности скорости ветра.

При обработке экспериментальных данных для моделирования суточного поступления ветровой энергии хорошее согласие с фактическим распределением вероятности скорости ветра аналитическое распределение Вейбулла:

$$\Phi_u = \frac{k}{c} \left( \frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{u}{c} \right)^k \right], \quad (2.8)$$

где  $k$  – параметр рассеяния ( $k = 1.6 \div 3.0$ )

$c$  - параметр положения (как правило  $c \approx \frac{2\bar{u}}{\sqrt{\pi}}$ )

Если плотность воздуха считать постоянной, то для вычисления интеграла (2.7) необходимо знать только зависимость коэффициента  $C_p$  от скорости набегающего потока воздуха. Для этого разобьем весь скоростной диапазон на четыре характерных участка, определив скорость ветра  $u_{min}$ , при которой ВЭУ включается; скорость  $u_{nom}$ , при которой ВЭУ достигает номинальной мощности; и скорость  $u_{max}$ , при превышении которой ВЭУ отключается. Тогда для  $E_U$  получим выражение:

$$E_u = \begin{cases} 0, & \text{при } U < U_{min} \\ (a'u^3 + b'u^2 + c'u + d'P_{nom}) \Phi_{U_{min} < U < U_{nom}} T, & \text{при } U_{min} \leq U < U_{nom} \\ P_{nom} \Phi_{U_{min} < U < U_{nom}} T, & \text{при } U_{nom} \leq U < U_{max} \\ 0, & \text{при } U \geq U_{max} \end{cases}, \quad (2.9)$$

где  $P_{nom}$  - номинальная (проектная) мощность ВЭУ;  $a', b', c', d'$  - параметры, зависящие от технических характеристик ВЭУ.

Из приведённых соотношений (2.6)-(2.9) следует, что необходимыми входными данными для построения модели являются среднесуточные значения скорости ветра  $\bar{v}$  (м/с) на известной высоте  $H_0$  (м), показатель  $b$ , характеризующий рельеф поверхности, среднегодовое значение плотности воздуха  $\rho_{cp}$  (кг/м<sup>3</sup>), характерной для исследуемого района, и параметры различных ВЭУ. Выходными параметрами модели являются суточные суммы ветровой энергии, которая может быть преобразована ВЭУ каждого типа в полезную работу, и значения безразмерных параметров  $c$  и  $k$  распределения Вейбулла. Результаты верификации модели приведен на рисунке 2.2.

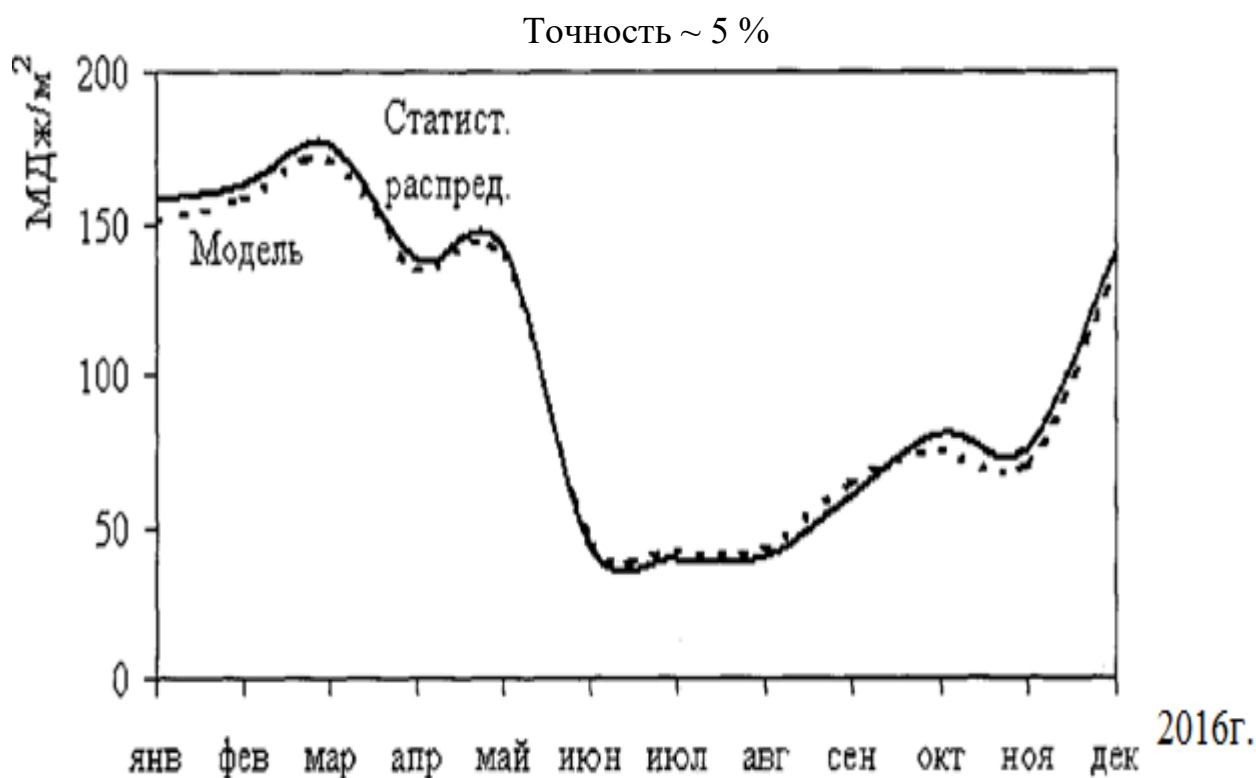


Рисунок 2.2 – Верификация модели ветровой активности для условий г. Рудный

Верификация модели поступления ветровой энергии проводилась по данным, полученным на метеостанции установленной на территории Рудненского индустриального института за 2016 г., путём сравнения суточных сумм ветровой энергии, вычисленных с помощью выражения (2.7), полагая  $\rho_{cp}=1,225$  кг/м<sup>3</sup>,  $A=1$  м<sup>2</sup>,  $Cp=Cp_{max}=0.59$ , с среднесуточной энергией, вычисляемой из выражения:

$$E_N = \frac{A\rho_N C_{P\max}}{2} \sum_{i=1}^{144} u_i^3 t_i = \frac{A\rho_N C_{P\max}}{2} \frac{\mu_a}{R} \frac{P_N}{(273 + \tau_N)} \sum_{i=1}^{144} u_i^3 t_i, \quad (2.10)$$

где  $u_i$  – средняя скорость ветра в течение  $i$ -го десятиминутного интервала  $t_i$  суток  $N$ ;

$\mu_a$  – молярная масса воздуха;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$P_N, \tau_N$  – среднесуточные значения атмосферного давления (па) и температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) для суток  $N$ .

В соответствии с проведённой верификацией модели величина относительной ошибки за год составляет около 5%. Это является приемлемой точностью для данного исследования, что позволяет сделать вывод о применимости в данной работе описанной модели расчёта суточных сумм ветровой энергии для моделирования поступления и потенциала энергии ветра в исследуемом районе.

## 2.4 Моделирование энергии биомассы

Основа биомассы - органические соединения углерода, которые в процессе соединения с кислородом при сгорании или в результате естественного метаболизма выделяют тепло. Посредством химических или биохимических процессов биомасса может быть трансформирована в такие виды топлива, как газообразный метан, жидкий метанол, твёрдый древесный уголь. Возможные варианты переработки биомассы показаны на рисунке 2.5 [22].

При моделировании поступления и потенциала энергии для биомассы необходимо учитывать возможности получения топлива (энергии) в качестве основного или дополнительного продукта сельскохозяйственного производства (включая аквакультуры), лесоводства, а также тех видов промышленной и бытовой деятельности, в результате которых образуются органические отходы. В таблице 2.2 приведены некоторые источники биомассы и примеры её переработки [22].

Таблица 2.2 – Источник биомассы и ее переработка

Источник биомассы или топлива	Производимое биотопливо	Технология преобразования	Примерный КПД преобразования, %	Приближённый энергетический выход, МДж/кг
Лесоразработки	(тепло)	Сжигание	70	16 - 20
Отходы переработки древесины	(тепло)	Сжигание	70	16 - 20
Зерновые	Солома	Сжигание	70	14 - 16 (сух. материал)
Сахарный тростник, сок	Этанол	Сбраживание	80	3 - 6
Сахарный тростник, отходы	Жмых	Сжигание	65	5 - 8
Навоз (тропики)	Метан	Анаэробное разложение	50	3 - 8 (сух. материал)
Навоз (умеренный климат)	Метан	Анаэробное разложение	50	2 - 4 (сух. материал)
Городские стоки	Метан	Анаэробное разложение	50	2 - 4 (сух. материал)
Мусор	(тепло)	Сжигание	50	5 - 16 (сух. материал)

Наиболее эффективным способом получения энергии, используя отходы животноводства, является производство биогаза - основного продукта метанового сбраживания животноводческих стоков. Ожидаемый выход тепловой энергии для биоэнергетической установки (без учёта расхода энергии на собственные нужды БЭУ) определяется соотношением [22]:

$$E = \eta \cdot H_g \cdot V_g, \quad (2.11)$$

где  $\eta$  - КПД горелочного устройства;

$H_g$  - удельная объёмная теплота сгорания биогаза;

$V_g$  - объём получаемого биогаза.

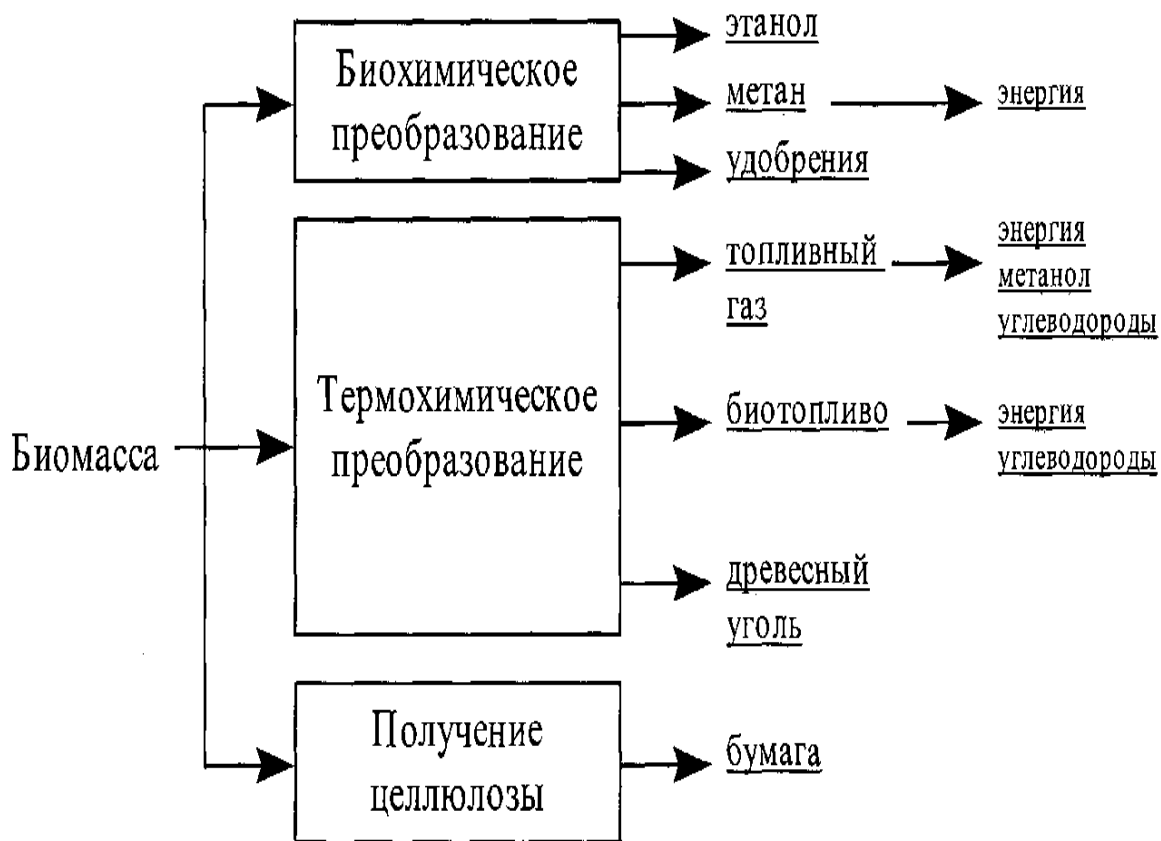


Рисунок 2.5 – Основные процессы переработки биомассы

Соотношение (2.13) для чистого метана, входящего в биогаз, имеет вид:

$$E = \eta \cdot H_M \cdot f_M \cdot V_g, \quad (2.12)$$

где  $H_M$  - удельная объёмная теплота сгорания метана (28 МДж/м при нормальных условиях);

$f_M$  - доля метана в биогазе, определяющая энергетический эквивалент биогаза (находится в пределах 0.5 - 0.7).

Объём биогаза определяется из соотношения:

$$V_B = c m_D, \quad (2.13)$$

где  $c$  - выход биогаза из сухой биомассы (0.2-0.4 м<sup>3</sup> /кг);

$m_D$  - масса сухого сбраживаемого материала.

Расход тепловой энергии на собственные нужды БЭУ определяется принятой технологией сбраживания и климатическими условиями её экс-

плуатации. Согласно [22] при мезофильном режиме работы (сбраживание при температуре около 30°C) эта величина составляет 25% от общего теплового эквивалента получаемого биогаза, при термофильном режиме (сбраживание при температуре около 55°C) - 75 %.

Из соотношений (2.11)-(2.13) следует, что исходными данными для моделирования энергетического потенциала являются величины  $f_m$ ,  $c$ ,  $m_D$ , режим работы энергоустановки. Существует несколько подходов определения выхода навоза на животноводческом объекте:

- по сухой массе кормов с учётом их перевариваемости и потерь;
- по суточным нормам выхода экскрементов с учётом различных половозрастных групп среднегодового поголовья;
- только по величине сухой массы кормов.

Наиболее полно эти методики изложены в [12].

При прямом сжигании биомассы её энергетический потенциал определяется выражением:

$$E = \lambda M_0 = \lambda M \frac{100 - OV}{100}, \quad (2.14)$$

где  $\lambda$  - удельная теплота сгорания сухого вещества;

$M$ ,  $OV$  - масса и процентное содержание воды в биомассе;

С помощью выражения (2.14) оценивается энергетический потенциал таких видов биомассы как твёрдые городские отходы, растительные остатки сельскохозяйственных культур, отходы лесозаготовок и лесоперерабатывающей промышленности, а также потенциал хозяйств по выращиванию биомассы в энергетических целях, возможность организации которых определяется наличием в исследуемом районе необходимых свободных площадей и урожайностью соответствующих энергетических культур. Типичным примером такого хозяйства является, например, лесоводческое энергетическое хозяйство (ЛЭХ) [22].

При этом поступление биотоплива по месяцам предполагается равномерным, так как флуктуации поступления твёрдых городских отходов, промышленных отходов и животноводческих стоков являются незначительными, остальные биотоплива собираются раз в год и характеризуются возможностью их накопления.

Результаты расчётов хорошо согласуются с данными, полученными в работе [100] при моделировании потенциала биомассы для аналогичных по климатическим условиям, составу почв, преобладающим породам деревьев, среднегодовому количеству осадков и структуре сельскохозяйственного производства, что позволяет сделать вывод о применимости использованной модели для оценки поступления и потенциала энергии биомассы в исследуемом районе.



## 2.5 Выводы по главе

По итогам проведенных исследований в главе представлены следующие выводы:

1. Рассмотренные модели позволяют оценивать поступление и потенциал ВИЭ в исследуемом районе для различных промежутков времени (сутки, неделя, месяц, год и т.д.).

2. В главе показано моделирование на основе солнечной и ветровой энергии, а также проведены экспериментальные исследования на территории Рудненского индустриального института, г. Рудного.

3. Модели являются инвариантными относительно размера района моделирования: оценка поступления и потенциала энергии каждого источника производится на основе вводимого характерного для этого источника районирования исследуемой местности, для которого, размер не превышает 250 км, независимо от других источников. Комплексный потенциал ВИЭ является аддитивной величиной, которую можно оценить для исследуемого района в целом, для любой его части.

4. Моделирование производится на основе существующих для большинства районов планеты климатических, актинометрических, метеорологических, геологических и других статистических данных.

5. Проведённая верификация моделей на примере региона показала достаточную точность 10-20% и адекватность для решения задач и достижения цели данного исследования. Рассмотренные модели могут быть использованы как основа методики оценки эффективности размещения объектов нетрадиционной энергетики в исследуемом регионе.

### **3. Методология оптимизации вариантов комплексного использования возобновляемых источников энергии**

#### **3.1 Свойство недостаточной определённости исходной информации при оптимизации энергетических систем**

Большие производственные системы, системы энергетики, являются открытыми в своих внешних материальных и информационных связях с окружающей средой (системами высшего, равного и низшего иерархического уровня). Из факта «открытости» таких систем следуют важные выводы. Одним является то, что информация, характеризующая состояние больших систем энергетики и особенно в относительно удалённом будущем, является неполной [23,17,64].

Неполнота информации о будущем состоянии естественно обуславливает наличие свойства недостаточной определённости оптимальных решений о ее движении, проявленного тем в большей мере, чем удаленнее рассматриваемое будущее.

Для системных исследований в энергетике важно правильное понимание характера информации. При этом становится все более ясной недостаточность разделения информации на детерминированную и вероятностную [23-27]. Сделанный в свое время шаг к созданию вероятностной теории информации был прогрессивным. Вероятностная теория информации исходит из некоторых существенных ограничений. Первое заключается в утверждении, что всякое сообщение (информация) уменьшает неопределенность, т.е. что информация выступает как определенность. Второе ограничение заключается в том, что под неопределенностью понимается характеристика множества сообщений и из них в процессе обработки производится выбор. Теория вероятности рассматривает лишь количественную характеристику информации, игнорируя ее содержание. Следовательно, процесс выбора из большого множества элементов производится чисто формальным путем; при различной ценности информации этот путь далеко не всегда может дать содержательное решение.

Информацию о системах энергетики, целесообразно разделить на три основных вида [23]:

1. Детерминированная, однозначно характеризует ту или иную часть элементов и связей системы. К ней можно отнести и информацию, называемую условно детерминированной. К подобной информации относится та, которая, строго говоря, не может быть определена точно из-за некоторых сравнительно небольших изменений в зависимости от условий работы, изменчивости во времени, погрешности измерений и т. д. Практически для данной задачи можно принимать однозначной или в интервалах допустимой погрешности. К условно детерминированной возможно, при оперативном управлении системой относить сведения о ряде параметров режима (сопротивления линий электропередач, характеристики напряжения в некоторых узлах системы и др.).

2. Вероятностная, которая рассматривается как объективная, характеризующая массовые случайные события (явления), повторяющиеся

множественно в неизменных условиях. Для таких событий может быть получена представительная статистика. Такие события, явления - обладают статистической устойчивостью с целью определения их вероятностных характеристик. Получено наилучшее решение «в среднем» на основе использования в качестве критерия оптимальности математического ожидания целевой функции.

Вероятностной характеристикой обладают достаточно изученные процессы (события) и те, для которых целенаправленные управляющие действия человека не имеют решающего значения. К ним относятся неуправляемые геофизические процессы, изменения водности рек, речного стока, температур наружного воздуха, солнечной радиации, массовые и в определенной мере стихийно складывающиеся действия людей, приводящие к широкому спектру изменений - от демографических сдвигов до колебаний электрической нагрузки в зависимости от числа включенных телевизоров. Только для процессов (событий), имеющих устойчивый стационарный характер, продуктивна по своему существу экстраполяция вероятностных характеристик на будущее. Такая экстраполяция почти всегда не может быть строго определенной и однозначной.

3. Недостаточно определенная или собственно неполная информация, существование которой определяется в основном недостаточностью или недостоверностью знаний и сведений о будущих условиях развития или функционирования системы, которые могут повлиять на принятие обоснованных решений. Такая информация, не являясь детерминированной, не обладает вероятностной характеристикой и статистической устойчивостью, а поэтому не может изучаться методами, рекомендуемыми теорией вероятности.

Используемые ныне на практике детерминированные оптимизационные расчеты за последние годы существенно усовершенствованы с помощью формализованных математических методов и ЭВМ. Это позволило перейти к выбору оптимальной структуры систем как сложного объекта взамен примитивного изолированного сравнения их отдельных элементов и осуществлять ввиду резкого сокращения трудоемкости многовариантные расчеты, изменяя по усмотрению разработчика те или иные задаваемые исходные данные [28].

В настоящее время становится очевидным, что преобладающие детерминированные оптимизационные расчеты все больше приходят в противоречие с реальной действительностью [34,26,29]. Практически многие решения, включая плановые, оптимальны лишь при тех условиях, применительно к которым они найдены; при изменившихся условиях данное решение может оказаться неоптимальным. Однако в момент принятия решения о будущем развитии, а в определенной мере и о функционировании системы, нельзя с полной достоверностью знать, сохранятся ли на рассматриваемый период времени те условия, применительно к которым оно выбрано; такая достоверность будет тем меньше, чем продолжительнее изучаемый период времени.

Недостатки детерминированных оптимизационных расчетов определяют целесообразность перехода к новой системе оптимизационных расчетов,

использующих неполную информацию, позволяющих получить и исследовать множество оптимальных решений. Расчёты имеют следующие главные преимущества [23]:

- Возможность выбора наилучших, в том числе наиболее гибких, решений из числа недостаточно определённых.

- Обоснованное проведение многовариантных расчётов на основе формирования наиболее реально возможных представительных условий развития и функционирования систем.

- Наибольшее приближение формализованных методов расчёта к реальным условиям движения системы.

- Создание обоснованного подхода к своевременности принимаемых решений.

- Создание методической базы для перехода к непрерывным процессам планирования, проектирования и управления системами энергетики.

В настоящее время для решения оптимизационных задач при неполной информации в основном используются развивающиеся математические методы интервального анализа, теории нечётких множеств, методы теории игр, методы теории полезности и другие. Применение некоторых элементов этих методов для решения задачи определения эффективных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс рассматривается ниже.

### **3.2 Общая схема комплексного использования возобновляемых источников энергии в энергетических системах**

Основная цель любой системы энергоснабжения - удовлетворение спроса потребителей на энергию при минимальной потребности в ресурсах и наименьшем суммарном ущербе в течение определённого периода времени [12]. Поэтому совершенная энергетическая система должна наиболее полно учитывать особенности процессов производства и потребления энергии. Несогласованные процессы производства и потребления энергии часто приводят к её неэкономному расходованию и потерям. Однако следует учитывать, что спрос на энергию никогда не колеблется точно так же, как её производство отдельной энергоустановкой по преобразованию ВИЭ. Для согласования спроса и предложения энергоустановки по преобразованию ВИЭ необходимо объединять в единую систему, которая в свою очередь может включаться в более крупную и универсальную по составу источников энергетическую систему. Использование накопителей энергии в таких системах позволяет существенно повысить их эффективность и увеличить в них долю установок по преобразованию ВИЭ. Таким образом, исследование возможностей вовлечения ВИЭ в энергобаланс необходимо производить на основе комплексного подхода к применению преобразователей ВИЭ с учётом структуры энергопотребления и возможностей эффективного использования накопителей энергии на различных этапах её преобразования.

Общая схема комплексного использования ВИЭ и возможные процессы преобразования энергии показаны на рисунке 3.1. На основе данной схемы предлагается проводить идентификацию возможных вариантов вовлечения ВИЭ в региональные энергосистемы. Этому должны предшествовать следующие предварительные этапы исследования:

- Определение района исследования.
- Моделирование поступления и потенциала ВИЭ для выбранного района.
- Оценка эффективности комплексного использования технологий преобразования ВИЭ в исследуемом районе.

Район, представляющий интерес, обычно совпадает с административной единицей, такой как область или край, либо с территорией, обслуживаемой энергетической компанией или её подразделением, либо с географической областью, например бассейном определённой реки [19].

При оценке эффективности комплексного использования технологий преобразования ВИЭ следует учитывать следующие факторы [30]:

- потребители должны получать энергию в нужной форме и необходимых количествах;
- для повышения эффективности системы энергоснабжения необходимо минимизировать количество стадий преобразования энергии между источником и потребителем, так как каждый дополнительный этап преобразования приводит к потерям энергии, необходимости установки дополнительного оборудования, и, как следствие, к повышению стоимости и снижению КПД и надёжности системы.

Таким образом, множество возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс исследуемого района, построенное на основе общей схемы комплексного использования ВИЭ с учётом потенциала ВИЭ и эффективности комплексного использования технологий преобразования ВИЭ, будет ограниченным и не пустым (за исключением предельных случаев когда, например, потенциал всех ВИЭ близок к нулю или нет потребителей энергии). Это множество будет содержать искомые эффективные варианты и учитывать все существующие возможности комбинирования ВИЭ.

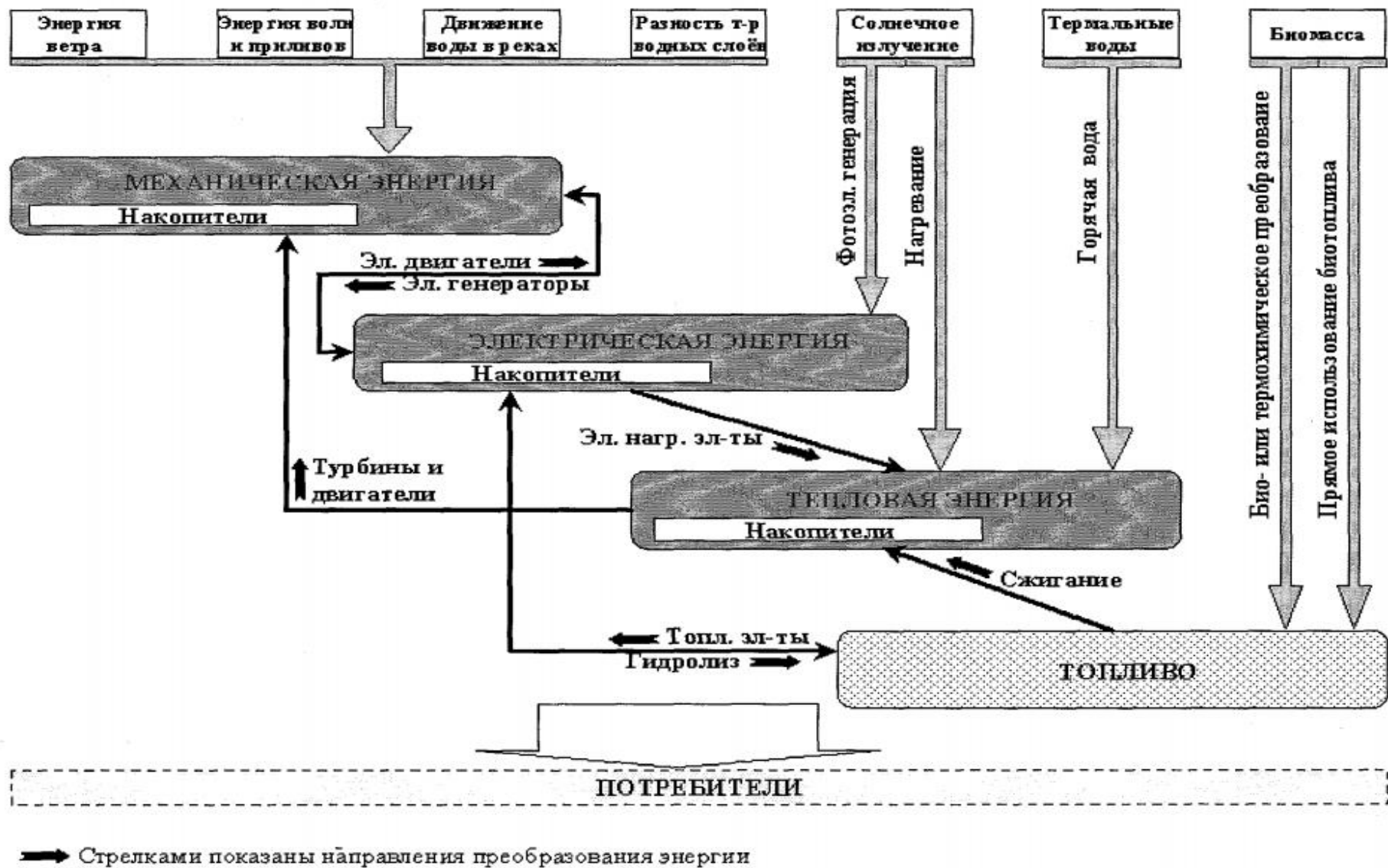


Рисунок 3.1 – Процессы преобразования энергии при комплексном использовании ВИЭ

### **3.3 Критерии эффективности использования возобновляемых источников энергии**

#### **3.3.1 Иерархия целей системы энергоснабжения с возобновляемыми источниками энергии**

Одним из компонентов системного подхода в энергетике является иерархическое представление энергетических систем. Поэтому наиболее эффективным способом структуризации целей, преследуемых при включении ВИЭ в энергетические системы, является построение иерархии целей [31]. Иерархия целей начинается с самых общих главных целей, находящихся на высших уровнях, и заканчивается более узкими на низших. Построение иерархии целей имеет следующие преимущества:

- верхние уровни иерархии целей стандартны для большинства исследований по оптимизации систем энергоснабжения, в основе лежат общие требования к энергосистемам;
- иерархия целей помогает обеспечить отсутствие «пробелов», которые могут иметь место на нижних уровнях;
- главные цели являются основой для установления целей более низкого уровня, поскольку выполнение последних является условием достижения целей более высокого уровня;
- на нижних уровнях располагаются более конкретные цели и легче подобрать подходящие критерии;
- выявляются ситуации, в которых может иметь место дублирование расчётов;
- критерии эффективности могут формулироваться только для целей, находящихся на нижних уровнях каждой ветви иерархии целей;
- иерархия является основой для формулировки и оценки критериев эффективности.

Иерархия целей для оценки эффективности возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс строится на основе полной иерархии целей системы энергоснабжения с ВИЭ (рисунок 3.2) [13]. Иерархия целей позволяет приспособлять требования общих целей к конкретным проблемам. Это обеспечивает необходимую основу для установления критериев эффективности. С другой стороны, в ходе отбора может выясниться, что некоторые из целей не являются необходимыми, поскольку возможные варианты равнозначны по этим целям. Причины, на основании которых возможные цели включаются в исследование и исключаются из него, подробно рассмотрены в работах [31,33-35,37].

Рассмотрим цели из предложенной на рисунке 3.2 полной иерархии целей для энергосистем с ВИЭ, которые необходимо учитывать при решении задачи определения эффективных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс, и подходы к выбору соответствующих им критериям.

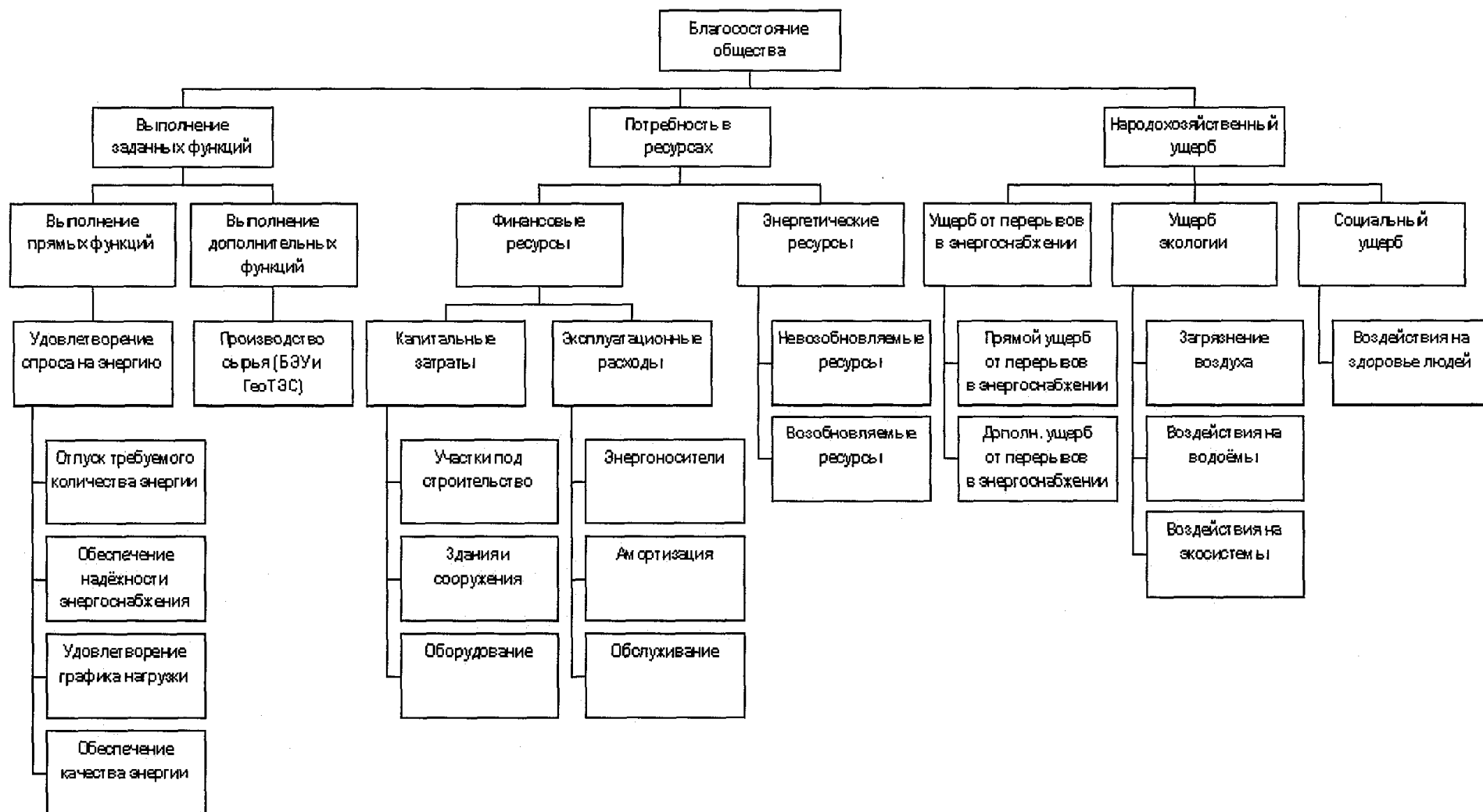


Рисунок 3.2 - Иерархия целей системы энергоснабжения с ВИЭ



### 3.3.2 Выполнение заданных функций

При исследовании вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс предполагается, что энергетическая система вне зависимости от доли ВИЭ в общем производстве энергии должна быть способна производить требуемое количество и качество энергии, удовлетворяя ежедневный график нагрузки [12,30]. Эти требования, предъявляемые к преобразователям ВИЭ, будут определять их мощность, необходимость использования и ёмкость накопителей энергии, качество оборудования и т.д., т.е. иметь непосредственное влияние на потребность в финансовых ресурсах.

Положительный дополнительный эффект от использования биоэнергетических установок и паро-гидротермальных систем теплоснабжения также влияет на потребность в финансовых ресурсах.

Исходной информацией для определения показателей надёжности энергоснабжения являются натуральные показатели надёжности отдельных элементов этих систем - интенсивность отказов  $\lambda$  и продолжительность восстановления  $T$  [36,37]. По своему характеру информация о натуральных показателях надёжности энергоснабжения может быть отнесена к категории вероятностно-неполной, заданной интервальным промежутком «от-до». Поскольку законы распределения показателей в этих интервалах неизвестны, для дальнейших рассуждений целесообразно  $\lambda$  и  $T$  рассматривать как непрерывные случайные элементы, равномерно распределённые в диапазонах  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  и  $[T_{\min}, T_{\max}]$ .

Допущение, основанно на принципе максимума энтропии, обеспечивает наименьший произвол в вероятностном описании рассматриваемых величин [36]. Тогда параметры распределений определяются из соотношений:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}, \quad \sigma_{\lambda} = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2\sqrt{3}}, \quad k_{\lambda} = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}, \quad v_{\lambda} = \frac{\sigma_{\lambda}}{\lambda}, \quad (3.1)$$

$$\bar{T} = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}, \quad \sigma_T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2\sqrt{3}}, \quad k_T = \frac{T_{\max}}{T_{\min}}, \quad v_T = \frac{\sigma_T}{T}, \quad (3.2)$$

Значения натуральных показателей надёжности обладают большой дисперсией. В работе [36] показано, что в некоторых случаях величины  $k_{\lambda}$  и  $k_T$  достигают нескольких десятков. Вопрос о том, насколько сильно влияют эти дисперсии на расчётные показатели надёжности систем энергоснабжения, представляется чрезвычайно существенным.

В большинстве случаев сравнение надёжности систем энергоснабжения может быть сведено к сравнению коэффициентов готовности этих систем. Коэффициент готовности каждого элемента системы определяется выражением:

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{1 + \lambda T} . \quad (3.3)$$

Учитывая, что  $\lambda$  и  $T$  являются случайными переменными, средние значения и дисперсии которых известны, можно определить для каждого элемента математическое ожидание и дисперсию коэффициента готовности:

$$\bar{K}_{\Gamma} = \frac{1}{1 + \bar{\lambda}\bar{T}} \left\{ 1 + \frac{1}{(1 + \bar{\lambda}\bar{T})^2} \left[ (\sigma_T \bar{\lambda})^2 + (\sigma_T \bar{T})^2 \right] \right\} , \quad (3.4)$$

$$\sigma_{K_{\Gamma}}^2 = \frac{(\sigma_T \bar{\lambda})^2 + (\sigma_T \bar{T})^2}{(1 + \bar{\lambda}\bar{T})^4} , \quad (3.5)$$

Анализ значений  $\bar{K}_{\Gamma}$ ,  $\sigma_{K_{\Gamma}}^2$  и  $k_{K_{\Gamma}} = K_{\Gamma\max}/K_{\Gamma\min}$  для различных видов оборудования наиболее полно представлен в работе [36]. Значения  $\sigma_{K_{\Gamma}}^2$  оказались весьма малыми, а величины  $k_{K_{\Gamma}}$  близкими к единице. В большинстве случаев наибольшая погрешность в вычислениях коэффициента готовности по средним значениям  $\lambda$  и  $T$  существенно меньше 1%. Это является свидетельством устойчивости коэффициента готовности как показателя надёжности отдельного элемента схемы; дисперсия параметров  $\lambda$  и  $T$  не оказывает существенного влияния на коэффициент готовности.

Чтобы оценить влияние на величину погрешности коэффициента готовности схемы числа параллельных цепей в ней и количества последовательных элементов в каждой цепи, можно рассмотреть схему, состоящую из  $m$  параллельных цепей, каждая из которых содержит  $n$  одинаковых элементов, характеризующихся коэффициентом готовности  $\bar{K}_{\Gamma}$  и дисперсией значений этого показателя  $\sigma_{K_{\Gamma}}^2$ . Тогда

$$\bar{K}_{\Gamma\text{сх}} = 1 - (1 - \bar{K}_{\Gamma}^n)^m ; \quad (3.6)$$

$$\sigma_{K_{\Gamma\text{сх}}}^2 = \left[ mn(1 - \bar{K}_{\Gamma}^n)^{m-1} \bar{K}_{\Gamma}^{n-1} \right]^2 \sigma_{K_{\Gamma}}^2 ; \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{K_{\Gamma\text{сх}}}^2 = 300 \frac{mn(1 - \bar{K}_{\Gamma}^n)^{m-1} \bar{K}_{\Gamma}^{n-1}}{1 - (1 - \bar{K}_{\Gamma}^n)^m} v_{K_{\Gamma}} . \quad (3.8)$$

Погрешность  $\varepsilon_{K_{\Gamma\text{сх}}}$  при  $v_{K_{\Gamma}} = \max\{v_{K_{\Gamma}}\} = 3.726 \cdot 10^{-4}$  по данным [36] достигает 5% в случае, если  $n$  достигает 45 элементов. Для большинства элементов

имеет существенно меньшее значение, то погрешность будет лежать в допустимых пределах и при  $n$ , значительно превышающем 45.

Сравнение и анализ выражения (3.9) при различных значениях  $m$  и  $n$  показывает, что при одном и том же  $n$ , погрешность уменьшается с увеличением  $m$ .

Вывод: При определении остальных показателей необходимо рассматривать как функции многих случайных переменных, т.е. следует определять диапазон их возможных значений с необходимой доверительной вероятностью. Анализ надёжности систем энергоснабжения, основанный на применении детерминированных значений натуральных показателей надёжности нельзя считать адекватным [36,63].

### 3.3.3 Потребность в финансовых ресурсах

Для определения потребности в финансовых ресурсах при исследовании вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс необходимо оценить капитальные затраты (участки под строительство, здания и сооружения, оборудование) и суммарные эксплуатационные расходы (энергоносители, амортизация, обслуживание). Однако точное определение этих величин затруднено по следующим причинам [31]:

- Существует множество факторов, влияющих на неопределённость затрат и не зависящих от исследователя.

- Стоимость денег изменяется с течением времени.

Неопределённость в оценках экономических воздействий является следствием многих причин, причём некоторые из них имеют естественный характер. На строительные затраты могут значительно повлиять геологические условия на строительных площадках. Природные явления, как оползень или землетрясение, могут вызвать задержку строительства, повреждение оборудования или привести к остановке строительства. Другие неопределённости могут быть вызваны деятельностью человека. Такие факторы как возможные судебные решения, задержки в лицензировании, изменения в налоговом законодательстве могут сильно влиять на стоимость энергетических объектов и себестоимость энергии. Эти обстоятельства должны учитываться при оценке экономических воздействий.

Из-за инфляции и выплаты процентов на капитал сегодняшний рубль (доллар) стоит дороже, чем рубль (доллар) в будущем. Следовательно, необходимо различать экономические воздействия в зависимости от того, когда они имели место. Используя методологию финансовой оценки инвестиций [17,31], обозначим через  $EX_t^i$  затраты в году  $t$ , относящиеся к энергетическому объекту  $i$ . Все значения затрат по годам выражаются последовательностями ( $EX_1^i, \dots, EX_t^i, \dots, EX_{T^i}^i$ ), где  $EX_t^i$  - затраты в году  $t$ , а  $T^i$  - срок службы объекта в годах. Тогда общая величина дисконтированных затрат ( $EX_D^i$ ) для объекта  $i$  определится соотношением:

$$EX_D^i = EX_{CAP}^i + \sum_{t=1}^{T'} \frac{EX_t^i}{(1+r)^t}, \quad (3.9)$$

где  $EX_{CAP}^i$  - капитальные затраты на возведение объекта  $i$ ;

$r$  - коэффициент дисконтирования.

Коэффициент дисконтирования, применяемый в практике оценивания "длинных" денег является прогнозом скорости изменения масштаба денег в стационарных режимах экономического развития, в обобщённом смысле он отражает соотношение энергетических потоков в обществе. В общем случае справедливо соотношение  $r \geq inf$ , где  $inf$  - ожидаемое значение инфляции.

Обозначим  $W^i$  годовое производство энергии на объекте  $i$ , тогда себестоимость энергии определится из соотношения:

$$p^i = \frac{EX_D^i}{T^i W^i} = \frac{1}{T^i W^i} \left[ EX_{CAP}^i + \sum_{t=1}^{T'} \frac{EX_t^i}{(1+inf)^t} \right]. \quad (3.10)$$

Вследствие наличия неопределённостей при оценке величин  $W^i$ ,  $EX_t^i$ ,  $EX_{CAP}^i$  и ожидаемой инфляции  $inf$  себестоимость энергии целесообразно рассматривать как случайную величину, которая может принимать значения в некотором диапазоне  $[p^-, p^+]$ . Расчёт ожидаемой себестоимости энергии при оценке альтернативных вариантов вовлечения ВИЭ в энергодобавку позволит осуществлять их сравнение по потребности в финансовых ресурсах.

### 3.3.4 Потребность в энергетических ресурсах

Наряду с затратами на энергоносители, которые оказывают влияние на потребность в финансовых ресурсах для производства энергии, необходимо учитывать факторы, связанные с вопросами энергетической безопасности и эффективностью использования энергоресурсов. Поступление и потенциал возобновляемых ресурсов определяется на основе рассмотренного в главе 2 данного исследования математического моделирования возобновляемых источников энергии. Целесообразность размещения, количество и мощность установок-преобразователей ВИЭ прежде всего определяется наличием соответствующих ресурсов возобновляемой энергии. Эффективность использования возобновляемой энергии будет определяться характеристиками различных технологий преобразования ВИЭ. Поэтому в рамках решаемой в данном исследовании задачи можно положить, что при любом рассматриваемом варианте вовлечения ВИЭ в региональный энергетический

баланс энергосистема будет обеспечена собственными возобновляемыми ресурсами.

Собственные региональные невозобновляемые ресурсы могут оказаться относительно быстро истощимыми, а среднесрочный и долгосрочный прогнозы изменения цен на энергоносители характеризуется достаточно большой неопределенностью в современных условиях быстро меняющейся экономической и политической ситуации.

Для полного учёта потребности региональной энергетической системы в ресурсах наряду с критериями, описывающими потребность в финансовых ресурсах, целесообразно рассматривать критерии, характеризующие зависимость от импорта энергоносителей и (или) энергии.

### **3.3.5 Ущерб от перерывов в энергоснабжении**

Факт возникновения экономического ущерба при нарушении энергоснабжения потребителей ни у кого не вызывает сомнений, к возможности точной оценки значений удельных ущербов и их использовании при перспективных технико-экономических сравнениях вариантов энергоснабжения многие специалисты относятся скептически. В работе [38] отмечается, что вычисление ущербов от снижения надёжности питания потребителей связано со значительными трудностями, а иногда и принципиально невозможно. В работе [27] высказывается мнение, что величина ущерба непосредственно определяется производственной структурой конкретных потребителей, последняя же, как правило, не известна на сколько-нибудь длительную перспективу. Поэтому в общем случае нормировать некоторую среднюю удельную величину ущерба достаточно трудно. Законы распределения вероятностей будущих значений ущербов можно получить только на основе надёжных массовых обобщений применительно к конкретным потребителям опыта прошлого и обоснований его экстраполяции на будущее. В настоящее время таких данных нет, и нет уверенности в возможности их получения. Благодаря этому в трактовке понятия ущерба имеется неопределенность.

Отсутствие четкости как в методах определения ущерба от перерывов питания, так и в способах учета этих величин в технико-экономических расчетах отмечается в работе [39]. Автор этой работы приходит к заключению, что недостаточная определенность принципиальных положений и отсутствие достоверного статистического материала исключают в настоящее время практическую возможность технико-экономической оценки надежности электро-снабжения потребителей.

Наличие методик определения народнохозяйственных ущербов от перерывов электроснабжения, имеющих в основе различные подходы к решению вопроса и разные терминологии, а также полученные с их помощью результаты подтверждают справедливость вышеприведенных точек зрения. Критический анализ этих работ достаточно полно в исследовании [40], далее дана краткая

характеристика принципиальных позиций, занимаемых различными исследователями данной проблемы.

В работе [41], авторы народнохозяйственный ущерб от перерывов электроснабжения потребителя разделяют на две составляющие:

1. Прямой ущерб, являющийся суммой ущербов от простоя рабочей силы, от брака продукции, от поломки оборудования, от расстройств технологического процесса, от общецеховых и общезаводских расходов, связанных с перерывом электроснабжения.

2. Дополнительный ущерб, или ущерб от недовыработки продукции.

В работе [42] ущерб складывается из следующих составляющих:

– Основного ущерба, обусловленного недоотпуском продукции из-за простоя оборудования и рабочей силы.

– Дополнительного ущерба, вызванного порчей сырья и оборудования, порчей или невозвратимой потерей готовой продукции и полуфабрикатов.

– Системного ущерба, имеющего место в энергосистемах из-за недоиспользования оборудования и персонала энергосистемы.

Согласно методике, предложенной в работе [40], народнохозяйственный ущерб при нарушении надежности работы элементов энергетической системы состоит из ущерба электроэнергетических систем (системный ущерб) и ущерба промышленных предприятий-потребителей энергии. Каждая из указанных групп народнохозяйственного ущерба включает в себя следующие составляющие:

– Основной ущерб, обусловленный недовыработкой продукции (невыполнением заданных функций).

– Дополнительный ущерб, вызванный браком продукции, а также вынужденным изменением режима работы остальных элементов энергосистемы и потребителей или изменением состава работающих элементов.

– Прямой ущерб, обусловленный внеплановыми ремонтами и ревизиями отказавшего оборудования или его восстановлением.

– Косвенный ущерб, причиняемый народному хозяйству недоиспользованием основных и оборотных материальных фондов электроэнергетических систем и промышленных предприятий-потребителей энергии.

Численные значения удельных ущербов, приводящиеся в литературе для схожих по характеру производства предприятий, различаются весьма существенно. В работах [41,36] приведены данные для предприятий различных отраслей с учетом длительности перерыва электроснабжения. Сведения об ущербах при перерывах электроснабжения отдельных технологических процессов имеются в [36].

В большинстве случаев значения отдельных ущербов приводятся в виде тенге на недополученный потребителем киловатт-час энергии.

Ряд авторов, [43], считают нецелесообразным связывать ущерб потребителя с недополучением им какого-то количества электроэнергии в киловатт-часах. По их мнению, такой показатель может быть использован

лишь при ориентировочных расчетах применительно к энергосистемам. Для промышленных предприятий, цехов, агрегатов и других потребителей энергии определение ущерба должно производиться на основе реального анализа производственных условий. Поэтому полный ущерб от одного перерыва предлагается определять по формуле

$$Y_{\text{ПЕР}} = \alpha + bT_N, \quad (3.11)$$

где  $a$ ,  $b$  - коэффициенты удельных ущербов, соответственно тн./перерыв, тн./час;

$T_N$  - продолжительность перерыва электроснабжения в часах.

Значения коэффициентов удельных ущербов  $a$  и  $b$  приведены в [41,36]. Обращают на себя внимание широкие диапазоны, в которых могут лежать значения  $a$  и  $b$  каждого вида производства. Чтобы сузить эти диапазоны, в [11] рекомендуется удельные показатели ущерба приводить к заводам условной мощности.

В [44] отмечается, что расчленение ущерба на составляющие зависящие от отключенной мощности и недоотпущенной энергии, соответствует действительности и отвечает принятой структуре ценообразования на электроэнергию, а также договорным отношениям между энергосистемой и потребителями об условиях электроснабжения и о расчетах за электроэнергию. Величину общего удельного показателя ущерба предлагается определять по выражению

$$Y_{\text{ПЕР}} = \alpha + k_N \frac{\beta}{T_N} \text{ тн./кВт}\cdot\text{ч}, \quad (3.12)$$

где  $a$  (тн./кВт·ч) и  $\beta$  (тн./кВт·ч) - коэффициенты удельных ущербов;

$T_N$  - продолжительность перерыва;

$k_N < 1$  - поправочный коэффициент к составляющей ущерба, обусловленный внезапностью перерыва.

Величина удельного ущерба существенно зависит от продолжительности перерыва питания. Анализ данных, приведенных в [36,61,62], показывает, что для схожих предприятий одной и той же отрасли значения коэффициентов  $a$  и  $\beta$  из формулы (3.13) могут различаться достаточно сильно.

Существенно различаются и величины удельных ущербов для одинаковых производств, приводящиеся различными авторами. В связи с этим отсутствует единство точек зрения на возможность использования некоторых усредненных значений удельных ущербов для энергосистем всей страны. Различные мнения по этой проблеме изложены в работах [39-43].

В работе [36] приведены некоторые сведения о состоянии рассматриваемой проблемы за рубежом. Некоторые авторы величину удельного ущерба от перерыва питания для своей страны предлагают определять как отношение стоимости всего валового национального продукта ко всей вырабатываемой в стране электроэнергии.

Сторонники дифференцированного подхода к оценке ущерба у различных потребителей предпочитают использовать выражение «ущерб»= $(a+bT_N)P$ , где  $a$ ,  $b$  - коэффициенты удельных ущербов,  $T_N$  - продолжительность перерыва питания,  $P$  - отключаемая при перерыве мощность. Отмечается существенное различие в значениях коэффициентов  $a$  и  $b$  для промышленных и коммунально-бытовых потребителей [36,59,60].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что информация о последствиях перерывов электроснабжения должна быть отнесена к категории собственно неполной. Этому в значительной степени способствуют условия ее формирования, которым свойственна концептуальная неопределенность, вызванная отсутствием четкой методики определения ущербов.

### 3.3.6 Экологический ущерб

Процессы преобразования энергии на сегодняшний день являются одним из главных источников загрязнения окружающей среды. Основными загрязнителями, выделяемыми при сжигании органических топлив, являются двуокись серы ( $SO_2$ ), оксиды азота ( $NO_x$ ), твердые частицы ( $PM$  - сажа, пыль и т.п.) и свинец ( $Pb$ ), имеющий сильно отрицательное воздействие на здоровье человека [17,45,46]. Выбросы углекислого газа ( $CO_2$ ), который является основным тепличным газом, и радиоактивных элементов также могут быть отнесены к загрязнителям воздуха [47,59,60,61]. Воздействие энергетических объектов на водоёмы в основном сводится к сбросам теплоты в воду или испарением воды [31].

Подходы к проблеме оценки антропогенных воздействий на экосистемы обоснованы исследованиями ряда специалистов, выделяющих два основных метода [48]:

1. Построение более подробных и полных списков переменных - базы числовых данных при создании компьютерных моделей и имитации природных экосистем.

2. Использование немногих, но отражающих сущность целостных характеристик.

На практике чаще используют макроскопический подход. Почти невозможно использовать все имеющиеся данные, поэтому экологи стремятся сократить, сконцентрировать весь объем информации и выдать ее в сжатой форме. Ведутся поиски «экологического градусника» - единого показателя, который может достаточно надежно охарактеризовать состояние экосистемы [46].



Макроскопические характеристики делят на дескрипторы (описательные характеристики) и маркеры (метчики). Маркеры - это индикаторные характеристики, выбранные из всего набора как наиболее существенные для определенной цели работы. В рыбоводстве применяется показатель продукции высшего трофического звена. Выбрав аспект описания экосистемы, решают, какие характеристики системы послужат целям нормирования, и выбирают математические средства описания состояния нормы и разработки критериев оценки «хорошего» и «плохого» состояния экосистемы.

Исторически подход к нормированию экосистем основывается на ретроспективном анализе данных о системе [48]. Например, статистическая норма рекомендует в качестве меры нормальности частоту, с которой данное состояние встречается в предыстории. Смысл статистической нормы состоит в том, что специалисты условились принять некоторый период существования системы за эталон ее нормы. Обоснованность статистической нормы полностью упирается в выбор такого периода, и ранги «хорошо - плохо» соответствуют рангам «часто - редко».

Другой вариант - эмпирическая норма. В этом случае состояние одной из экспериментальных серий объявляется контрольным (нормальным). Выделяют теоретическую норму, основанную на теоретических предпосылках, экспертную норму, которая устанавливается авторитарно. Примером последней могут быть различные индексы, широко применяемые в экологии и гидробиологии для оценки состояния экосистем и качества воды.

Норма - это чаще всего число, которое рассчитывают как функцию из совокупности состояний системы в множестве чисел. Каждому состоянию будет соответствовать единственная численная величина или пределы колебаний величин. Нормой может быть также кривая зависимостей между величинами (функция). Отклонение от кривой считают аномалией.

В настоящее время разработаны критерии оценки изменения природной среды для воздушной среды, водных объектов, почв, геологической среды, наземных экосистем (растительного и животного мира), биогеохимических характеристик [46,48,49].

Критериями для атмосферного воздуха являются критические нагрузки (максимальные значения выпадений) и критические уровни загрязняющих веществ (максимальные значения концентраций). Параметры установлены для наземной растительности, лесных и водных экосистем по веществам: оксиды азота и серы, фтористый водород, озон (критические уровни), соединения серы и азота, ионы водорода (критические нагрузки).

Выявление зон чрезвычайной экологической ситуации и экологического бедствия для водных объектов приводят по критериям загрязнения, истощения водных ресурсов и деградации водных экосистем с использованием химических и биологических (в том числе биотестовых) показателей. Основными химическими показателями являются концентрации наиболее опасных токсичных загрязняющих веществ (с учетом класса опасности), в том числе обладающих свойством накапливаться в органах и тканях гидробионтов. Для совокупной оценки используют расчетный суммарный показатель

для превышающих ПДК химических веществ. Оценка состояния водных экосистем основана на гидробиологических параметрах, характеризующих развитие всех экологических групп водных сообществ: фито-, зоопланктона, зообентоса, запасов ихтиофауны, а также на показателях биотестирования токсичности. Учитывают также степень евтрофикации пресноводных и морских экосистем. В качестве основного показателя степени истощения водных ресурсов взята норма безвозвратного изъятия поверхностного стока.

В оценке состояния почв основными критериями экологического неблагополучия являются показатели физической деградации почв, химического и биологического загрязнения. Величины параметров установлены для показателей [48]:

- Площадь выведенных из сельхозоборота земель.
- Уничтожение гумусового горизонта.
- Превышение уровня грунтовых вод.
- Радиоактивное загрязнение.
- Превышение ПДК химических веществ (с учетом классов опасности).
- Снижение уровня активной микробной массы.
- Фитотоксичность (по данным биотестирования).

В качестве дополнительных показателей используют показатели доли загрязнений сельхозпродукции. Экспертно устанавливают параметры средней урожайности почв сельскохозяйственных территорий.

Изменения геологической среды оценивают по интенсивности и масштабам проявления современного напряженно-деформированного состояния верхних частей литосферы, по параметрам критических скоростей деформации и масштабам ожидаемого сейсмического эффекта.

Оценку степени деградации наземных экосистем проводят по критериям, характеризующим негативные изменения в их структуре и функционировании. В зоне чрезвычайной экологической ситуации состояние экосистем описывается изменениями в соотношении основных трофических групп и удельной массы одной из групп в пределах 20-50% с нарушением взаимосвязей внутри системы, процессы деградации в этом случае еще обратимы. В зонах экологического бедствия изменения необратимы и экосистема теряет средо- и ресурсовоспроизводящие функции.

Направленность и скорость деградации наземных экосистем рассчитывают по рядам наблюдений за (5-10) лет. Критерии оценки состояния растительности различаются в зависимости от географических условий и типов экосистем. При этом учитывают следующие параметры [48]:

- Уменьшение биоразнообразия.
- Плотность популяции видов-индикаторов.
- Площадь коренных ассоциаций.
- Лесистость.
- Запас древесины основных лесобразующих пород.
- Повреждение древостоев и хвойных пород техногенными выбросами.
- Проектное покрытие и продуктивность пастбищной

растительности.

- Изменение ареалов редких видов, и др.

Критерии состояния животного мира включают показатели на уровне зооценоза и отдельных видов и популяций. Рассматриваются параметры [48]:

- Уменьшение биоразнообразия.
- Плотность популяции видов-индикаторов.
- Снижение численности охотничье-промысловых видов.

При биогеохимической оценке рассматривают биогеохимические провинции с резким изменением химического элементного состава компонентов окружающей природной среды. Например, основными показателями являются соотношение углерода и азота в почвах, поверхностных водах, растениях, растительных кормах, содержание токсичных химических веществ (ртути, кадмия, свинца, мышьяка и др.) в растениях и растительных кормах.

Выбор показателей, указывающих степень экологических нарушений, вызываемых энергетическими объектами на основе принципов экологического нормирования, представляет собой трудную задачу. В работе [50] рассматриваются примеры построения искусственных шкал возможных кратко-, средне- и долгосрочных воздействий энергетических объектов на экосистемы. Результаты практических расчётов в работе [51] показывают, что диапазон неопределённости при количественной оценке прогнозируемых воздействий энергетических объектов на состояние окружающей среды значителен и, в большинстве случаев, информация о воздействиях не носит вероятностного характера. В таких случаях целесообразно использование методов интервального анализа и (или) методов теории нечётких множеств.

### **3.3.7 Социальный ущерб**

Воздействия энергетических объектов на здоровье и безопасность людей обусловлены вероятностью аварий, несчастных случаев и заболеваний, вызываемых загрязнением окружающей среды.

Анализ возможных последствий аварий на энергетических объектах следует проводить с учётом метеорологических, демографических и других условий [31], которые детально рассматриваются при решении задач оптимального размещения энергетических объектов. Исключением являются атомные электростанции, для которых независимо от места их размещения необходимо учитывать количество радиоактивных отходов, подлежащих утилизации.

Для нормальной эксплуатации энергетических объектов имеются обширные статистические данные, описывающие вероятность несчастных случаев на каждом технологическом этапе процесса производства энергии [31].

Воздействия на здоровье населения оценивают в совокупности с критериями и показателями загрязнения окружающей среды [48]. К основным медико-демографическим показателям отнесены: заболеваемость, детская смертность, медико-генетические нарушения, специфические и онкологические заболевания, связанные с загрязнением окружающей среды. Показатели

на обследуемых территориях (раздельно для городского и сельского населения) сравнивают с показателями контрольных (фоновых) территорий. В качестве контрольных используют те территории, где регистрируются наиболее благоприятные значения медико-географических показателей. Примеры показателей и параметров, характеризующих медико-демографические критерии, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Медико-демографические критерии состояния здоровья населения

Основные показатели	Параметры зоны	
	Экологического бедствия	Чрезвычайной ситуации
Изменение структуры и увеличение перинатальной смертности	В 1,5 раза и более	От 1,3 до 1,5 раза
<b>Увеличение детской смертности:</b>		
- младенческой (до 1 года)	В 1,5 раза и более	От 1,3 до 1,5 раза
- детской (1-4) года	В 1,5 раза и более	От 1,3 до 1,5 раза
<b>Медико-генетические показатели:</b>		
- увеличение частоты врожденных пороков развития новорожденного и спонтанных выкидышей	В 1,5 раза и более	От 1,3 до 1,5 раза
<b>Изменение заболеваемости детей и взрослых:</b>		
- увеличение распространенности по отдельным нозологическим формам и возрастным группам, изменение структуры заболеваемости	В 2 раза и более	От 1,5 до 2 раз

Продолжение таблицы 3.1		
<b>Онкологические заболевания (заболеваемость и смертность):</b>		
- отдельные формы	В 2 раза и более	От 1,5 до 2 раз
- злокачественные новообразования у детей	В 2 раза и более	От 1,5 до 2 раз
Специфические заболевания, связанные с загрязненностью территории	Наличие таких заболеваний	Наличие таких заболеваний
<b>Дополнительные показатели:</b>		
Увеличение нарушений репродуктивной функции у женщин:		
- осложнение течения и исходов беременности (число случаев на 1000)	В 2 раза и более	От 1,5 до 2 раз
Изменение массы тела, роста окружности головы у новорожденных	Критерии устанавливают по экспертным оценкам	Критерии устанавливают по экспертным оценкам
<b>Средняя продолжительность жизни мужчин и женщин:</b>		
- отставание от аналогичных показателей на контрольных территориях по годам:		
- при рождении	М-3,6, Ж-3,5	М-3,2, Ж-2,6
- в возрасте 15 лет	М-4,0, Ж-2,5	М-3,4, Ж-2,5
- 35 лет	М-3,0, Ж-2,0	М-2,5, Ж-2,4
- 65 лет	М-2,3, Ж-1,7	М-2,0, Ж-1,8
Психическое развитие детей: Доля детей с отклонениями	20% и более	От 10 до 20%
Изменение иммунного статуса	Критерии устанавливают по экспертным оценкам	Критерии устанавливают по экспертным оценкам

Снижение качества питьевой воды вследствие загрязнения источников водоснабжения и санитарно-эпидемиологического состояния водных объектов рекреационного назначения является важнейшим фактором изменения среды обитания человека и входит в число критериев оценки экологического

состояния территорий. Ранжирование параметров проводится по показателям, включенным в ГОСТ на питьевую воду, в частности, по встречаемости патогенных микроорганизмов, параметрам кишечной палочки и др., для питьевой воды централизованного и нецентрализованного водоснабжения, а также для поверхностных, подземных, рекреационных вод.

Критерии санитарно-гигиенической оценки опасности загрязнения токсичными веществами учитывают на основе классов опасности химических веществ, влияния пороговых концентраций на санитарный режим водоемов и барьерной способности используемых технологических схем очистки воды.

Выбор критериев оценки почв населенных пунктов определяется возможностью переноса загрязняющих веществ в воздух и воды этих территорий, а также прямым влиянием отдельных показателей на здоровье населения.

Химическое загрязнение почв оценивают по суммарному показателю химического загрязнения (сумме коэффициентов концентраций отдельных компонентов). Оценка радиоактивного загрязнения почв населенных пунктов проводится по двум основным показателям: мощности экспозиционной дозы на уровне 1 м от поверхности почвы (мкР/ч) и степени загрязнения по отдельным радиоизотопам (кюри/км ) [48].

Степень общей радиоэкологической безопасности оценивают по среднегодовому значению эффективной дозы (выражается в Зивертах -Зв) или коллективной эффективной дозы (произведению средней эффективной дозы по группе людей на число людей в группе).

К основным путям облучения человека относят [48]:

- Внешнее облучение от гамма-излучающих радионуклидов в радиоактивном облаке.
- Внешнее облучение от аэрозольных выпадений.
- Внутреннее облучение по пищевым цепочкам и ингаляционным путям.

Территории, в пределах которых среднегодовые значения эффективной дозы сверхестественного фона не превышают  $1 \text{ м}^3 \text{ в/год}$ , отнесены к территориям с благополучной экологической обстановкой. Для индивидуальных доз в  $1 \text{ м}^3 \text{ в/год}$  уровень риска составляет 0.0001/год. При превышении эффективности дозы облучения до  $5 \text{ м}^3 \text{ в/год}$  при диапазоне доз до  $10 \text{ м}^3 \text{ в/год}$  территорию относят к зоне чрезвычайной экологической ситуации. Уровень риска составляет в этом случае 0.001/год. Превышение доз в  $10 \text{ м}^3 \text{ в/год}$  дает основание отнести территорию к зоне экологического бедствия со степенью риска выше 0.001/год.

Заболеваемость от конкретного загрязнителя и возможная смертность зависят от его взаимодействия с организмом человека. Для различных загрязнителей необходимо знать соотношение «доза - последствие». Возможны либо формализованное моделирование этих соотношений и оценка предпочтений по уровню заболеваемости и смертности, либо оценка предпочтений по уровню выбросов загрязнителя [31]. Преимущества моделирования соотношений «доза - последствие» в исследованиях энергетических систем

заключается в том, что подобные модели универсальны для всех типов исследований.

Аналогично воздействиям на окружающую среду, критериям, как с естественными, так и с искусственными шкалами, характеризующим социальный ущерб, присуща неопределенность, которая может носить вероятностный, интервальный или нечёткий характер.

### **3.4 Анализ решений по выбору эффективных вариантов вовлечения возобновляемых источников энергии в энергобаланс**

В главе 1 было показано, что основными инструментами для решения задачи определения эффективных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс являются такие методы системного анализа, как математическое моделирование, многокритериальная оптимизация и экспертные оценки, которые все вместе позволяют рассматривать большое число альтернативных вариантов, совершенствовать процесс принятия решений и точнее прогнозировать их последствия. Комплексное использование перечисленных методов представляет собой «анализ решений» - систематизированный и логический метод, основанный на наборе аксиом для рационального анализа сложных проблем выбора решений. Эти основополагающие аксиомы сформулированы в работах [35,52,53]. Анализ решений разработан на основе предположения, что приемлемость вариантов для ЛПР должна зависеть от:

- вероятности возможных последствий выбора каждого альтернативного варианта;
- предпочтений ЛПР по отношению к этим последствиям.

В анализе решений эти факторы выражаются количественно и включаются в формализованный анализ проблемы. Имеющаяся информация, собранные данные, модели и экспертные оценки используются для количественного выражения вероятностей различных последствий. Для количественного выражения предпочтений используется теория полезности.

Анализ решений даёт теоретически обоснованные методы для формализации и интегрирования мнений и предпочтений экспертов и ЛПР при оценке альтернативных направлений действий в сложных проблемах выбора решений. Структурная схема процесса анализа решений, предложенная в работе [31] для выбора оптимальной площадки размещения энергетического объекта и содержательно адаптированная автором для задач оценки эффективности вовлечения ВИЭ в энергетический баланс, показана на рисунке 3.3.

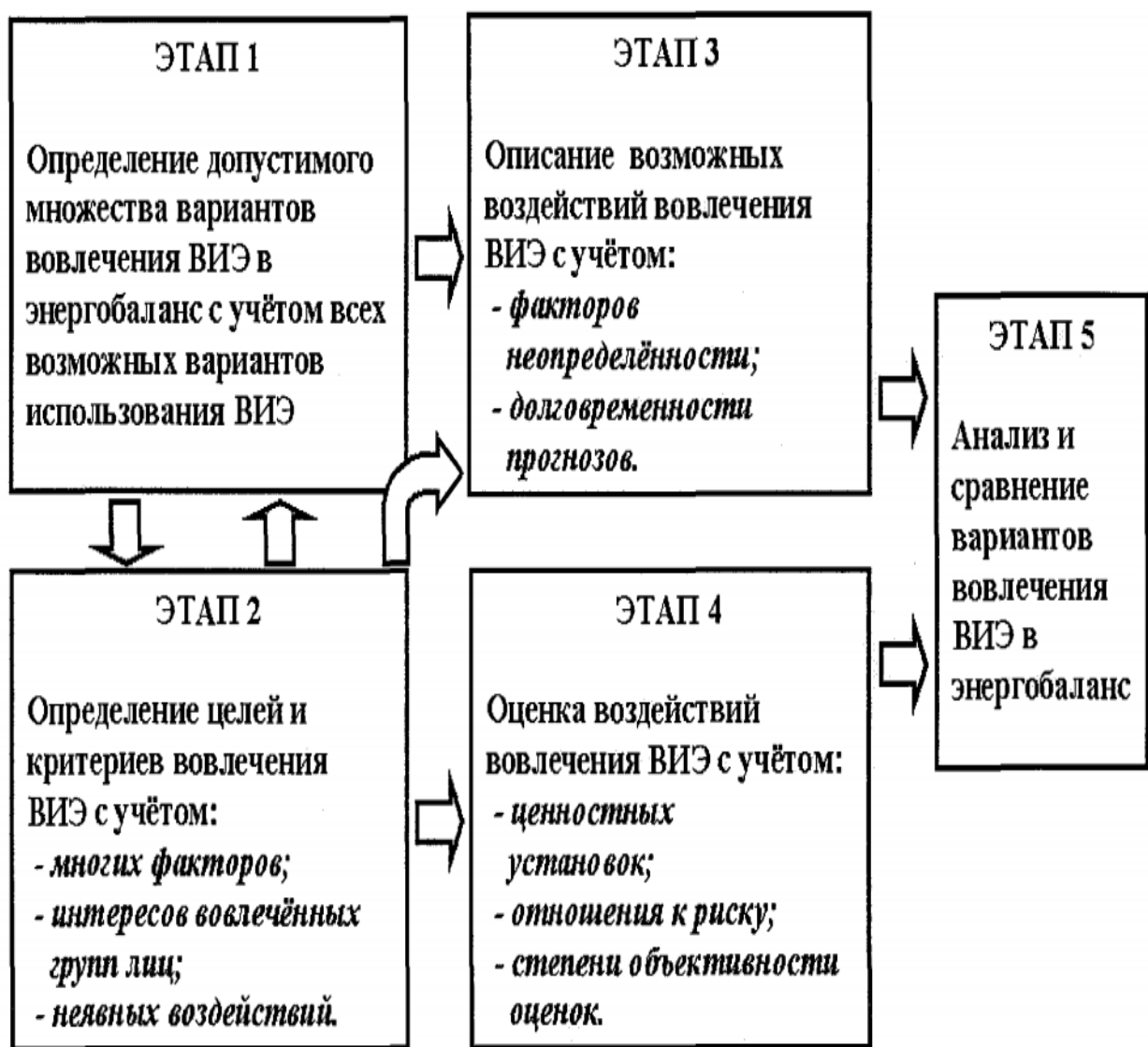


Рисунок 3.3 – Схема процесса анализа решений по выбору варианта вовлечения ВИЭ в энергобаланс

Идентификация возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс (формирование списка альтернатив или подэтап предварительной оптимизации) позволяет выделить ограниченное конечное множество возможных решений, которые будут рассматриваться при дальнейшей оптимизации. Такой предварительный отбор можно осуществлять на основе общей схемы комплексного использования ВИЭ, используя результаты оценок поступления и потенциала различных ВИЭ в исследуемом районе и результаты оценок эффективности технологий преобразования ВИЭ. Например, в районах с низким потенциалом ветровой энергии заведомо нет смысла рассматривать варианты использования ВЭУ и т.д.

Следующим этапом исследования после выявления конечного множества возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс является рас-



смотренное в п. 3.3 данной главы формирование целей, преследуемых при размещении преобразователей ВИЭ, а также критериев эффективности, необходимых для оценки степени, с которой эти цели достигаются. Цель, в том смысле как в данном случае употребляется этот термин, обладает двумя чертами: характеризует главную область заинтересованности (или её часть) и указывает направление предпочтения [31].

Пусть имеется множество возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс в исследуемом районе  $S_1, \dots, S_j, \dots, S_J$ , ( $j=1, \dots, J$ ), подлежащих оценке. Требуется определить цели  $O_1, \dots, O_i, \dots, O_n$ , ( $i=1, \dots, n$ ), которым выбираемый вариант должен соответствовать. Для каждой цели необходимо установить критерий эффективности  $X_i$  с естественной или искусственной (специально построенной) шкалой для оценки степени, с которой цель  $O_i$  достигается. Конкретные значения (уровни) критерия  $X_i$  обозначаются  $x_i$ . Такая структуризация проблемы позволяет описать последствия выбора каждого конкретного варианта вектором  $x = (x_1, \dots, x_n)$ .

Описание воздействий варианта вовлечения ВИЭ в энергобаланс на исследуемый район необходимо проводить с учётом неопределённости в возможных последствиях путём оценки для каждого варианта  $S_j$  функции распределения вероятности  $p_j(x)$ . В общем случае  $p_j(x)$  может иметь стохастическое, интервальное, нечёткое (размытое) или детерминированное (т.е. тогда, когда  $p_j(x)$  есть просто  $x$ ) представление. При описании возможных воздействий необходимо учитывать также фактор времени, определяющий долговременность прогноза, и вероятностные зависимости между различными критериями. С помощью функции  $p_j(x)$ , соответствующей варианту вовлечения  $S_j$ , можно формально описать возможные воздействия данного варианта вовлечения ВИЭ на исследуемый район. На этапе 4 анализа решений необходимо выразить количественно приемлемость каждого из возможных последствий. Для этого можно использовать многокритериальную теорию полезности. В функции полезности  $u$  каждому значению  $u(x)$  соответствует значение возможного последствия  $x$ . Функция полезности имеет два важных свойства: первое -  $u(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) > u(x''_1, x''_2, \dots, x''_n)$  только в том случае, если  $u(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$  предпочтительнее, чем  $u(x''_1, x''_2, \dots, x''_n)$ ; второе - при наличии неопределённостей ожидаемое значение полезности является критерием оценки альтернатив.

Процесс определения функции полезности может быть разбит на пять этапов [33]:

- формулировка терминологии и основных соображений;
- определение общей структуры предпочтений;
- оценка однокритериальных функций полезности;
- оценка весовых коэффициентов;
- проверка последовательности и повторение процедуры.

Для удобства каждый из них рассматривается отдельно, несмотря на то, что они в значительной степени взаимосвязаны и взаимозависимы.

Тремя факторами, относящимися к этапу 4 анализа решений, являются системы ценностных отношений, беспристрастность и отношение к риску. Каждый из них требует ценностных установок, которые выявляются при определении функции  $u$ . Метод анализа решений сосредоточен на выявлении и выяснении необходимой информации об этих установках и выражении их в форме, удобной для оценки вариантов. Преимуществами применения функции полезности в анализе решений являются:

- используемые процедуры и модели формализуются математически, исходя из теоретических положений;

- в процедурах систематически выявляется необходимая информация о ценностных соотношениях, беспристрастности и отношении к риску с постоянной проверкой точности;

- проводится анализ чувствительности к ценностным установкам экспертов и ЛПР.

Когда проблема сформулирована, форма представления, значения и вероятности последствий определены, и структура предпочтений установлена, информация должна быть логически переработана для проведения оценки эффективности возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс исследуемого района. Основой для такой оценки является ожидаемая полезность, что следует, как было указано выше, из аксиом теории анализа решений.

Расчёт ожидаемой полезности на этапе 5 анализа решений является математической операцией с учётом распределения вероятности  $p_j$  для каждого варианта вовлечения  $S_j$  и функции полезности  $u$ , которые определяются на предыдущих этапах анализа. Вообще этот расчёт представляет собой суммирование вероятностей каждого из возможных последствий, умноженных на полезность этого последствия [33]. Таким образом, формализованно комбинируется вероятность и предпочтительность последствий. В результате получается ожидаемая полезность  $E_j(u)$  для каждого варианта вовлечения  $S_j$ :

$$E_j(u) = \int_x p_j(x)u(x)dx. \quad (3.13)$$

Чем больше значение  $E(u)$ , тем выше приемлемость варианта. Таким образом, значение  $E(u)$  может быть использовано для ранжировки последствий, отражающей предпочтения ЛПР одному набору последствий перед другим. Необходимо учитывать, что ожидаемая полезность, определяющая выбор варианта, прямо связана с критериями эффективности, предварительно выбранными для проведения анализа. Оценка эффективности возможного варианта вовлечения определяется степенью удовлетворения этим критериям.

В реальных ситуациях необходимо, чтобы эксперт мог исследовать чувствительность любого решения к различным точкам зрения, касающимся неопределённости, связанной с различными уровнями воздействия, и к различным структурам ценностей. В анализе решений количественно выражаются возможные воздействия (даже субъективного характера), чётко рас-

сматриваются неопределённости и разрабатываются формальные положения по системе ценностей. Без количественного выражения анализ чувствительности проводить трудно. Полезным способом представления результатов анализа чувствительности является выражение набора условий через показатели неопределённостей и предпочтений, исходя из которых могут быть выбраны различные варианты.

### 3.5 Выводы по главе

По итогам проведенных исследований в главе 3 определены следующие выводы:

1. Оценка эффективности вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс представляет собой сложную задачу, вследствие необходимости учёта значительной неопределённости исходной информации и многокритериальное<sup>TM</sup>.

2. Идентификацию конечного множества возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс, подлежащих дальнейшей оценке, необходимо производить на основе общей схемы комплексного использования ВИЭ, позволяющей рассмотреть все возможные варианты производства энергии для энергоснабжения потребителей исследуемого региона с учётом графика нагрузки и поступления возобновляемой энергии.

3. Выбор критериев эффективности для оценки альтернативных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс должен производиться на основе общей иерархии целей, преследуемых при организации системы энергоснабжения с ВИЭ. Использование иерархии целей позволяет приспособлять требования общих целей к конкретным задачам, решаемым при вовлечении ВИЭ в энергобаланс исследуемого региона.

4. Рассмотренные подходы и методы оценки критериев эффективности на основе иерархии целей позволяют осуществлять выбор системы критериев эффективности для каждого конкретного исследования региональной энергосистемы.

5. Решение поставленной задачи оценки эффективности вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс целесообразно осуществлять с помощью анализа решений - комплексного метода, сочетающего в себе методы математического моделирования и оптимизации в условиях неопределённости, количественно учитывающего предпочтения ЛПР.

6. Показан процесс преобразования энергии при комплексном использовании ВИЭ и иерархия целей системы энергоснабжения.

7. Проиллюстрирована схема процесса анализа решений по выбору варианта вовлечения возобновляемых источников энергии в энергобаланс.

## 4. Оптимизационные решения о включении возобновляемых источников энергии для электроснабжения социальных объектов

### 4.1 Определение множества допустимых решений задачи вовлечения возобновляемых источников энергии

Приведенные исследования в главе 3 показали, что недостатки детерминированных оптимизационных расчётов при решении структурных задач в энергетических системах определяют целесообразность перехода к новой системе оптимизационных расчётов, использующих неполную информацию, позволяющих получить и исследовать множество допустимых решений. Выделяют три основных характерных этапа решения оптимизационных задач при неполной исходной информации [17,23,30]:

- выбор ограничительного множества возможных условий развития системы или объекта.
- выполнение в предварительных локальных и оптимизационных расчётов и анализ их результатов.
- проведение специальных оптимизационных расчётов с принятием решений по их результатам.

Раздел исследования посвящён первому и второму этапу, выделению и анализу множества допустимых решений задачи вовлечения возобновляемых источников энергии в энергобаланс.

При обсуждении подходов к выбору критериев эффективности в главе показано, что значения критериев эффективности в большинстве случаев могут быть оценены в некоторых интервалах со значительным диапазоном неопределённости нестатистической природы. В данных условиях наиболее общей и наиболее естественной моделью описания факторов неопределённости является их представление в интервальной форме, когда задаётся диапазон возможных значений переменных или зависимостей, например в виде

$$y^- \leq y \leq y^+, \quad (4.1)$$

где  $y^-$ ,  $y^+$  - нижняя и верхняя границы неопределённого параметра.

Приведённое неравенство означает, что  $y$  может принимать любое значение из интервала  $[y^-, y^+]$  и нельзя приписать вероятностную меру [25,54].

При анализе данных может применяться нестатистическая модель с заданной абсолютной ( $\varepsilon$ ) или относительной ( $\delta$ ) ошибками. При этом предполагается, что выполняется одно из следующих условий:

$$|y - y_0| \leq \varepsilon, \quad (4.2)$$

$$|y - y_0|/|y| \leq \delta, \quad (4.3)$$

где  $y_0, y$  - истинное и оценочное (измеренное) значение величины;  
 $\varepsilon, \delta$  - заданные абсолютная и относительная ошибки.

Истинное значение  $y_0$  лежит внутри известного интервала границы которого  $y^-, y^+$  определяются как  $y \pm \varepsilon$  и  $y \pm \delta |y$ .

Для получения представительного ограниченного множества или множества допустимых решений задачи вовлечения ВИЭ в энергобаланс целесообразно использовать метод интервального анализа [25].

Множество допустимых вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс ( $X_D$ ) может быть определено в результате ограничения возможных вариантов вовлечения по критерию стоимости. Базовый вариант нулевого вовлечения ВИЭ в энергобаланс априори принадлежит допустимому множеству, а для него «экологические» критерии принимают наименее предпочтительное значение. Любой вариант вовлечения ВИЭ будет удовлетворять условиям принадлежности допустимому множеству по этим критериям. Дополнительными условиями являются наличием необходимого количества земельных площадей для размещения энергоустановок по преобразованию ВИЭ и ограничения по совместно используемым возобновляемым ресурсам.

Рассмотрим алгоритм построения множества допустимых вариантов производства энергии с использованием ВИЭ, который может быть применён для электрической и тепловой энергии. Большая часть технологий преобразования ВИЭ ориентированы на производство только одного вида энергии, которая, согласно общей схеме комплексного использования ВИЭ может быть преобразована в другие формы. В этих случаях достаточно будет учитывать изменения КПД систем и стоимость дополнительного оборудования. Для использующих биотопливо ТЭЦ, крупных солнечных и ГеоТЭС тепловая энергия является побочным продуктом и может быть учтёной. Для остальных случаев следует учитывать возможные ограничения оптимального множества, связанные с ограниченностью совместно используемых для производства электрической и тепловой энергии ресурсов ВИЭ. Рассмотрим эти ограничения ниже.

Пусть  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  ( $i=1, \dots, n$ ) - суммарные мощности энергетических установок по производству электрической (тепловой) энергии, использующих  $i$ -ую технологию преобразования возобновляемой энергии. Поставим задачу максимизации годового производства электрической (тепловой) энергии с помощью ВИЭ:

$$\max [c]^T x, \quad (4.4)$$

где  $[c]$  - интервальный вектор коэффициентов, каждый элемент которого  $[c_i^-, c_i^+]$  определяет эффективность использования установленной мощности в выработке энергии;

при следующих ограничениях:

$$\left( Q - \sum_{i=1}^n c_i^+ x_i \right) p_{\text{bas}} + \sum_{i=1}^n p_i^+ x_i \leq p_{\text{max}} Q$$

или

(4.5)

$$\sum_{i=1}^n (p_i^+ - p_{\text{bas}}) c_i^+ x_i \leq (p_{\text{max}} - p_{\text{bas}}) Q$$

где  $p_{\text{bas}}$  - себестоимость «традиционной» энергии;

$p_i^+$  - верхняя оценка себестоимости энергии для  $i$ -ой технологии;

$p_{\text{max}}$  - максимально допустимая себестоимость энергии.

$$K_{zi}^+ \cdot x_i \leq S_i$$

и,

$$K_{zi}^+ \cdot x_i \leq \bigcup_i S_i \quad [\text{использование земельных площадей}] \quad (4.6)$$

где  $K_{zi}$  - коэффициент использования земельных площадей  $i$ -ой технологией;

$S_i$  - доступная для размещения энергетических объектов данного типа площадь;

суммирование ведётся только по технологиям, «претендующим» на использование одних и тех же площадей.

$$\sum \alpha_i c_i^+ x_i \leq B_k, \quad [\text{потенциал биотоплива}] \quad (4.7)$$

где суммирование ведётся только по технологиям, использующим  $k$ -ый вид биотоплива;

$B_k$  - годовой потенциал  $k$ -го вида биотоплива;

$\alpha_i$  - коэффициент, обратный КПД, который учитывает полезное использование  $i$ -ой технологией потенциала  $k$ -го вида биотоплива.

Физический смысл коэффициентов  $c$  для различных технологий преобразования ВИЭ показан в таблице 4.1.

Задача (4.4) при условиях (4.5-4.7) представляет собой задачу линейного программирования с интервально заданными коэффициентами целевой функции [25], для решения которой используется следующий алгоритм 1.

Шаг 1. Формируется матрица  $M_c$  размера  $(n \times 2^n)$ , содержащая  $2^n$  векторов  $c^j \in [c]$ , ( $j=1 \dots 2^n$ ), которые задают вершины гиперпараллелепипеда. Она определяет многогранный выпуклый конус

$$K_C = \left\{ x \in R^n \mid x = M_C \lambda = \sum_{j=1}^{2^n} \lambda_j c^j, \quad \lambda \geq 0 \right\}, \quad (4.8)$$

Таблица 4.1 - Расчет коэффициентов модели определения вариантов использования ВИЭ

Технология	Основные энергетические соотношения / производство энергии	Значение коэффициента $c$
Фотоэлектрическая генерация и тепловые солнечные системы (суточное пр-во энергии)	$E_d = x \cdot КПД \cdot H_d,$ где $H_d$ - суточная сумма солн. радиации ( $d$ - порядковый номер дня в году); $x$ - мощность, выраженная в $m^2$ воспринимающей поверхности; $КПД$ - полный КПД системы.	$c = \sum_{d=1}^{365} c_d = КПД \cdot \sum_{d=1}^{365} H_d$
ВЭУ (суточное пр-во энергии)	$E_d = x \cdot КПД \cdot \Phi_d(u' < u < u'') \cdot T$ где $\Phi_d(u)$ - суточная функция распределения вероятности скорости ветра; $x$ - номинальная мощность ВЭУ, подходящей для данного класса ветровой активности; $T$ - 24 часа; $КПД$ - полный КПД системы.	$c = \sum_{d=1}^{365} c_d = КПД \cdot T \cdot \sum_{d=1}^{365} \Phi_d(u' < u < u'')$
ВлЭУ (суточное пр-во энергии)	$E_d = x \cdot КПД \cdot H_d,$ где $H_d$ - суточная сумма волн, энергии; $x$ — мощность, выраженная в м воспринимаемого волн, фронта; $КПД$ - полный КПД системы	$c = \sum_{d=1}^{365} c_d = КПД \cdot \sum_{d=1}^{365} H_d$
Сжигание биомассы и БЭУ (годовое пр-во энергии)	$E_y = x \cdot K_M \cdot K_9$ где $x$ - установленная мощность; $K_M$ — коэффициент участия в балансе мощности (учёт расхода энергии на собств. нужды); $K_9$ - коэффициент участия в балансе энергии, ч/год.	$c = K_M \cdot K_9$

ГеоТЭС (годовое пр-во энергии)	$E_y = x \cdot K_m \cdot K_э$ где $x$ - установленная мощность; $K_m$ - коэффициент участия в балансе мощности (учёт расхода энергии на собств. нужды); $K_э$ - коэффициент участия в балансе энергии, ч/год.	$c = K_m \cdot K_э$
--------------------------------------	--	---------------------

*Шаг 2.* Формируется задача линейного программирования

$$\max(c^1)^T x \quad (4.9)$$

при условиях  $Ax \leq b$ ,  $x \geq 0$ ,  
 где  $c^1 = \{c_i^1\}$  ( $i=1, \dots, n$ );  $c^1 \in M_c$  - первая строка матрицы  $M_c$ .

Определяется оптимальное решение  $x^1$  задачи (4.9).

*Шаг 3.* В точке  $x^1$  множества допустимых решений задачи (4.9) формируется матрица  $M_A$ , строками которой являются векторы нормалей активных ограничений. Матрица  $M_A$  задаёт конус  $KA(x^1)$ .

*Шаг 4.* Решается матричное уравнение:

$$M_A \lambda = M_c, \quad (4.10)$$

где  $\lambda$  - искомая матрица размера  $(n \times 2^n)$ , содержащая векторы коэффициентов линейных комбинаций вида  $x = \sum_{j=1}^{2^n} \lambda_j x^j$ , ( $i=1, \dots, n$ ).

*Шаг 5.* Проверяется условие единственности для решения  $x^1$ , которое согласно теореме Куна-Таккера [25] формулируется следующим образом:

- решение задачи (4.4) является единственным, если конус возможных вариаций градиента целевой функции содержится в конусе, натянутом на нормали к активным ограничениям в точке  $x^1$ , т.е. выполняется следующее соотношение включения:

$$K_C \subset K_A(x^1), \quad c \in [c] \quad (4.11)$$

Если все элементы матрицы  $\lambda$  положительны, то  $K_C \subset K_A(x^1)$  - единственное оптимальное решение задачи (4.4). Если среди элементов матрицы  $\lambda$  имеются отрицательные, то это означает, что соответствующие векторы  $c^j$  не принадлежат конусу  $K_A(x^1)$  и, следовательно, решение  $x^1$  не единственное.

В этом случае для определения множества недоминируемых решений осуществляется переход к следующему шагу.



*Шаг 6.* Среди множества векторов  $c^j (j=1, \dots, 2^n)$  произвольным образом выбирается вектор, например  $c^k$ , который принимается в качестве расчётного, затем формируется задача

$$\max(c^k)^T x \quad (4.12)$$

при условиях  $Ax \leq b, x \geq 0$ .

Эта задача принимается в качестве исходной. Определяется новое оптимальное решение  $x^2$  и осуществляется переход к шагу 3 и т.д.

В результате реализации алгоритма 1 будут получены граничные точки множества  $X_D^{EL}$  ( $X_D^H$ ) эффективных решений задачи (4.4) максимизации производства электрической (тепловой) энергии, используя ВИЭ. Искомое эффективное множество  $X_E$  вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс определится с помощью алгоритма 2.

*Шаг 1.* Определение возможного количества и мощности энергоустановок, использующих  $i$ -ую технологию преобразования ВИЭ, из условия:

$$x_i \geq ST_i \left[ P_i^{ef} \right] \quad x \in X_D^{EL} \text{ или } X_D^H \quad (4.13)$$

где  $[P_i^{ef}]$  - интервал возможных (эффективных) мощностей для энергоустановок, использующих  $i$ -ую технологию,

$ST_i$  - количество энергоустановок для  $i$ -ой технологии.

Построение множеств  $X_D^{EL}$  и  $X_D^H$ , для которых выполняется условие (3.15). Эти множества будут включать в себя все эффективные варианты производства электрической (тепловой) энергии, используя ВИЭ. Построение множества  $X'_D = X_D^{EL} \cup X_D^H$ .

*Шаг 3.* Проверка условий (4.6-4.7) для случаев использования земельных площадей и потенциала одного биотоплива для производства как электрической, так и тепловой энергии. Построение множества  $X''_D \subseteq X'_D$ , для которого условия (4.6-4.7) не выполняются.

*Шаг 4.* Определение искомого множества эффективных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс  $X_D = X'_D - X''_D$ .

Вывод о предпочтительности того или иного принадлежащего полученному оптимальному множеству варианта вовлечения ВИЭ в энергобаланс можно сделать только на основании определяемой ЛПР интегральной ценности каждого варианта. В соответствии с методологией «анализа решений» количественную оценку ценностей следует производить с помощью функции полезности, которая в математической форме отражает предпочтения ЛПР. Отношение ЛПР к риску и позволяет сопоставлять различные ценностные соотношения между различными воздействиями.

## 4.2 Оптимальное решение задачи вовлечения возобновляемых источников энергии на основе теории полезности

В главе 3 исследованы подходы к выбору критериев эффективности, соответствующие целям низшего уровня полной иерархии целей систем энергоснабжения с ВИЭ. Пусть имеется  $n$  целей низшего уровня, которым соответствуют критерии целей  $X_i, i=1, \dots, n$ , и пусть  $x_i$  есть конкретный уровень критерия  $X_i$ . Возможное последствие для любого варианта вовлечения ВИЭ в энергобаланс есть вектор  $x=(x_1, \dots, x_n)$ , а полезность этого варианта определяется функцией полезности  $u(x)$ .

В теории многомерной полезности основными являются понятия, в которых рассматриваются условия независимости критериев. При соблюдении определённых условий независимости оценка функции полезности может быть разбита на отдельные части. Каждую из частных оценок можно получить значительно легче, чем общую. Если существуют простые функции  $f, f_1, \dots, f_n$ , такие что

$$u(x) = f[f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)] \quad (4.14)$$

тогда оценка функции полезности сведётся к оценке  $f$  и  $f_i, i=1, \dots, n$ , где  $f_i$  - одномерные функции;  $u$  и  $f$  -  $n$ -мерные функции. Функция  $f$  имеет простые формы представления в случаях выполнения хотя бы одного из следующих основных условий независимости [10]:

- Независимость по предпочтению. Пара критериев  $\{X_1, X_2\}$  независима по предпочтению от других критериев  $X_3, \dots, X_n$ , если порядок предпочтения в пространстве критериев  $X_1, X_2$  не зависит от уровней, на которых фиксированы критерии  $X_3, \dots, X_n$ . Независимость по предпочтению означает, что кривые безразличия в пространстве критериев  $X_1, X_2$  не зависят от уровней других критериев.

- Независимость по полезности. Критерий  $X_1$  называется независимым по полезности от критериев  $X_2, \dots, X_n$ , если порядок предпочтений лотерей, в которых меняются только уровни критерия  $X_1$  при фиксированных значениях других критериев  $X_2, \dots, X_n$ , не зависит от уровней критериев  $X_2, \dots, X_n$ .

- Аддитивная независимость. Критерии  $X_1, \dots, X_n$  называются аддитивно независимыми, если порядок предпочтения для лотерей не зависит от совместного распределения вероятностей для этих лотерей, но зависит только от распределений вероятностей.

Приведём основные соотношения, устанавливающие условия предвзятости предпочтений в удобной функциональной форме.

Пусть даны критерии  $X_1, \dots, X_n$ , где  $n > 3$ . Тогда полилинейная функция полезности

$$\begin{aligned}
u(x_1, \dots, x_n) = & \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n k_{ij} u_i(x_i) u_j(x_j) + \\
& + \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n \sum_{h>j}^n k_{ijh} u_i(x_i) u_j(x_j) u_h(x_h) + \dots + k_{1..n} u_1(x_1) \dots u_n(x_n)
\end{aligned} \tag{4.15}$$

где  $u_i$  - одномерная функция полезности для критерия  $X_i$ , а  $k$  с нижними индексами - весовые коэффициенты, существует тогда и только тогда, когда критерий  $X_i$   $i=1, \dots, n$ , является независимым по полезности от остальных критериев [55]. Для определения функции полезности  $u_i(x_i)$  в форме (3.18) следует оценить индивидуальные функции полезности в области их значений, принадлежащих интервалу  $[0;1]$ , а также весовые коэффициенты, равные в сумме 1.

Пусть даны критерии  $X_1, \dots, X_n$ , где  $n \geq 2$ . Аддитивная функция полезности

$$u(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) \tag{4.16}$$

где  $u_i$  - одномерная функция полезности для критерия  $X_i$ , а  $k_i$  - весовые коэффициенты, существует тогда и только тогда, когда критерии являются аддитивно независимыми [56]. Отметим, что (4.19) является частным случаем (4.18) и соответственно может быть получена оценка для функции полезности  $u(x)$ .

Пусть даны критерии  $X_1, \dots, X_n$ , где  $n \geq 3$ . Функция полезности

$$\begin{aligned}
u(x_1, \dots, x_n) = & \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) + k \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n k_{ij} u_i(x_i) u_j(x_j) + \\
& + k^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n \sum_{h>j}^n k_{ijh} u_i(x_i) u_j(x_j) u_h(x_h) + \dots + k^{n-1} k_{1..n} u_1(x_1) \dots u_n(x_n)
\end{aligned} \tag{4.17}$$

существует тогда, когда пара критериев  $\{X_1, X_i\}$ ,  $i=2, \dots, n$ , является независимой по предпочтению от остальных критериев, а критерий  $X_1$  независим по полезности от остальных критериев [57]. Дополнительная константа  $k$  рассчитывается по значениям  $k_{it}$   $i=1, \dots, n$ : если  $\sum k_i = 1$ , то  $k=0$ , если же  $\sum k_i \neq 1$  то  $k \neq 0$ . Ясно, что если  $k=0$ , то (4.17) сводится к аддитивной функции полезности (4.16). Если  $k \neq 0$ , то умножив правую и левую части равенства (4.17) на  $k$  и прибавив к ним по 1, можно представить (4.17) в виде произведения, которое называется мультипликативной функцией полезности,

$$k u(x_1, \dots, x_n) + 1 = \prod_{i=1}^n k [k_i u_i(x_i) + 1] \tag{4.18}$$

Для определения функции полезности, используя приведённые выше соотношения необходимо:

- проверить условия независимости;
- определить одномерные функции и
- определить весовые коэффициенты.

Рассмотрим методику определения функции полезности с помощью теории оценивания [33].

Проверка условий независимости. Все условия независимости проверяются путём отыскания характерных случаев, в которых структура предпочтений ЛПР противоречит принятому допущению о независимости критериев. Если таких противоречий найти не удаётся, то предполагается, что данное допущение применимо при решении данной задачи.

Рассмотрим вопрос, действительно ли пара критериев  $\{X_1, X_2\}$ , является независимой по предпочтению от остальных критериев  $X_3, \dots, X_n$ . Сначала для критериев задаётся набор относительно нежелательных уровней  $X_3^0, \dots, X_n^0, \dots, x_n^0$  и исследуется порядок предпочтений последствий в плоскости критериев  $X_1, X_2$ . ЛПР просят указать в этой плоскости пары последствий, которые являются равноценными. Пусть последствия  $(x_1, x_2, x_3^0, \dots, x_n^0)$  и  $(x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n)$  равноценны. Затем для критериев  $X_3, \dots, X_n$  устанавливаются новые уровни  $x'_3, \dots, x'_n$  и ЛПР спрашивают, будут ли соответствующие последствия  $(x_1, x_2, x_3^1, \dots, x_n^1)$  и  $(x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n)$  равноценными. Положительный ответ на этот вопрос не противоречит допущению о наличии независимости по предпочтению, отрицательный - исключает такое допущение. Если получены положительные ответы для нескольких пар уровней критериев и для нескольких различных уровней критериев  $X_3, \dots, X_n$ , то кажется приемлемым допустить существование по независимости по предпочтению пары критериев  $\{X_1, X_2\}$  от критериев  $X_3, \dots, X_n$ .

Проверка допущений о наличии независимости по полезности проводится аналогично.

Для проверки приемлемости допущения об аддитивной независимости ЛПР предлагают оценить несколько пар лотерей с одинаковыми маргинальными распределениями вероятностей. Для упрощения процедуры проверки уровни всех критериев, за исключением двух, фиксируются во всех исходах лотерей данной пары. При этом уровни двух критериев, которыми отличаются исходы, полностью покрывают диапазоны их изменения и если лотереи каждой пары эквивалентны для ЛПР, то видимо, разумно принять допущение об аддитивной независимости критериев  $X_1, \dots, X_n$ .

Построение одномерных функций полезности. Общая форма функции полезности полностью определяется отношением к риску. Определим важные понятия, характеризующие отношение к риску [31]:

- *несклонность к риску* имеет место тогда, когда для любой невырожденной лотереи детерминированное последствие, одинаковое с ожидаемым последствием лотереи, более предпочтительно, чем эта лотерея;
- *безразличие к риску* имеет место тогда, когда для любой невырожденной лотереи детерминированное последствие, одинаковое с ожидаемым последствием лотереи, равноценно самой лотерее;
- *склонность к риску* имеет место тогда, когда для любой невырожденной лотереи детерминированное последствие, одинаковое с ожидаемым последствием лотереи, менее предпочтительно, чем эта лотерея.

В работе [33] доказано следующее утверждение: несклонность к риску (безразличие к риску, склонность к риску) означает, что функция полезности является вогнутой (линейной, выпуклой).

Все три случая иллюстрируются на рисунке 4.1 как для возрастающих, так и для убывающих одномерных функций полезности.

Влияние отношения к риску на одномерные функции полезности

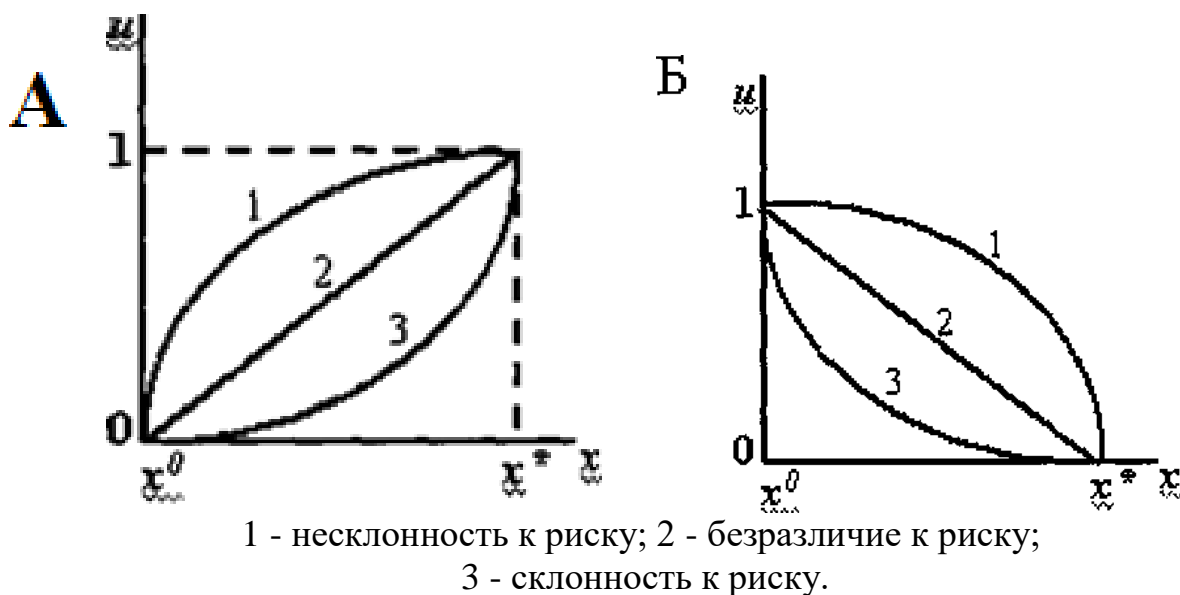


Рисунок 4.1. А - возрастающие функции полезности; Б - убывающие функции полезности;

Сделано предположение, что критерий  $X$  изменяется от минимального уровня  $x^0$  до максимального уровня  $x^*$ , а функция  $u$  нормирована так, что её значения находятся в диапазоне  $[0;1]$ . В большинстве случаев экспоненциальная или линейная форма представления хорошо подходит для описания одномерных функций полезности, когда они входят как составные части в многомерную функцию [97], т.е. классы функций полезности при несклонности к риску, безразличии к риску и склонности к риску имеют вид:

$$u(x) = a + b(-e^{-ex}), \quad (4.19a)$$

$$u(x) = a + b(cx), \quad (4.196)$$

$$u(x) = a + b(e^{cx}), \quad (4.19в)$$

соответственно, где  $a$  и  $b > 0$  - постоянные, определяемые из условия нормирования функции  $u$  так, чтобы область её значений находилась в диапазоне  $[0;1]$ ; коэффициент  $c$  является положительным для возрастающих функций полезности и отрицательным для убывающих.

В (4.19а) и (4.19в) коэффициент  $c$  характеризует присущую ЛПР степень несклонности к риску. Для линейной функции полезности (4.196) коэффициент  $c$  можно принять равным 1 или -1 для возрастающих или убывающих функций соответственно. Экспоненциальные и другие возможные формы однокритериальных функций полезности подробно обсуждаются в работах [33,58].

Для определения одномерных функций полезности необходимы два типа ценностных установок. Первый тип суждений описывает отношение к риску и поэтому позволяет определить общий вид функции полезности, а второй тип определяет конкретный вид функции полезности.

Допустим, что рассматривается функция  $u(x)$  для критерия  $X$  с уровнями, заданными в области  $x^0 \leq x \leq x^*$ . Так как можно с определённой установкой, действительно ли большие уровни  $X$  являются более предпочтительными, чем меньшие, примем, что в данном случае большие уровни являются менее предпочтительными. Для проверки отношения к риску, рассмотрим лотерею 50 - 50 с исходами, соответствующими крайним точкам уровня  $X$ , и сравним её с ожидаемым последствием. Это означает, что ЛПР задаётся вопрос, является ли лотерея 50 - 50, дающая исходы  $x^0$  или  $x^*$ , более предпочтительной, равноценной или менее предпочтительной, чем её детерминированный эквивалент  $\bar{x} \equiv (x^0 + x^*)/2$ . Большее предпочтение для детерминированного последствия указывает, что может иметь место несклонность к риску.

Вопрос повторяется для нижней и верхней половин диапазона изменений  $X$ . Лотерея с равными вероятностями исходов  $x^0$  или  $x^*$  сравнивается с ожидаемым значением  $(x^0 + \bar{x})/2$ . Большее предпочтение для детерминированного исхода вновь указывает на несклонность к риску. Подобным же образом указывает на несклонность к риску большее предпочтение детерминированного последствия  $(\bar{x} + x^*)/2$  по сравнению с лотереей, дающей с равной вероятностью исходы  $\bar{x}$  или  $x^*$ . Если такие оценки, как для всего диапазона, так и для каждой его половины однотипны по отношению к риску, то несклонность к риску является верным допущением. Если получены противоречивые оценки отношения к риску и перепроверка не указывает на ошибки, то необходимо разделить область задания уровней критерия  $X$  на несколько интервалов и определять отношение к риску для каждого из них в отдельности. Так, например, может оказаться, что на промежутке от  $x^0$  до  $x'$  ЛПР не склонно к риску, а на промежутке от  $x'$  до  $x^*$  справедливо предположение о безразличии к риску.

Если одномерная функция полезности имеет вид (4.196), то дополнительных оценок риска не требуется. В этом случае параметр  $c$  равен 1 или -1 в зависимости от того, является ли функция полезности возрастающей или убывающей. Постоянные  $a$  и  $b$  определяются из условий нормирования функции  $u(x)$ , областью значений которой является интервал  $[0;1]$ .

Рассмотрим случаи склонности и несклонности к риску. Допустим, что критерий выбран так, что большему его уровню отвечает большее предпочтение, а ЛПР не склонно к риску. Из теоремы 5 следует, что функция полезности имеет вид:

$$u(x) = a + b(-e^{-cx}), \quad b > 0, \quad c > 0. \quad (4.20)$$

Если  $u(x)$  оценивается для  $x^0 \leq x \leq x^*$ , то нормируя  $u(x)$ , можно положить

$$u(x^0) = 0 \text{ и } u(x^*) = 1. \quad (4.21)$$

Далее необходимо оценить детерминированный эквивалент ЛПР для лотереи, т.е. необходимо определить который ЛПР считает равноценным лотерее 50 - 50 с исходами либо  $x'$ , либо  $x''$ , где  $x'$  и  $x''$  выбраны произвольно. Тогда полезность, приписанная детерминированному эквиваленту, должна быть равна ожидаемой полезности лотереи, так что

$$u(\xi) = 0.5u(x') + 0.5u(x''). \quad (4.22)$$

Подставляя (4.20) в (4.21) и (4.22), получаем три уравнения относительно трёх неизвестных постоянных  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Решая эти уравнения, получим искомую функцию полезности в явном виде. Определение постоянных упрощается, если  $x'$  и  $x''$  выбираются равными  $x^0$  и  $x^*$  соответственно.

Если  $u(x)$  оценивается для чётко определённых и упорядоченных уровней критерия  $X$  ( $x^0, x^1, \dots, x^j, \dots, x^*$ ), где  $x^0$  имеет наименьшую степень предпочтения, а  $x^*$  - наибольшую, то используются условия нормирования (4.24) и для каждого  $x^j$  определяется вероятность  $p_j$  так, чтобы  $x^j$  было равноценно лотерее, дающей исход  $x^*$  с вероятностью  $p_j$ , или  $x^0$  с вероятностью  $1 - p_j$ . Тогда, приравнявая полезности, получаем

$$u(x^j) = p_j u(x^*) + (1 - p_j) u(x^0). \quad (4.23)$$

После оценки одномерных функций полезности необходимо проверять приемлемость этих функций путём сравнения двух лотерей или детерминированного последствия и лотереи. Более предпочтительная ситуация всегда должна соответствовать большему рассчитанному значению ожидаемой полезности. Если такое условие не выполняется, то необходимо скорректировать функцию полезности. Такие проверки проводятся до тех пор, пока не будет найден не противоречивый набор предпочтений.

Оценка весовых коэффициентов. Весовые коэффициенты  $k_i$  в (4.15)- (4.18) характеризуют ценностные соотношения между различными критериями. Если заданы критерии  $X_1, \dots, X_n$ , то требуется  $n$  весовых коэффициентов для аддитивной функции полезности,  $(n+1)$  - для мультипликативной функции и  $(2^n - 1)$  - для полилинейной функции. Пусть  $r$  число таких коэффициентов. Для их определения необходимо построить и решить  $r$  независимых уравнений, в которых весовые коэффициенты будут являться неизвестными.

Пусть функция  $u(x)$  представляется в виде некоторой функции  $f$  для которой  $f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)$  и  $k_1, \dots, k_r$  являются аргументами. Тогда

$$u(x) = f[f_1(x_1), \dots, f_n(x_n), k_1, \dots, k_r], \quad (4.24)$$

где вид  $f$  определяется из условий независимости и  $f_i$  находятся так, как это описано выше.

Самый простой способ построения уравнений состоит в том, чтобы найти два последствия  $x$  и  $y$ , которые с точки зрения ЛПР равноценны, т.е. одинаково предпочтительны. Тогда  $u(x) = u(y)$ , т.е.

$$f[f_1(x_1), \dots, f_n(x_n), k_1, \dots, k_r] = f[f_1(y_1), \dots, f_n(y_n), k_1, \dots, k_r], \quad (4.25)$$

и таким образом получено одно уравнение для определения неизвестных  $k_1, \dots, k_r$ .

На практике лучше зафиксировать  $(n-2)$  критерия и изменять лишь два, для получения пары эквивалентных последствий. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет получена система из  $r$  независимых уравнений вида (4.25), которая может быть решена относительно неизвестных  $k_1, \dots, k_r$ .

В результате последовательного выполнения описанных процедур выполняются все этапы построения многокритериальной функции полезности. Полученная в явном виде функция  $u(x)$  количественно определяет структуру ценностей ЛПР. Подстановка  $u(x)$  в выражение (4.14), которым количественно описывается модель анализа решений, позволяет определить ожидаемую полезность каждого из рассматриваемых вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс. Если ожидаемая полезность одного варианта выше, чем другого, первому варианту следует отдать предпочтение. Таким образом, варианты могут быть ранжированы по их ожидаемым полезностям. Этот результат является основной причиной использования категории полезности в задачах, связанных со значительной неопределённостью.

Интерпретация ожидаемой полезности является сложной задачей по следующим основным причинам [31]:

- полезность - это понятие, не имеющее физического смысла и применяемое для упрощения анализа сложной проблемы принятия решения;
- функция полезности - это индекс предпочтительности того, для кого она построена, в то же время другие лица или группы могут иметь отличные представления о ценностях и, следовательно, иную интерпретацию полезности;



- шкала для функции полезности может выбираться произвольно, поэтому сведения о полезности без сведений о шкале не имеют смысла.

Не смотря на тот факт, что понятие ожидаемой полезности является подходящим для оценки и ранжирования вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс, оно не подходит для составления отчетов и интерпретации ранжирования. Для решения этой проблемы необходимо осуществить обратное преобразование ожидаемой полезности для получения набора последствий, т.е. для каждой ожидаемой полезности  $E(u_j)$  находим набор последствий  $x^j$  такой, что

$$E(u_j) = u(x^j), \quad (4.26)$$

где  $x^j$  - последствия с воздействиями, эквивалентными ожидаемым воздействиям варианта  $S_j$ .

Последствия  $x^j, j=1, \dots, J$ , называемые эквивалентными последствиями для варианта, могут быть использованы, чтобы получить наглядное представление об общих последствиях каждого из возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс.

При практическом применении категории эквивалентных последствий варианта вовлечения ВИЭ в энергобаланс уровни всех критериев, кроме одного, фиксируются для множества  $x^j, j=1, \dots, J$ . Например, если критерии  $X_2, \dots, X_n$  фиксированы на уровнях  $\xi_2, \dots, \xi_n$ , то  $x^j = (x_1^j, \xi_2, \dots, \xi_n)$  и тогда из (5.26) получим

$$E(u_j) = u(x_1^j, \xi_2, \dots, \xi_n) \quad (4.27)$$

Если  $X_1$ , например, себестоимость, тогда  $x_1^j$  есть себестоимость энергии для варианта  $S_j$  при условии, что другие критерии фиксированы на уровнях  $\xi_2, \dots, \xi_n$ . В таком случае  $x_1^j$  (где  $j=1, \dots, J$ ) служит одномерным показателем для оценки различных вариантов. Так как  $x^j$  имеет физическую интерпретацию, последствия воздействий для каждого варианта и различия в воздействиях легче интерпретировать, чем в случае использования  $E(u_j)$ . Уровни  $\xi_2, \dots, \xi_n$  в (4.27) выбираются так, чтобы облегчить интерпретацию  $x_1^j$  и анализ чувствительности. Например, эти остальные воздействия могут быть установлены на ненарушенном или на «нормальном» уровнях.

Анализ чувствительности во многом способствует успешному использованию анализа решений для оценки эффективности различных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс и сводится в целом к повторным оценкам возможных вариантов при изменении некоторой исходной информации. Целью является изучение зависимости оценок вариантов от исходной информации модели. Анализ чувствительности позволяет идентифицировать [31]:

- применимость используемых моделей и данных о воздействиях;
- экспертные оценки и ценностные установки, существенно влияющие на результаты исследования;

- варианты, подлежащие дальнейшему исследованию и варианты, исключаемые из рассмотрения.

Анализ решений с подробным анализом чувствительности обеспечивает достаточное количество информации для того, чтобы убедить ЛПР, что рекомендуемый вариант действительно самый лучший. По итогам процедуры выбора варианта вовлечения ВИЭ в энергобаланс составляется обзор исследования и его результатов, завершающийся обоснованными рекомендациями экспертов.

### **4.3 Структура программного комплекса, реализующего разработанную методику**

В работе использовались различные методы программирования, включившие в себя исследования по методам расчета мощности различных видов вовлечения возобновляемых источников энергии. При создании программы для ЭВМ использовались разработанные авторами программы алгоритмы расчёта, переведенные на машинный язык и реализованные в программной среде разработки Delphi на языке Pascal. Структура разработанной в модульной программы, позволяющей частично автоматизировать применение разработанной методики, показана на рисунке 4.2 и включает следующие модули:

- моделирование поступления и потенциала ВИЭ;
- выбор и расчет технико-экономических показателей технологий преобразования ВИЭ;
- синтез допустимого множества вариантов использования ВИЭ с помощью алгоритма решения задачи (4.4), рассмотренного выше в этой главе;
- выбор и количественная оценка критериев эффективности;
- выбор общего вида многомерной функции полезности, построение одномерных функций полезности и оценка весовых коэффициентов с использованием интерактивных процедур;
- расчет ожидаемой полезности каждого варианта использования ВИЭ, принадлежащего допустимому множеству и интерпретация результатов в графической или текстовой форме с помощью метода эквивалентных последствий.

Программа позволяет рассматривать различные промежутки времени в зависимости от характера и детализации исходных данных.

С помощью математических моделей производится оценка количества энергии, поступающей от каждого источника, в течение заданного промежутка времени. Требуемая точность и характерный период, на котором производится оценка, определяется в зависимости от функциональных задач энергоустановки по преобразованию ВИЭ. Д

ля начала работы с программой нужно запустить файл «Запуск программы.exe», находящийся в каталоге с программой. После окна приветствия откроется окно для ввода данных, показанное на рисунке 4.3.

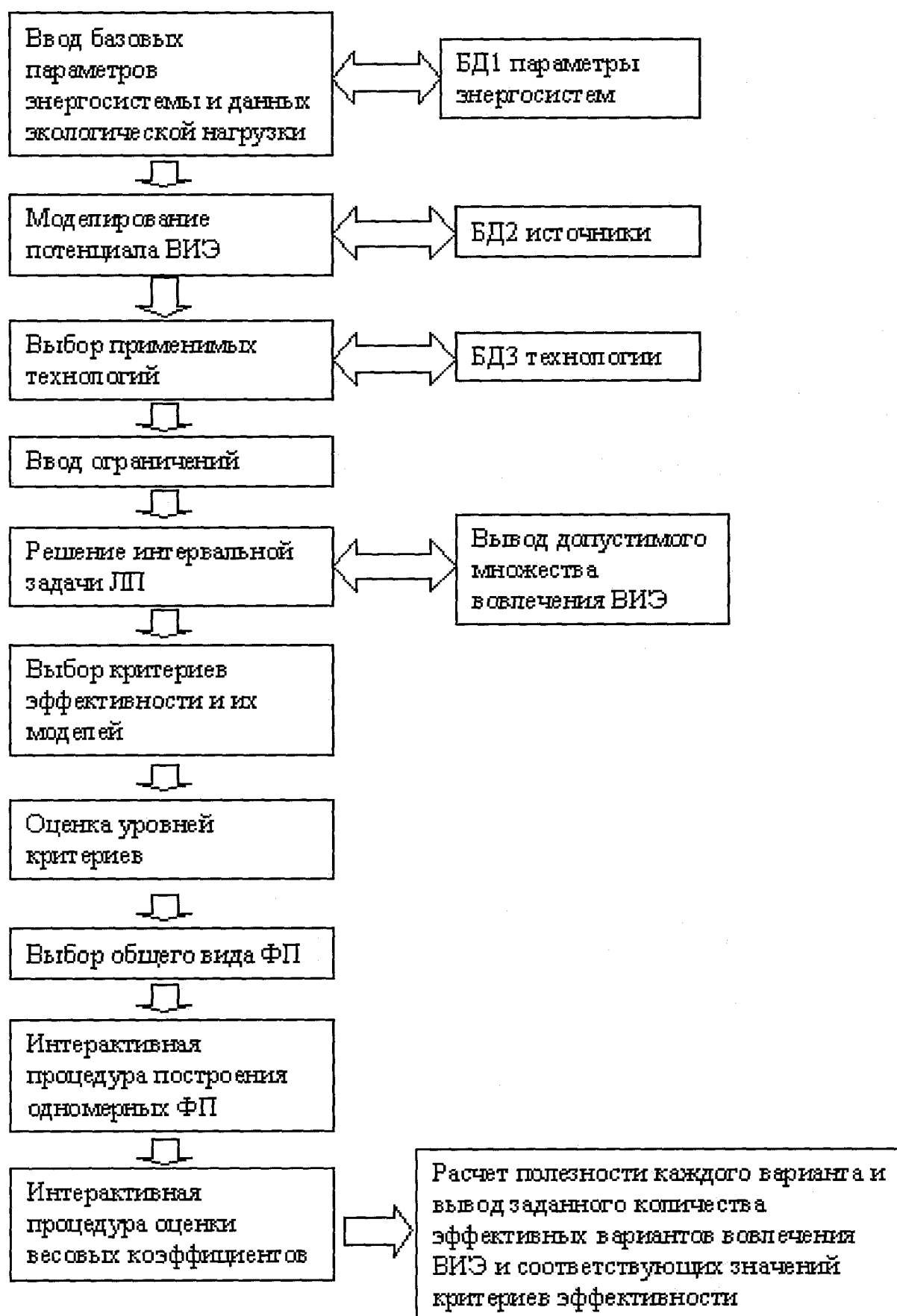


Рисунок 4.2 - Структурная схема пакета прикладных программ, реализующего разработанную методику

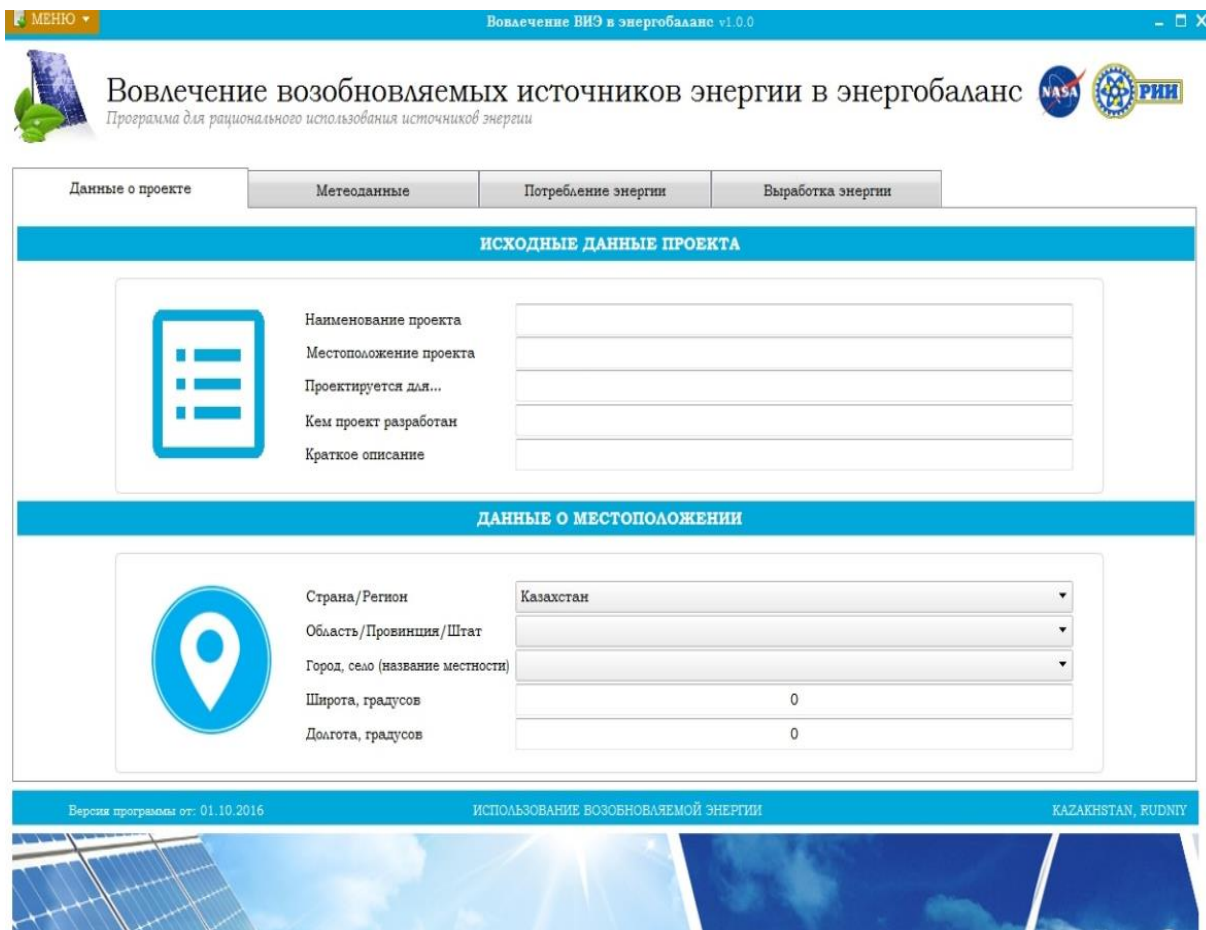


Рисунок 4.3 – Окно с вкладкой для ввода данных о проекте

В первой вкладке программы можно ввести основные информационные данные о проекте. А в разделе «Данные о местоположении» для работы с программой обязательно нужно выбрать местоположение, в частности данные о широте и долготе должны быть введены. При выборе из выпадающих списков местности, города или села, программа автоматически, из собственной базы подгружает координаты этого населенного пункта. Это позволяет программе делать расчеты для конкретной местности в зависимости от ее метеоусловий.

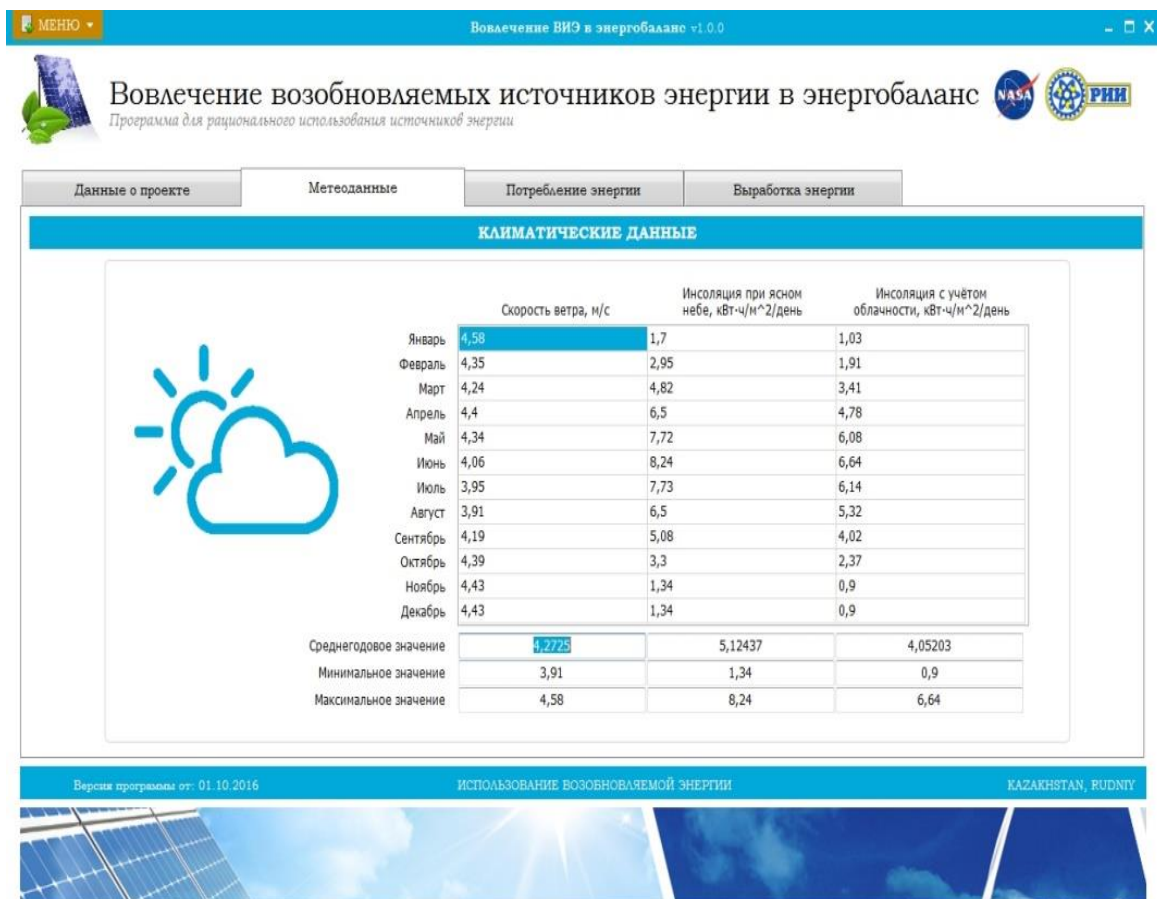


Рисунок 4.4 – Вкладка с загруженными метеоданными населенного пункта

Во второй вкладке, отображённой на рисунке 4.4, показаны метеорологические данные, которые программа взяла из базы NASA по координатам, введенным на предыдущей вкладке. В каждом месяце отображает среднегодовое значение за последние 10 лет.

Следующая вкладка – потребление энергии (рисунок 4.5). Она является обязательно для заполнения, чтобы программа могла рассчитать варианты вовлечения ВИЭ в энергобаланс. Программа позволяет рассчитывать потребление, указанное для каждого дня в течении одного года, а также ежемесячно. Отдельная вкладка с потреблением – «Периодическая нагрузка», в которой можно указать индивидуальные особенности потребления энергии объектом.



Рисунок 4.5 – Вкладка для ввода данных о потреблении энергии объектом

После ввода данных о потреблении нужно выбрать в следующей вкладке, какие источники возобновляемой энергии будут использоваться для получения энергии для заданного объекта. Программа предлагает три источника энергии – энергия ветра, солнца и гидроэнергия. На рисунке 4.6 представлена вкладка с вводом данных по ветру и солнцу. В таблице «Площади, доступные для установки солнечных панелей и ветрогенераторов», нужно указать размеры земельных участков, на которых можно разместить солнечные панели и ветрогенераторы. Среди дополнительных параметров можно указать особенности окружающей местности близ объекта, для которого проводится расчет. Например, высота окружающих объект зданий и деревьев, а также, если есть река, то напор и расход воды.

Для проведения расчета по введенным данным нужно нажать меню и выбрать «Произвести расчет», и, если не было ошибок при вводе данных, программа покажет новую вкладку программы с результатами расчетов, как показано на рисунке 4.7.

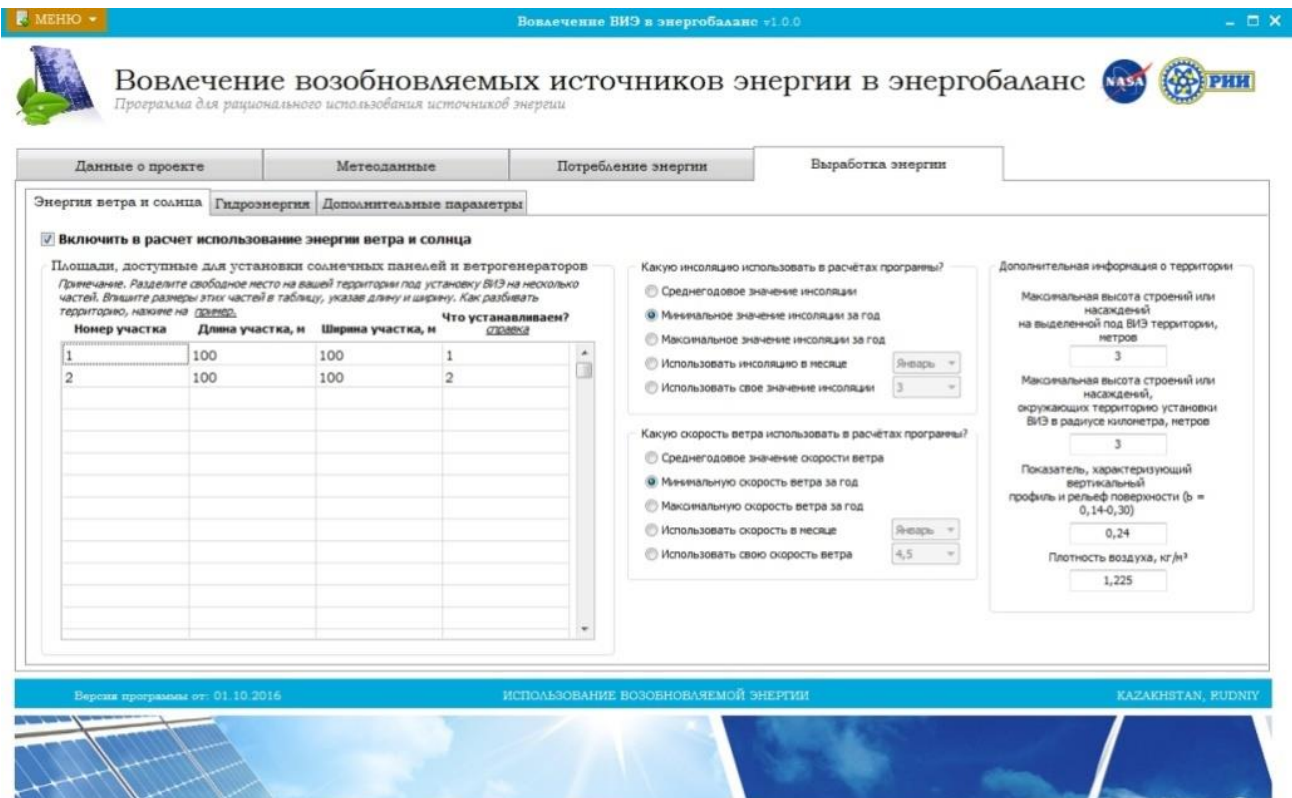


Рисунок 4.6 – Ввод дополнительных параметров по использованию ВИЭ

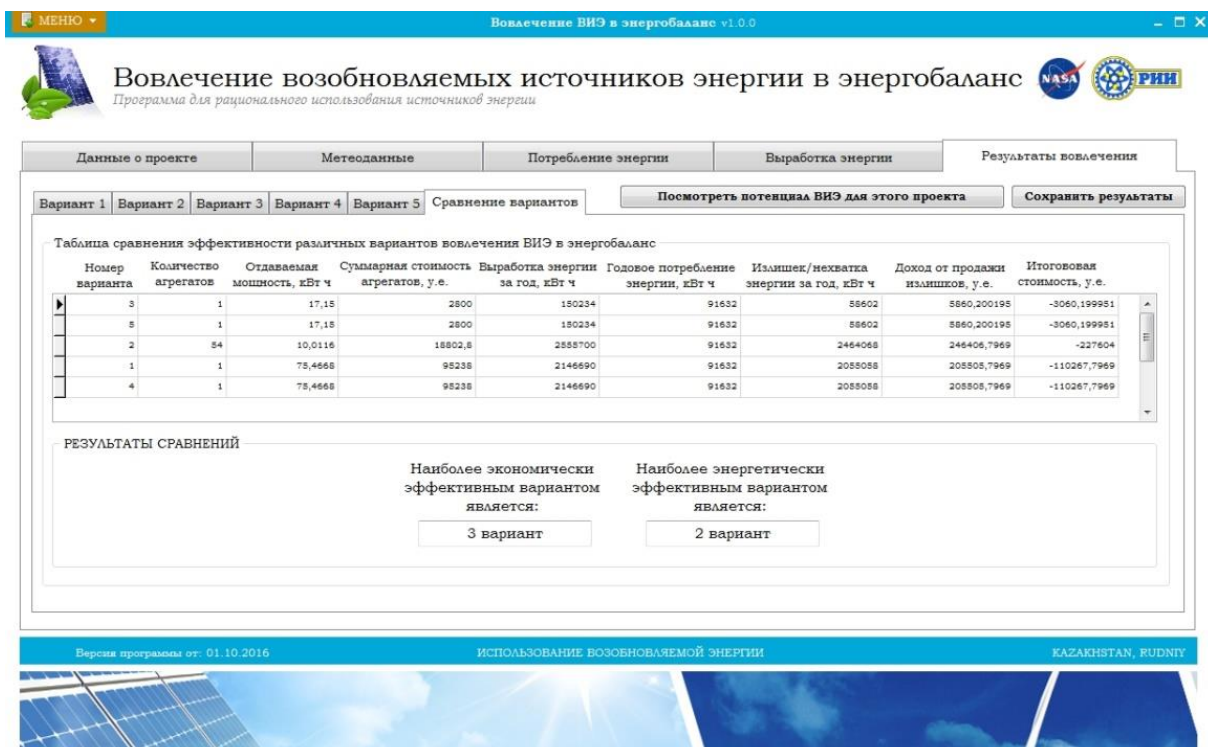


Рисунок 4.7 – Вкладка с результатами расчетов







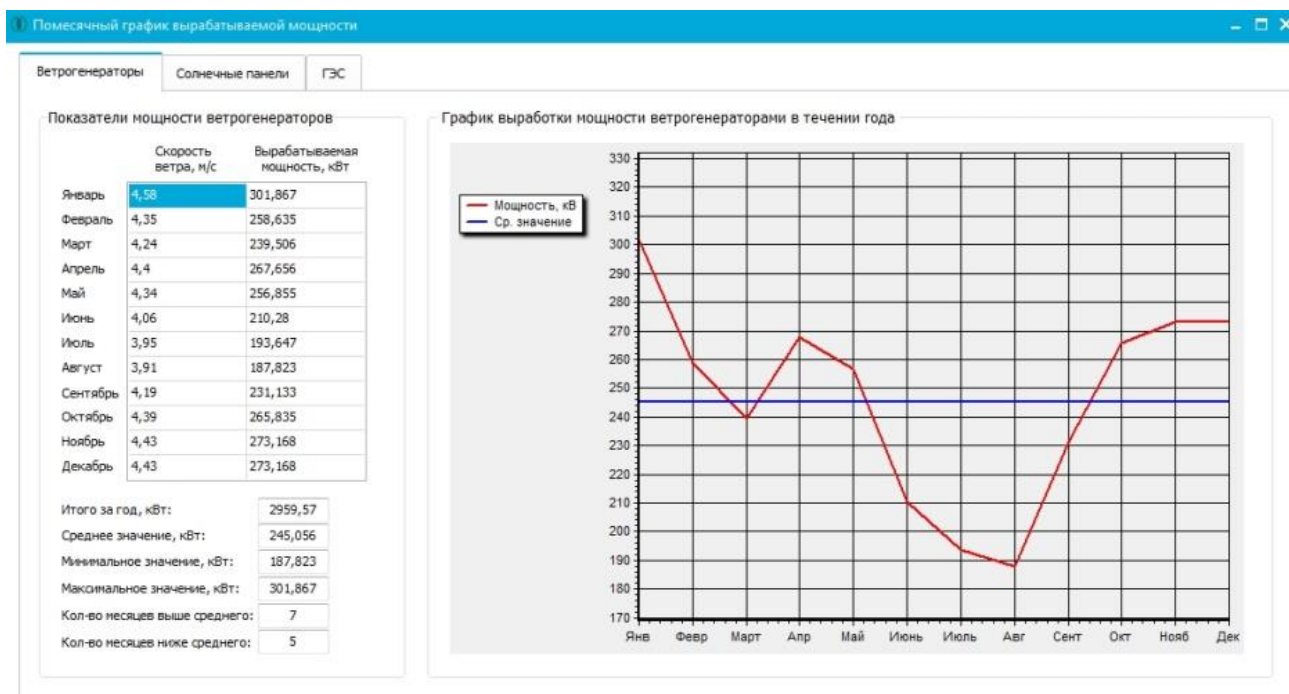


Рисунок 4.9 – Помесичный график вырабатываемой мощности

#### 4.4 Выводы по главе

На основе проведенных исследований представлены по главе следующие выводы:

1. Множество допустимых вариантов производства энергии с использованием технологий преобразования ВИЭ в исследуемом регионе может построено с помощью решения задачи линейного программирования с интервально заданными коэффициентами целевой функции при ограничениях по средней стоимости энергии в энергосистеме, доступным земельным площадям и совместно используемым ресурсам для конкурирующих технологий преобразования возобновляемой энергии.

2. Количественная оценка предпочтений ЛПР по отношению к альтернативным вариантам вовлечения ВИЭ в энергобаланс может эффективно осуществляться с помощью построения многокритериальной функции полезности, позволяющей ранжировать оцениваемые варианты по их ожидаемым полезностям.

3. Синтез описанных в данной главе алгоритмов в единую методику решения задачи оценки эффективности вовлечения ВИЭ в энергобаланс представляет собой новый методический подход, позволяющий получать научно обоснованные результаты исследования в виде ожидаемого набора

последствий выбора каждого из альтернативных вариантов развития энергетического сектора.

4. В главе представлена структурная схема пакета прикладных программ реализующая разработанную методику.

5. Методика оценки эффективности вариантов вовлечения ВИЭ реализована в виде модульного программного обеспечения для ЭВМ в среде Delphi, позволяющая использовать различные форматы входных и выходных баз данных.

6. Приведенные оценочные расчеты, выполненные на основе разработанной методики, полезных объемов вовлечения ВИЭ показывают, что «эффективный потенциал» ВИЭ, рассчитанный с учетом многокритериальности проблемы, существенно превосходит «экономический потенциал».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены основные типы возобновляемых источников энергии: ветроэнергетические системы; солнечные системы; биоэнергетика; топливные элементы; системы когенерации; и т.д. Описаны основные проблемы интеграции возобновляемых источников энергии в электрическую сеть, технические и экономические аспекты, а также рассмотрена нормативно-правовая база для ВИЭ.

Основные результаты исследования сводятся к следующим положениям и выводам:

1. На нынешнем этапе развития большинства технологий производства энергии из возобновляемых источников её стоимость в (2-4) раза выше по сравнению с технологиями сжигания ископаемых топлив, однако, при учёте экологических, социальных и других факторов комплексное вовлечение ВИЭ в энергобаланс может быть эффективным.

2. Система рассмотренных математических моделей ВИЭ, представляющих собой универсальные аналитические модели с переменными параметрами, позволяет оценить комплексный потенциал возобновляемых источников энергии с точностью (10-200% для различных промежутков времени на основе вводимого характерного для каждого источника районирования исследуемого региона.

3. Комплексное использование возобновляемых источников энергии, комбинирование различных взаимодополняющих друг друга источников приводит к существенному повышению эффективности энергокомплексов и энергосистем. Эффективность комплексного использования источников возобновляемой энергии обладает синергетическим эффектом, зависящим от потенциала и комплиментарности различных источников в рассматриваемом регионе.

4. Разработана общая схема комплексного использования ВИЭ, позволяющая рассмотреть возможные варианты производства и преобразования энергии с учетом графиков нагрузки и поступления возобновляемой энергии.

5. Представлена общая иерархия целей системы энергоснабжения с ВИЭ, позволяющая делать обоснованный выбор критериев эффективности для оценки альтернативных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс. Разработаны модели критериев, которые могут быть использованы для их оценки при исследовании конкретной энергосистемы. Рассмотрены основные этапы решения задачи оценки эффективности вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс, используя анализ решений.

6. Рассмотрены некоторые перспективные технологии преобразования ВИЭ и ожидаемая динамика их технико-экономических показателей, которые реализованы в виде эксплуатируемых в настоящее время в мире промышленных и демонстрационных энергетических установок. Приведенные параметры энергетических установок могут быть использованы для количественной оценки критериев эффективности при исследовании возможностей вовлечения ВИЭ в региональный энергобаланс.

7. Дана математическая формулировка задачи построения множества допустимых вариантов производства энергии с использованием различных технологий преобразования ВИЭ в исследуемом регионе, сводящаяся к решению задачи линейного программирования с интервально заданными коэффициентами целевой функции при ограничениях по средней стоимости энергии в энергосистеме, доступным земельным площадям и совместно используемым ресурсам для конкурирующих технологий преобразования возобновляемой энергии.

8. Методика оценки эффективности вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс реализована в виде модульного программного обеспечения, позволяющая использовать различные форматы входных и выходных баз данных. Программы могут эффективно использоваться на этапах регионального энергетического планирования и при обосновании целесообразности размещения объектов возобновляемой энергетики.

9. Приведенные оценочные расчеты, выполненные на основе разработанной методики, полезных объемов вовлечения ВИЭ в региональный энергобаланс показывают, что «эффективный потенциал» ВИЭ может существенно превосходить официальный «экономический потенциал», используемый при разработке энергетических стратегий и обосновании инвестиционных проектов в области возобновляемой энергетики.

10. Примененные в разработанной методике принципы и методы системного подхода позволяют эффективно решать задачи структурных изменений энергетических систем и вовлечения в них новых источников и технологий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабдуллина, З. К. Анализ, роль и назначение возобновляемых источников энергии / З. К. Хабдуллина, Г. А. Хабдуллина, Хабдуллин А.Б.//Мат. межд. научно-прак. конф. «Инновации в науке, образовании и производстве Казахстана». –Алматы, 2015. – С.43-47;
2. Хабдуллина, З. К.Выбор и установка солнечного теплового устройства / З. К. Хабдуллина, Г. А. Хабдуллина, А.Б. Хабдуллин//Мат. межд. научно-прак. конф. «Инновации в науке, образовании и производстве Казахстана». –Алматы, 2015. – С.48-50;
3. Guldana Khabdullina, Arman Khabdullin, Tatyana Glushchenko Review of scientific and technical literature related to the thesis «The usage of renewable energy sources to improve the effectiveness of power supply of social objects»// Abstract Book of Environmental Engineering and Management Section of RTU 57th Students Scientific and Technical Conference, Riga 2016. – P. 25.
4. Хабдуллина,Г.А. Об использовании возобновляемых источников энергии в Северном Казахстане/ Хабдуллина Г.А., Динмухаметов И.Б., Глущенко Т.И. // Сборник научно-аналитических статей «Теория и практика стационарных преобразований в России»/ - Казань, 2016. – С.75-79.
- 5.Беляева Ю.М. Проблемы долгосрочного развития энергетики// Промышленная энергетика. – 2003. - №4.
6. Некрасова В.Г. Перспективы использования азотного топлива// промышленная энергетика.-2008.-№5.
7. Бежан А. В. Теплоснабжение с применением ветроэнергетических установок// “Энергоснабжение”.- 2007.- № 6.
8. Сыркина В. В. Ветроэнергетика – из прошлого через настоящее в будущее//Альтернативная энергетика и экология.- 2009 .- № 4.
9. Матвеева А.В. Энергоэффективный дом с системой солнечного горячего водоснабжения/Промышленная энергетика.-. 2008.- № 6.
10. Губанов В.А., Захаров В.В., Коваленко А.Н. Введение в системный анализ/ Под ред. Л.А. Петросяна. - Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1988.-232 с.
11. Советов Б Л., Яковлев С. А. Моделирование систем. - М.: Высшая школа, 1985.- 271 с.
12. Разработка методических положений по определению эффективности систем энергоснабжения объектов АПК с использованием ВИЭ: Отчет о НИР (заключ.)/ Краснодар.политехи.ин-т (КПИ); Руководитель Симанков В.С. - Краснодар, 1989. - 204 с.:ил.
13. Симанков В.С., Буцацкий П.Ю., Шопин А.В. Методология моделирования физических процессов в энергетических комплексах с ВИЭ и оптимизация их параметров// Труды физического общества республики Адыгея. - 1998. -№3.- С. 18-26.
14. Симанков В.С., Попова Т.П., Моисеенко Л.В. Имитационное моделирование и методы искусственного интеллекта при определении

энергетического потенциала нетрадиционных возобновляемых источников энергии// Моделирование электроэнергетических систем: Тез. докл. X науч. конф. - Каунас, 1991. - С.78-79.

15. Симанков В.С., Зангиев Т.Т. Моделирование нетрадиционных возобновляемых источников энергии при исследовании возможностей их вовлечения в энергобаланс/ ОАО «Технический университет КубГТУ». - Краснодар, 1999. - 19 с. - Деп. в ВИНТИ 31.05.99, № 1752 В-99.

16. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. - М., 1981. - 487 с.

17. Симанков В.С., Зангиев Т.Т. Системный анализ при решении структурных задач альтернативной энергетики/ Ин-т совр. технол. и экон. - Краснодар, 2001. - 151 с.

18. Техничко-экономическое обоснование проекта системы гелиоветровольноэнергетических установок для выработки электроэнергии в прибрежной полосе Азовского и Чёрного морей с учётом берегозащитных мероприятий: Отчет о НИР (промежут.) / Краснодар.политехи.ин-т (КПИ); Руководитель Симанков В.С. - Краснодар, 1991. - 180 с.:ил.

19. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 392 с.

20. DeMeo E.A., Galdo J.F. Renewable Energy Technology Characterizations TR-109496. - EPRI and DOE Topical Report, 1997. - 270 p.

21. Advanced Wind Turbine Conceptual Study/ Final Report, August 1990 - March 1992. - R. Lynette & Associates, July 1995. - 146 p. - Report NREL/TP- 441-692.

22. Соуфер С., Заборски О. Биомасса как источник энергии: Пер. с англ. - М.: Мир, 1985.- 368 с.

23. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. - М.: Наука, 1983. - 454 с.

24. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. - СПб: Изд-во СПбГТУ, 1999. - 512 с.

25. Вошинин А.П., Сотиров Г.Р. Оптимизация в условиях неопределенности. - Издательство МЭИ (СССР); «Техника» (НРБ), 1989. - 224 с.

26. Макаров А.А., Мелентьев Л.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. - Новосибирск, 1973. - 273 с.

27. Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. - М., 1976. - 336 с.

28. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. - М.:СИНТЕГ, 1998. - 376 с. - Серия "Информатизация России на пороге XXI века".

29. Гамм А.З., Макаров А.А., Сансев Б.Г. Теоретические основы системных исследований в энергетике. - Новосибирск: Наука, 1986. - 331 с.

30. Lincoln D.R., Rubin E.S. Cross-media environmental impacts of coal-fired plants: an approach using multi-attribute utility theory// IEEE Trans. Syst. - Man and Cybernetics SMC-9, 1970. - P. 285-290.

31. Кини Р. Размещение энергетических объектов: выбор решений: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 320 с.
32. Fishburn P.C. Nonlinear preference and utility theory. - Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1988. - 259 p.
33. Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with multiply objectives: preferences and value tradeoffs - New York, NY: Cambridge University Press, 1993. - 569 p.
34. Meyer R.F. On the relationship among the utility of assets, the utility of consumption and investment strategy in an uncertain, but time invariant world//
35. Pratt J.W., Raiffa H., Schlaifer R.O. The foundations of decision under uncertainty: an elementary exposition// Amer. Statist. Assoc. J., 1964. - P. 353375.
36. Пиковский А.А., Таратин В.А. Техничко-экономические расчёты в энергетике в условиях неопределённости. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. - 196 с.
37. Симанков В.С. Исследование методов нормирования надёжности и повышения экономичности сельских электрических сетей. Автореферат диссертации... канд. техн. наук. - М.: Изд-во Москов. ин-та инженеров сельскохоз. производства, 1982. - 15 с.
38. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М., 1978. - 416 с.
39. Козлов В.А. К технико-экономической оценке надёжности электро-снабжения промпредприятий// Опыт проектирования и эксплуатации промышленных предприятий. - Л., 1972. - С.86-91.
40. Огороков В.Р. Управление электроэнергетическими системами (технико-экономические принципы и методы). - Л., 1976. - 224 с.
41. Михайлов В.В. Надёжность энергоснабжения промышленных предприятий. - М., 1973. - 168 с.
42. Сыромятников И.А. Методика определения ущербов от перерывов электроснабжения// Надёжность электроснабжения. - М., 1967. - С.21-31.
43. Гук Ю.Б., Лосев Э.А., Мясников А.В. Оценка надёжности электроустановок. - М., 1974. - 198 с.
44. Головкин П.И. Режимы электроснабжения потребителей. - М., 1971. - 112 с.
45. Симанков В.С., Зангиев Т.Т. Экология и нетрадиционные возобновляемые источники энергии/ Кубанский государственный технологический унт. - Краснодар, 1998. - 9 с. - Деп. в ВИНТИ 27.11.1998, № 3501 В-98.
46. EPA Air Quality Index Reporting/ Environmental Protection Agency (EPA) Federal Register, 1998.-Vol.63.-No.236.-P.131-137,- RIN 2060-АН92.
47. Симанков В.С., Зангиев Т.Т. Моделирование процессов вовлечения нетрадиционных возобновляемых источников энергии в энергобаланс для решения экологических проблем// Математика, компьютер, образование: Сб. тез. докл. У1 Международной конф. - М., 1999. - С.249.
48. Хоружая Т.А. Методы оценки экологической опасности. - М.: Экспертное бюро - М, 1998. - 224 с.

49. Экологические проблемы энергетики / Кошелев А.А., Ташкинова Г.В., Чебаненко Б.Б. и др. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. - 322 с.
50. Симанков В.С., Лыжко В.М. Оптимизация электроэнергетических систем по многим критериям/ Краснодар, политехи, ин-т. - Краснодар, 1983. - 33 с. - Деп. в Информэнерго 08.08.1983, № 1328 эн-83.
51. Gruhl J. Alternative electric generation impact simulator - aegis, description and examples/ M.I.T. Energy Laboratory, MIT-EL79-0. - Cambridge, Massachusetts, 1978. - 56 p.
52. Savage L.J. The foundations of statistics. - 2d rev. ed. - New York: Dover Publications, 1972. - 310 p.
53. Von Neumann J., Morgenstern O. Theory of games and economic behavior. - 2nd ed. - Princeton: Princeton University Press, 1953. - 641 p.
54. Шрейдер Ю.А. Равенство, сходство, порядок. - М.: Наука, 1971.-224 с.
55. Hammond J.S., Keeney R.L., Raiffa H. Smart choices: a practical guide to making better decisions. - Boston: Harvard Business School Press, 1999. - 244 p.
56. Fishburn P.C. Utility theory for decision making. - Huntington, N.Y.: R. E. Krieger Pub. Co., 1979. - 234 p.
57. Keeney R.L. Wise choices: decisions, games, and negotiations. - Boston: Harvard Buiness School Press, 1996. - 478 p.
58. Marshall K.T., Oliver R.M. Decision making and forecasting: with emphasis on model building and policy analysis. - New York: McGraw-Hill, 1995. - 407 p.
59. Симанков В.С., Тулин А.А., Смирнов О.В. Применение экспертных систем в АСУ/ Техн. ун-т Кубан. гос. технол. ун-та. - Краснодар, 2000. - 42 с. - Деп. в ВИНТИ 24.07.2000, № 2059 - В00.
60. Симанков В.С., Зангиев Т.Т. Методологические основы поддержки принятия решений при оценке эффективности использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии// Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве: Тез. докл. I Всерос. науч.-техн. конф. - Нижний Новгород, 1999. - С.7.
61. Симанков В.С., Зангиев Т.Т. Оценка эффективности использования тонких пленок в фотоэлектрических системах// Электротехника. - 1998. - №12. - С.8-12.
62. Симанков В.С., Лыжко В.М., Коломиец И.А., Скудина И.А. Энергоснабжение животноводческих объектов с использованием нетрадиционных возобновляемых источников// Нетрадиционные виды энергетики и проблемы энергоинверсии: Тез. докл. регион, науч.-теор. конф. - Краснодар, 1989. -С.5-7
63. Симанков В.С., Михайлов А.А. Теоретические основы построения комплексного показателя эффективности// Повышение надежности эксплуатации и реконструкция промышленных зданий и сооружений: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Рудный, 1990. - С.116-118.
64. Симанков В.С., Луценко Е.В. Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов. - Краснодар: Изд-во ТУ КубГТУ, 1999.-309 с.



65. Сивков С.И. Методы расчёта характеристик солнечной радиации. - JL: Гидрометеиздат, 1968. - 185 с.

66. Хабдуллина, Г. А. К вопросу об использовании автономных энергосистем от возобновляемых источников энергии/ Хабдуллина Г. А., Алмагамбетов А.Т. , Легасова Г.К. , к.э.н. Глущенко Т.И.// Сборник научно-аналитических статей «Теория и практика стационарных преобразований в России»/ - Казань, 2016. – С.9-13

67. Алмагамбетов, А.Т. Эффективность использования солнечных коллекторов в условиях Костанайской области/ Алмагамбетов А.Т. , Хабдуллина Г.А. , Легасова Г.К. // Сборник научно-аналитических статей «Теория и практика стационарных преобразований в России»/ - Казань, 2016. – С.13-17.

68. Khabdullin, A. / Khabdullin A., Khabdullin A., Khabdullina Z., Khabdullina G., Terehovics E., Veidenbergs I., Blumberga D. Why solar electricity has high potential for Kazakhstan industries//International scientific conference «Environmental and Climate Technologies», CONECT 2016.- Energy Procedia 113, 2017.- P.417-422.