

На правах рукописи



Губий Елена Валерьевна

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЛАНТАЦИЙ ДЛЯ ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ ОТДАЛЕННЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Специальность 05.13.18

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН).

Научный
руководитель
Официальные
оппоненты:

Зоркальцев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор.

Краковский Юрий Мечеславович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», кафедра информационных систем и защиты информации, профессор.

Кузьмин Олег Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», Институт математики, экономики и информатики, кафедра теории вероятностей и дискретной математики, заведующий кафедрой.

Ведущая
организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Защита диссертации состоится «15» января 2020 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2019-4/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим отправлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.017.01,
доктор технических наук, профессор



Александр Матвеевич Клер

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы обусловлена целесообразностью исследования вопросов эффективного замещения традиционных ископаемых видов топлива местными возобновляемыми экологически более чистыми источниками энергии. В качестве такого источника рассматриваются энергетические плантации (ЭП), представляющие собой специальные лесные насаждения, биомасса с которых используется для получения энергии.

Представляется целесообразным исследование эффективности ЭП для топливоснабжения:

- отдаленных от крупных транспортных магистралей населенных пунктов, доставка ископаемого топлива в которые является дорогостоящей;
- территорий с повышенными требованиями к охране окружающей среды, как, например, туристско-рекреационная зона на побережье озера Байкал.

Для проведения такого исследования необходимо создание специального инструментария (математических моделей и методов, комплексов программ), позволяющего системно описывать и оптимизировать все этапы технологической цепочки создания и функционирования ЭП.

Степень разработанности темы исследования. Исследования эффективности ЭП с помощью математических методов в мире проводились крайне мало. Первым данным вопросом занимался финский математик О. Hellman. Он занимался поиском оптимального срока произрастания древесины. Однако в его исследованиях не изучались вопросы заготовки, транспортировки и хранения биотоплива, влияющие на его конечную стоимость.

Важную роль в изучении эффективности ЭП занимают работы биологов. Большой вклад в изучение продуктивности ЭП внесли L. Christersson и T. Ericsson и др.

Вопросы эффективности производства твердого биотоплива на энергетических плантациях рассматривались в работах зарубежных исследователей. Масштабные исследования по оценке себестоимости биотоплива проведены в Швеции (H. Rosenqvist, M. Nordborg). Экономические аспекты использования разных видов растений на энергетические цели в условиях Польши изучаются E. Krasuska, H. Rosenqvist, M. Borzecka-Walker и др. В Республике Беларусь с 2006 года на экспериментальных участках проводятся исследования по оценке эффективности производства биомассы на энергетические цели. Результаты исследований показывают экономическую эффективность ЭП в условиях этих стран.

При анализе эффективности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов особую роль играют вопросы обеспечения надежности топливоснабжения, поскольку нехватка топлива в таких условиях часто не может быть компенсирована оперативными поставками топлива по стабильным ценам. Методической основой в исследовании вопросов надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов с ЭП могут служить работы по проблемам надежности и маневренности топливоснабжения М.А. Великанова, П.В. Горюнова, В.И. Зоркальцева, Ю.А. Мазура, А.С. Некрасова, Л.С. Хрилева и др.

Целью работы является создание инструментария для анализа и комплексной оптимизации процессов создания и функционирования ЭП для обеспечения котельно-печным топливом отдаленных населенных пунктов с учетом действия случайных факторов, влияющих на эффективность и надежность топливоснабжения.

Задачи.

1. Создание комплекса математических моделей для исследования всей технологической цепочки производства, транспортировки и хранения биотоплива с ЭП с учетом действия случайных факторов.
2. Разработка математических методов для описания действия случайных факторов в производстве, потреблении и в переходящих запасах топлива при реализации моделей анализа и синтеза надежности топливоснабжения с ЭП.
3. Создание программно-вычислительного комплекса (ПВК) для реализации математических моделей анализа эффективности и надежности топливоснабжения с ЭП.
4. Апробация разработанных моделей и вычислительного комплекса для оптимизации функционирования ЭП и анализа надежности на примерах, близких к условиям Иркутской области по ценовым и природно-метеорологическим характеристикам.

Объект исследования – энергетические плантации.

Предмет исследования – математические модели, вычислительные методы, ПВК для анализа эффективности и надежности функционирования ЭП.

Научная новизна работы.

1. Впервые произведено полное описание функционирования ЭП в виде комплекса математических моделей, предназначенного для анализа эффективности и надежности топливоснабжения.
2. Разработаны, теоретически и экспериментально обоснованы математические методы для описания действия случайных факторов в потреблении и производстве топлива с ЭП, а также в переходящих эксплуатационных запасах топлива, реализующий марковский стационарный эргодический процесс.

3. Математические модели для анализа эффективности и надежности ЭП реализованы в виде ПВК.

4. На основе созданной модели анализа эффективности топливоснабжения с ЭП на примере, близком к условиям Иркутской области, оценена эффективность ЭП при разных объемах потребности в топливе населенного пункта, возможных изменениях дальности перевозок, а также при варьировании цен на привозное топливо.

5. На основе разработанной модели анализа надежности топливоснабжения с ЭП на примере, близком к условиям Иркутской области, проведен анализ надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов биотопливом с ЭП, осуществлены оценки оптимального состава средств обеспечения надежности.

Теоретическая значимость работы. Разработаны, теоретически и экспериментально обоснованы методы анализа эффективности ЭП, алгоритмы описания действия случайных факторов в потреблении и производстве топлива, алгоритм, реализующий марковский стационарный эргодический процесс для моделирования переходящих запасов топлива многолетнего регулирования.

Практическая значимость работы. Результаты расчетов на модели позволяют оптимизировать затраты и анализировать эффективность и надежность топливоснабжения с ЭП для конкретных возможных ценовых, природных и прочих условий.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математической статистики для подготовки исходных данных, имитационное моделирование, моделирование методом Монте-Карло, функционально-стоимостной анализ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Комплекс математических моделей для анализа эффективности и надежности топливоснабжения с ЭП, учитывающий всю технологическую цепочку производства, транспортировки и хранения биотоплива, а также действия случайных факторов.

2. Математические методы для описания действий случайных факторов в производстве, потреблении и переходящих запасах топлива.

3. ПВК для анализа и оптимизации состава средств обеспечения надежности топливоснабжения с ЭП отдаленных населенных пунктов.

4. Технология проведения исследования эффективности и надежности топливоснабжения с ЭП отдаленных населенных пунктов.

5. Апробация созданного инструментария на примерах, соответствующих природным условиям Иркутской области.

Достоверность научных результатов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждаются согласованностью полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными, обеспечи-

вается применением строгих методов математического моделирования и статистической обработки данных.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях: «Актуальные проблемы права, экономики и управления», Иркутск, 2011 г.; «Охрана и рациональное использование животных и растительных ресурсов», Иркутск, 2012 г.; «Проблемы оптимизации и экономические приложения», Омск, 2012 г.; «XLIII конференция-конкурс научной молодежи». Иркутск, 2013 г.; «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Иркутск 2013 г.; VIII Международная школа-симпозиум «Анализ, моделирование, управление, развитие экономических систем (АМУР-2014)», Симферополь, 2014 г.; «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2014», Новосибирск, 2014 г.; 48-ая конференция-конкурс молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике», Иркутск, 2018 г.; XIV Международная Азиатская школа-семинар «Проблемы оптимизации сложных систем», оз. Иссык-Куль, 2018 г.; XIX Всероссийский симпозиум с международным участием «Сложные системы в экстремальных условиях», Красноярск, 2018.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликована 21 печатная работа, в т.ч. 7 – в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК, 1 – монография и 1 – учебное пособие. Получено 1 свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, списка литературы, включающего 115 наименований, 7 приложений. Работа изложена на 148 страницах, содержит 27 рисунков, 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность рассматриваемой проблемы, научная новизна, сформулированы цель, задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит вводно-обзорный характер. Дан сравнительный анализ видов биотоплива, представлены экологические преимущества от использования биомассы с ЭП перед традиционными источниками энергии, приведены данные о современном состоянии использования биомассы в мире, сделан обзор литературы по теме исследования. Дано обоснование цели и задач исследования. Сделан вывод о том, что создание инструментария для изучения вопросов эффективности замены традиционного котельно-печного топлива на биотопливо с ЭП является актуальным.

Во второй главе изложена математическая модель анализа эффективности ЭП.

В качестве исходной формы для анализа рассматривается ЭП в виде круга с населенным пунктом в центре. При такой конфигурации плантации средняя дальность перевозок и затраты на транспортировку минимальны. Круг разделен на сегменты, их количество равно времени созревания древесины (выраженному в годах). Каждый год на одном из сегментов весной осуществляются лесозаготовки, а осенью – посадки.

Основным показателем для анализа экономической эффективности ЭП предлагается использовать приведенные затраты, рассчитываемые по формуле:

$$C(x) = I(x) \cdot E_N + CO(x). \quad (1)$$

Здесь x – вектор эндогенных параметров (количество работников разных профессий, площадь ЭП, длины дорог разных категорий, количества технических устройств и строений разных типов и др.); $I(x)$ – капитальные затраты, млн руб.; $CO(x)$ – среднегодовые текущие затраты, млн руб./год; E_N – коэффициент эффективности капиталовложений (можно интерпретировать как процент на инвестиции, осуществляемые за счет кредита, или как ожидаемую величину дивидендов от вложений в акции, в зависимости от способов формирования инвестиций в создание ЭП).

Вычисления на модели анализа эффективности ЭП осуществляется путем последовательного определения значений отдельных эндогенных параметров с привлечением варьируемых экзогенных показателей (оценок урожайности, характеристик и цен отдельных видов техники и др.). Эти вычисления представлены в виде методик расчета отдельных составляющих капитальных и текущих затрат.

На базе данной модели может осуществляться в итеративном режиме выбор оптимального состава технических устройств, технологий на отдельных этапах производственной деятельности, оптимального вида и сроков выращивания растений, другие частные и системные задачи. Приведем две из них.

Минимизация приведенных затрат на топливоснабжение населенных пунктов с ЭП:

$$C(x) \rightarrow \min \quad (2)$$

при условиях

$$R(x) \geq Q, \quad (3)$$

$$x \in X, \quad (4)$$

где $R(x)$ – объем годового производства биотоплива, т у.т. (тонны условного топлива); Q – объем годовой потребности в топливе, т у.т.; X – множество векторов E^n допустимых значений переменных по другим, кроме (3), ограничениям. Здесь E^n – евклидово пространство.

Выбор оптимального сочетания использования ЭП и привозного топлива:

$$C(x) + p_L L \rightarrow \min \quad (5)$$

при ограничениях

$$R(x) + L \geq Q, \quad (6)$$

$$L \geq 0, \quad (7)$$

и условия (4). Здесь L – искомый объем использования привозного топлива, т у.т.; p_L – заданная цена привозного топлива с учетом транспортных затрат, руб./т у.т.

Можно выделить следующие особенности модели анализа эффективности ЭП.

1. Нелинейность многих зависимостей. Например, нелинейный характер носит зависимость объемов транспортных работ от объемов годового производства топлива.

2. Дискретность значений отдельных переменных, в частности количества единиц техники разных типов, количества работников и др.

3. Неопределенность значений отдельных экзогенных показателей (случайный характер величины годовой потребности в топливе, продуктивности ЭП в конкретных условиях, цен на оборудование, моторное топливо и др.).

Важной для экономического анализа характеристикой являются предельные затраты

$$MC(Q) = \frac{\Delta C(Q)}{\Delta Q}, \quad (8)$$

где $C(Q)$ – минимальные приведенные затраты в задаче (2)–(4) на производство биотоплива в объеме Q .

Из-за наличия условий целочисленности на значения некоторых переменных предельные затраты корректно вычислить нельзя. Поэтому рассматривается модификация модели, в которой исключены условия целочисленности. Такая модификация дает оценки затрат снизу, уточняемые после введения условий целочисленности. В качестве оправдания допустимости исключения условий целочисленности может служить возможность аренды на неполные сроки отдельных видов техники.

Апробация модели эффективности ЭП в детерминированных условиях. Модель апробирована на примере, близком к природно-метеорологическим условиям южных районов Иркутской области. При потребности в топливе 7950 т у.т. (соответствует численности населения около 6000 человек), сроке созревания древесины 6 лет, продуктивности ЭП 5 т у.т./га площадь ЭП в форме круга составит около 95 км², ее радиус – 5,5 км.

Как видно из рисунка 1, приведенные затраты являются выпуклой функцией от объемов производства биотоплива. Затраты на топливоснабжение привозным топливом, поставляемым по фиксированной цене (в данном примере равной 2500 руб./т у.т.), являются линейной функцией от объемов производства. Затраты на топливоснабжение с ЭП меньше, чем затраты на топливоснабжение за счет привозного топлива при годовой потребности в топливе менее 14500 т у.т. Оптимальный объем производства биотоплива (объем, при котором предельные затраты равны стоимости привозного топлива) составляет 7950 т у.т. До тех пор пока предельные затраты на производство биотоплива ниже затрат на привозное топливо, топливоснабжение следует осуществлять только с ЭП. После того как предельные затраты станут равны цене привозного топлива, дополнительные объемы целесообразно наращивать за счет привозного топлива.



Рисунок 1 – Зависимость стоимости топливоснабжения из разных источников от объема потребления топлива

Приведенные затраты на производство 7950 т у.т. биотоплива составляют 11,5 млн руб./год. Если бы этот объем покрывался привозным топливом, то затраты составили бы 19,9 млн руб./год. Разница в 8,4 млн руб./год является максимальным эффектом от ЭП при рассматриваемых условиях.

Из рисунка 2 видно, что при увеличении цены привозного топлива возрастает объем, при котором выгоднее осуществлять топливоснабжение с ЭП и оптимальный объем использования ЭП. Так, при увеличении цены привозного топлива до 3500 руб./т у.т. (в 1,4 раза) оптимальный объем производства увеличивается до 11200 т у.т. (в 1,4 раза). Максимальный эффект от ЭП в таком случае возрастет до 18,2 млн руб./год (в 2,2 раза).

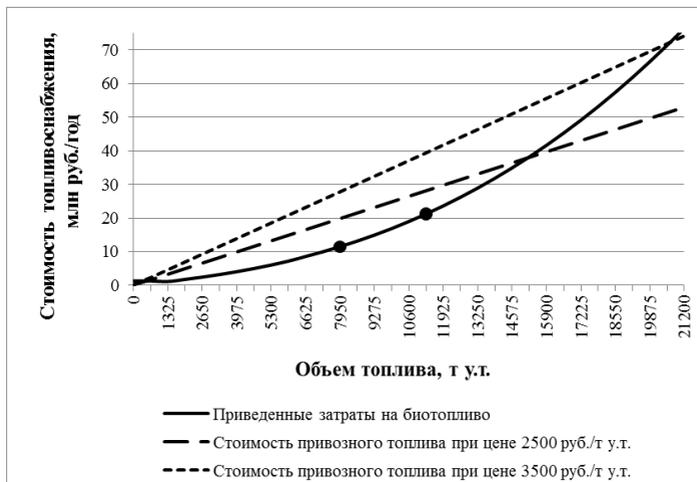


Рисунок 2 – Зависимость стоимости топливоснабжения из разных источников от объема потребления топлива при варьировании цен на привозное топливо

Исследование влияния транспортного фактора на экономическую эффективность ЭП. При фиксированной потребности в топливе с увеличением средней дальности грузоперевозок в 2 раза приведенные затраты на производство биотоплива возрастут с 11,5 до 17,4 млн руб./год (в 1,5 раза). Экономический эффект в этом случае сократится с 8,4 до 2,5 млн руб./год (в 3,4 раза). Если же учесть, что оптимальный объем потребности в топливе снизится с 7950 до 5300 т у.т. (в 1,5 раза), максимальный экономический эффект снизится с 8,4 до 4,9 млн руб./год (в 1,7 раза).

Увеличение цены на привозное топливо до 3500 руб./т у.т. при увеличенной дальности перевозок в два раза приведет к оптимальному объему производства топлива на ЭП 6600 т у.т./год. Экономический эффект в таком случае составит 10,7 млн руб./год.

Представленные результаты исследований на модели анализа эффективности ЭП показывают, что в сложившейся ценовой ситуации ЭП потенциально могут быть экономически эффективны для топливообеспечения отдаленных населенных пунктов в условиях Иркутской области. При этом этот вывод справедлив без учета большого положительного экологического эффекта от ЭП, который может и должен приобретать стоимостное выражение.

Экономическая эффективность ЭП существенно зависит от конкретных условий, в том числе от объемов потребности в топливе, конфигурации и степени удаленности территорий, отводимых под ЭП, от цены при-

возного топлива. Все это обуславливает необходимость в каждом конкретном случае анализа всей технологической цепочки ЭП на основе математической модели.

В третьей главе представлены модели анализа и синтеза надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов с ЭП. Рассматриваются три последовательно вложенные модели (рисунок 3): имитационная модель функционирования ЭП в течение года, модель анализа надежности, модель синтеза надежности топливоснабжения с ЭП.

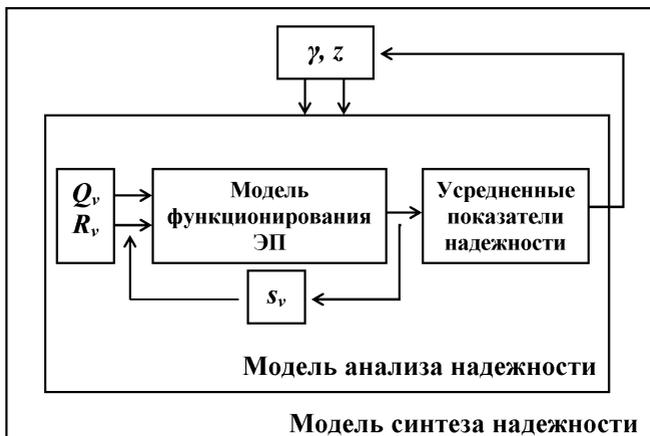


Рисунок 3 – Система вложенных моделей анализа и синтеза надежности топливоснабжения с ЭП (γ – резерв мощности, z – емкость складов, s_v – запасы топлива, R_v – объем производства топлива, Q_v – потребность в топливе, v – номер итерации, где $v = 0, \dots, V$)

В этих моделях рассматриваются три случайные величины: годовая потребность, годовой объем производства и переходящие из года в год запасы топлива. Экзогенными для расчетов являются величины математического ожидания годовой потребности в топливе \bar{Q} , удельные потери при хранении топлива в течение года α , удельные ущербы от дефицита топлива μ , приращения приведенных затрат $\Delta C(\gamma, z, R_v, s_v)$, оцениваемые на модели анализа эффективности ЭП в детерминированных условиях, характеристики вероятностей реализации случайных величин годовых объемов потребления и производства топлива.

Случайные отклонения потребности в топливе определяются на основе данных отклонений интегральной разности температур внутри и вне здания за предшествующие годы

$$b^\tau = B^\tau / \bar{B}, \tau = 1, \dots, T, \quad (9)$$

где B^τ – значение интегральной разности температур внутри и вне зданий за отопительный период τ ; \bar{B} – среднее арифметическое значение величины B^τ ; T – количество отопительных периодов прошлых лет, для которых имеются данные ежедневных наблюдений температур.

Поскольку случайная величина производства топлива имеет ограниченный интервал возможных значений, случайные отклонения производства топлива описываются в виде усеченного нормального распределения. Математическое ожидание производства топлива \bar{R} является расчетной оптимизируемой величиной. Заданными являются величина среднеквадратического отклонения σ и коэффициенты δ^1, δ^2 , определяющие интервал возможных значений $[R^1, R^2]$ случайной величины производства топлива. Границы этих интервалов задаются по правилам: $R^1 = \delta^1 \bar{R}$, $R^2 = \delta^2 \bar{R}$.

Случайная величина переходящих запасов топлива определяется на базе алгоритма, реализующего марковскую последовательность изменения этих запасов, поскольку вероятностные характеристики запасов топлива S_{v+1} определяются только значением S_v .

Верхний уровень системы вложенных моделей представляет **модель оптимизации (или синтеза) состава средств обеспечения надежности топливоснабжения**. В качестве мер обеспечения надежности топливоснабжения с ЭП рассматриваются создание резервов мощности в производстве топлива γ и создание складов емкостью z для хранения запасов топлива. Величины γ и z являются оптимизируемыми показателями. Обе эти переменные рассматриваются как безразмерные величины и определяются относительно значения математического ожидания потребности в топливе.

Под резервом мощностей понимается относительное превышение математического ожидания производства котельно-печного топлива \bar{R} над математическим ожиданием потребности \bar{Q} :

$$\gamma = (\bar{R} - \bar{Q}) / \bar{Q}. \quad (10)$$

В модели синтеза надежности исследуется и решается двухпараметрическая задача оптимизации

$$F(\gamma, z) \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$\gamma \geq 0, \quad (12)$$

$$z \geq 0, \quad (13)$$

где $F(\gamma, z)$ – функция математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита. Ее значение определяется в результате расчетов на модели анализа надежности.

Оптимизация осуществляется путем сопоставления значений функции $F(\gamma, z)$ при последовательном варьировании значения каждого из аргументов (методом покоординатного спуска). Эта итерационная процедура осуществляется до тех пор, пока оптимальные значения перестанут существенно изменяться по итерациям. Для решения задачи одномерной оптимизации может применяться метод золотого сечения. В целях анализа последствий имеющейся неопределенности исходных данных используется варьирование с равномерной сеткой соответствующих исходных данных и аргументов оптимизируемой функции.

Модель анализа надежности топливоснабжения основывается на многократной имитации функционирования систем топливоснабжения в течение года, охватывающего отдельный отопительный период. Обозначим $v = 0, \dots, V$ номер итерации имитации.

В этой модели используется метод статистических испытаний (Монте-Карло) в виде двух процедур – задания на каждой итерации случайных величин потребности и производства топлива.

В реализованном варианте случайная величина потребности в топливе определяется по правилу:

$$Q_v = b_v \cdot \bar{Q}, \quad (14)$$

где b_v – одно из случайно выбранных значений относительных величин отклонений интегральной разности температур в прошлые зимы (9). Случайная величина производства топлива определяется методом Монте-Карло, используя заданные значения параметров усеченного нормального закона распределения.

Выбор случайной величины переходящих запасов топлива осуществляется по специальному алгоритму в рамках имитационной модели функционирования ЭП в течение года. На имитационной модели рассчитываются показатели, характеризующие функционирование плантации в течение года (на данной итерации). После прохождения всех итераций рассчитываются обобщающие показатели надежности и усредненных затрат топливоснабжения с ЭП. Приведем некоторые из них.

1. Математическое ожидание дефицита

$$MD = \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V D_v, \quad (15)$$

где D_v – величина дефицита на итерации v , т.у.т.

2. Оценка вероятности появления дефицитных ситуаций

$$PD = \frac{TD}{V}, \quad (16)$$

где TD – количество номеров испытаний, при которых возникает дефицит, рассчитывается по формуле

$$TD = \sum_{v=1}^V \text{sgn}(D_v). \quad (17)$$

Здесь

$$\text{sgn}(D_v) = \begin{cases} 1, & \text{если } D_v > 0 \\ 0, & \text{если } D_v \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

3. Математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежно-сти и ущербов от дефицита

$$F(\gamma, z) = \mu MD + \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V \Delta C_v(\gamma, z, R_v, s_v), \quad (19)$$

где μ – удельные ущербы, млн руб./т у.т. (включают в себя стоимость привозного топлива и стоимость его экстренной транспортировки до места потребления при возникновении дефицита).

Имитационная модель функционирования системы топливо-снабжения с ЭП в течение года. Обозначим u_v остатки запасов топлива на конец отопительного периода. Задано значение $u_0 \geq 0$. Величина запасов, переходящих в следующий отопительный период, определяется, исходя из известной величины остатков топлива предыдущего отопительного периода:

$$s_v = \min \{(1 - \alpha) \cdot u_{v-1}; z\}, \quad v = 0, \dots, V. \quad (20)$$

В этом выражении учитываются потери при хранении топлива в течение года α и ограниченность емкости складов для запасов z .

Величина располагаемых ресурсов топлива определяется как сумма произведенного биотоплива и запасов, перешедших из предыдущего отопительного периода

$$RR_v = R_v + s_v. \quad (21)$$

Величина дефицита определяется по формуле

$$D_v = (Q_v - RR_v)_+. \quad (22)$$

Согласно этой формуле, в тех случаях, когда потребность превышает располагаемые ресурсы, образуется дефицит топлива. Иначе дефицит равен нулю. Здесь функция $(x)_+$ от вещественного x является неотрицательной срежкой: $(x)_+ = \max \{0, x\}$.

Остаток топлива образуется в случае, когда потребность в топливе меньше располагаемых ресурсов:

$$u_v = (RR_v - Q_v)_+ \quad (23)$$

Апробации моделей анализа и синтеза надежности топливоснабжения. Проведено исследование на разработанном ПВК на примере, близком к условиям Иркутской области, при математическом ожидании потребности в топливе только на отопление 6350 т у.т., (соответствует численности населения около 6000 человек) и удельных ущербах от дефицита 9000 руб./т у.т.

В результате оптимизации состава средств обеспечения надежности установлено, что при среднеквадратическом отклонении математического ожидания производства топлива на 15 % от математического ожидания производства топлива оптимальный резерв мощности равен 0,05, оптимальная емкость складов – 0,6 от математического ожидания годовой потребности в топливе.

С ростом резерва мощности сначала математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита сокращается за счет снижения последней составляющей. Затем математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита начинает возрастать вследствие превалирования в нем затрат на обеспечение надежности. В точке минимума целевой функции (1,69 млн руб./год) вероятность дефицита составляет 0,1; математическое ожидание запасов – 2111 т у.т.

Влияние фактора неопределенности в производстве топлива на надежность топливоснабжения. Оптимальные резерв мощности и емкость складов возрастают с ростом среднеквадратического отклонения математического ожидания производства топлива. При существенном варьировании этого показателя (10–20 %) оптимальный резерв мощности ведет себя устойчиво и изменяется от 0,04 до 0,05, оптимальная емкость складов – от 0,4 до 0,8 от математического ожидания годовой потребности в топливе.

Метод формирования переходящих запасов топлива: обоснование использования процедур расчета показателей на модели анализа надежности. Изменения по итерациям $v = 0, 1, \dots, V$ переходящих запасов топлива можно представить в виде следующего правила:

$$s_{v+1} = \min \{ (1 - \alpha)(L_v + s_v)_+ ; z \}, \quad v = 0, \dots, V, \quad (24)$$

$$L_v = R_v - Q_v. \quad (25)$$

Величина L_v принимает значения из интервала $[L^1; L^2]$, где $L^1 = R^1 - Q^2$, $L^2 = R^2 - Q^1$, при $Q^1 = \min_{\tau} b^{\tau} \bar{Q}$, $Q^2 = \max_{\tau} b^{\tau} \bar{Q}$.

Для любого ν величина s_ν может принимать значения на интервале $[0; z]$ с некоторыми плотностями вероятности. Последовательность случайных величин $s_0, s_1, \dots, s_\nu, s_{\nu+1}$ традиционно определяется как **однородная марковская последовательность**, если плотность вероятности реализации случайной величины $s_{\nu+1}$ зависит только от плотности вероятности величины s_ν и от заданной и неизменной по итерациям плотности вероятности перехода от s_ν к $s_{\nu+1}$. Поскольку согласно (25) значения $s_{\nu+1}$ зависят только от реализации случайной величины L_ν с заданными неизменными по итерациям плотностями вероятности и от уровней запасов только на предыдущей итерации s_ν , то вырабатываемая алгоритмом последовательность $s_0, s_1, \dots, s_\nu, s_{\nu+1}$ является однородной марковской.

Однородная марковская последовательность обладает свойством сходимости к финитным состояниям, которых может быть несколько. Финитным состоянием является стационарный случайный процесс, при котором плотности вероятности реализации по итерациям не изменяются.

Для уверенного использования процедур усреднения по итерациям, в том числе при расчете показателей надежности (15)–(16) необходимо обеспечить:

- 1) нахождение случайной величины запасов в стационарном состоянии;
- 2) единственность стационарного состояния;
- 3) достаточно большое количество итераций при стационарном состоянии для получения однозначных результатов расчета показателей надежности.

Достаточным условием единственности стационарного состояния является факт положительности значений плотности вероятности реализации случайной величины L в любой точке интервала $[L^1; L^2]$.

Количество итераций, достаточное для перехода в стационарное состояние, оценено на основе экспериментальных рядов. На рисунках 4 и 5 представлены результаты расчета среднеарифметического и стандартного отклонения от среднеарифметического значения уровней запасов. Приведены три реализации процесса с использованием разных начальных значений запасов. Согласно рисункам 4 и 5, уже после итерации $\nu = 6000$ среднеарифметическое значение и стандартное отклонение от среднеарифметического значения уровней запасов расходятся не более чем на 2 %. После этого количества итераций можно считать, что процесс стационарный.

Количество итераций, достаточных для устойчивых расчетов показателей надежности топливоснабжения также определено в результате экс-

периментальных вычислений. Они показали, что 65000 итераций вполне достаточно.



Рисунок 4 – Изменение по итерациям среднеарифметического значения для трех реализаций случайного процесса изменения запасов



Рисунок 5 – Изменение по итерациям среднеквадратического отклонения от среднеарифметического значения для трех реализаций случайного процесса изменения запасов

Данный метод формирования переходящих запасов топлива является основой для осуществляемой в настоящее время разработки общего метода исследования эффективности и оптимизации энергоснабжения в условиях сильного действия случайных факторов в производстве и потреблении энергоресурсов. Ведется разработка вычислительных методов и методики выбора оптимального сочетания мощностей солнечных или ветровых электростанций, накопителей электроэнергии и резервных источников

электроснабжения (например, дизельных электростанций) при решении задач электроснабжения отдаленных населенных пунктов.

В четвертой главе представлен ПВК «Анализ эффективности и надежности топливоснабжения с ЭП» (рисунок 6). ПВК включает в себя семь блоков.

В рамках блока обработки метеорологических данных производится расчет следующих показателей: продолжительности отопительных периодов, интегральной разности температур за отопительные периоды, отклонений интегральной разности температур внутри и вне здания от среднеожидаемого значения. Эти показатели необходимы для расчета средней величины потребности и для генерации случайных величин потребности в топливе.



Рисунок 6 – Архитектура ПВК «Анализ надежности топливоснабжения с ЭП»

Блок расчета затрат в детерминированных усредненных условиях основан на рассмотренной во 2 главе модели для исследования эффективности ЭП в детерминированных условиях.

В рамках блока расчета затрат в случайно меняющихся условиях происходит формирование затратных показателей (объема инвестиций, среднегодовых текущих затрат, приведенных затрат и др.) по производству биотоплива в конкретном году для модели анализа надежности топливоснабжения. Случайность связана с фактической реализацией величины производства топлива.

Блок генерации случайных данных потребностей в топливе и объемов производства в отдельном году реализует алгоритмы выбора объемов потребности и производства, представленные выше при описании модели анализа надежности. Относительно автономное существование этого бло-

ка позволяет заменять его при необходимости на другие алгоритмы формирования указанных случайных величин.

В блоке имитации функционирования ЭП в течение года на основе сгенерированных случайных значений потребности и производства топлива рассчитываются величины переходящих запасов топлива, располагаемых ресурсов топлива, остатков топлива, величины прироста затрат, связанных с созданием средств обеспечения надежности на итерации ν . Осуществляется переход к следующей итерации $\nu + 1$. Итерационное имитирование завершается при $\nu = V$.

В рамках блока обработки результатов расчетов на всех итерациях осуществляется обработка полученных результатов для расчета показателей надежности топливоснабжения, обобщенно характеризующих особенности функционирования изучаемой системы в случайных условиях, в т.ч. показателей математического ожидания дефицита, оценки вероятности появления дефицитных ситуаций, математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита.

В рамках блока оптимизации состава средств обеспечения надежности используются алгоритмы варьирования уровней резерва мощности и емкости складов. Критерием выбора оптимальных значений резерва мощности и емкости склада является минимум суммы математического ожидания затрат на обеспечение надежности топливоснабжения и ущербов от дефицита.

8 сентября 2017 года в Федеральной службе по интеллектуальной собственности зарегистрирована программа для ЭВМ «Анализ надежности топливоснабжения с ЭП», свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619882. Язык программирования: Visual Basic for Applications.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан комплекс математических моделей для анализа эффективности и надежности топливоснабжения с ЭП с учетом действия случайных факторов в производстве, потреблении и переходящих запасах топлива.

2. Представлен численный метод формирования случайной величины запасов топлива многолетнего регулирования. Показано, что он вырабатывает марковскую стационарную эргодическую последовательность.

3. Математические модели и методы реализованы в виде ПВК.

4. Проведены экспериментальные исследования на моделях анализа эффективности и надежности топливоснабжения с ЭП. Показано, что в условиях Иркутской области производство биотоплива на ЭП может быть рентабельно, максимальный эффект достигается при покрытии потребно-

сти населенного пункта в топливе объемом 7950 т у.т.; оптимальный резерв мощности составляет 0,05, оптимальная емкость складов – 0,6 от математического ожидания годовой потребности в топливе.

5. Показано, что эффективность и надежность топливоснабжения с ЭП во многом зависит от природных и ценовых условий. Поэтому для анализа эффективности и надежности топливоснабжения с ЭП в каждом конкретном условиях необходимо специальное исследование на базе разработанных моделей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

1. Губий, Е. В. Модели и методы анализа надежности энергоснабжения отдаленных населенных пунктов / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Управление большими системами. – 2019. – Выпуск 78. – С. 221-234.
2. Губий, Е. В. Марковская последовательность переходящих запасов топлива / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Научный вестник НГТУ. – 2019. – Том 74. – № 1. – С. 181-196.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по прочим специальностям

1. Ващук, Л. Н. Как живут леса в России: от Петра I до наших дней / Л. Н. Ващук, Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Эко. – 2013. – № 5. – С. 81-94.
2. Губий, Е. В. Создание математической модели для анализа эффективности энергетических лесов / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 2(34). – С. 80-83.
3. Губий, Е. В. Энергетические плантации: иностранный опыт и оценка применимости в России / Е. В. Губий // Вестник ИрГСХА. – 2013. – № 56. – С. 106-112.
4. Губий, Е. В. Эффективность энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Эко. – 2018. – № 7. – С. 96-110.
5. Губий, Е. В. Математическая модель анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов биомассой с энергетических плантаций / Е. В. Губий, // Вестник ИрГТУ. – 2018. – Т. 22. – № 7. – С. 102-113.

Статьи в изданиях, индексируемых в Scopus

1. Bockkarev V. The use of local energy resources for remote populated areas / V. Bockkarev E. Gubiy, N. Dekanova, V. Zorkaltsev, V. Khan //

MATEC Web Conf. 2018 International Scientific Conference «Investment, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities» (ICRE 2018). – 2018. – V. 212. – 10p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateccconf/201821202008>

Монографии

1. Губий, Е. В. Эффективность энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев. – Новосибирск: Наука, 2018. – 96 с.

Учебные пособия

1. Губий, Е. В. Возобновляемые источники энергии. Биотопливо: учебное пособие / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев. – Иркутск: Изд-во ООО «Байкал-Инновация», 2013. – 90 с.

Статьи в прочих изданиях

2. Губий, Е. В. О создании энергетических плантаций в России и мире / Е. В. Губий // Стохастическое программирование и его приложения: сборник статей. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012. – С. 307-316.

3. Губий, Е. В. Анализ многолетних колебаний температур для целей энергетики / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Математическое моделирование, оптимизация и информационные технологии: материалы 4-й международной конференции, Кишинёв, 25–28 марта 2014г. – Кишинёв: Editura Evrica, 2014. – С. 147-156.

4. Губий, Е. В. Анализ надежности топливоснабжения населенных пунктов биотопливом с энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. Вып. 64. – С. 267-274.

5. Губий, Е. В. Анализ эффективности энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Анализ, моделирование, управление, развитие экономических систем: сборник научных трудов VIII Международной школы-симпозиума АМУР-2014, Севастополь, 12–21 сентября. – Симферополь: ТНУ им. В.И. Вернадского, 2014. – С. 102-105.

6. Губий, Е. В. Анализ надежности топливоснабжения с энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Материалы 3-ей международной научно-практической конференции «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии», Иркутск, 27–29 мая 2014г. – Иркутск: ИрГСХА, 2014. – Т. 2. – С. 145-152.

7. Gubiy, E. V. Analysis long-term of variation of air temperature for the purpose of energy reliability / E. V. Gubiy, V. I. Zorkaltsev, I. I. Khazheev // Advanced mathematics, computations and applications – 2014: the international conference», Novosibirsk, June 8-11, 2014. – Novosibirsk: Academizdat, 2014. – P. 56-57.

8. Губий, Е. В. Метод Монте-Карло в моделях анализа надежности энергосбережения / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев, С. М. Пержабинский // Марчуковские научные чтения – 2017, Новосибирск, 25 июня – 2 июля 2017г. – Новосибирск: Омега Принт, 2017. – С. 73.

9. Губий, Е. В. Оценка эффективности энергетических плантаций для теплоснабжения отдаленных населенных пунктов / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», Иркутск, .24–28 апреля 2017г. – Иркутск: ИрННТУ, 2017. – С. 100-105.

10. Губий, Е. В. Анализ эффективности энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Материалы XIV Международной Азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем», оз. Иссык-Куль, Кыргызская Республика, 20 июля - 31 июля 2018 г. – Алматы: НЦ ГНТЭ, 2018. – С. 185-193.

11. Губий, Е. В. Анализ эффективности энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Материалы XIX Всероссийского симпозиума с международным участием «Сложные системы в экстремальных условиях», Красноярск, 20 – 23 августа 2018г. – Красноярск, 2018. – С. 57-60.

12. Губий Е. В. Исследование экономической эффективности энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Математическое моделирование, оптимизация и информационные технологии: материалы 6-й Междунар. науч. конф., Кишинев, 19–24 марта 2018г. – Кишинев, 2018. – С. 287-292.

13. Зоркальцев В. И. Анализ надежности топливоснабжения с энергетических плантаций / В. И. Зоркальцев, Е. В. Губий // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017619882. – 08.09.2017.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.
Заказ № 98, тираж 100 экз.