

На правах рукописи



Сагитова Ляйсан Акзамовна

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара 2025

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика и информатика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «СамГТУ»», г. Самара

**Научный
руководи-
тель:**

Зотеев Владимир Евгеньевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

**Официаль-
ные оппо-
ненты:**

Головнин Олег Константинович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Медицинская физика, математика и информатика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет», г. Самара

Доманов Виктор Иванович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится «23» октября 2025 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ауд. 200.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ФГБОУ ВО «СамГТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02. Тел. +7(846)337-04-43; e-mail: d24237702@samgtu.ru. В отзыве просим указывать почтовый адрес, номер телефона, электронную почту, наименование организации, должность, шифр и наименование научной специальности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ» и на сайте диссертационного совета 24.2.377.02 <https://d24237702.samgtu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.377.02
к.ф.-м.н., доцент



Саушкин М.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На производственную деятельность предприятий и качество жизни людей существенное влияние оказывает эффективность функционирования энергетической отрасли, при этом одним из приоритетных направлений развития науки, техники и технологий в Российской Федерации является энергосбережение, энергоэффективность и ядерная энергетика.

В трудах Р. Калмана, Р. Егера сформулированы подходы к моделированию сложных систем. Позже они были развиты в работах Л.А. Мелентьева, А.А. Макарова и других, применительно к функционированию энергетических систем. Проблемам эффективности функционирования энергетических предприятий посвящены исследования научной школы Н.В. Дилигенского.

В условиях изменений внешней среды, методов организации и управления энергетическими предприятиями актуальным является исследование деятельности энергосистем, позволяющее на основе методологии системного анализа и математического моделирования исследовать производственно-экономические взаимосвязи энергосистем с промышленными предприятиями, проводить оценку эффективности управления энергетическим комплексом с учетом вклада используемых ресурсов.

Поэтому актуальность настоящей работы, посвященной системному анализу совместного производства тепловой и электрической энергии предприятиями энергосистемы и оценке эффективности ее производственной деятельности, не вызывает сомнений.

Целью диссертационной работы является системный анализ и моделирование функционирования энергосистемы для оценки и повышения эффективности производства энергии.

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

1. Исследование деятельности энергосистемы на основе методологии системного анализа для оценки эффективности ее функционирования в условиях структурного кризиса.
2. Анализ функционирования региональной энергосистемы на основе построения и систематизации новых математических моделей, адекватно описывающих процесс производства тепловой и электрической энергии.
3. Разработка комплекса критериев оценки эффективности совместного производства тепловой и электрической энергии территориальной энергосистемой Самарской области.
4. Разработка алгоритмов поддержки принятия решений по повышению эффективности функционирования энергосистемы с помощью проблемно-ориентированных имитационных моделей.

Объектом научного исследования является энергосистема Самарской области, представляющая собой сложную динамическую техническую и социально-экономическую систему, в период ее функционирования с 1990 по 2021 гг.

Предмет научного исследования. Закономерности функционирования и развития энергосистемы Самарской области в период 1990–2021 гг., методы построения математических моделей для решения задач анализа и прогнозирования функционирования энергосистемы, критерии и методы оценки ее эффективности, модели и механизмы управления энергосистемой.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы системного анализа, статистического анализа, математического моделирования, методы линейного и нелинейного прикладного регрессионного анализа, теории управления.

Научная новизна характеризуется следующими результатами:

1. Впервые проведен комплексный анализ энергосистемы Самарской области с учетом региональной специфики генерации и потребления энергии за расширенный временной период (1990–2021 гг.), что позволило выявить ранее не исследованные структурные взаимосвязи и закономерности, определяющие устойчивость и эффективность функционирования энергетического комплекса.

2. Сформирована система критериев оценивания эффективности деятельности энергетического комплекса, включающая предельные производительности основных ресурсов, эластичности выпуска энергии, факторы изменения масштаба производства и совершенствования технологических процессов, фазовые портреты состояний энергосистемы, отличающаяся от известных анализом функционирования энергосистемы в пространстве входных воздействий с помощью предельных траекторий поведения процессов.

3. Разработана новая аналитическая модель управления энергосистемой в виде одноконтурной системы управления, которая позволяет количественно обосновывать объем инвестиций, необходимых для модернизации капитальных фондов с учетом эффективности использования ресурсов.

4. Предложены новые математические модели функционирования энергосистемы и методы их параметрической идентификации на основе результатов наблюдений, отличающиеся от известных использованием ковариационно-стационарных моделей временных рядов, учитывающих взаимосвязи реальных статистических данных и обладающих высокой точностью прогнозирования по сравнению с известными методами.

5. Разработана система поддержки принятия решений для повышения эффективности управления энергопроизводством, отличающаяся от известных применением в качестве имитационных новых ковариационно-стационарных моделей временных рядов, которая позволяет повысить достоверность различных прогнозных сценариев и разрабатывать математически обоснованные решения для управления деятельностью энергосистемы.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новых критериев эффективности функционирования энергосистемы на основе предельных траекторий поведения процессов в пространстве входных воздействий, а также математических моделей и алгоритмов численных методов оценивания параметров этих моделей на основе результатов наблюдений и применении их для прогнозирования функционирования энергосистемы.

Практическая значимость. Разработанные в диссертационной работе методики системного оценивания энергоэффективности функционирования производств, новые математические модели функционирования энергосистемы, алгоритм работы системы поддержки принятия решений, системы управления процессами энергетических производств с имитационными моделями в контуре использованы в энергетических комплексах региона при анализе их производственно-хозяйственной деятельности, направленной на повышение эффективности их функционирования.

Работа соответствует предметной области исследования научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (п. 3, 4, 6, 11).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты системного анализа функционирования энергосистемы Самарской области, позволяющие выявить новые ранее не исследованные структурные взаимосвязи и закономерности.

2. Комплекс критериев эффективности функционирования энергосистемы на основе предельных траекторий поведения процессов в пространстве входных воздействий.

3. Аналитическая модель системы управления энергосистемой за счет формирования инвестиций в капитальные ресурсы для повышения эффективности производства энергии.

4. Новые математические модели функционирования энергосистемы на основе ковариационно-стационарных моделей временных рядов и методы их параметрической идентификации на основе статистических данных наблюдений, обладающие более высокой точностью прогнозирования по сравнению с известными методами.

5. Система поддержки принятия решений по управлению энергосистемой, направленной на повышение эффективности функционирования производств.

Степень достоверности результатов исследований. Достоверность и обоснованность полученных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием методологии системного анализа и соответствующего математического аппарата: методов математического моделирования, линейного и нелинейного прикладного регрессионного анализа, теорий управления, пространств состояний, производственных функций, верификацией разработанных моделей путем ретроспективного сопоставления со статистическим материалом и использования разработанных критериев оценки качества моделей.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-исследовательских семинарах кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВО СамГТУ, XXIX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-29» (г. Самара, 2016 г.), VIII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017» (г. Самара, 2017 г.), XXIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2017 г.), III Международной научно-технической конференции Пром-Инжиниринг-2017 (ICIE-2017) (Санкт-Петербург, 2017 г.), VIII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Самара, 2017 г.), XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019» (Новокузнецк, 2019 г.), Международной научно-технической конференции «Энергетические системы» (Белгород, 2019 г., 2023 г., 2024 г.), Международной мультидисциплинарной конференции о промышленном инжинирингу и современных технологиям «FarEastCon-2019» и «FarEastCon-2020» (Владивосток, 2019 г., 2020 г.), XXI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 2019 г.), XV Международной научно-технической конференции «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических

комплексов» (г. Саратов, 2019 г.), XIII, XV и XVI Всероссийской научно-практической конференции «Математические модели современных экономических процессов, методы анализа и синтеза экономических механизмов» (г. Самара, 2020 г., 2023 г., 2024 г.), XIV Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы экономики современных промышленных комплексов; Финансирование и кредитование в экономике России: методологические и практические аспекты» (г. Самара, 2021 г.), II Международном научно-практическом форуме по передовым достижениям в науке и технике SciTech 2022 (Барнаул, 2022 г.), XII Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 публикации в научных изданиях из перечня ВАК, 1 публикация в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в МНБД, 4 публикации в других рецензируемых научных изданиях.

Благодарности. Автор выражает признательность научному руководителю доктору технических наук В.Е. Зотееву за ценные методологические указания, постановку исследовательских задач и научное руководство работой, кандидату технических наук А.А. Гавриловой за экспертные консультации и поддержку работы.

Внедрение. Практическая полезность полученных результатов подтверждается актами о применении результатов в АО «Самарагорэнергосбыт» и ПАО «Т Плюс». Научные результаты, полученные в данной работе, используются в учебном процессе на кафедрах «Теплогазоснабжение и вентиляция» и «Прикладная математика и информатика» СамГТУ.

Личный вклад автора. В работах [1, 3–7, 9–16], опубликованных в соавторстве, автору принадлежит участие в постановке задач, разработке алгоритмов и методик решения задач, программная реализация, анализ и систематизация результатов. Работы [2, 8] написаны единолично.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает в себя введение, 5 глав, заключение, список используемой литературы, приложения. Текст диссертации изложен на 191 странице машинописного текста, содержит 96 рисунков, 17 таблиц; 11 страниц занимают 4 приложения. Список литературы включает 143 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, сформулированы основные направления исследования.

В первой главе проведен аналитический обзор известных методов системного анализа, математического моделирования, исследований для оценки эффективности сложных энергетических систем.

Основные положения методологии системного анализа были разработаны и описаны в работах Л. фон Берталанфи, Д.М Гвишиани, Н.Н. Моисеева, Н. Винера, В.Н. Садовского. Реализацией системного подхода для сложных технических систем занимались Канторович Л.В., Саати Т., Глушков В.М., Прангишвили И.В., Вавилов А.В., Дилигенский Н.В. и другие. Методология системных исследований комплексных проблем энергетических систем была разработана Л.А. Мелентьевым в Сибирском энергетическом институте Сибирского отделения АН СССР.

Для системного анализа энергетических систем и оценки эффективности их функционирования и оптимизации используются различные модели – структурированные на основе территориальных или функциональных признаков, модели математического программирования, балансовые модели, агрегированные модели в форме производственных функций (ПФ), описывающие процессы преобразования входных ресурсов в конечные продукты. Последний из перечисленных классов моделей был выбран в работе в качестве базового для комплексного анализа энергетических систем.

Рассмотрены методы и критерии идентификации и их свойства — непараметрические и параметрические методы, статистические, методы прикладного регрессионного анализа.

Проанализированы методы оценивания комплексной эффективности функционирования сложных систем, процессов и агрегатов, основанные на использовании как объективной, так и субъективной информации. Эффективность энергосистемы промышленного региона — это комплексный показатель, отражающий способность энергосистемы обеспечивать управляемое, надежное, устойчивое и экономически выгодное снабжение потребителей тепловой и электрической энергией при рациональном использовании основных ресурсов и минимальном воздействии на окружающую среду.

На основании аналитического обзора обоснована необходимость повышения эффективности энергетического производства, сформулированы цель и актуальность исследования.

Во второй главе проведена структуризация, декомпозиция, классификация и статистический анализ опытных данных о характеристиках и функционировании региональной энергетики.

В анализируемом промышленном регионе расположены крупные энергетические генерирующие объекты (ТЭЦ), основной деятельностью которых является комбинированная выработка тепловой и электрической энергии.

Региональный энергетический комплекс является сложной развивающейся системой. Анализ её деятельности за период с 1990 по 2021 гг. проводился на основе реальных статистических данных, публикуемых согласно государственному законодательству в ежегодной отчетности региональных министерств и энергетических компаний. Основными видами продукции, вырабатываемыми энергосистемой, являются электрическая Y_e и тепловая Y_t энергии в виде промышленного пара и горячей воды для коммунальных нужд городского населения региона.

Для исследования динамики выработки суммарной, электрической и тепловой энергии введены относительные переменные $Y_{\text{с.от.}} = Y_s / Y_{s1990}$, $Y_{\text{т.от.}} = Y_t / Y_{t1990}$, $Y_{\text{е.от.}} = Y_e / Y_{e1990}$, где Y_{s1990} , Y_{t1990} , Y_{e1990} — значения производства суммарной, тепловой и электрической энергии в 1990 году, Y_s , Y_t , Y_e — текущие значения производства энергии, соответственно. На рисунке 1 отображена динамика изменения относительной выработки тепловой, электрической и суммарной энергий в период с 1976 по 2021 гг.

Период с 1976 по 1989 гг. стабилен и характеризуется постоянным ростом производства энергии. При этом соотношение выработки тепловой и электрической энергий сохранялось неизменным. В 1987–1989 гг. система достигает максимальных значений производства суммарной энергии до 123–124 % в относительных единицах.

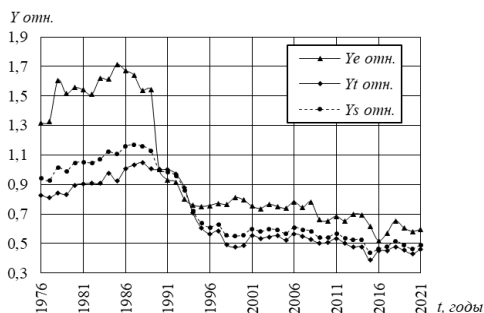


Рисунок 1 – Относительное производство суммарной, тепловой и электрической энергии за период с 1976 по 2021 гг.

Детальный анализ деятельности энергосистемы за этот период был проведен в работах Н.В. Дилигенского, А.Г. Салова, А.А. Гавриловой и других.

Начиная с 1990 г. наблюдается значительное снижение производства энергии. За период с 1989 по 1996 гг. произошло снижение выпуска электрической энергии на 51%, тепловой энергии на 44,8%, а суммарной на 46%. То есть, за период в пять лет выпуск энергии снизился почти

в 2 раза. В первую очередь, это связано со сменой экономической формации страны, переходом к рыночным отношениям.

С 1996 года наблюдается стабилизация на уровне 60–64 % от начального значения в исследуемый период. Период с 2007 по 2021 гг. характеризуется продолжением спада выпуска продукции с меньшим темпом. При этом производство тепловой энергии снизилось в 1,20 раза, электроэнергии — в 1,25 раза, суммарной энергии — в 1,21 раза. В итоге показатели производства электрической и тепловой энергии соответствуют уровню 45,1 и 55,5 % от уровня 1976 года и тенденций по увеличению энергопроизводства не наблюдается.

В период с 2007 по 2021 гг. постоянный спад производства энергии обусловлен падением энергопотребления промышленностью области. После падения в переходный период 1990–1996 гг. оно осталось неизменным и в анализируемый период (2007–2021 гг.) не наблюдается тенденции к его повышению. Постоянная в течение года тепловая нагрузка в виде промышленного пара заместилась сезонной отопительной нагрузкой в виде горячей воды. Это замещение привело к изменению соотношения выработки тепловой и электрической энергии. В результате в настоящее время оборудование энергопредприятий работает в нерасчетных режимах с пониженными показателями эффективности.

В целом с 2007 по 2021 гг. наблюдается дальнейшее снижение производства тепловой и электрической энергии на 16,3 и 20,1 %, соответственно, и все попытки руководства энергетики повысить эффективность функционирования предприятий пока не приводят к существенным результатам.

Для оценки энергоэффективности функционирования энергетической компании необходимо построить модели, адекватно описывающие происходящие процессы и на их базе исследовать направления повышения эффективности использования наиболее значимых ресурсов – топливных, капитальных, трудовых.

Третья глава посвящена построению математических моделей функционирования энергосистемы и использования капитальных, трудовых и топливных ресурсов, статистическому анализу результатов структурной и параметрической идентификации параметров и оценке погрешностей прогнозов на основе построенных моделей.

В известных подходах к математическому моделированию функционирования энергетических систем в качестве исследовательского аппарата широкое распространение получили трехфакторные мультипликативно-степенные модели в виде ПФ:

$$Y_s(t) = AK^\alpha(t)L^\beta(t)B^\gamma(t), \quad (1)$$

где $Y_s(t)$ — выпуск электрической и тепловой энергии; $K(t)$, $L(t)$ и $B(t)$ — капитальные, трудовые и топливные ресурсы, соответственно, A — масштабный коэффициент, характеризующий интегральную эффективность производства, α , β и γ — коэффициенты эластичности, характеризующие эффективность использования капитальных и трудовых ресурсов в производственных процессах.

Однако данные модели обладают недостатками, для устранения которых при описании динамики производства энергии y_k региональной энергосистемой были рассмотрены ковариационно-стационарные модели временных рядов с детерминированным трендом вида:

$$y_k = \sum_{j=1}^p \lambda_j y_{k-j} + \sum_{j=p+1}^{m+p+1} \lambda_j t_k^{j-(p+1)} + u(x_{1k}, x_{2k}, x_{3k}, \bar{a}) + \varepsilon_k, \quad (2)$$

где x_{1k} , x_{2k} и x_{3k} — капитальные, трудовые и топливные ресурсы, соответственно,

$\sum_{j=p+1}^{m+p+1} \lambda_j t_k^{j-(p+1)}$ — детерминированный тренд в форме многочлена степени m относительно временной переменной t_k ; p — порядок авторегрессии, $u(x_{1k}, x_{2k}, x_{3k}, \bar{a})$ — детерминированная, в общем случае нелинейная, трехфакторная функция с вектором параметров $\bar{a} = (\lambda_{m+p+2}, \lambda_{m+p+3}, \dots, \lambda_n)^T$, T — операция транспонирования, λ — параметры модели, ε_k — последовательность нормально распределённых независимых случайных величин с нулевым математическим ожиданием.

В диссертации проведены систематизация и сравнительный анализ девяти разработанных различных по структуре ковариационно-стационарных моделей временных рядов на основе как линейной, так и нелинейной регрессии с трехфакторным (3Ф) трендом в форме ПФ, формулы которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Систематизация ковариационно-стационарных моделей временных рядов функционирования энергосистемы

Группа моделей		Тип модели	№
I	3Ф регрессионная модель, построенная на основе:	линейной ПФ:	
		$y_k = \lambda_1 x_{1k} + \lambda_2 x_{2k} + \lambda_3 x_{3k} + \varepsilon_k, k = 0, 1, 2, \dots, N-1;$	(I.1)
		мультипликативно-степенной ПФ:	(I.2)
		$y_k = \lambda_1 x_{1k}^{\lambda_2} x_{2k}^{\lambda_3} x_{3k}^{\lambda_4} + \varepsilon_k, k = 0, 1, 2, \dots, N-1;$	
II	ковариационно-стационарная стохастическая модель в форме разностного уравнения:	с линейным полиномиальным трендом второго порядка	(II.1)
		$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 y_{k-2} + \lambda_3 + \lambda_4 t_k + \lambda_5 t_k^2 + \varepsilon_k, k = \overline{2, N-1};$	
		с трендом в форме линейной 3Ф ПФ	(II.2)
		$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 x_{1k} + \lambda_4 x_{2k} + \lambda_5 x_{3k} + \varepsilon_k, k = \overline{1, N-1}.$	
		с трендом в форме мультипликативно-степенной 3Ф ПФ	(II.3)
		$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 y_{k-2} + \lambda_3 x_{1k}^{\lambda_4} x_{2k}^{\lambda_5} x_{3k}^{\lambda_6} + \varepsilon_k, k = \overline{2, N-1};$	

III	ковариационно-стационарная стохастическая модель в форме разностного уравнения:	с трендом в форме линейной 3Ф ПФ и моделью случайного возмущения в форме АР (1):	(III.1)
		$y_k = \lambda_2 x_{1k} + \lambda_3 x_{2k} + \lambda_4 x_{3k} +$ $+ \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 x_{1,k-1} - \lambda_3 x_{2,k-1} - \lambda_4 x_{3,k-1}) + \varepsilon_k,$ $k = 1, 2, 3, \dots, N-1$	
		с трендом в форме мультипликативно-степенной 3Ф ПФ и моделью случайного возмущения в форме АР (1):	(III.2)
		$y_k = \lambda_2 x_{1k}^{\lambda_3} x_{2k}^{\lambda_4} x_{3k}^{\lambda_5} + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 x_{1,k-1}^{\lambda_3} x_{2,k-1}^{\lambda_4} x_{3,k-1}^{\lambda_5}) + \varepsilon_k;$ $k = 1, 2, 3, \dots, N-1,$	
		с трендом в форме линейной 3Ф ПФ и моделью случайного возмущения в форме АР (2):	(III.3)
		$y_k = \lambda_3 x_{1k} + \lambda_4 x_{2k} + \lambda_5 x_{3k} + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_3 x_{1,k-1} - \lambda_4 x_{2,k-1} - \lambda_5 x_{3,k-1}) +$ $+ \lambda_2 (y_{k-2} - \lambda_3 x_{1,k-2} - \lambda_4 x_{2,k-2} - \lambda_5 x_{3,k-2}) + \varepsilon_k; k = 2, 3, \dots, N-1,$	
		с трендом в форме мультипликативно-степенной 3Ф ПФ и моделью случайного возмущения в форме АР (2):	(III.4)
		$y_k = \lambda_3 x_{1k}^{\lambda_4} x_{2k}^{\lambda_5} x_{3k}^{\lambda_6} + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_3 x_{1,k-1}^{\lambda_4} x_{2,k-1}^{\lambda_5} x_{3,k-1}^{\lambda_6}) +$ $+ \lambda_2 (y_{k-2} - \lambda_3 x_{1,k-2}^{\lambda_4} x_{2,k-2}^{\lambda_5} x_{3,k-2}^{\lambda_6}) + \varepsilon_k; k = 2, 3, \dots, N-1,$	

Описаны алгоритмы устойчивых численных методов среднеквадратичного оценивания параметров этих моделей на основе статистических данных функционирования энергосистемы Самарской области за период с 1990 по 2021 г. В качестве критерия среднеквадратичного оценивания параметров моделей использовалась минимизация суммы квадратов остатков $\|e\|^2 = \|y - \hat{y}\|^2 \rightarrow \min$. Проверка обоснованности выбора такого критерия строилась на основе анализа остатков, выявления в них корреляции и статистики Дарбина–Уотсона.

Анализ результатов проведенных численно-аналитических исследований и сравнительная оценка качества построенных моделей динамики производства суммарной энергии показали, что наилучшей математической моделью является ковариационно-стационарная модель временного ряда в форме разностного уравнения с мультипликативно-степенным трендом (9).

В таблице 2 приведены результаты расчета параметров математических моделей (4) и (9). $Q_{ост} = \|y - \hat{y}\|^2$ — сумма квадратов отклонений результатов расчета $\hat{y}_k$ по модели от результатов наблюдений; $s, \%$ — оценка относительного отклонения модели от эксперимента; DW — статистика Дарбина–Уотсона.

Таблица 2 – Результаты расчетов параметров математических моделей (4) и (9)

Модель	Коэффициенты модели					$Q_{ост}$	$s, \%$	DW
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5			
(I.2)	1,008	-0,167	-0,058	1,035		0,017	3,7%	1,0
(III.2)	0,684	0,965	-0,128	0,016	0,945	0,012	3,3%	1,9

Анализ показателей качества математических моделей свидетельствует об отсутствии автокорреляции в остатках для модели (9), тем самым указывая на эффективность среднеквадратичных оценок параметров этой модели.

Приведены результаты сравнительного анализа качества моделей на основе оценок погрешностей прогноза. Анализ результатов расчетов погрешностей прогнозов показал, что погрешность прогноза по модели (9) существенно меньше погрешностей, вычисленных на основе известной модели (4) в среднем на 27%. Из-за некорректности применения классического метода наименьших квадратов при оценке параметров модели (4), вследствие смещения оценки дисперсии случайного возмущения в результатах наблюдения, величина оценки предельной погрешности прогноза (доверительный интервал) оказывается завышенной. Кроме этого, применение модели (9) позволяет обеспечить высокую точность оценок факторных эластичностей, а также достоверность прогнозов выпуска продукции энергопроизводств на достаточно длительный промежуток времени.

Поскольку статистические данные функционирования энергопроизводств публикуются со значительным запаздыванием (полтора-два года), то актуальные показатели функционирования энергосистемы за 2022 и 2023 гг. были использованы для оценки качества моделей с помощью построения перспективных прогнозов. Результаты сравнения точности прогноза на основе известной мультипликативно-степенной модели (4) и модели временного ряда в форме разностного уравнения (9) свидетельствуют о существенном снижении погрешностей прогнозирования при использовании модели (9) по сравнению с моделью (4). Кроме того, применение классического метода наименьших квадратов для оценки параметров модели 2 приводит к неэффективности оценок дисперсии случайных возмущений в наблюдаемых данных. Вследствие этого, расчетная величина предельной погрешности прогноза, определяемая через доверительный интервал, оказывается заниженной.

Для достоверного прогноза выпуска продукции энергосистемы Самарской области в диссертации рассматриваются математические модели динамики использования капитальных, трудовых и топливных ресурсов в форме ковариационно-стационарных стохастических моделей временных рядов с детерминированным полиномиальным трендом на основе модели авторегрессии порядка p :

$$y_k = \sum_{j=1}^p \lambda_j y_{k-j} + \sum_{j=p+1}^{m+p+1} \lambda_j t_k^{j-(p+1)} + \varepsilon_k,$$

где $\sum_{j=p+1}^{m+p+1} \lambda_j t_k^{j-(p+1)}$ — детерминированный тренд в форме многочлена степени m относительно временной переменной t_k ; ε_k — последовательность независимых случайных величин с нулевым математическим ожиданием.

Описаны устойчивые алгоритмы численных методов среднеквадратичного оценивания параметров моделей динамики использования ресурсов на основе статистических данных деятельности энергосистемы Самарской области за период с 1990 по 2021 гг.

Результаты проведенных численно-аналитических исследований, статистический анализ результатов параметрической идентификации, оценка погрешностей прогнозов и сравнительный анализ с известными методами прогнозирования

временных рядов подтвердили высокую эффективность построенных моделей динамики капитальных, трудовых и топливных ресурсов.

В четвертой главе сформирована система критериев оценки эффективности функционирования региональной энергосистемы.

На основе построенных математических моделей проведен анализ показателей качества функционирования энергетического комплекса.

Исследованы факторные эластичности использования ресурсов, характеризующие относительную эффективность использования соответствующих ресурсов и показывающие, на сколько процентов возрастает производство энергии при увеличении соответствующих ресурсов на один процент.

Отрицательные значения эластичности капитальных ресурсов в моделях производства суммарной энергии в период с 1990 по 2021 гг. указывают на наличие избытка основных фондов в энергосистеме в рассматриваемый период.

Эластичность трудовых ресурсов β остается положительной: $\beta = 0,016$, однако ее значение оказывается статистически незначимым. При этом наибольшее влияние на производство суммарной энергии оказывают топливные ресурсы: увеличение затрат топлива на 1% в этот период приводило к увеличению выпуска суммарной энергии на 0,945%.

На основе построенных математических моделей были исследованы эффективности использования ресурсов энергосистемой по предельным производительностям капитальных, трудовых и топливных ресурсов:

$$\partial Y / \partial K = \alpha Y / K, \quad \partial Y / \partial L = \beta Y / L, \quad \partial Y / \partial B = \gamma Y / B, \quad (3)$$

которые характеризуют предельные отношения прироста выпуска энергии при постоянных величинах остальных ресурсов.

На рисунке 2 приведены графики изменения предельных производительностей капитальных, трудовых и топливных ресурсов в сопоставлении с периодом стабильного функционирования (1976–1989 гг.).

В период с 1990 по 2021 гг. значения $\partial Y_s / \partial K$ становятся отрицательными,

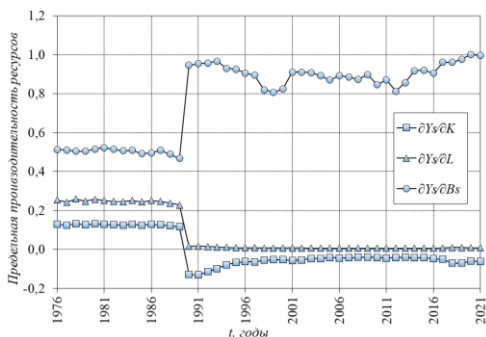


Рисунок 2 – Предельная эффективность капитальных $\partial Y_s / \partial K$, трудовых $\partial Y_s / \partial L$ и топливных $\partial Y_s / \partial B_s$ ресурсов при производстве суммарной энергии

что свидетельствует о неэффективной работе энергосистемы и наличии избыточных фондов. Значения предельной производительности труда снижаются на 93,1 % в 1990 г. С 1990 по 2021 гг. значения показателя остаются практически неизменными с небольшими колебаниями, оценка математического ожидания за этот период составляет 0,011. Поведение предельной топливоотдачи свидетельствует об эффективном использовании топливных ресурсов в период 1990–2021 гг.

Изменение эффективности работы энергосистемы характеризуется изменением масштаба энергетических производств M и совершенствованием технологических процессов R ¹.

Для исследования влияния этих факторов на работу энергосистемы использовались относительные значения капитальных, трудовых и топливных ресурсов $K_{от.}$, $L_{от.}$ и $B_{от.}$, которые определяются как отношение величины входных ресурсов в начальный год рассматриваемого периода к их текущим значениям.

Показатель совершенствования технологических процессов R характеризует повышение эффективности использования каждого вида ресурсов и описывается выражением вида:

$$R = \left(\frac{Y_{от.}}{K_{от.}} \right)^{\rho_{\alpha}} \cdot \left(\frac{Y_{от.}}{L_{от.}} \right)^{\rho_{\beta}} \cdot \left(\frac{Y_{от.}}{B_{от.}} \right)^{\rho_{\gamma}},$$

где $\rho_{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta + \gamma}$, $\rho_{\beta} = \frac{\beta}{\alpha + \beta + \gamma}$, $\rho_{\gamma} = \frac{\gamma}{\alpha + \beta + \gamma}$ – относительные эластичности.

Значения фактора изменения масштаба энергетического производства M определяются как среднегеометрическое взвешенное значение относительных увеличений объемов входных ресурсов:

$$M = (K_{от.})^{\rho_{\alpha}} (L_{от.})^{\rho_{\beta}} (B_{от.})^{\rho_{\gamma}}.$$

На рисунке 3 описана динамика факторов R и M на анализируемом периоде 1990–2021 гг. в зависимости от произведенной суммарной энергии.

Для периода 1990–2021 гг. вклад масштабного фактора негативен, т.е. увеличение количества используемых ресурсов сочетается со снижением объёмов производства энергии.

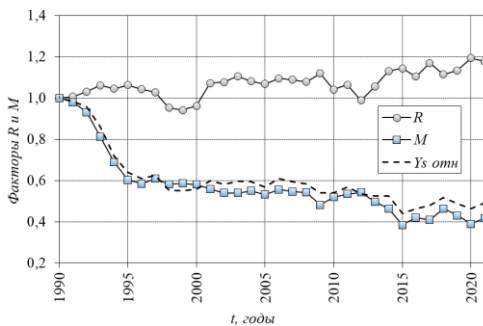


Рисунок 3 – Оценка параметров состава фактора эффективности производства электрической энергии.

Величина M уменьшилась в 2,4 раза. Значения R в эти годы были выше вклада масштабного фактора и несколько компенсировали негативные последствия. Полученная величина $M < 1$ и отрицательная эластичность $\rho_{\alpha} = -0,153$ свидетельствуют о том, что в энергосистеме имеет

ся излишние капитальные ресурсы. Анализ показал, что для обеспечения эффективности функционирования энергосистемы на уровне 1989 года объём используемых материальных ресурсов должен быть уменьшен на 61%.

Исследованы траектории протекания производственных процессов в пространстве входных воздействий.

Для этого в плоскости параметров капитальных K и трудовых L ресурсов на рисунке 4 построены предельные траектории поведения процессов – изокванты и

¹ Кузнецов Б. Т. Макроэкономика / Б. Т. Кузнецов, М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2017. 463 с.

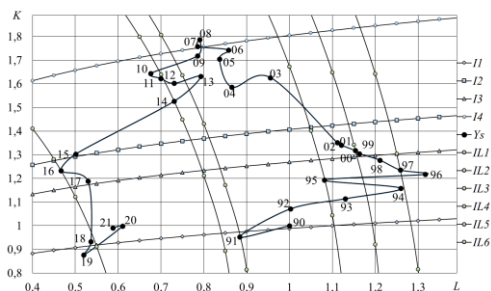


Рисунок 4 – Выпуск суммарной энергии для периода времени с 1990 по 2021 гг.:
изокванты - I1, I2, I3, I4, I5;
изоклинали - IL1, IL2, IL3, IL4, IL5,
график реальной зависимости $K=K(L)$.

изоклинали. На изокванте выпуск продукции постоянен при различных значениях входных параметров K и L : $Y(K, L) = \text{const}$. Изоклиналями называются линии наибольшего роста производственной функции, то есть линии, на которой предельные нормы замещения производственных ресурсов постоянны: $\frac{\partial Y}{\partial K} / \frac{\partial Y}{\partial L} = \text{const}$. Направление изоклинали при $\partial Y / \partial K > 0$ соответствует максимальному приросту выпускаемой продукции, а

противоположное – наибольшему спаду производства.

На расчетной сетке изоквант и изоклинал приведены графики реального протекания производственных процессов. Из анализа построенных кривых выявлено, что с 1991 по 1996 гг. произошло изменения соотношения между трудовыми и капитальными ресурсами в сторону неоправданного увеличения численности работников. При этом линия реального выпуска продукции отклоняется от изокванты влево, что соответствует наибольшему спаду производства, выпуск энергии в этот период сократился на 48,3 %.

В период с 1996 по 2011 гг. траектория реальных производственных процессов движется практически параллельно изокванте, отклоняясь от нее вправо. Данный период соответствует периоду стабилизации значений производства суммарной энергии с небольшими колебаниями, при этом происходит замещение трудовых ресурсов капитальными. Это свидетельствует об избытке основного производственного оборудования при данных выпусках энергии, а также о низком вкладе трудовых ресурсов в производственный процесс.

С 2011 по 2015 гг. кривая $K=K(L)$ отклоняется по изоклинали влево, происходит снижение объемов затрачиваемых трудовых и капитальных ресурсов. Этому периоду соответствует снижение производства энергии на 22,8%.

В период с 2016 по 2018 гг. кривая реальных производственных процессов движется практически перпендикулярно изокванте, происходит сокращение основных фондов. При этом выпуск энергии в этот период возрастает на 3,0–8,2% в год.

В 2019–2021 гг. траектория реальной зависимости $K = K(L)$ энергосистемы движется по изоклинали вправо, происходит увеличение объемов затрачиваемых трудовых ресурсов. При этом выпуск энергии изменяется незначительно. В целом, в период 1990–2021 гг. наблюдается снижение эффективности использования основных ресурсов.

Исследованы внутренние закономерности динамики поведения энергосистемы в фазовых пространствах состояний на основе статистических данных функционирования энергосистемы за период с 1976 по 2021 гг. В качестве координатных

осей – показателей качества использованы текущие производительности ресурсов: фондоотдача Y/K , производительность труда Y/L и топливоотдача Y/B .

На рисунке 5 приведена проекция фазового портрета для анализируемой энергосистемы в период 1976–2021 гг. на плоскость с координатными осями «фондоотдача Y/K » – «производительность труда Y/L ».

Состояние анализируемой системы характеризуется тремя особыми точками с малыми флуктуациями для периодов 1976–1987 гг., 1996–2002 гг. и 2004–2015 гг. Движение изображающих точек происходит по циклическим эллипсам. В окрестностях первой стационарной точки система находилась 12 лет, в окрестностях второй — 7 лет, в окрестностях третьей точки — 12 лет. Нахождение системы в особой точке говорит о стабилизации ее работы и о способности системы к саморегулированию.

До 1987 года система функционировала устойчиво со стабильными показателями эффективности. На интервале с 1988 по 1995 гг. происходит переходный процесс от одного стационарного состояния энергосистемы к другому, на более низких уровнях показателей эффективности функционирования энергосистемы, уменьшившихся в среднем в два раза. С 2003 по 2004 гг. происходит еще один переходный процесс от второй особой точки к третьей. Третья особая точка характеризуется более низким показателем фондоотдачи и повышением производительности труда по сравнению со второй особой точкой.

С 2016 по 2021 гг. наблюдается переходный процесс, сопровождающийся значительными колебаниями показателей эффективности использования ресурсов. За этот период возросли значения всех текущих производительностей для суммарной энергии: фондоотдача увеличилась на 46,7 %, трудоотдача — на 13,2 %, топливоотдача — на 13,4 %. При этом движение фазовой кривой в этот период происходит против часовой стрелки, что говорит о переходе к неустойчивому состоянию.

В целом, в период с 1990 по 2021 гг. энергосистема функционирует с пониженными показателями энергоэффективности. Основные фонды капитальные и трудовые ресурсы используются неэффективно. Необходимо использовать полученные показатели в принятии решений по управлению энергосистемой.

В пятой главе представлена структурная схема разработанной системы поддержки принятия решений для повышения эффективности функционирования энергосистемы в процессе формирования величины инвестиций, направленных на обновление основных фондов.

Алгоритм поддержки принятия решений по повышению эффективности функционирования энергосистемы позволяет учесть характеристики

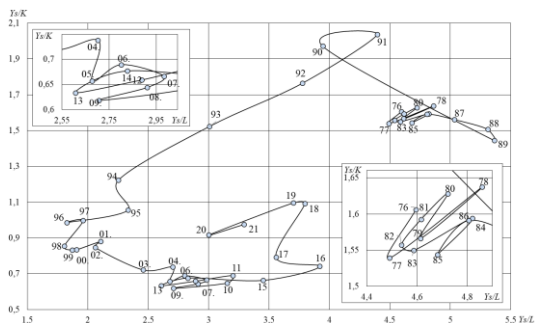


Рисунок 5 – Фазовый портрет производства суммарной энергии в плоскости состояний «Фондоотдача – производительность труда»

функционирования энергосистемы на двух уровнях. Предлагаемый алгоритм включает в себя этап построения систем поддержки принятия решений по повышению эффективности финансирования основных фондов.

Структурная схема включает в себя одноконтурную систему поддержки принятия решений, приведенную на рисунке 6. В контуре управления энергосистемой моделируется формирование инвестиций на обновление капитальных ресурсов K_{t+1} за счет доли прибыли ν от выпуска продукции Y_t , которая является управляющей величиной.

Величина капитальных ресурсов следующего периода будет складываться из стоимости основных фондов текущего периода с учетом коэффициента выбытия основных фондов μ и величины инвестиций:

$$K_{t+1} = (1 - \mu) \cdot K_t + I_{t+1} = (1 - \mu) \cdot K_t + \nu \cdot Y_t.$$

Для формирования математически оправданных решений при определении величины инвестиций в обновление капитальных ресурсов на будущий год в контуре имитационной модели была использована система поддержки принятия решений (СППР), структура которой приведена на рисунке 7.



Рисунок 6 – Имитационная система управления энергосистемой Самарской области

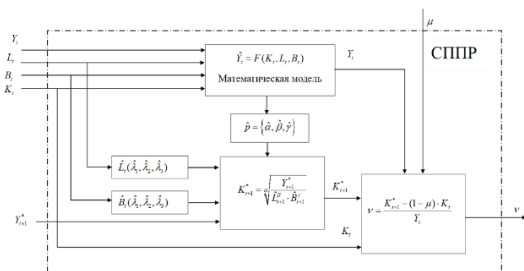


Рисунок 7 – Структура системы поддержки принятия решений

В качестве факторной зависимости, описывающей функционирование энергосистемы для использования в СППР, используется мультипликативно-степенная модель в виде ПФ (9).

На основе выбранных моделей было проведено имитационное моделирование производства энергии энергосистемы Самарской области по выборке объемом 21 год, начиная с 2000 по 2020 гг., на 1 год вперед.

Согласно модели (9), сценарий снижения прогнозируемого уровня производства энергии на 2021 год составляет 0,45 (интегральный выпуск энергии на 3,0% ниже уровня производства в 2020 г.) и обеспечивается величиной ν равной 0,26. Для сценария стабильного отпуска энергии, при котором величина производства энергии останется неизменной с 2020 по 2021 гг., доля инвестиций в капитальные ресурсы должна быть равна $\nu = -0,27$.

Сценарий увеличения энергопроизводства на 3 % обеспечивает управляющая величина $\nu = -0,65$. Полученные результаты свидетельствуют об отрицательном влиянии увеличения инвестиций в имеющиеся основные фонды, что приводит к снижению эффективности производства энергии, в целом, и подтверждают выводы о

наличии избыточных фондов в энергосистеме. Вложение инвестиций в существующее оборудование при текущем уровне энергопотребления, даже в ремонт, не может привести к увеличению выпуска продукции. Для повышения эффективности работы энергосистемы необходимо сокращение неиспользуемого энергетического оборудования и его обновление, которое требует значительных капиталовложений, либо создание крупных промышленных потребителей на уровне государства.

Основные выводы и результаты работы

1. Проведен системный анализ функционирования региональной энергосистемы с учетом внешних и внутренних факторов за период с 1990 по 2021 гг., позволивший выявить ранее не исследованные структурные взаимосвязи и закономерности, определяющие устойчивость и эффективность функционирования энергосистемы Самарской области.

2. Разработана система критериев оценки эффективности деятельности территориальной энергосистемы Самарской области в виде предельных производительностей основных ресурсов, эластичностей выпуска энергии, факторов изменения масштаба производства и совершенствования технологических процессов, относительных вкладов капитальных и трудовых ресурсов в производство энергии, а также в виде анализа функционирования энергосистемы в пространстве входных воздействий с помощью предельных траекторий поведения процессов.

3. Разработана новая аналитическая модель управления энергосистемой в виде одноконтурной системы управления, позволяющая определить объем инвестиций, необходимых для модернизации капитальных фондов с учетом эффективности использования ресурсов.

4. Разработаны математические модели функционирования энергосистемы в виде ковариационно-стационарных моделей временных рядов и методы их параметрической идентификации на основе результатов наблюдений, позволяющие существенно повысить точность прогнозирования производства энергии.

5. Разработана система поддержки принятия решений для повышения эффективности управления энергопроизводством на основе новых ковариационно-стационарных моделей временных рядов, позволяющая повысить достоверность различных прогнозных сценариев и принимать обоснованные решения по управлению деятельностью энергосистемы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Салов, А. Г. Системный анализ надежности централизованного теплоснабжения города Самары / А. Г. Салов, **Л. А. Сагитова** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 2(62). С. 77-87. EDN TQNRAS. (**BAK**)

2. **Сагитова, Л. А.** Многокритериальная оценка сравнительной эффективности генерирующего оборудования / **Л. А. Сагитова** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30, № 2(74). С. 48-59. DOI 10.14498/tech.2022.2.4. EDN TWISQP. (**BAK**)

3. Зотеев, В. Е. Прогнозное моделирование динамики основных ресурсов и построение имитационной системы управления деятельностью региональной

энергосистемы Самарской области / В. Е. Зотеев, **Л. А. Сагитова**, А. А. Гаврилова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2024. Т. 32, № 3(83). С. 100-116. DOI 10.14498/tech.2024.3.7. EDN RCXNGO. (**BAK**)

4. Зотеев, В. Е. Разработка и сравнительный анализ математических моделей функционирования региональной энергосистемы Самарской области / В. Е. Зотеев, **Л. А. Сагитова**, А. А. Гаврилова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2024. Т. 28, № 3. С. 586-608. DOI 10.14498/vsgtu2091. EDN IWFHMA. (**Web of Science, Scopus**)

Публикации в других научных изданиях

5. Обобщенная оценка сравнительной эффективности работы котельного оборудования / А. Г. Салов, А. А. Гаврилова, Ю. В. Чиркова, **Л. А. Сагитова** // Градостроительство и архитектура. 2016. № 2(23). С. 140-146. EDN WCFKUP.

6. Сравнительная оценка эффективности работы котлов по обобщенным критериям / А. Г. Салов, А. А. Гаврилова, **Л. А. Сагитова**, Ю. В. Чиркова // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2016. № 12(94). С. 194-198. EDN YFOOYX.

7. Гаврилова, А. А. Системный анализ энергоэффективности территориальной генерирующей компании в период структурных преобразований / А. А. Гаврилова, А. Г. Салов, **Л. А. Сагитова** // Энергетические системы. 2019. № 1. С. 95-101. EDN ZCJMN.

8. **Сагитова, Л. А.** Алгоритм системы поддержки принятия решений о повышении эффективности регионального энергетического комплекса / **Л. А. Сагитова** // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19, № 2. С. 256-262. DOI 10.18469/ikt.2021.19.2.15. EDN OFDGCF.

9. Салов, А. Г. Комплексный подход к оптимизации структур управления промышленными предприятиями / А. Г. Салов, А. А. Гаврилова, **Л. А. Сагитова** // Пром-Инжиниринг : Труды III международной научно-технической конференции, С.Петербург-Челябинск-Новочеркасск-Владивосток, 16–19 мая 2017 года. С.Петербург-Челябинск-Новочеркасск-Владивосток: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. С. 393-396. EDN WCOQDR.

10. **Сагитова, Л. А.** Анализ производства тепловой и электрической энергии энергетическими предприятиями Самарской области / **Л. А. Сагитова**, А. Г. Салов // Электроэнергетика глазами молодежи - 2017 : Материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 02–06 октября 2017 года. Том 3. Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. С. 270-273. EDN ZMTXWN.

11. Гаврилова, А. А. Анализ траекторий производственно-технологических процессов работы энергосистемы в плоскости параметров входных ресурсов / А. А. Гаврилова, **Л. А. Сагитова**, А. Г. Салов // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019 : Труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 28–30 ноября 2019 года / под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. С. 237-241. EDN AJWBYJ.

12. Гаврилова, А. А. Системный анализ эффективности управления региональной энергетической системой в условиях преобразований / А. А. Гаврилова,

А. Г. Салов, **Л. А. Сагитова** // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах, Самара, 03–06 сентября 2019 года / Под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. Том II. Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Офорт", 2019. С. 392-397. EDN MWNTFU.

13. Gavrilova, A. System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation / A. Gavrilova, A. Salov, **L. A. Sagitova** // Proceedings - 2019 21st International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems", CSCMP 2019, Samara, 03–06 сентября 2019 года. Samara: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 736-741. DOI 10.1109/CSCMP45713.2019.8976644. EDN CGUYOR.

14. Gavrilova, A. A. Comprehensive Analysis and Simulation of Fail-Safe Operation of District Heating in Communities / A. A. Gavrilova, A. G. Salov, **L. A. Sagitova** // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01–04 октября 2019 года. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8934815. DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934815. EDN UCBMHV.

15. Gavrilova, A. A. Assessment of the Efficiency of the Samara Region's Energy Complex under Changing Conditions / A. A. Gavrilova, A. G. Salov, **L. A. Sagitova** // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. Vladivostok, 2020. P. 9271116. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271116. EDN JBKIZZ.

16. Зотеев, В. Е. Математическое моделирование функционирования региональной энергосистемы Самарской области / В. Е. Зотеев, **Л. А. Сагитова**, А. А. Гаврилова // Математическое моделирование и краевые задачи : материалы XII Всероссийской научной конференции с международным участием : в 2 т., Самара, 17–19 сентября 2024 года. Самара: Самарский государственный технический университет, 2024. С. 137-140. EDN WNHXVI.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02,
созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»
(протокол № 2 от «30» июня 2025 г.)

Тираж 100 экз. Заказ № 179.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,25.

Отпечатано в типографии
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати,
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244