Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего образования
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

На правах рукописи

Карманов Александр Арсланович

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ИНЕРЦИОННЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — Никитин Петр Владимирович,
кандидат педагогических наук, доцент

Москва – 2026

Диссертация представлена к публичному рассмотрению и защите в порядке, установленном ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» в соответствии с предоставленным правом самостоятельно присуждать ученые степени кандидата наук, ученые степени доктора наук согласно положениям пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Публичное рассмотрение и защита диссертации состоятся 9 февраля 2027 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Финансового университета Д 505.001.126 по адресу: Москва, Ленинградский проспект, д. 51, корп. 1, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в диссертационном зале Библиотечно-информационного комплекса ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» по адресу: 125167, Москва, Ленинградский проспект, д. 49/2, комн. 100 и на официальном сайте Финансового университета в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: www.fa.ru.

Персональный состав диссертационного совета:

председатель – Шевцов В.А., д.техн.н., профессор;
заместитель председателя – Рябов П.Е., д.физ.-мат.н., доцент;
ученый секретарь – Прокопчина С.В., д.техн.н., профессор;

члены диссертационного совета:
Кочкаров А.А., д.техн.н., доцент;
Судаков В.А., д.техн.н., профессор;
Тимошенко А.В., д.техн.н., профессор;
Фархадов М.П., д.техн.н., с.н.с.

Автореферат диссертации разослан 13 ноября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Финансового университета Д 505.001.126 С.В. Прокопчина

I Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Инерционные теплоэнергетические системы должны поддерживать требуемый температурный режим при рациональном расходовании энергии. Режим работы оборудования влияет и на потребляемую мощность, и на теплообмен, но температуры изменяются с запаздыванием и зависят от внешних факторов. Поэтому управление по текущим измерениям без оценки его будущих последствий может привести к длительным температурным отклонениям или избыточному расходу энергии.

Данные эксплуатационного мониторинга описывают реакцию системы на уже реализованное управление. Они не показывают непосредственно, какими будут температурные и энергетические характеристики при других траекториях управления. Для их сопоставления требуется по одной и той же истории наблюдений совместно рассчитывать будущие характеристики с учетом внешних факторов.

Такой расчет должен выполняться многократно при выборе управления. При этом необходимо учитывать температурные требования и технические ограничения, проверять найденную траекторию и укладываться в период обновления управления. Поэтому актуальна разработка математической модели динамики температурных и энергетических характеристик, алгоритма нелинейного модельно-предиктивного управления и комплекса программ для их совместного применения.

Степень разработанности темы исследования. Математические модели теплового режима зданий и систем отопления представлены в работах С.В. и В.И. Панферовых, А.А. Захарова и соавторов. Методы контроля и прогнозирования процессов теплопереноса в условиях неполных и динамически изменяющихся данных исследованы Н.М. Япаровой, а оптимизация тепловых и гидравлических режимов зданий с применением эволюционных алгоритмов – А.П. Шуравиным.

Применение динамических предиктивных моделей для управления инерционными системами рассмотрено Л.А. Мыльниковым и соавторами, способы формирования прогноза на заданном горизонте – S. Ben Taieb и R.J. Hyndman. Подходы к сочетанию физических зависимостей и моделей по данным представлены в работах D.C. Psichogios, L.H. Ungar и G.E. Karniadakis. В моделях тепловой динамики зданий G. Gokhale, B. Claessens и C. Develder совместно рассчитываются температура и потребляемая мощность при задаваемом управлении; расчетная траектория формируется рекурсивно, а физическая информация учитывается при определении параметров модели.

Теоретические основы модельно-предиктивного управления систематизированы М.В. Сотниковой, Е.И. Веремеем, J.B. Rawlings, D.Q. Mayne

и M.M. Diehl. Прогнозное управление теплоснабжением исследовано А.А. Басалаевым; управление тепловым режимом здания на скользящем горизонте с минимизацией стоимости энергии при температурных и технических ограничениях – М.М. Тверским и Д.В. Румянцевым. Последовательное решение задач управления с сохранением достигнутых значений приоритетных целевых функций рассмотрено D. He, L. Wang и J. Sun. В работах E. O'Dwyer и соавторов этот принцип применяется к отоплению зданий с разделением задач определения тепловой нагрузки и энергоснабжения.

Программные средства построения контроллеров и решения задач динамической оптимизации представлены do-mpc (F. Fiedler, B. Karg и соавторы), GEKKO (L.D.R. Beal, J.D. Hedengren и соавторы) и ACADO Toolkit (B. Houska и соавторы). Эти средства позволяют задавать модели, целевые функции и ограничения для численного расчета управления. Совместное моделирование зданий и систем управления развито в работах M. Wetter, а воспроизводимое испытание стратегий управления на платформе BOPTEST – в работах D. Blum и соавторов.

Указанные исследования формируют основу математического моделирования, предиктивного управления и его программной реализации. Дальнейшая разработка в принятой постановке связана с согласованием прямого совместного расчета температурных и энергетических характеристик по данным эксплуатационного мониторинга и задаваемой траектории управления, приоритетного выбора этой траектории и проверки результатов численного решения. Такое согласование должно обеспечивать выполнение вычислительной процедуры в пределах периода обновления управления.

Цель исследования заключается в уменьшении отклонений от требуемого температурного режима и снижении энергопотребления инерционных теплоэнергетических систем.

Для достижения цели исследования поставлены следующие **задачи**:

1) разработать математическую модель динамики температурных и энергетических характеристик инерционных теплоэнергетических систем, устанавливающую зависимость расчетных траекторий указанных характеристик от данных эксплуатационного мониторинга и траектории управления оборудованием системы;

2) разработать алгоритм нелинейного модельно-предиктивного управления, формирующий технически допустимую траекторию управления оборудованием инерционных теплоэнергетических систем на основе последовательного решения трех задач: уменьшения отклонения от требуемого температурного режима, снижения расчетного энергопотребления и выбора траектории управления;

3) разработать комплекс программ, обеспечивающий расчет температурных и энергетических характеристик по математической модели, формирование технически

допустимой траектории управления по алгоритму и подготовку расчетного протокола до следующего момента формирования управления.

Объектом исследования являются инерционные теплоэнергетические системы, функционирующие в условиях нелинейной динамики, технологических ограничений и влияния внешних факторов.

Предметом исследования являются математические модели динамики температурных и энергетических характеристик, алгоритмы нелинейного модельно-предиктивного управления инерционными теплоэнергетическими системами, а также средства их воспроизводимой программной реализации.

Область исследования диссертации соответствует п. 3. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; п. 8. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» Паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Научная новизна выносимых на защиту положений заключается в том, что:

1) разработана математическая модель динамики температурных и энергетических характеристик инерционных теплоэнергетических систем, отличающаяся от математических моделей, используемых Н.М. Япаровой при контроле и прогнозировании процессов теплопереноса и А.П. Шуравиным при оптимизации тепловых и гидравлических режимов зданий, а также от моделей G. Gokhale, B. Claessens и C. Develder для расчета тепловой динамики зданий, тем, что:

– математическая модель устанавливает функциональную зависимость расчетной траектории температурных и энергетических характеристик от данных эксплуатационного мониторинга за предшествующий интервал, характеризующих динамику инерционной теплоэнергетической системы при реализованном управлении ее оборудованием и влиянии на нее внешних факторов, а траектория управления этим оборудованием задается как самостоятельный аргумент данной зависимости при прямом расчете характеристик на всем заданном горизонте;

– для каждой задаваемой траектории управления расчетная функция математической модели одновременно определяет значения температурных и энергетических характеристик на всем заданном горизонте управления. Полученные значения образуют совместный выход модели и используются для определения отклонения от требуемого температурного режима, разности температур, характеризующей теплообменный процесс, и расчетного энергопотребления системы;

– параметры модели определяются в результате численной минимизации составной целевой функции, объединяющей составляющую соответствия расчетных температурных и энергетических характеристик данным эксплуатационного мониторинга и балансовую составляющую. Балансовая составляющая задается нормированными невязками дополнительной дискретной связи. Для расчетной температуры, используемой для оценки соблюдения требуемого режима, эта связь задана между ее изменением за единицу времени и разностью расчетных температур, характеризующей теплообменный процесс. Коэффициенты указанной связи предварительно определяются численным методом по данным эксплуатационного мониторинга и фиксируются при последующем определении параметров модели.

2) разработан алгоритм нелинейного модельно-предиктивного управления, отличающийся от алгоритмической схемы упреждающего управления при заданной температурной области, предложенной М.М. Тверским и Д.В. Румянцевым, и от реализации приоритетного предиктивного управления с разделением задач оптимизации тепловой нагрузки и энергоснабжения, представленной E. O'Dwyer и соавторами, совокупностью следующих признаков:

– продолжением поиска менее энергозатратной траектории управления при отсутствии найденной технически допустимой траектории, обеспечивающей соблюдение требуемого температурного режима на всем расчетном горизонте. Вместо непосредственного перехода к граничному управляющему действию решается энергетическая задача при условии непревышения достигнутого значения температурной целевой функции. Допустимым начальным приближением служит траектория управления, принятая в температурной задаче;

– формированием и последовательным численным решением температурной и энергетической задач нелинейной оптимизации, в которых переменными оптимизации являются значения управления теплоэнергетическим оборудованием на расчетном горизонте. Целевые функции обеих задач определяются по температурным и энергетическим характеристикам, совместно рассчитанным разработанной математической моделью для каждой рассматриваемой траектории управления. Полученная траектория принимается после проверки технической допустимости и выполнения установленных ограничений. При непринятии очередного результата выбирается исходная либо последняя принятая технически допустимая траектория управления.

3) разработан комплекс программ предиктивного управления оборудованием инерционных теплоэнергетических систем, отличающийся от программного средства нелинейного модельно-предиктивного управления do-mpc тем, что в единую вычислительную процедуру объединены подготовка и проверка данных эксплуатационного мониторинга, совместное выполнение разработанных модели

и алгоритма, проверка технической допустимости итоговой траектории управления и формирование расчетного протокола. Протокол содержит исходные данные, результаты решения задач, сведения о выполненных проверках и основания принятия итоговой траектории управления, что позволяет воспроизводить порядок получения расчетного результата.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что, в отличие от результатов, полученных другими исследователями, разработанные модель и алгоритм позволяют согласованно решать задачи поддержания температурного режима и снижения энергопотребления с сохранением приоритета температурного режима, в том числе в условиях, когда его соблюдение не обеспечивается. Решение поставленной научной задачи способствует развитию теоретической и методологической базы предиктивного управления с учетом тепловой инерции, внешних факторов и технологических ограничений.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные модель, алгоритм и комплекс программ обеспечивают расчетное обоснование управляющих воздействий на теплоэнергетическое оборудование с учетом требований к температурному режиму и энергопотреблению. Полученные результаты позволяют сопоставлять варианты управления и оценивать их температурные и энергетические последствия до применения на объекте.

Методология и методы исследования. В исследовании использованы методы математического моделирования динамических систем, параметрической идентификации моделей по данным и численного решения задач нелинейной оптимизации с ограничениями. При разработке алгоритма использованы методы нелинейного модельно-предиктивного управления. При разработке комплекса программ использованы функциональное проектирование и программная реализация вычислительных процедур. Проверка разработанных модели, алгоритма и комплекса программ выполнена средствами вычислительного эксперимента.

Информационную базу исследования составили данные эксплуатационного мониторинга теплоэнергетической системы ледовой арены, материалы вычислительных экспериментов и научные публикации по теме исследования.

Положения, выносимые на защиту. В соответствии с поставленными задачами, положения, выносимые на защиту, включают в себя следующее:

1) математическая модель динамики температурных и энергетических характеристик инерционных теплоэнергетических систем, отличающаяся от известных моделей использованием данных эксплуатационного мониторинга и задаваемой траектории управления как самостоятельных аргументов при прямом совместном расчете температурных и энергетических характеристик на всем горизонте, а также определением параметров численной минимизацией составной целевой функции

соответствия данным и балансовой согласованности. Балансовая составляющая задается нормированными невязками дополнительной дискретной связи при предварительно определенных и фиксированных коэффициентах связи. На интервале независимой проверки включение балансовой составляющей уменьшило нормированную балансовую невязку на 30,29% при увеличении значений показателей ошибки расчета температурных и энергетических характеристик не более чем на 1,90% (С. 34-63; 99-117);

2) алгоритм нелинейного модельно-предиктивного управления, отличающийся от предметно адаптированной схемы Тверского и Румянцева продолжением поиска менее энергозатратной траектории при ненулевом достигнутом значении температурной целевой функции с использованием этого значения как верхней границы ограничения энергетической задачи. Температурная и энергетическая задачи формируются и последовательно решаются численно по разработанной математической модели относительно значений управления оборудованием. Принятие результатов сопровождается проверкой ограничений и резервным выбором технически допустимой траектории управления. В вычислительном эксперименте относительно указанного аналога расчетное энергопотребление уменьшено на 10,87%, интегральное температурное отклонение – на 25,30%, доля времени вне требуемого диапазона – на 10,43 процентного пункта (С. 64-89; 117-127);

3) комплекс программ предиктивного управления оборудованием инерционных теплоэнергетических систем, отличающийся от программного средства нелинейного модельно-предиктивного управления do-mpc тем, что в единую вычислительную процедуру объединены подготовка и проверка данных эксплуатационного мониторинга, совместное выполнение разработанных модели и алгоритма, проверка технической допустимости итоговой траектории управления и формирование расчетного протокола. Протокол содержит исходные данные, результаты решения задач, сведения о выполненных проверках и основания принятия итоговой траектории управления, что позволяет воспроизводить порядок получения расчетного результата. В зафиксированной программной и аппаратной среде максимальная измеренная продолжительность процедуры составила 3,81 с, или 1,27% периода обновления управления, равного 300 с (С. 128-136).

Степень достоверности, апробация и внедрение результатов исследования. Достоверность результатов исследования подтверждается вычислительными экспериментами на данных эксплуатационного мониторинга ледовой арены. Точность и балансовая согласованность модели проверены на отдельном временном интервале после фиксации ее параметров. Варианты управления сопоставлены при одинаковых исходных условиях с проверкой технической допустимости решений алгоритма и сохранения достигнутых значений целевых функций. Полученные количественные оценки относятся к условиям принятой модельной постановки.

Основные положения и результаты рассмотрены и одобрены на следующих научных мероприятиях: на Международном конгрессе «Современные проблемы компьютерных и информационных наук» (Москва, МГУ, 30 ноября – 2 декабря 2023 г.); на XXII открытой Всероссийской конференции «Преподавание информационных технологий в Российской Федерации» (г. Тверь, Ассоциация предприятий компьютерных и информационных технологий, 16-17 мая 2024 г.); на III Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Цифровизация экономики и финансов: модели, методы и технологии» (Москва, Финансовый университет, 23-24 апреля 2025 г.); на научно-практической конференции «Применение технологий искусственного интеллекта в прикладных областях» (Москва, Финансовый университет, 23 июня 2025 г.); на Международном конгрессе «Современные проблемы компьютерных и информационных наук» (Москва, МГУ, 20-22 ноября 2025 г.).

Результаты диссертационного исследования Карманова А.А. использовались при разработке программ для ЭВМ:

– «Программа для ЭВМ по прогнозированию температурного режима и оптимизации энергопотребления на основе автоэнкодера» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Реестре Роспатента № 2025618035 от 01.04.2025; автор: Карманов А.А.; правообладатель: ООО «ИНДЕПЕНДЕНТ ЭНЕРДЖИ»);

– «Автоматизированная интеллектуальная система предиктивной аналитики IoT-данных энергопотребления на основе больших языковых моделей» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Реестре Роспатента № 2025681392 от 13.08.2025; автор: Карманов А.А.; правообладатель: ООО «ИНДЕПЕНДЕНТ ЭНЕРДЖИ»);

– «Предиктивная интеллектуальная система на основе физических уравнений и трансформерной архитектуры для прогнозирования систем энергопотребления» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Реестре Роспатента № 2025681393 от 13.08.2025; автор: Карманов А.А.; правообладатель: ООО «ИНДЕПЕНДЕНТ ЭНЕРДЖИ»).

Материалы диссертации используются в практической деятельности ООО «ИНДЕПЕНДЕНТ ЭНЕРДЖИ» в проекте по автоматизации управления инженерно-техническими сооружениями при разработке и апробации средств прогнозирования и расчетной поддержки управления энергопотреблением теплоэнергетических объектов. Разработанные математическая модель, алгоритм и комплекс программ используются для подготовки данных мониторинга, многошагового прогноза, расчета допустимых управляющих воздействий и анализа вычислительных сценариев. Результаты позволяют воспроизводимо сопоставлять расчетные сценарии температурного режима и энергопотребления и проверять

допустимость рассчитанных управляющих воздействий до их натурной апробации на объектах.

Результаты исследования используются Кафедрой искусственного интеллекта Факультета информационных технологий и анализа больших данных Финансового университета в преподавании учебной дисциплины «Рекомендательные системы и коллаборативная фильтрация» для обучающихся по направлению подготовки 01.03.02 Прикладная математика и информатика.

Апробация и внедрение результатов исследования подтверждены соответствующими документами.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях общим объемом 6,90 п.л. (авторский объем – 6,43 п.л.), в том числе 4 статьи общим объемом 3,80 п.л. (авторский объем – 3,65 п.л.) опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России, а также 1 статья общим объемом 1,60 п.л. (авторский объем – 1,28 п.л.) опубликована в издании, индексируемом в международной цитатно-аналитической базе Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 140 наименований и одного приложения. Текст диссертации изложен на 175 страницах и содержит 14 таблиц и 17 рисунков.

II Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, охарактеризована степень ее разработанности, определены цель, задачи, объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту. Раскрыты теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, достоверность, апробация и внедрение результатов.

В первой главе проведен анализ исследований по математическому моделированию и предиктивному управлению инерционными теплоэнергетическими системами. Сопоставлены существующие математические модели, алгоритмические схемы и программные средства, определены направления их совершенствования. По результатам анализа сформулированы требования к разрабатываемым модели, алгоритму и комплексу программ. На этой основе дана формализованная постановка научной задачи, представленная формулами (1)–(4).

В общей постановке исходными являются доступные к моменту t данные эксплуатационного мониторинга $X_t^L \in \mathbb{R}^{L\times p}$, где L – число предшествующих временных срезов, p – число признаков одного среза. Требуется построить математическую модель по формуле (1)

$$M = (\mathbb{R}^{L\times p}, \mathbb{R}^{H}, \mathbb{R}^{H\times n_y}, F_{\theta^*}), \tag{1}$$

где M объединяет пространства исходных данных, управления и расчетных характеристик с расчетной функцией F_{θ^*};

H – число шагов горизонта;

n_y – число компонент вектора характеристик;

θ^* – вектор параметров функции, который требуется определить при построении модели.

Расчетная функция должна устанавливать зависимость по формуле (2)

$$\hat{Y}_{t+1:t+H}(U) = F_{\theta^*}(X_t^L, U_{t+1:t+H}), \tag{2}$$

где $\hat{Y}_{t+1:t+H}(U) \in \mathbb{R}^{H\times n_y}$ – совместная расчетная траектория температурных и энергетических характеристик;

$U_{t+1:t+H} \in \mathbb{R}^{H}$ – задаваемая как самостоятельный аргумент траектория управления.

Множество ее технически допустимых значений $\mathcal{U}_t$ определяется ограничениями оборудования и действующим управлением u_t.

Требуется разработать алгоритм, выбирающий технически допустимую траекторию с приоритетом температурного результата. Снижение расчетного энергопотребления и последующий выбор траектории должны сохранять достигнутые значения критериев более высокого приоритета. Результат алгоритма задается формулой (3)

$$U^{\star}_{t+1:t+H} = A(X_t^L, M, \mathcal{U}_t), \qquad u_t^{\star} = [U^{\star}_{t+1:t+H}]_1, \tag{3}$$

где $U^{\star}_{t+1:t+H}$ – выбранная технически допустимая траектория управления;

A – искомый алгоритм;

$u_t^\star$ – первый элемент выбранной траектории, применяемый на ближайшем интервале.

Требуется разработать комплекс программ, обеспечивающий подготовку данных, расчет характеристик по модели, формирование управления по алгоритму, проверку результата и подготовку расчетного протокола до следующего момента формирования управления по формуле (4)

$$C(X_t^L, M, A) = (U_{t+1:t+H}^\star, u_t^\star, r_t), \qquad \tau_{\text{calc}}^{\max} < \Delta t_{\text{ctrl}}, \tag{4}$$

где C – вычислительная процедура комплекса программ;

r_t – расчетный протокол;

$\tau_{\text{calc}}^{\max}$ – максимальная измеренная продолжительность процедуры в проведенной серии расчетов, с;

Δt_{ctrl} – период обновления управления, с.

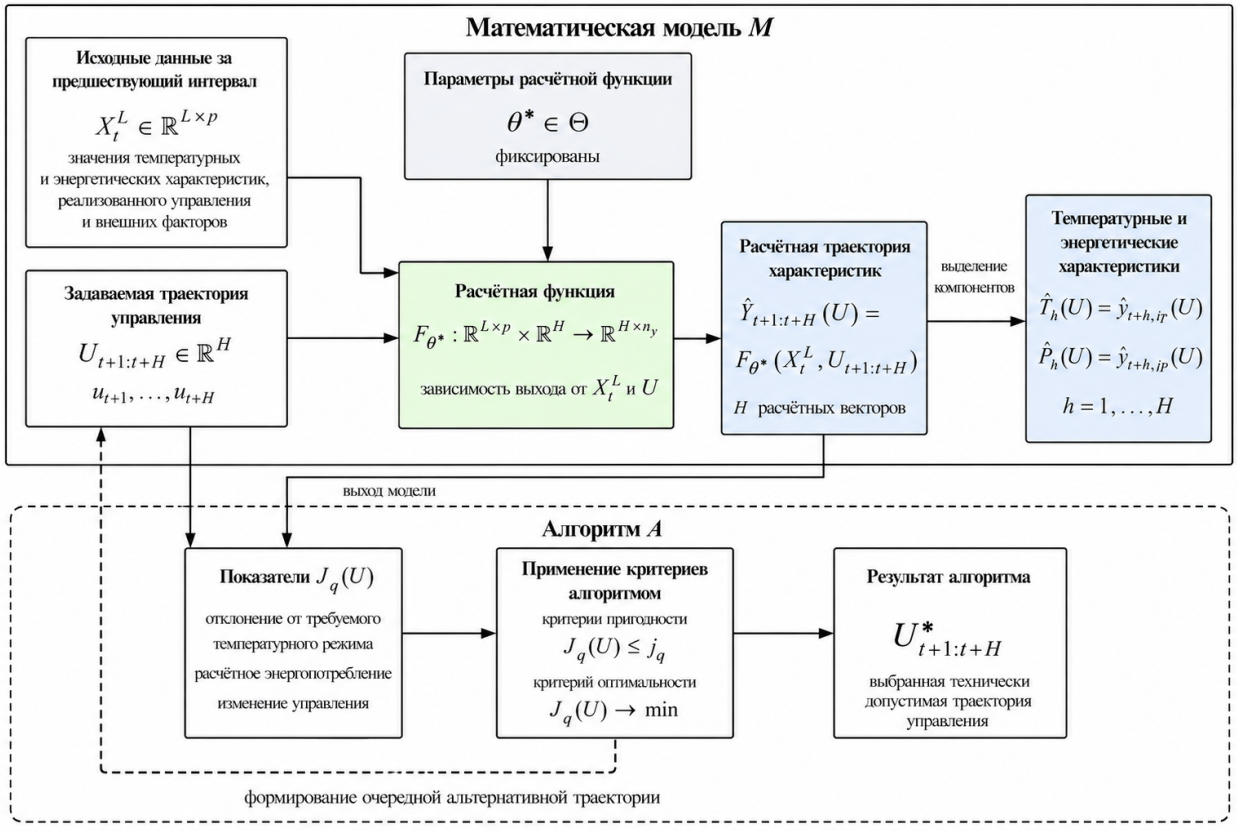
Во второй главе разработана математическая модель M, состав и расчетная зависимость которой заданы формулами (1) и (2). Раскрыты формирование исходных данных, структура расчетной функции и порядок определения ее параметров.

Отображение $\Phi(m_t) = (y_t, d_t, u_t)$ формирует из вектора мониторинга m_t векторы температурных и энергетических характеристик y_t, зарегистрированных внешних факторов d_t и фактически реализованное управление u_t. Матрица $X_t^L = \Phi_L(m_{t-L+1}, \dots, m_t)$ формируется преобразованием и нормированием данных за предшествующий интервал. Будущая траектория управления задается самостоятельным аргументом; будущие наблюдения внешних факторов не используются.

При сопоставлении альтернативных траекторий управления данные эксплуатационного мониторинга X_t^L и параметры модели θ^* остаются фиксированными, а изменяется только задаваемая траектория управления. Для каждой такой траектории модель прямо рассчитывает температурные и энергетические характеристики на всем горизонте.

На рисунке 1 показана связь математической модели с алгоритмом управления. Расчетная функция получает данные за предшествующий интервал и задаваемую траекторию управления, формируя совместную расчетную траекторию характеристик. По выходу модели и траектории управления алгоритм определяет показатели температурного отклонения, расчетного энергопотребления и изменения управления.

Эти показатели используются при проверке ограничений и последовательном решении задач оптимизации.



Источник: составлено автором.

Рисунок 1 – Структурно-логическая схема математической модели и ее связи с алгоритмом управления

В выбранном параметрическом семействе $\mathcal{F} = \{F_\theta \mid \theta \in \Theta\}$ параметры функции определяются при фиксированном λ численным решением задачи по формуле (5)

$$J_\lambda(\theta) = J_{\text{pred}}(\theta) + \lambda J_{\text{phys}}(\theta) \to \min, \quad \theta \in \Theta, \qquad \lambda \ge 0, \tag{5}$$

где J_λ – составная целевая функция;

θ – вектор параметров;

J_{pred} объединяет нормированные ошибки расчета характеристик с установленными весами;

λ – коэффициент балансовой составляющей;

J_{phys} оценивает соответствие расчетных температур дополнительной балансовой связи;

$\Theta \subseteq \mathbb{R}^{n_\theta}$ – множество допустимых значений вектора параметров θ;

n_θ – число параметров.

Балансовый остаток сопоставляет изменение температуры за единицу времени с линейной функцией температурной разности по формуле (6)

$$e_h(\theta) = \frac{\hat{T}_h^{(1)}(\theta) - \hat{T}_{h-1}^{(1)}(\theta)}{\Delta t} - \alpha\left(\hat{T}_h^{(2)}(\theta) - \hat{T}_h^{(1)}(\theta)\right) - \beta, \tag{6}$$

где e_h – балансовый остаток, °C/с;

$h = 1, \ldots, H$ – номер шага;

$\hat{T}_h^{(1)}$ – расчетная температура, определяющая режим, °C;

$\hat{T}_{h-1}^{(1)}(\theta)$ – расчетная температура, определяющая режим, на предыдущем шаге, °C;

Δt – длительность шага, с;

α – коэффициент балансовой связи, $с^{-1}$;

$\hat{T}_h^{(2)}$ – расчетная температура участвующей в теплообмене среды, °C;

β – коэффициент балансовой связи, °C/с.

На первом шаге вместо $\hat{T}_0^{(1)}(\theta)$ используется зарегистрированная температура в момент t.

Коэффициенты α и β оцениваются методом наименьших квадратов по зарегистрированным температурам в однородных группах данных. Медианы групповых оценок фиксируются при определении параметров θ.

Балансовая составляющая вычисляется по формуле (7) с использованием остатков уравнения (6)

$$J_{\text{phys}}(\theta) = \frac{1}{N_r}\sum_{n=1}^{N_r} \omega_n^{\text{bal}} \left(\frac{e_n(\theta)}{\sigma_e}\right)^2, \tag{7}$$

где N_r – общее число балансовых остатков;

$\omega_n^{\text{bal}} > 0$ – заданные веса;

$e_n(\theta)$ – остатки, последовательно пронумерованные по расчетным интервалам и шагам горизонта;

$\sigma_e > 0$ – фиксированный масштаб нормирования остатков, °C/с.

Определение параметров, выбор конфигурации и независимая проверка выполняются на трех последовательных временных интервалах. Коэффициент λ выбирается отдельно от параметров θ; до независимой проверки все выбранные значения фиксируются.

В третьей главе разработан алгоритм A нелинейного модельно-предиктивного управления, результат которого определен формулой (3). По совместному выходу модели M, задаваемому формулой (2), на скользящем горизонте последовательно решаются задачи уменьшения температурного отклонения, снижения расчетного энергопотребления и выбора траектории управления.

Для уменьшения размерности численного поиска траектория управления представлена блочным вектором $v = (v_1, \dots, v_B)^{\mathsf{T}} \in \mathbb{R}^B$, где B – число блоков. Оператор развертки $U_{t+1:t+H}(v)$ повторяет значение каждого компонента на соответствующих шагах расчетного горизонта. Ограничения оборудования задают область технически допустимых векторов по формуле (8)

$$V_t = \left\{ v \in \mathbb{R}^B \;\middle|\; \begin{array}{ll} u_{\min} \le v_b \le u_{\max}, & b = 1, \dots, B, \\ |v_1 - u_t| \le \Delta u_{\max}, & \\ |v_b - v_{b-1}| \le \Delta u_{\max}, & b = 2, \dots, B \end{array} \right\}, \tag{8}$$

где V_t – множество технически допустимых блочных векторов;

$u_{\min}$ – нижняя граница управления;

v_b – управление в блоке с номером b;

$u_{\max}$ – верхняя граница управления;

u_t – действующее управление;

$\Delta u_{\max}$ – предел его изменения.

При $u_t \in [u_{\min}, u_{\max}]$ постоянный вектор с компонентами u_t принадлежит V_t и может служить исходным допустимым результатом. Для каждого блочного вектора модель рассчитывает $\hat{Y}_{t+1:t+H}\big(U(v)\big)$.

По температурной компоненте этого выхода определяется отклонение от требуемого диапазона по формуле (9)

$$\delta_h(v) = \max\big\{T_{\min} - \hat{T}_h(v),\ 0,\ \hat{T}_h(v) - T_{\max}\big\}, \tag{9}$$

где $\delta_h(v)$ – расстояние расчетной температуры $\hat{T}_h(v)$ до диапазона $[T_{\min}, T_{\max}]$, °C;

$T_{\min}$ – нижняя граница требуемого температурного диапазона, °C;

$T_{\max}$ – верхняя граница требуемого температурного диапазона, °C;

$h = 1, \dots, H$ – номер шага горизонта.

Температурная целевая функция имеет вид, приведенный в формуле (10)

$$J_T(v) = \frac{1}{H}\sum_{h=1}^{H} \delta_h\,(v)^2, \tag{10}$$

где J_T – средний квадрат температурного отклонения на горизонте, °C².

Функция равна нулю при соблюдении диапазона на всем горизонте и увеличивает вклад больших выходов за его границы. Энергетическая целевая функция определяется формулой (11)

$$J_E(v) = \Delta t \sum_{h=1}^{H} \hat{P}_h\,(v), \tag{11}$$

где J_E – расчетное энергопотребление на горизонте, кВт·ч;
Δt – длительность шага, ч;
$\hat{P}_h(v)$ – средняя мощность, выделенная из выхода модели, кВт.

Для выбора траектории управления используется функция по формуле (12)

$$J_S(v) = (v_1 - u_t)^2 + \sum_{b=2}^{B} (v_b - v_{b-1})^2, \tag{12}$$

где J_S – сумма квадратов изменений управления, включая переход от u_t к первому блоку, °C²;
B – число блоков.

Температурная задача имеет вид, приведенный в формуле (13)

$$J_T(v) \to \min, \qquad v \in V_t, \tag{13}$$

Поиск ведется по технически допустимым блочным векторам. Принятый после проверки результат обозначается $v_t^{(T)}$, а достигнутое значение – $j_T = J_T\left(v_t^{(T)}\right)$. Оно может быть ненулевым, если траектория полного соблюдения режима не найдена.

Энергетическая задача формируется с использованием полученной границы по формуле (14)

$$\begin{aligned} &J_E(v) \to \min, \qquad v \in V_t, \\ &J_T(v) \le j_T, \end{aligned} \tag{14}$$

где j_T – граница, сохраняющая температурный результат.

Принятый результат обозначается $v_t^{(E)}$, а достигнутое значение – $j_E = J_E\left(v_t^{(E)}\right)$. Ограничение не фиксирует одну траекторию, и блочный вектор остается переменной поиска. Приоритет критериев установлен в порядке $T \succ E \succ S$. В отличие от предметно адаптированной схемы Тверского и Румянцева, при $j_T > 0$ выполняется энергетическая задача с границей j_T вместо непосредственного перехода к граничному действию.

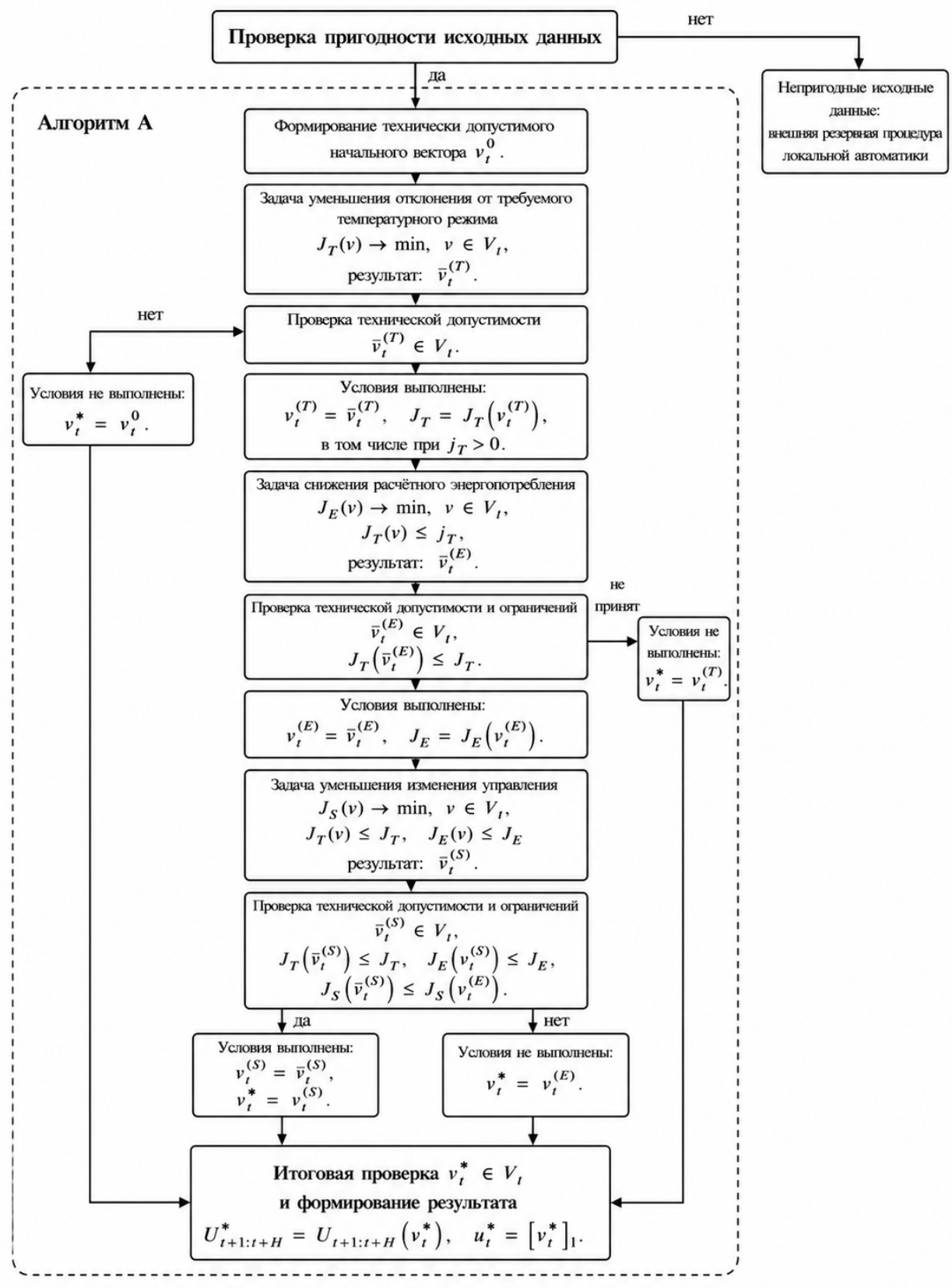
Для выбора траектории по величине изменений управления решается третья задача по формуле (15)

$$\begin{aligned} &J_S(v) \to \min, \qquad v \in V_t, \\ &J_T(v) \le j_T, \qquad J_E(v) \le j_E, \end{aligned} \tag{15}$$

Значения j_T и j_E сохраняют результаты первых двух задач. Вектор принимается как $v_t^{(S)}$ после проверки этих ограничений, технической допустимости и непревышения $J_S\left(v_t^{(E)}\right)$. Результат каждой задачи принимается после проверки технической допустимости и ее ограничений. При непринятии дальнейшие задачи не выполняются; сохраняется последний принятый результат, а при его отсутствии – исходный вектор $v^0 \in V_t$. При принятии всех результатов итоговым становится $v_t^{(S)}$. Техническая допустимость выбранного $v_t^\star$ проверяется повторно.

Порядок решения задач и резервного выбора показан на рисунке 2. Проверка пригодности входных данных и обращение к внешней резервной процедуре относятся к комплексу программ. Принятый результат каждой из первых двух задач является допустимой точкой и начальным приближением следующей, но дополнительный энергетический выигрыш не гарантируется.

Для локального численного поиска применяется метод последовательного квадратичного программирования на основе наименьших квадратов (SLSQP) с автоматическим дифференцированием. На ближайшем интервале применяется $u_t^\star = [v_t^\star]_1$, где $[\cdot]_1$ выделяет первый компонент. Затем обновляется X_t^L и сдвигается горизонт. Результаты задач и итоговый выбор включаются в расчетный протокол.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2 – Структурно-логическая схема формирования технически допустимой траектории управления

В четвертой главе проведена вычислительная апробация модели M и алгоритма A на данных теплоэнергетической системы ледовой арены и разработан комплекс

программ. Модель рассчитывает температуры льда, возвратного и подающего теплоносителя и среднюю мощность компрессорной группы. Управление задает требуемое значение температуры возвратного теплоносителя, передаваемое локальной автоматике. Температуры и управление выражаются в °C, мощность – в кВт. Шаг расчета составляет 1 мин, предшествующий интервал – 180 мин ($L = 180$), горизонт – 30 мин ($H = 30$).

Для проверки модели данные хронологически разделены на три непересекающихся интервала. На первом определяются параметры расчетной функции и стандартизации, на втором выбираются семейство функции, коэффициент λ и итерация определения параметров. Третий используется для независимой проверки после фиксации этих решений.

На интервале выбора сопоставлены шесть расчетных функций, в том числе на основе сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сопоставление расчетных функций на интервале выбора

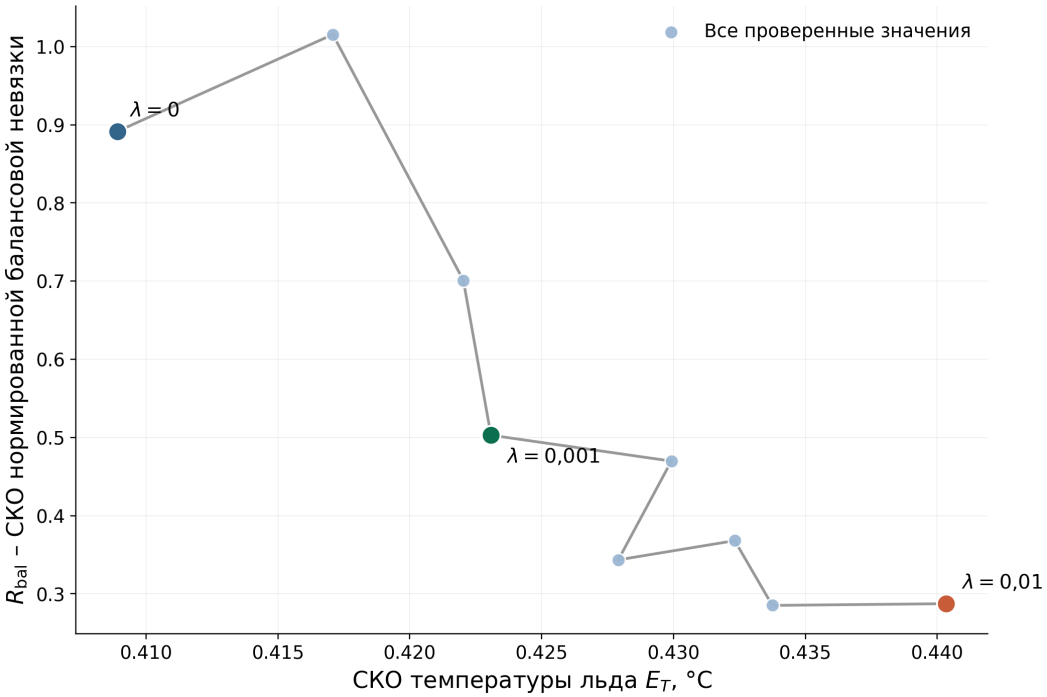
Расчетная функция	E_T, °C	E_T^H, °C	E_Y
Инерционная базовая	0,6127	0,7227	0,9669
Линейная прямая	0,4669	0,5189	0,8109
Линейная рекурсивная	0,4965	0,5594	0,7559
Многослойный персептрон	0,4340	0,4992	0,7447
LSTM	0,4636	0,5189	0,7939
Трансформер	0,4317	0,4851	0,6958

Источник: составлено автором.

В таблице E_T характеризует среднеквадратическую ошибку температуры льда на всем горизонте, E_T^H – в его последней точке; E_Y – среднеквадратическую ошибку стандартизованного вектора характеристик на событийных шагах последних десяти минут горизонта. Трансформерная функция показала наименьшие значения всех трех показателей и была выбрана для последующего определения коэффициента балансовой составляющей λ.

При выборе λ использованы показатели E_T и E_Y, дополненные среднеквадратической нормированной балансовой невязкой R_{bal} на дальней части горизонта. Исключены варианты, для которых существовал другой вариант не хуже

по всем трем показателям и лучше хотя бы по одному. Среди оставшихся минимум суммы квадратов нормированных показателей получен при $\lambda^{\star} = 0{,}001$. На рисунке 3 представлены два из трех показателей; выбор выполнен по всем трем.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3 – Сопоставление ошибки расчета температуры льда и нормированной балансовой невязки при выборе коэффициента λ

После фиксации коэффициента и параметров модели выполнена независимая проверка, результаты которой приведены в таблице 2. По сравнению с вариантом без балансовой составляющей нормированная балансовая невязка уменьшилась на 30,29% при увеличении ошибки E_T на 1,90%, а E_Y – на 0,59%.

Таблица 2 – Независимая проверка точности и балансовой согласованности модели

Вариант определения параметров	E_T, °C	E_Y	R_{bal}
Без балансовой составляющей, $\lambda = 0$	0,4495	0,8074	0,8212
С балансовой составляющей, $\lambda = 0{,}001$	0,4581	0,8122	0,5725

Источник: составлено автором.

После проверки модели исследована эффективность алгоритма A в рекурсивном вычислительном эксперименте. Сопоставлены 26 суточных реализаций, по 288 расчетных моментов за сутки – всего 7488 для каждого варианта. Управление обновлялось каждые 5 мин; горизонт 30 мин представлялся шестью пятиминутными блоками.

При сдвиге окна на 5 мин в него включались рассчитанные характеристики первых пяти минут горизонта вместо зарегистрированных; наиболее ранние данные исключались.

Основным аналогом служил предметно адаптированный вариант схемы Тверского и Румянцева: энергетическая задача решалась при найденном практически нулевом температурном отклонении, иначе применялось граничное действие.

Варианты сопоставлялись по энергопотреблению, температурному отклонению, доле времени вне диапазона и вариации управления. Расчетное энергопотребление за период эксперимента определяется формулой (16)

$$E = \Delta t \sum_{m \in M} P_m, \tag{16}$$

где E – энергопотребление, кВт·ч;

$\Delta t = 1/60$ ч – длительность интервала;

m – индекс интервала;

M – множество минутных интервалов 26 суточных реализаций;

P_m – средняя рассчитанная мощность компрессорной группы, кВт.

Интегральное температурное отклонение представляет сумму отклонений с учетом длительности шага, без возведения в квадрат, и определяется формулой (17)

$$I = \Delta t \sum_{m \in M} \delta_m, \tag{17}$$

где I – интегральное отклонение, °C·мин;

$\Delta t = 1$ мин;

δ_m – расстояние расчетной температуры льда до требуемого диапазона, °C, равное нулю внутри него.

Доля времени вне диапазона определяется выражением (18)

$$\rho = \frac{100}{|M_0|} \sum_{m \in M_0} \mathbf{1}\,(\delta_m > 0), \tag{18}$$

где ρ – доля времени в процентах;

$M_0 \subset M$ – интервалы вне расширенных интервалов заливки;

$|M_0|$ – их число;

$\mathbf{1}(\cdot)$ – индикатор выполнения условия.

Показатель $\overline{V}$ – среднее за 26 суток значение суммы абсолютных изменений управления между последовательными расчетными моментами, включая изменение относительно управления перед началом суток, °C.

Результаты сопоставления расчетных траекторий за 26 суток приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты рекурсивного вычислительного эксперимента за 26 суток

Вариант управления	E, кВт·ч	I, °C·мин	ρ, в процентах	$\overline{V}$, °C
Фактически применявшийся, модельная переоценка	38 908,07	5 549,76	42,20	16,50
Предметно адаптированный вариант известной схемы	36 544,63	6 555,27	41,71	25,24
Разработанный алгоритм	32 570,47	4 896,71	31,28	37,65

Источник: составлено автором.

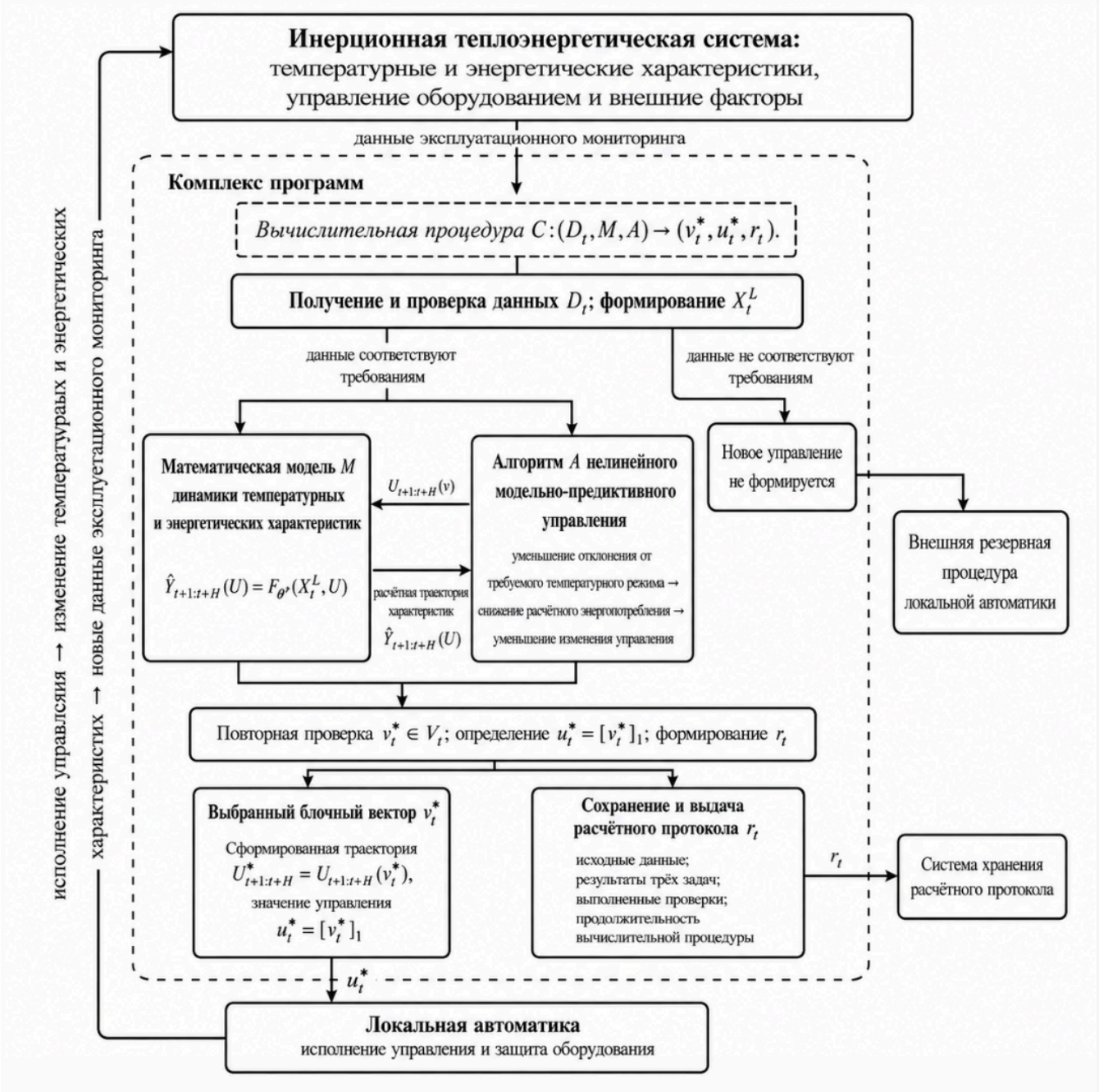
По сравнению с предметно адаптированным вариантом схемы Тверского и Румянцева разработанный алгоритм уменьшил расчетное энергопотребление на 10,87%, интегральное температурное отклонение I – на 25,30%, долю времени вне диапазона ρ – на 10,43 процентного пункта.

Меньшие значения E и ρ получены в 25 из 26 суточных реализаций, меньшее значение I – в 24. При этом средняя суточная вариация управления $\overline{V}$ увеличилась с 25,24 до 37,65 °C.

Комплекс программ объединяет подготовку данных, расчет по модели M и выполнение алгоритма A, проверку траектории и формирование протокола, как показано на рисунке 4. Расчетный протокол фиксирует исходные данные и конфигурацию, результаты решения задач, выполненные проверки, основания принятия итоговой траектории и продолжительность вычислений.

Работоспособность комплекса проверена отдельно при фиксированных исходных данных. После инициализации и загрузки модели измерялось время от формирования входных данных до повторной проверки траектории и формирования протокола в оперативной памяти.

Максимальная продолжительность составила 3,81 с, или 1,27% периода обновления управления, равного 300 с.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4 – Функциональная схема комплекса программ предиктивного управления

III Заключение

Решена научная задача разработки математической модели, алгоритма нелинейного модельно-предиктивного управления и комплекса программ для формирования технически допустимой траектории управления оборудованием инерционных теплоэнергетических систем. Получены следующие результаты:

1) разработана математическая модель динамики температурных и энергетических характеристик инерционных теплоэнергетических систем, обеспечивающая их прямой совместный расчет на всем горизонте. Данные эксплуатационного мониторинга и задаваемая траектория управления являются

самостоятельными аргументами расчетной функции. Ее параметры определяются численной минимизацией составной целевой функции соответствия данным и балансовой согласованности. На интервале независимой проверки нормированная балансовая невязка уменьшена на 30,29% при увеличении значений показателей ошибки расчета характеристик не более чем на 1,90%;

2) разработан алгоритм нелинейного модельно-предиктивного управления. Формирование управления выполняется по совместному выходу модели. Достигнутое значение температурной целевой функции, в том числе ненулевое, используется как верхняя граница ограничения энергетической задачи. Последовательное численное решение задач сопровождается проверкой ограничений и резервным выбором исходной либо последней принятой технически допустимой траектории управления. В рекурсивном вычислительном эксперименте по данным эксплуатационного мониторинга ледовой арены относительно предметно адаптированного варианта схемы Тверского и Румянцева расчетное энергопотребление уменьшено на 10,87%, интегральное температурное отклонение – на 25,30%, доля времени вне требуемого диапазона – на 10,43 процентного пункта;

3) разработан комплекс программ, объединяющий подготовку и проверку данных эксплуатационного мониторинга, расчет характеристик по модели, формирование траектории управления по алгоритму, проверку ее технической допустимости и подготовку расчетного протокола. Протокол фиксирует исходные данные, конфигурацию расчета, результаты решения задач, выполненные проверки и основания принятия итоговой траектории управления. Максимальная измеренная продолжительность процедуры после предварительной загрузки параметров модели составила 3,81 с, или 1,27% пятиминутного периода обновления управления. Требование вычислительной оперативности выполнено в проведенной серии расчетов.

Три поставленные задачи исследования решены. Достижение цели по температурному режиму и расчетному энергопотреблению подтверждено в принятой вычислительной постановке с использованием одной модели внутри алгоритма и для рекурсивного расчета характеристик. Подтверждение эффекта в действующем контуре управления требует натурной апробации. При переносе разработок на другие системы необходимо повторно определить состав данных и характеристик, балансовую связь, параметры модели и ограничения управления, проверить конфигурацию алгоритма и продолжительность вычислений. Дальнейшие исследования связаны с расширением пространства управляющих переменных, учетом дополнительных физических и технологических ограничений и развитием процедур сопровождения модели.

IV Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России:

1. Карманов, А.А. Методы и алгоритмы глубокого обучения для управления энергопотреблением спортивных объектов / А.А. Карманов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2024. – № 1. Том 20. – С. 101–111. – ISSN 2411-1473.

2. Карманов, А.А. Анализ временных рядов физических характеристик ледовой арены с использованием технологий интернета вещей и машинного обучения / А.А. Карманов, П.В. Никитин // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 11. – ISSN 2073-8633. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9647 (дата обращения: 01.10.2026).

3. Карманов, А.А. Физически-информированная нейронная сеть на трансформерной архитектуре для прогноза временных рядов в инженерных системах / А.А. Карманов // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 9. – ISSN 2073-8633. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10380 (дата обращения: 01.10.2026).

4. Карманов, А.А. Прогнозирование температуры поверхности льда с использованием больших языковых моделей в задачах предиктивного управления холодильными системами / А.А. Карманов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2026. – № 1. Том 22. – С. 117–125. – ISSN 2411-1473.

Публикации в международной цитатно-аналитической базе «Scopus»:

5. Карманов, А.А. A Physically Regularized Control-Oriented State Model and Nonlinear Model Predictive Control Framework for an Ice Rink Refrigeration System = Ориентированная на управление модель состояния с физической регуляризацией и схема нелинейного модельно-предиктивного управления холодильной системой ледовой арены / А.А. Карманов, П.В. Никитин // Big Data and Cognitive Computing. – 2026. – № 5. Volume 10. – Article 134. – ISSN 2504-2289. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/bdcc10050134. – URL: https://www.mdpi.com/2504-2289/10/5/134 (дата обращения: 01.10.2026).

Публикации в других научных изданиях:

6. Карманов, А.А. Применение глубокого обучения с подкреплением для оптимизации систем энергопотребления / А.А. Карманов // Научный аспект. – 2023. – № 6. Том 20. – С. 2553–2576. – ISSN 2226-5694.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

7. Карманов, А.А. Программа для ЭВМ по прогнозированию температурного режима и оптимизации энергопотребления на основе автоэнкодера / А.А. Карманов // Программы для ЭВМ. Свидетельство о регистрации Роспатента № 2025618035 (01.04.2025).

8. Карманов, А.А. Автоматизированная интеллектуальная система предиктивной аналитики IoT-данных энергопотребления на основе больших языковых моделей / А.А. Карманов // Программы для ЭВМ. Свидетельство о регистрации Роспатента № 2025681392 (13.08.2025).

9. Карманов, А.А. Предиктивная интеллектуальная система на основе физических уравнений и трансформерной архитектуры для прогнозирования систем энергопотребления / А.А. Карманов // Программы для ЭВМ. Свидетельство о регистрации Роспатента № 2025681393 (13.08.2025).