

На правах рукописи



Пехота Дмитрий Андреевич

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
АВТОМАТИЧЕСКОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗКИ В ЛОКАЛЬНЫХ
СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 2.4.3 – «Электроэнергетика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Глазырин Владимир Евлампиевич,** кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Глазунова Анна Михайловна,** доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук, отдел электроэнергетических систем №40, старший научный сотрудник;

Семенова Наталья Геннадьевна, кандидат технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», кафедра автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники, профессор.

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

Защита состоится «15» октября 2026 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации: www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» августа 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент

Осинцев Анатолий Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Концепция локальных интеллектуальных систем электроснабжения (ЛИСЭ) представляет собой современный подход к организации и управлению локальными энергетическими системами, включающими как генерирующие, так и энергопотребляющие установки, с использованием интеллектуальных технологий для мониторинга и оптимизации работы этих систем. Важной функцией ЛИСЭ является управление режимами работы сети с применением сложных алгоритмов, что направлено на повышение устойчивости и надёжности электроснабжения. Одним из ключевых аспектов работы таких систем является функция автоматического отключения нагрузки, обеспечивающая бесперебойное электроснабжение наиболее ответственных потребителей сети в условиях перегрузок или возникновения нештатных ситуаций.

В настоящее время отсутствуют типовые алгоритмы, эффективно решающие задачу автоматического отключения нагрузки в подобных системах. Это обуславливает необходимость в разработке специализированных решений, направленных на рационализацию этого процесса с учётом специфических особенностей ЛИСЭ. Разработка системы автоматического отключения нагрузки (САОН) является особенно актуальной в связи с возрастанием требований к устойчивости и надёжности систем электроснабжения.

Использование генетических алгоритмов (ГА) для решения задачи выбора объема и состава отключаемой нагрузки в ЛИСЭ является перспективным подходом. Такой алгоритм широко используется в различных областях, включая энергетические системы минигрид, что подтверждается множеством научных работ и исследований во всём мире, посвященных его применению для оптимизации параметров нагрузки и предотвращения перегрузок, но, к сожалению, в отечественной литературе работы, посвященные его применению в рассматриваемой области, отсутствуют.

Степень разработанности темы исследования.

Оптимизацией и решением задач в области электроэнергетики с использованием ГА большой вклад внесли следующие ученые: Манусов В. З., Крюков А.В., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Павлюченко Д.А., Любченко В.Я., Хальясмаа А.И., Ерошенко С.А., Агеев В.А., Вавилов В.Е., Глазырин Г.В., Матрёнин П.В., Кубарьков Ю.П. и др.

Анализу и реализации применения ГА в задачах отключения нагрузки в мировом научном сообществе были посвящены работы ряда зарубежных авторов: Chen C.–R., Melo M., Tsai W.–T., Yedrzejewski N., Chen H.–Y., Nyete A., Lee C.–Y., Lan H.–W., Rastegar H., Zdiri M. A., Alshammari A. S. и др.

В отечественной литературе описаны различные варианты использования автоматического отключения нагрузки в локальных энергосистемах и методы определения объема и состава отключаемой нагрузки, но примеры применения ГА для решения рассматриваемой задачи в отечественной научной литературе отсутствуют.

Объект исследования – локальные интеллектуальные системы электроснабжения.

Предмет исследования – эвристические методы реализации алгоритма выбора объема и состава автоматически отключаемой нагрузки в локальных интеллектуальных системах электроснабжения.

Цель работы – разработка эффективных алгоритмов для системы автоматического отключения нагрузки в локальных интеллектуальных системах электроснабжения, направленных на оптимизацию выбора объема и состава отключаемой нагрузки.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ существующих принципов построения систем автоматического отключения нагрузки как в локальных, так и в объединённых и региональных энергосистемах.

2. Формирование требований к разрабатываемой системе автоматического отключения нагрузки, критерий качества функционирования и средств оценки.

3. Разработка метода выбора объема и состава отключаемой нагрузки с использованием генетического алгоритма по критерию минимального экономического ущерба потребителей.

4. Разработка цифровой модели локальной интеллектуальной системы электроснабжения и испытание с её использованием работы системы автоматического отключения нагрузки с применением как генетического, так и метагенетического алгоритмов.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработан алгоритм оптимизации выбора объема и состава отключаемой нагрузки, основанный на нахождении значения оптимального объема и состава отключаемой нагрузки с использованием адаптивного алгоритма по критерию минимального экономического ущерба потребителей.

2. Разработан алгоритм проверки эффективности работы эвристических алгоритмов в задаче нахождения необходимого объема и состава отключаемой нагрузки по критерию минимального экономического ущерба потребителей, заключающийся в сравнительном анализе результатов функционирования алгоритмов на множестве сценариев моделирования.

3. Разработан универсальный алгоритм принятия решений в системе автоматического отключения нагрузки в зависимости от вида аварии и режима работы локальной интеллектуальной системы электроснабжения, основанный на анализе режимных параметров и выборе объема и состава отключаемой нагрузки с учетом ограничений по активной мощности.

Теоретическая значимость работы:

1. Предложена целевая функция генетического алгоритма, которая позволяет снизить экономический ущерб от вынужденного отключения активной мощности.

2. Сформирован перечень критериев качества функционирования системы автоматического отключения нагрузки, использование которого позволяет оценивать эффективность работы эвристических алгоритмов определения объёма и состава отключаемой нагрузки по избирательности, быстродействию, вероятности нахождения оптимального решения и масштабируемости.

3. Определены основные закономерности изменения эффективности работы генетического алгоритма при изменении параметров и операторов.

4. Разработана стратегия использования метагенетического алгоритма для решения задачи оптимизации совокупности параметров и операторов генетического алгоритма.

Практическая значимость работы:

1. Разработан метод реализации метагенетического алгоритма, осуществляющего оптимизацию совокупности используемых параметров и операторов генетического алгоритма, что позволяет повысить эффективность функционирования системы автоматического отключения нагрузки при возникновении аварии.

2. Разработан порядок проверки эффективности работы эвристических алгоритмов при решении задачи выбора объема и состава отключаемой нагрузки, которая может послужить основой для создания коммерческого программного обеспечения, что подтверждается актом внедрения.

3. На основе проведенных экспериментов доказано, что применение метагенетического алгоритма для оптимизации совокупности параметров и операторов генетического алгоритма позволяет обеспечить системе автоматического отключения нагрузки соответствие разработанным критериям качества функционирования.

Методология и методы исследования.

Разработанные научные положения основываются на применении теоретических и экспериментальных методов исследования в области противоаварийного управления электроэнергетических систем. Исследования проводились с использованием положений теоретических основ электротехники, теории построения электроэнергетических систем, теории автоматического управления, методов компьютерного моделирования, объектно–ориентированного программирования, а также экспериментов на цифровых моделях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Повышение эффективности алгоритма выбора объема и состава отключаемой нагрузки в локальных интеллектуальных системах электроснабжения с применением автоматики отключения нагрузки возможно при уточнении совокупности параметров и операторов генетического алгоритма, применяемого в системах автоматического отключения нагрузки, что обусловлено критической зависимостью эффективности генетического алгоритма от совокупности используемых параметров и операторов.

2. Описанные принципы построения и логика функционирования позволяют реализовать эффективную систему автоматического отключения нагрузки с учетом применения различных эвристических алгоритмов в составе локальной интеллектуальной системы электроснабжения.

3. Использование метагенетического алгоритма для оптимизации совокупности параметров и операторов генетического алгоритма позволяет в локальной интеллектуальной системе электроснабжения находить оптимальную комбинацию для отключения нагрузки в 94 % случаях менее чем за 150 мс, а при наличии ошибки, она с вероятностью 0,96 не превышает 0,48 %.

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности

Выносимые положения на защиту соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.3 «Электроэнергетика»:

- Пункту 9 – «Оптимизация структуры, параметров и схем электрических соединений электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид»;
- Пункту 15 – «Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике»;
- Пункту 16 – «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике»;
- Пункту 20 – «Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии».

Достоверность результатов и выводов

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена комплексом научно-методических и практических мер, а именно: строгим теоретическим обоснованием, опирающимся на фундаментальные положения теории электрических цепей и основ управления режимами электроэнергетических систем, корректной постановкой задачи оптимизации автоматического отключения нагрузки, аргументированным выбором ГА, проведением многократного цифрового моделирования, сопоставлением результатов работы САОН с аналитическими расчётами, статистической обработкой данных моделирования, оценкой погрешностей и анализом повторяемости результатов при многократных повторениях экспериментов работы САОН при различных начальных условиях.

Апробация работы

Основные результаты работы представлялись, докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры электрических станций НГТУ, на V Всероссийской с международным участием молодёжной конференции «Бутаковские чтения» (г. Томск, 2025), на VIII Международной молодежной научно-практической конференции «ЭНЕРГОСТАРТ» (г. Кемерово, 2025), на XIX Всероссийской научной конференции молодых ученых «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ» (г. Новосибирск, 2025), на Международной научной-практической конференции «Устойчивая энергетика, современные энергетические технологии и проблемы энергетической безопасности» (г. Минск, 2026).

Публикации.

По результатам исследования опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 научных статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 3 публикаций в международных и российских изданиях, материалах международных и всероссийских конференций. Получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, состоящего из 89 наименований, и 4 приложений. Общий объем 202 страницы и включает 45 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и научные задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, теоретическая и прикладная значимость работы, приведены методы исследования, перечислены научные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, представлены апробация основных положений работы и структура диссертации.

В первой главе проведен анализ состояния и проблем управления нагрузкой в ЛИСЭ. Выполнено описание структуры, состава и особенности функционирования активных энергетических комплексов (АЭК) – частного случая ЛИСЭ, применяемого в российской практике и имеющего закрепленный правовой статус. Отдельно рассмотрены системы автоматики как отечественные, так и зарубежные, использующие отключение нагрузки (ОН) в качестве управляющего воздействия (УВ).

В ЕЭС России автоматическое ОН применяется в ключевых системах ПА и является одним из наиболее быстродействующих и надёжных УВ. Однако применение таких решений в АЭК требует адаптации, учитывающей наличие распределённой генерации, систем накопления энергии (СНЭ) и различные режимы работы потребителей АЭК.

Управление режимами АЭК осуществляется с помощью управляемого интеллектуального соединения (УИС), обеспечивающего координацию производства и потребления электроэнергии, устранение локальных перегрузок и повышение надёжности электроснабжения, что означает необходимость разработки САОН как подсистемы УИС в АЭК с учетом возможности интеграции в программно–аппаратный комплекс УИС.

Распространённые в настоящее время САОН в основном характеризуются статичной структурой групп нагрузок и не в полной мере учитывают манёвренность ГУ и СНЭ, что в условиях АЭК может приводить к избыточным отключениям и снижению надёжности электроснабжения потребителей. Перспективным направлением в подобных системах является переход к интеллектуальным САОН, формирующим УВ на основании текущих измерений в реальном времени и обеспечивающим координацию с режимом работы всех элементов АЭК: генерирующих установок, накопителей и потребителей.

Во второй главе последовательно сформулированы функциональные задачи САОН с учётом особенностей режимов работы АЭК, выполнены классификация и систематизация требований к системе, обоснован выбор сценариев моделирования для оценки её эффективности, сформированы критерии качества функционирования, а также описаны элементы предлагаемой математической модели АЭК и приведена характеристика необходимых средств для оценки работы САОН.

Рассматриваемая система является одним из ключевых элементов УИС АЭК, обеспечивающим корректное автоматическое управление нагрузкой с целью сохранения устойчивости работы АЭК при любых возмущениях и изменениях режимов работы. В связи с этим составлен следующий перечень функций САОН:

1. Контроль потребления активной мощности отдельными объектами АЭК и его соответствие разрешённым значениям вне зависимости от режима работы АЭК.

2. Контроль перетока мощности по линиям связи и недопущение превышения им разрешённой величины согласованной обменной мощности в параллельном режиме работы АЭК с внешней сетью.

3. Отключение части нагрузок для обеспечения баланса мощностей при переходе из параллельного в автономный режим работы АЭК.

4. Контроль баланса мощностей и селективное отключение ЭПУ, а также поддержание необходимой величины аварийного резерва мощности в автономном режиме работы АЭК.

На основании перечня функций САОН, изучения нормативно–правовой базы и проектирования логики функционирования системы сформулирован обобщённый перечень требований к разрабатываемой САОН, представленный на рисунке 1.



Рисунок 1 – Перечень требований к разрабатываемой САОН УИС АЭК

Для количественной оценки качества принимаемых решений сформирована система критериев качества функционирования САОН:

- Избирательность – это способность САОН формировать УВ исключительно для тех ЭПУ, которые находятся в работоспособном состоянии. Алгоритм должен исключать воздействие на отключённые, неисправные или заблокированные объекты.

- Быстродействие – характеризуется суммарным временем от момента возникновения возмущения до фактического времени приёма УВ коммутационными аппаратами выбранных ЭПУ. Быстродействие определяет способность системы эффективно прекратить развитие аварийного режима.

- Масштабируемость – это способность САОН сохранять основные показатели качества работы при изменении числа ЭПУ, ГУ и СНЭ в составе АЭК.

- Вероятность нахождения оптимального ответа – это вероятность нахождения такой комбинации подлежащих отключению ЭПУ, при которой избыточное ограничение нагрузки минимально при выполнении заданной целевой функции.

Следует отметить, что практическое значение критерия вероятности нахождения оптимального решения заключается в том, что он позволяет объективно оценивать эффективность применения рассматриваемых эвристических алгоритмов и сравнивать их между собой.

В третьей главе представлено описание модульной архитектуры САОН, основных алгоритмов решения функциональных задач САОН, обоснование

применения ГА в САОН и способ оптимизации работы ГА с применением метагенетического алгоритма (метаГА).

В качестве типа архитектуры выбрана модульная архитектура, поскольку её применение в системах автоматики обусловлено преимуществами с точки зрения гибкости, масштабируемости и упрощения сопровождения. В качестве модулей в САОН применяются:

- измерительные модули;
- модуль сбора и предварительной обработки информации;
- вычислительный модуль;
- модуль параметрирования САОН;
- модуль НМИ (человеко–машинного интерфейса);
- модуль формирования УВ;
- модуль хранения данных;
- исполнительные модули.

В приложении «А» диссертации приведена обобщенная структурная схема САОН. В процессе функционирования САОН осуществляется попеременная работа нескольких важных алгоритмов, определяющих работу всей системы. Основными алгоритмами САОН являются:

- алгоритм распознавания аварий первичного оборудования АЭК;
- алгоритм предварительного расчёта УВ ОН для различных вариантов изменения режима;
- алгоритм расчёта необходимого резерва активной мощности в автономном режиме работы АЭК;
- алгоритм расчёта мощности и выбора состава отключаемых ЭПУ внутри АЭК (объекта АЭК).

Алгоритм распознавания аварий первичного оборудования определяет расчётный аварийный сценарий по дискретным сигналам (РЗА, SCADA, АСДУ) для отключения элементов схемы. Для исключения ложного пуска учитывается выведенное состояние оборудования в ремонтном режиме. Результатом его работы является дискретный сигнал, являющийся реакцией на конкретную расчётную аварию для выдачи заранее вычисляемых УВ ОН.

Алгоритм предварительного расчёта УВ ОН для различных режимов логически разделяется на три этапа: определение изменений параметров режима (1), расчет максимального дефицита мощности при типовом возмущении (2), формирование оптимальной комбинации ЭПУ для отключения по заранее определенному правилу, определяемому целевой функцией, (3). Перечень УВ ОН сохраняет актуальность в пределах ограниченного временного интервала, после чего его следует обновить. Поскольку повторное определение перечня необходимых отключений может занимать больше времени, чем выполнение остальных блоков САОН, эти расчёты должны осуществляться предварительно независимо от основной программы, в фоновом режиме.

В зависимости от используемых параметров и операторов ГА время определения состава УВ ОН может существенно изменяться и составляет Δt_1 . Совокупное время расчёта всех вариантов сценариев составляет Δt_2 , которое является суммарным временем выполнения расчётов по n блокам сценариев

расчёта. В примере, приведенном на рисунке 2, итоговое время выполнения расчётов по всем сценариям составляет:

$$\Delta t_2 = n \cdot \Delta t_1.$$

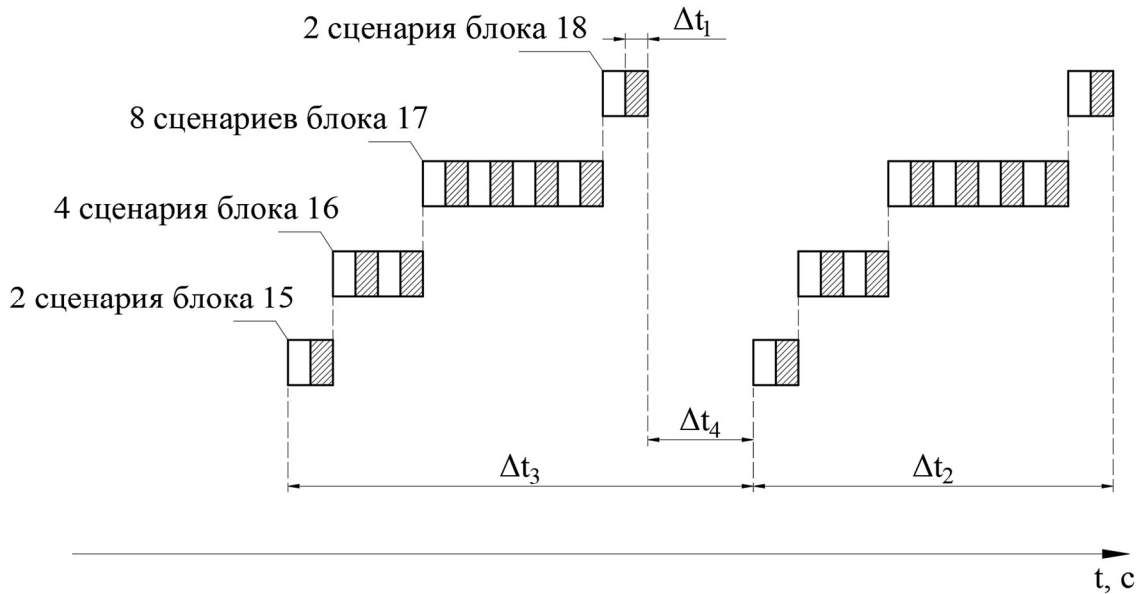


Рисунок 2 – Временная диаграмма алгоритма предварительного определения перечня УВ ОН

Шаг по времени между повторными расчётами УВ ОН устанавливается отдельно. Частота обновления УВ ОН не может превышать $\frac{1}{\Delta t_2}$ в секунду, что соответствует минимальному временному интервалу между последовательными вычислениями, при котором $\Delta t_4 = 0$.

Условием пуска алгоритма выбора мощности и состава отключаемых ЭПУ внутри отдельного объекта АЭК является выполнение следующего неравенства:

$$P_{\text{разр.АЭК.с}} \leq P_{\text{тек.АЭК.с}} = \sum_j Q_j \cdot P_{\text{тек.ЭПУ.с, j}},$$

где $P_{\text{разр.АЭК.с}}$ – разрешенное значение потребляемой активной мощности c -го объекта АЭК, кВт; $P_{\text{тек.АЭК.с}}$ – текущее значение потребляемой активной мощности c -го объекта АЭК, кВт; $P_{\text{тек.ЭПУ.с, j}}$ – текущее значение потребляемой активной мощности j -м ЭПУ c -го объекта АЭК, кВт.

Условием пуска алгоритма выбора мощности и состава отключаемых ЭПУ внутри АЭК является превышение разрешенной мощности потребления АЭК от ЕЭС в параллельном режиме работы в течение регламентированного промежутка времени:

$$P_{\text{разр.АЭК}} \leq P_{\text{тек.АЭК}},$$

где $P_{\text{разр.АЭК}}$ – разрешенное значение потребляемой активной мощности АЭК от ЕЭС в параллельном режиме, кВт; $P_{\text{тек.АЭК}}$ – текущее значение потребляемой активной мощности АЭК от ЕЭС в параллельном режиме, кВт.

Условие начала расчёта необходимого резерва активной мощности в автономном режиме АЭК в общем виде выглядит следующим образом:

$$P_{\text{тек.АЭК}} > \sum_i Q_{\text{ГУ. i}} \cdot P_{\text{ГУ. i}}^{\text{max}} - P_{\text{рез. +}},$$

где i – индекс ГУ, $P_{\text{тек.АЭК}}$ – текущее значение суммарной потребляемой активной мощности потребителями АЭК и потерь активной мощности в распределительной сети АЭК, кВт; $P_{\text{ГУ},i}^{\max}$ – верхняя граница регулировочного диапазона по активной мощности i -ой ГУ, кВт; $P_{\text{рез.}+}$ – величина резерва активной мощности, кВт.

Также необходимо учитывать ряд ограничений, которые необходимо учитывать при определении диапазона допустимых значений потребляемой активной мощности после выдачи УВ. Это необходимо как в алгоритме предварительного расчёта УВ ОН, так и в алгоритме расчёта необходимого резерва активной мощности в автономном режиме АЭК. А именно: мощность отключаемой нагрузки должна быть больше либо равна недостатку резерва активной мощности, но меньше, либо равна максимально допустимой мощности, на которую может быть снижена генерируемая мощность на работающем оборудовании. В общем виде этот диапазон определяется неравенством:

$$P_{\text{тек.АЭК}} - \left(\sum_i Q_{\text{ГУ},i} \cdot P_{\text{ГУ},i}^{\max} - P_{\text{рез.}+} \right) \leq \sum_j Q_j \cdot P_{\text{откл.ЭПУ } j} \leq \sum_i Q_{\text{ГУ},i} \cdot P_{\text{ГУ},i}^{\text{down}},$$

где $P_{\text{ГУ},i}^{\text{down}}$ – максимально допустимый сброс активной мощности i -ой ГУ, то есть та величина активной мощности ГУ, на которую можно быстро уменьшить выработку её активной мощности без вреда для ГУ, кВт; $P_{\text{откл.ЭПУ } j}$ – активная мощность выбранного для отключения j -го ЭПУ, кВт.

С учетом введённых обозначений, задача оптимизации выбора объема и состава отключаемой нагрузки в АЭК (объекте АЭК) формулируется следующим образом:

- Целевая функция оптимизации – минимальная сумма текущего значения потенциального экономического ущерба $V_{\text{тек.ЭПУ}}$ для выбранных к отключению управляемых ЭПУ:

$$F_{\text{fit}} = \min \left(\sum_j Q_j \cdot V_{\text{тек.ЭПУ } j} \right).$$

В современной практике допускается применение различных методов оценки ущерба. Выбор оптимальной методики определяется отраслевой спецификой деятельности потребителя, а также устоявшейся практикой финансового анализа.

- Основное ограничение по активной мощности – активная мощность отключаемой нагрузки должна быть больше либо равна недостатку резерва активной мощности, но не более максимально допустимой мощности, на которую может быть уменьшена генерируемая мощность на работающем оборудовании:

$$P_{\text{тек.АЭК}} - \Delta P \leq \sum_j Q_j \cdot P_{\text{тек.ЭПУ } j} \leq \sum_i Q_{\text{ГУ},i} \cdot P_{\text{ГУ},i}^{\text{down}}$$

- Технологические условия ограничения обусловлены тем, что ЭПУ могут использоваться для формирования УВ при выполнении следующих условий:

1. ЭПУ находятся в работе и потребляют активную мощность;
2. мощность потребления ЭПУ известна;
3. ЭПУ доступен для дистанционного отключения по условиям функционирования в составе предприятия;
4. цепи управления высоковольтного выключателя ЭПУ исправны и управление разрешено.

- Для множества доступных к отключению ЭПУ Ω в случае несоответствия накладывается запрет на отключение:

$$Q_j = 0, \quad j \notin \Omega.$$

- Поскольку ЭПУ управляется дискретно, а их количество ограничено и не может быть больше фактического количества N управляемых ЭПУ в АЭК:

$$Q_j \in \{0; 1\}, \quad j = 1, 2 \dots N.$$

Сформулированная задача относится к классу задач булевого линейного программирования, характеризующихся линейной целевой функцией и линейными ограничениями при бинарных переменных управления. Данный класс задач является NP–трудным.

Отдельно следует отметить, что если в составе объекта АЭК имеется более 20 ЭПУ (область решений оказывается более 2^{20}), то расчёт целесообразно выполнять с использованием ГА. При меньшем числе управляемых ЭПУ может находиться решение методом полного перебора. Также может быть использован гибридный алгоритм расчета, реализующий предварительное сравнение времени работы ГА и метода полного перебора при определенном числе ЭПУ и параметрах ГА при неизменных операторах ГА для получения меньших затрат по времени при запуске метода полного перебора, как более целесообразного.

Выбор ГА для решения задачи оптимизации объема и состава отключаемой нагрузки обусловлен комбинаторной природой решаемой задачи и дискретным характером УВ. По постановке задача близка к "задаче о рюкзаке": из множества возможных комбинаций управляемых ЭПУ требуется выбрать ту, которая обеспечивает требуемый эффект при минимальном объеме отключаемой мощности. При увеличении числа потребителей пространство решений экспоненциально возрастает, что делает применение точных методов оптимизации из-за большого объема необходимых вычислений затруднительным.

В этих условиях использование эвристических алгоритмов является обоснованным, а ГА – одним из наиболее целесообразных методов. Он позволяет выполнять поиск в многомерном дискретном пространстве без жёстких требований к аналитическим свойствам целевой функции, обеспечивает глобальный характер поиска и допускает естественное кодирование структуры отключаемой нагрузки. Дополнительным основанием для его выбора являются результаты анализа научных публикаций, в которых отражён положительный опыт применения ГА при решении подобных задач в электроэнергетике.

При использовании ГА в качестве инструмента для решения рассматриваемой задачи, необходимо учитывать, что настройка ГА включает в себя не только изменение собственных параметров ГА (параметров), но и выбор операторов (функций) ГА. Поэтому для повышения качества и эффективности решения с использованием ГА необходимо иметь средства для адаптации и постоянного повышения качества и эффективности функционирования ГА на основе применения метаГА в задачах определения объема и состава отключаемого оборудования АЭК.

Применение метаГА основано на ретроспективном анализе работы ГА при многократном запуске ГА с различными комбинациями параметров и операторов ГА. Сам метаГА представляет собой ГА, в котором генами метаГА являются

параметры и операторы ГА, от которых зависит работа ГА. Особью метаГА является совокупность параметров и операторов ГА.

Целевая функция метаГА имеет следующий вид:

$$F_{fit}(i) = (-p_i, \varepsilon_i, \delta_i, t_i)$$

$$i < j \leftrightarrow F_{fit}(i) <_{lex} F_{fit}(j),$$

где i и j – это совокупности параметров и операторов ГА, p_i – вероятность нахождения оптимального ответа с i совокупностью параметров и операторов ГА при многократном запуске ГА, ε_i – максимальная величина ошибки суммарного экономического ущерба с i совокупностью параметров и операторов ГА при многократном запуске ГА относительно оптимального ответа, у.е.; δ_i – средняя ошибка суммарного экономического ущерба с i совокупностью параметров и операторов ГА при множественной работе ГА, у.е.; t_i – среднее время работы ГА с i совокупностью параметров и операторов ГА, с.

С использованием этой целевой функции осуществляется сравнение в лексикографическом порядке обобщённых показателей качества решения при многократном запуске ГА при различных сочетаниях параметров и операторов ГА. Сначала в качестве критерия качества решения принимается максимум p_i , следующим по значимости используется критерий ε_i , затем при совпадении двух предыдущих критериев оценивается δ_i , и в последнюю очередь оценивается t_i .

В случае нахождения такой совокупности параметров и операторов ГА, значения целевой функции метаГА которой более предпочтительны по значениям целевой функции метаГА, выполняется изменение текущих настроек ГА на более удачное их сочетание. Таким образом, алгоритм адаптивного метаГА автоматически изменяет используемые параметры работы ГА для достижения лучшей эффективности его работы. На рисунке 3 представлена укрупненная функциональная схема адаптивного генетического алгоритма.

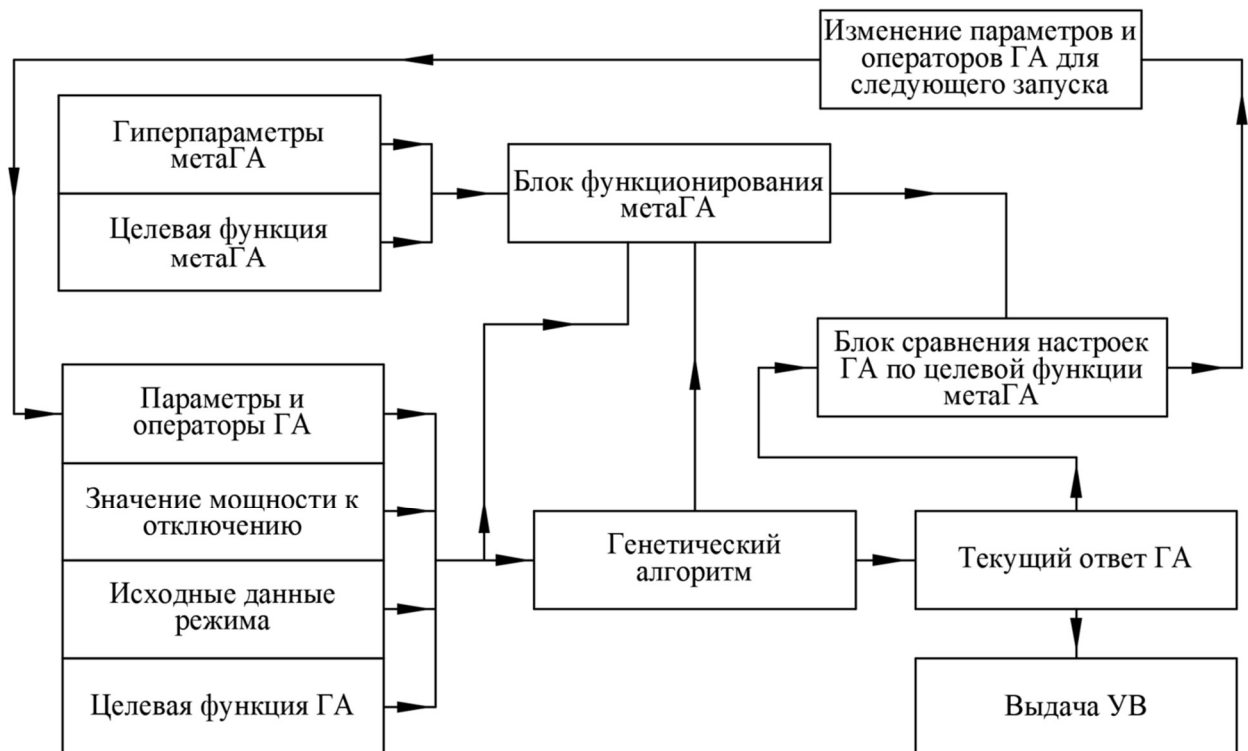


Рисунок 3 – Функциональная схема адаптивного генетического алгоритма

В связи с более длительными расчётами метаГА в процессе оптимизации настроек ГА целесообразно использовать отдельные вычислительные мощности для выполнения алгоритмов метаГА.

В четвертой главе приведены результаты исследования эффективности применения ГА при выборе объема и состава отключаемой нагрузки, основанного на имитационном моделировании. Обозначен сам имитационный эксперимент, его ограничения и недостатки, описан отдельный алгоритм формирования наборов ЭПУ для проверки корректности работы ГА, выбраны типовые сценарии, проведен анализ результатов работы метаГА и ГА при различных сочетаниях параметров и операторов как эвристически подобранных, так и полученных в результате работы метаГА.

Для проведения имитационного эксперимента в работе предложен специализированный алгоритм тестирования, представляющий собой программный комплекс, предназначенный для последовательного воспроизведения сценариев работы САОН и анализа результатов работы ГА. Важно отметить, что с использованием предложенного алгоритма тестирования возможна оценка различных алгоритмов решения задачи для сравнения их эффективности. Структурно предложенный алгоритм тестирования состоит из трёх взаимосвязанных функциональных блоков:

- блок подготовки исходных данных для формирования наборов ЭПУ;
- блок формирования наборов ЭПУ по целевой суммарной мощности для рассматриваемых аварийного сценария и количества ЭПУ;
- блок решения комбинаторной задачи.

В работе проведена оценка работы ГА. Проверка эффективности алгоритма решения задачи определения состава и мощности отключения нагрузки в САОН осуществляется на основе набора типовых сценариев моделирования, отражающих наиболее вероятные варианты развития аварийных ситуаций в АЭК. Всего рассматривалось девять сценариев, сформированных на основе теоретического анализа режимов работы энергосистемы с распределённой генерацией. Сценарии затрагивают различные варианты потери генерирующей мощности вне зависимости от режима работы АЭК.

В каждом запуске рассматривалось 9 сценариев моделирования, а количество ЭПУ изменялось в диапазоне от 15 до 70 единиц. Для каждого сочетания сценария и количества ЭПУ проводилось по 10000 опытов, причём в каждом опыте существует уникальный набор ЭПУ, при выборе которого достигается оптимальное значение целевой функции, и, соответственно, засчитывается оптимальное решение. Таким образом, общее количество выполненных вычислительных экспериментов составило 5040000. Объём полученных данных является достаточным для анализа результативности работы алгоритма при исследуемом сочетании параметров и операторов ГА.

На рисунке 4 представлен график зависимости доли оптимальных решений от общего числа полученных решений при различном количестве ЭПУ для различных номеров сценария. По оси абсцисс отложено количество ЭПУ, по оси ординат – доля оптимальных решений, найденных ГА для заданного количества ЭПУ в рамках соответствующего сценария.

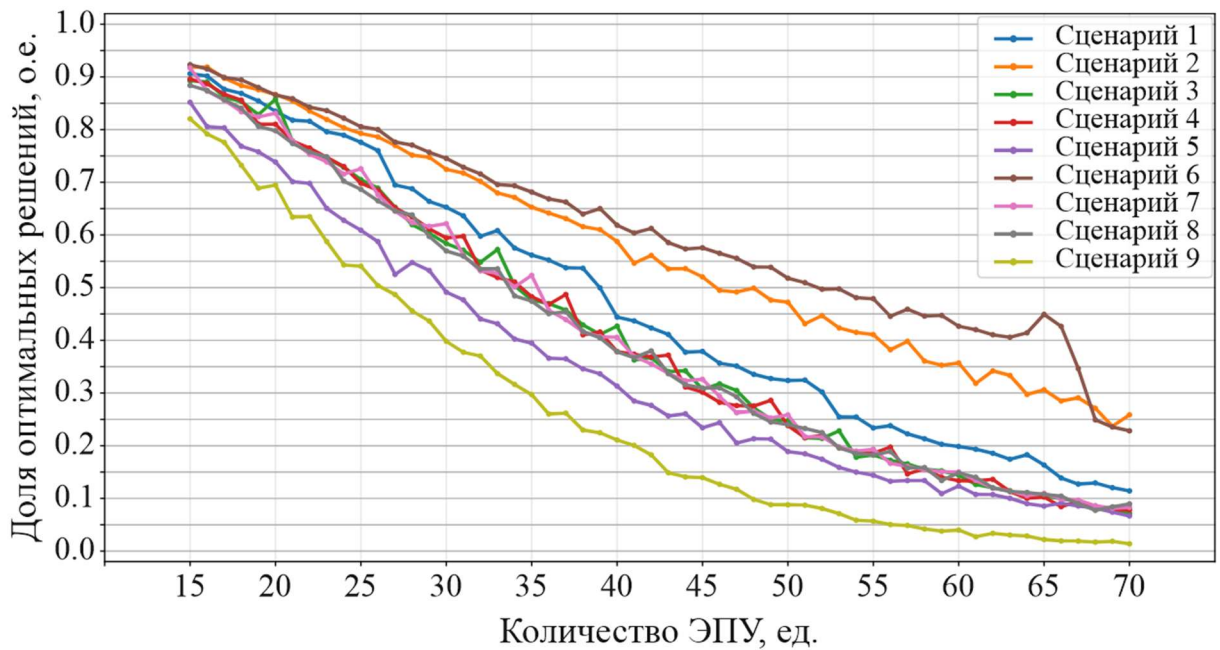


Рисунок 4 – График зависимости доли оптимальных решений от общего числа решений задачи с помощью ГА от количества ЭПУ в модели АЭК по сценариям

Для более детального анализа качества решений построены графики кумулятивной функции распределения, описывающей вероятность того, что относительное отклонение найденного ГА решения от оптимального значения не превышает заданную величину. По оси абсцисс откладывается относительная ошибка в процентах по сравнению с оптимальным решением, по оси ординат – вероятность того, что ошибка принимает значение, меньшее либо равное соответствующему значению по оси абсцисс. На рисунке 5 приведены соответствующие графики.

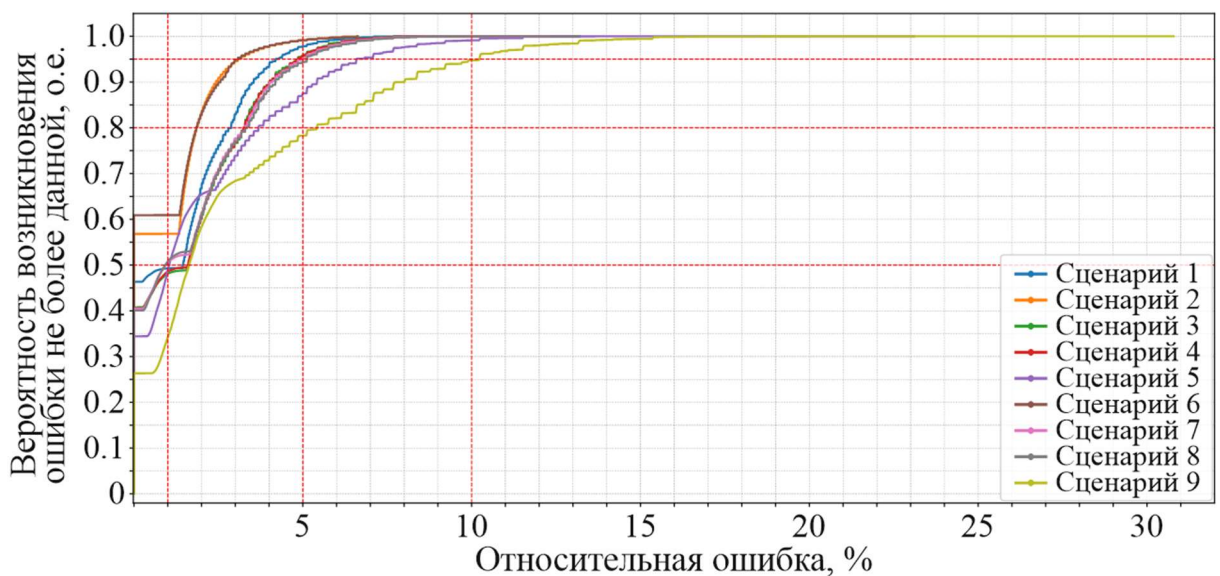


Рисунок 5 – Кумулятивная функция распределения при работе ГА по различным сценариям

Из рисунка 5 следует, что при увеличении размерности поиска решений снижается эффективность ГА. Среднее время решения составило 144,12 мс, а

вероятность получения удовлетворительного ответа при работе в худшем сценарии (сценарий 6) с отклонением менее чем в 5 % от оптимального ответа составила 10, 23%.

Среднее время решения задачи в незначительной степени зависит от размера области поиска. При 15 ЭПУ максимальное среднее время решения составляет 145,56 мс в сценарии 6, а минимальное – 142,55 мс в сценарии 9. При 70 ЭПУ максимальное время работы алгоритма составляет 145,44 мс в сценарии 3, а минимальное – 142,07 мс в сценарии 9. Наблюдаемый разброс значений в пределах нескольких миллисекунд может быть обусловлен фоновой загрузкой центрального процессора сторонними процессами, связанными с операционной системой (ОС) и системными задачами ОС «Windows».

Кроме того, выполнен запуск метаГА несколько не связанных друг с другом раз на одном и том же наборе исходных данных, но при различных начальных сочетаниях его гиперпараметров. Общее время проведения этих расчётов составляет 2077 машино–часов. В таблице 1 приведены результаты работы метаГА.

Таблица 1 – Результаты поиска комбинаций при различных запусках метаГА по проведенным экспериментам

Комбинация параметров ГА	Номер эксперимента						
	1	2	3	4	5	6	7
Число особей	182	256	110	320	108	128	186
Число поколений	118	88	186	98	174	158	130
Оператор отбора	Ранжированный отбор						Турнирный отбор
Размер турнира	–	–	–	–	–	–	4
Оператор скрещивания (число – кол–во точек при k–точечном скрещивании)	2	1	4	5	3	Равномерное скрещивание	4
Вероятность скрещивания	0,94	0,64	0,16	0,88	0,74	0,46	0,33
Оператор мутации	Обмен битов						
Вероятность мутации особи	0,38	0,92	0,55	0,56	0,78	0,97	0,79
Вероятность мутации гена	0,64	0,74	0,1	0,02	0,57	0,89	0,21
Среднее время работы ГА, мс	11	12	7	22	10	13	110

На рисунках 6 и 7 представлены результаты применения найденной совокупности параметров и операторов ГА последнего запуска метаГА. Полученная совокупность показала наилучшую результативность. Среднее время работы составило 148,11 мс, худшая доля оптимальных решений при многократной работе ГА составила 0,945.

По результатам построения графика кумулятивной функции распределения на рисунке 7 видно, что относительная ошибка нахождения оптимального ответа не превышает 1 % в 97 случаях из 100.

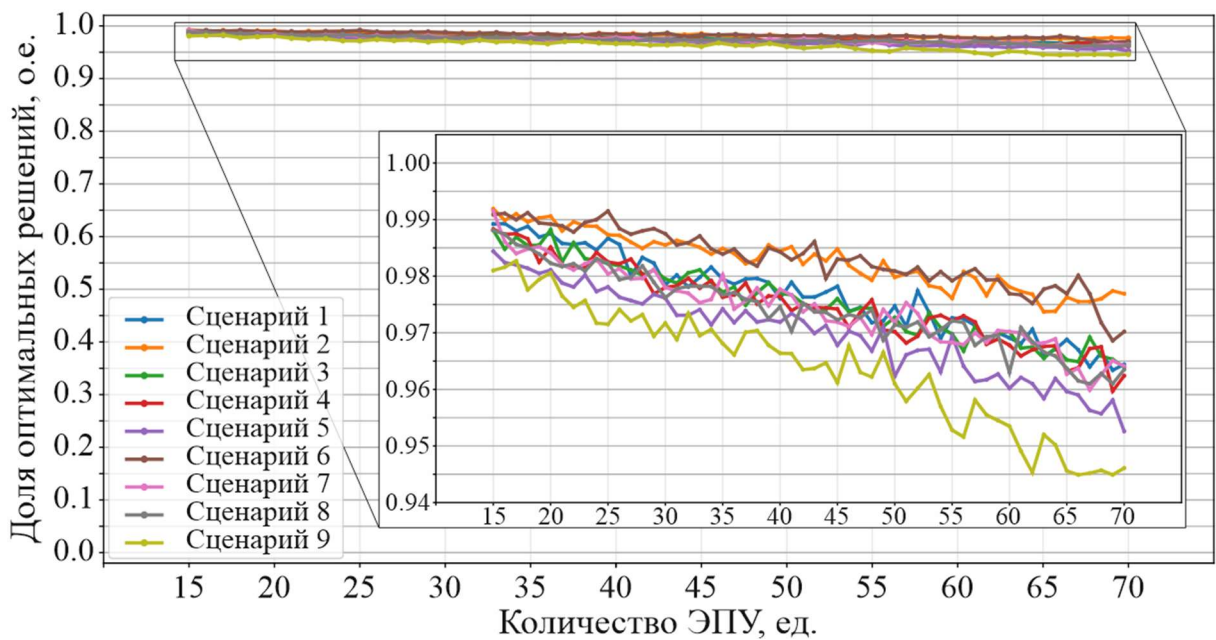


Рисунок 6 – Зависимость доли оптимальных решений от общего числа решений задачи с помощью ГА от количества ЭПУ в модели АЭК по последним результатам, полученным от метаГА

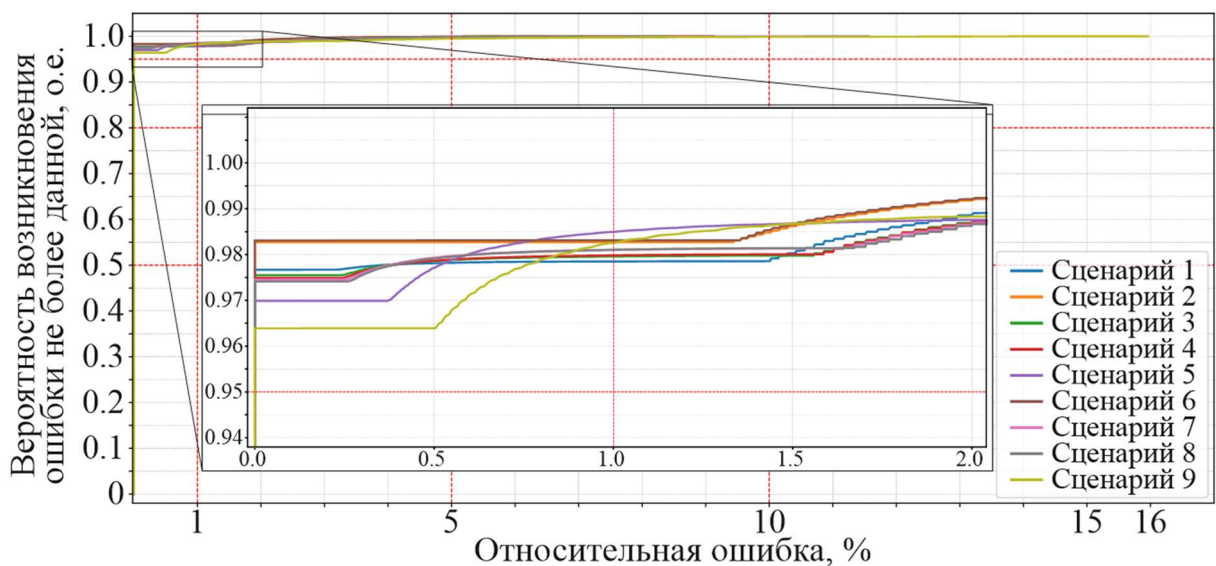


Рисунок 7 – Кумулятивная функция распределения при работе ГА по различным сценариям по последним результатам, полученным от метаГА

Из таблицы 3 видно, что последняя комбинация параметров и операторов ГА показывает наилучшие результаты при решении задачи выбора состава и объёма отключаемой нагрузки в АЭК. Во-первых, максимальная ошибка во всех экспериментах оказалась минимальной и составила 11,57%. Во-вторых, доля оптимальных решений при многократных запусках этого алгоритма является наибольшей среди всех тестируемых конфигураций и в худшем случае составляет 0,945. В-третьих, минимальную ошибку в 0,483% ГА получаем с вероятностью 0,963 в случае, если оптимальное решение не найдено.

Таблица 3 – Сравнительные характеристики множественных запусков ГА с различными вариантами сочетаний параметров и операторов ГА

Комбинация параметров ГА		Эмпирически подобранная	Результат запуска метаГА		
			5	6	7
Наиболее низкая доля оптимальных решений при многократном запуске, о.е.		0,014	0,634	0,596	0,945
Среднее время работы алгоритма по всем запускам, мс		144,12	10,36	22,39	148,11
Вероятность возникновения ошибки, о.е.	<= 1%	0,344	0,927	0,982	0,978
	<= 5%	0,781	0,997	0,999	0,995
	<= 10%	0,947	0,999	0,999	0,999
Максимальная величина ошибки при вероятности, %	0,5	1,629	–	–	–
	0,8	5,409	0,547	–	–
	0,95	10,231	1,156	0,583	–
Пороговое значение ошибки	Вероятность, о.е.	0,485	0,785	0,924	0,963
	Величина ошибки, %	0,263	0,486	0,488	0,486
Максимальная ошибка при запусках ГА, %		30,77	38,36	28,95	11,57

Таким образом, полученные результаты подтверждают результативность работы метаГА. Предложенный подход позволяет находить такие комбинации параметров и операторов ГА, которые значительно повышают эффект от решения задачи. Это также подтверждает целесообразность использования метаГА для адаптивной настройки ГА в процессе эксплуатации САОН, что позволяет не только повысить результативность её работы со временем, но и эффективно адаптировать параметры и операторы ГА при изменении состава нагрузок. В дальнейшем это должно предоставить возможность автоматической адаптации алгоритма для поддержания его высокой эффективности и точности при изменяющихся режимах работы и конфигурации АЭК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ работы ПА, использующей ОН в качестве УВ как для локальных, так и для объединенных и региональных энергосистем. Рассмотрены нормативные документы, регламентирующие работу существующих САОН. Обозначена важность технической реализации САОН в АЭК с использованием технологии УИС и учётом взаимодействия с другими подсистемами ПА.

2. Разработан перечень функциональных задач САОН в зависимости от режима работы АЭК, составлены перечни сигналов и параметров режима, получаемых от ГУ, ЭПУ, объектов АЭК, СНЭ, линий связи АЭК с ЕЭС, которые необходимы для реализации функционала САОН.

3. Сформулированы требования к разрабатываемой системе САОН, в части функционала, быстродействия, селективности, информационной безопасности, надёжности и резервирования, систем связи, интеграции в УИС, самоадаптации к

изменяющимся условиям функционирования АЭК после действия САОН, масштабируемости и модификации, а также регистрации событий.

4. Определены сценарии, в соответствии с которыми должно осуществляться моделирование работы АЭК, позволяющие проверить функциональные возможности и выполнение требований к функционированию АЭК.

5. Сформулированы критерии оценки качества функционирования САОН: избирательность, быстродействие, вероятность нахождения оптимального ответа, масштабируемость.

6. Разработана модульная архитектура САОН, использующая эвристические методы оптимизации.

7. Разработан алгоритм оптимизации параметров и операторов ГА на основе эволюционного алгоритма – метаГА, входящего в состав алгоритма определения состава и мощности отключаемых ЭПУ внутри АЭК, позволяющего без участия оператора корректировать используемые параметры работы и операторы ГА для достижения максимальной эффективности работы САОН.

8. Предложены программные компоненты САОН, реализующие логику принятия решений и действий разработанных алгоритмов.

9. Разработаны алгоритмы, являющиеся основными для САОН: алгоритм распознавания аварий первичного оборудования АЭК, алгоритм предварительного расчета УВ ОН по различным сценариям, алгоритм расчета необходимого резерва активной мощности в автономном режиме АЭК и алгоритм определения состава и мощности отключаемых ЭПУ внутри АЭК.

10. Разработан алгоритм формирования наборов рекомендуемых к отключению ЭПУ, являющийся ядром программы тестирования САОН. Алгоритм формирует наборы ЭПУ, в каждом из которых имеется единственный ответ с максимумом целевой функции ГА при различающихся пространствах решений, позволяющий выполнять автоматическую оценку эффективности алгоритмов, используемых для решения задачи выбора объема и состава ОН, вне зависимости от используемого метода решения комбинаторной задачи, что позволяет сравнивать эффективность различных методов решения рассматриваемой задачи.

11. С использованием разработанной программы автоматизированной проверки алгоритмов, используемых для решения задачи выбора объема и состава ОН, проведена оценка эффективности работы САОН с эмпирически подобранной комбинацией параметров и операторов ГА, а также с комбинациями параметров и операторов ГА, полученных в результате применения метаГА. Анализ результатов работы метаГА позволяет сделать вывод об эффективности его использования благодаря нахождению совокупности параметров и операторов ГА, позволяющих иметь более качественные характеристики работы ГА в части нахождения оптимальных решений выполняемой задачи.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Пехота Д.А. Исследование применимости генетического алгоритма для решения задачи обеспечения необходимого резерва мощности в активном энергетическом комплексе / В. Е. Глазырин, А. А. Осинцев, Д. А. Пехота // Электрические станции. – 2024. – № 6. – С. 51–59.

2. **Пехота Д.А.** Применение генетического алгоритма в задачах нахождения необходимого объема отключаемой нагрузки / В.Е. Глазырин, А.А. Осинцев, Д.А. Пехота // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2025. – № 2(93). – С. 44–57.

3. **Пехота Д.А.** Реализация алгоритма мета–оптимизации внутренних характеристик генетического алгоритма для выбора объема и состава отключаемой нагрузки / Д.А. Пехота, В.Е. Глазырин // Интеллектуальная Электротехника. – 2026. – № 1. – С. 4–21.

Публикации в других российских изданиях:

4. **Пехота Д.А.** Функциональные задачи системы автоматического отключения нагрузки в составе АЭК / В.Е. Глазырин, Д.А. Пехота // ЭНЕРГОСТАРТ. Материалы VIII Международной молодежной научно–практической конференции, 20–21 ноября 2025 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун–т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: А.Р. Богомоллов (отв. редактор) [и др.]. – Кемерово, 2026. – 1 электрон. опт. диск.

5. **Пехота Д.А.** Исследование работы генетического алгоритма в задачах отключения нагрузки в составе АЭК / Д.А. Пехота, В.Е. Глазырин // Бутаковские чтения: Сборник статей V Всероссийской с международным участием молодёжной конференции, Томск, 9–11 декабря 2025 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2025. – С. 199–202.

6. **Пехота Д. А.** Разработка гибридного алгоритма автоматического отключения нагрузки в составе АЭК / Д.А. Пехота // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. 19 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 8–12 дек. 2025 г. : в 9 ч. – Новосибирск : Изд–во НГТУ, 2026. – Ч. 2. – С. 466–469.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

7. Свидетельство № 2025663907 РФ. Программа реализации эволюционного алгоритма нахождения оптимальной совокупности гиперпараметров генетического алгоритма для решения задачи нахождения необходимого объема отключаемой нагрузки с учётом дополнительного критерия ценности присоединения; № 2025663246: заявл. 02.06.2025, опублик. 02.06.2025 / Д.А. Пехота, В.Е. Глазырин, А.А. Осинцев; ФГБОУ ВО «НГТУ».

8. Свидетельство № 2026614055 РФ. Программа проверки эффективности работы генетического алгоритма в задаче нахождения необходимого объема отключаемой нагрузки с использованием дополнительного критерия ценности присоединения; № 2026613157: заявл. 12.02.2026, опублик. 12.02.2026 / Д.А. Пехота, В.Е. Глазырин; ФГБОУ ВО «НГТУ».

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346–08–57
Формат 60x84 1/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № Р-05587. Подписано в печать 03.07.2026 г.