



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА SIMINTECH ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАГРУЗКИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ильичев В. Ю. ORCID ID 0000-0003-1017-5544

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация,
e-mail: patrol8@yandex.ru*

В статье рассмотрено практическое применение генетического алгоритма в отечественной среде имитационного моделирования для оптимального перераспределения электрической нагрузки между параллельно работающими газотурбинными двигателями. Актуальность работы обусловлена устойчивым ростом распределённой генерации, необходимостью снижения удельного расхода топлива и курсом на импортозамещение программного обеспечения. Объектом исследования выбрана реальная электростанция с тремя агрегатами газотурбинных установок мощностью 16 мегаватт, имеющими разную наработку и расходные характеристики. Построена верифицированная по архивам автоматизированной системы управления имитационная модель группы двигателей. Для оптимального перераспределения нагрузки разработан генетический алгоритм на языке программирования Python с использованием библиотеки эволюционных алгоритмов, интегрированный с моделью через обмен данными и формирующий уставки загрузки. Показано, что оптимальное распределение нагрузки даёт экономию природного газа на 3,7% при суммарном потреблении 30 мегаватт, а при 42 мегаватт – на 2,1% по сравнению с традиционным равномерным распределением. Генетический алгоритм демонстрирует уверенную сходимость за 40-60 поколений и высокую работоспособность в динамическом режиме. Интегральная оценка годовой экономии топлива составляет 2,5-3,5%, что соответствует нескольким миллионам рублей для одной станции. Полученные результаты подтверждают экономическую целесообразность внедрения эволюционных методов оптимизации в контуры управления реальными газотурбинными электростанциями.

Ключевые слова: генетический алгоритм, имитационное моделирование, газотурбинный двигатель, оптимизация загрузки, распределение нагрузки, расход топлива, параллельная работа, SimInTech

APPLICATION OF THE SIMINTECH GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING LOAD REDISTRIBUTION AMONG GAS TURBINE ENGINES

Ilichev V. Y. ORCID ID 0000-0003-1017-5544

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Bauman Moscow State Technical University (National Research University)”,
Moscow, Russian Federation, e-mail: patrol8@yandex.ru*

This article examines the practical application of a genetic algorithm in a domestic simulation environment for the optimal redistribution of electrical load among parallel-operating gas turbine engines. The relevance of this study is driven by the steady growth of distributed generation, the need to reduce specific fuel consumption, and the strategic shift towards software import substitution. The research focuses on an actual power plant equipped with three gas turbine units rated at sixteen megawatts that have different operating hours and distinct consumption characteristics. A simulation model of the engine group was developed and verified against historical data from the plant's automated process control system. A genetic algorithm was developed in Python using an evolutionary algorithms library and integrated with the model through data exchange to generate optimal load setpoints. The results show that optimal load distribution yields a three point seven percent savings in natural gas at a total demand of thirty megawatts, and a two point one percent savings at forty-two megawatts compared to the traditional uniform distribution. The genetic algorithm demonstrates robust convergence within forty to sixty generations and high operational efficiency in dynamic mode. During step changes in demand, the transient process maintains an exact power balance. The overall estimated annual fuel savings range from two point five to three point five percent, translating to several million rubles per power plant. These results convincingly confirm the economic feasibility of successfully implementing evolutionary optimization methods into the control loops of real gas turbine power plants using domestic software.

Keywords: genetic algorithm, simulation modeling, gas turbine engine, load optimization, load distribution, fuel consumption, parallel operation, SimInTech

Введение

Современные исследования в области моделирования технических систем всё в большей степени опираются на методы интеллектуального анализа данных [1] и ап-

парат дискретных динамических систем [2]. Эти подходы формируют основу для перехода от эмпирических диспетчерских регламентов к формализованным контурам управления энергетическими объектами.

Распределённая генерация на базе газотурбинных и парогазовых установок занимает всё более заметное место в электроэнергетике благодаря высокой манёвренности, компактности и возможности работы на природном газе [3]. Оптимальное распределение активных мощностей между агрегатами традиционно решается методами математического программирования [4], однако на практике эта задача часто решается равномерным распределением нагрузки либо по диспетчерским таблицам, не учитывающим текущее техническое состояние агрегатов.

Между тем агрегаты даже одной серии имеют различные расходные характеристики, которые с наработкой расходятся всё сильнее, и равномерное распределение приводит к систематическому перерасходу топлива. Эксплуатация параллельно работающих газотурбинных двигателей должна учитывать технические ограничения, закреплённые правилами эксплуатации электрических станций и сетей [5]. Обзор метаэвристических методов оптимизации показывает их высокую эффективность при решении подобных электроэнергетических задач [6].

Мультиагентные модели энергоснабжающих систем позволяют учесть сложные взаимодействия между компонентами [7], а современные интеллектуальные системы обеспечивают адаптацию к изменяющимся условиям эксплуатации [8]. Для комплексной оценки работы энергетических объектов необходимо также моделирование пространства выбросов в атмосфере [9].

Характеристики газотурбинных двигателей содержат изломы, зоны запрещённой работы и нелинейности, что делает целевую функцию негладкой и многоэкстремальной. Именно здесь проявляются преимущества генетических алгоритмов, которые работают с популяцией решений, учитывают произвольные ограничения через штрафные функции и применимы к смешанным переменным. Эффективность подобных подходов подтверждается методикой построения баланса в гидротепловых энергосистемах [10], комплексной оптимизацией режимов промышленных тепловых электростанций [11] и применением имитационных моделей систем автоматического управления [12].

Отдельную актуальность задаче придаёт курс на импортозамещение программного обеспечения. Отечественная среда SimInTech содержит библиотеки для моделирования энергетических объектов, а параметрический синтез регуляторов с использованием метаэвристических алгоритмов в этой среде демонстрирует их работоспособность [13]. Оптимизация электрических сетей генетическими алгоритмами с актив-

но-адаптивными элементами подтверждает применимость эволюционных методов к энергосистемам [14], а корректный учёт ограничений обеспечивает техническую реализуемость получаемых решений [15].

Целью настоящей работы является практическая апробация генетического алгоритма отечественной среды имитационного моделирования SimInTech для задачи оптимального перераспределения электрической нагрузки между параллельно работающими газотурбинными двигателями при изменении суммарного потребления электрической энергии и количественная оценка достигаемой экономии топлива. Актуальность исследования обусловлена устойчивым ростом доли распределённой генерации на базе газотурбинных и парогазовых установок, необходимостью снижения удельного расхода топлива в условиях переменных графиков нагрузки, а также курсом на импортонезависимость программных средств технологического моделирования и управления.

Научная новизна состоит в том, что впервые для кластера ГТЭ-16 предложена архитектура замкнутого контура «модель станции – генетический алгоритм – уставки АСУ ТП», реализованная полностью на отечественном программном обеспечении и сочетающая защитный слой, гарантирующий соблюдение технических ограничений, и экономическое вознаграждение. Защитный слой реализован в виде штрафных функций за нарушение баланса мощности и за выход за допустимые диапазоны работы агрегатов, а функция вознаграждения минимизирует суммарный расход топлива. В отличие от известных подходов предложенная архитектура не требует пересмотра методики при изменении состава агрегатов или их характеристик после ремонта: достаточно обновить коэффициенты аппроксимации в модели.

Практическая значимость работы определяется курсом на импортонезависимость: весь контур реализуется на отечественном программном обеспечении и может быть интегрирован с АСУ ТП через стандартные протоколы обмена. Разработанная методика легко масштабируется.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: построение и верификация имитационной модели группы ГТД по реальным расходным характеристикам; формализация критерия оптимальности с учётом экономических компонент; настройка параметров генетического алгоритма и оценка его сходимости; проведение серии вычислительных экспериментов в стационарных и переходных режимах; сравнение результатов с традиционным равномерным распределением и оценка годовой экономии.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования выбрана электростанция машиностроительного предприятия, включающая три параллельно работающих агрегата ГТЭ-16 с различной наработкой: № 1 – новый (после капитального ремонта), № 2 – около 50 тыс. ч, № 3 – около 80 тыс. ч. Агрегаты ГТЭ-16 номинальной мощностью 16 МВт подключены к общим шинам 10 кВ и работают параллельно на покрытие нагрузки предприятия с выдачей излишков во внешнюю сеть.

С ростом наработки ухудшается КПД турбомашин и растёт удельный расход топлива, а расходная характеристика смещается вверх и становится «круче». По данным испытаний, приведённых к стандартным условиям, расход газа каждого агрегата аппроксимирован квадратичной зависимостью от электрической мощности:

$$B_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $i=1, 2, 3$ – номер агрегата; P_i – электрическая мощность i -го агрегата, МВт;

a_i, b_i, c_i – коэффициенты аппроксимации, полученные методом наименьших квадратов.

Для исследуемых агрегатов получены следующие коэффициенты:

агрегат № 1 (новый):

$$a_1=1200, b_1=850, c_1=12,5;$$

агрегат № 2 (50 тыс. ч):

$$a_2=1350, b_2=920, c_2=14,2;$$

агрегат № 3 (80 тыс. ч):

$$a_3=1480, b_3=980, c_3=15,8.$$

Критерий оптимальности (минимум суммарного расхода газа) $\min F = \sum B_i(P_i)$ при ограничениях:

$$\text{баланс мощности } \sum P_i = B,$$

где 1) D – суммарный спрос, МВт;

2) диапазон работы: $4 \leq P_i \leq 15,2$ МВт (не выше 95% от номинала 16 МВт);

3) темп набора нагрузки:

$$|dP_i / dt| \leq 0,5 \text{ МВт/с}.$$

Задача решается с использованием генетического алгоритма, реализованного на языке Python с применением библиотеки DEAP. Интеграция с моделью станции, построенной в среде имитационного моделирования SimInTech, осуществляется через обмен данными в CSV-формате: на каждом поколении генетический алгоритм формирует уставки загрузки агрегатов, которые передаются в модель станции; после моделирования переходного процесса значения расхода газа возвращаются в алгоритм для оценки приспособленности особей.

Генетический алгоритм настроен со следующими параметрами: размер популяции $N=60$ особей; число поколений $G=100$; вероятность кроссовера $p_c = 0,8$; вероятность мутации $p_m = 0,05$; метод селекции: турнирный отбор (размер турнира = 3); тип кроссовера: арифметический; тип мутации: гауссова с $\sigma = 0,1$.

Штрафные функции за нарушение ограничений имеют вид:

$$\Phi(P) = F(P) + \lambda_1 \left(\sum_{i=1}^3 P_i - D \right)^2 + \lambda_2 \sum_{i=1}^3 \max(0, 4 - P_i)^2 + \lambda_3 \sum_{i=1}^3 \max(0, P_i - 15,2)^2,$$

где $\lambda_1=1000, \lambda_2=500, \lambda_3=500$ – коэффициенты штрафов.

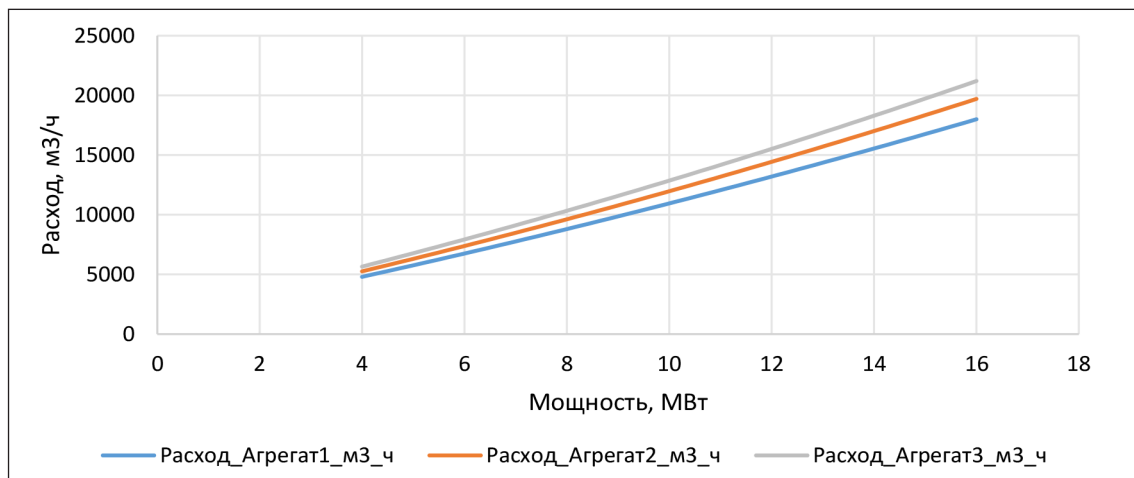


Рис. 1. Расходные характеристики параллельно работающих ГТЭ-16
Примечание: составлено авторами

Верификация модели проведена по архиву АСУ ТП за 6 месяцев эксплуатации. Средняя погрешность моделирования расхода газа составила 2,3%, что подтверждает адекватность модели для решения задачи оптимизации. Графическое сопоставление характеристик (рис. 1) показывает, что при мощности 16 МВт разница в расходе между новым и изношенным агрегатами достигает около 1 тыс. м³/ч, что и определяет экономический эффект оптимизации.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлены кривые сходимости ГА для спроса 30 МВт: лучшая особь выходит на плато к 40–60-му поколению.

На рис. 3 показана эволюция популяции на ландшафте целевой функции: к 60-му поколению особи плотно группируются в окрестности глобального оптимума, что подтверждает механизм глобального поиска.

Сравнение равномерного и оптимального распределения показано на рис. 4.

Генетический алгоритм стремится загрузить наиболее экономичный агрегат № 1 до максимально допустимой нагрузки (95% номинала), агрегат № 2 – до зоны наилучшего относительного прироста, а наименее экономичный № 3 – к техническому минимуму при малом спросе. Это согласуется с принципом равенства относительных приростов, но получено автоматически, без аналитического вывода. Для спроса 30 МВт оптимальное распределение 15,2/9,5/5,3 МВт даёт экономию 3,7% (12,44 против 12,92 тыс. м³/ч), для 42 МВт распределение 15,2/15,2/11,6 МВт – 2,1% (16,93 против 17,29 тыс. м³/ч). При спросе 45,6 МВт и выше все агрегаты работают на максимально допустимой нагрузке 15,2 МВт, перераспределение невозможно и экономия равна нулю. Результаты динамического эксперимента (рис. 5): до 300 с станция работает при 30 МВт (распределение 15,2/9,5/5,3 МВт); после скачка до 42 МВт агрегаты выходят на новое распределение 15,2/15,2/11,6 МВт за 150–200 с с точностью баланса 0,2 МВт без перерегулирований.

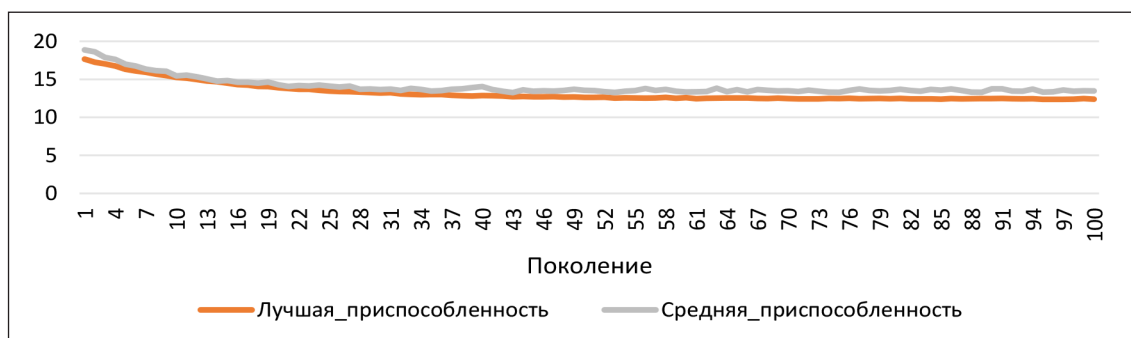


Рис. 2. Сходимость ГА: лучшая и средняя приспособленность (спрос 30 МВт)
Примечание: составлено авторами

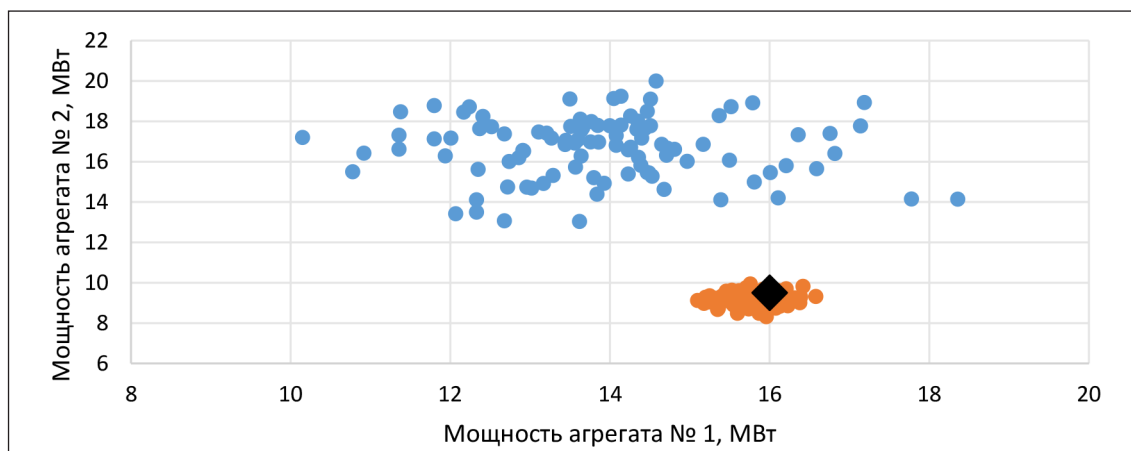


Рис. 3. Эволюция популяции ГА на ландшафте целевой функции ($D = 30$ МВт):
распределение особей на 10-м (синие точки) и 60-м (оранжевые точки) поколениях
Примечание: составлено авторами

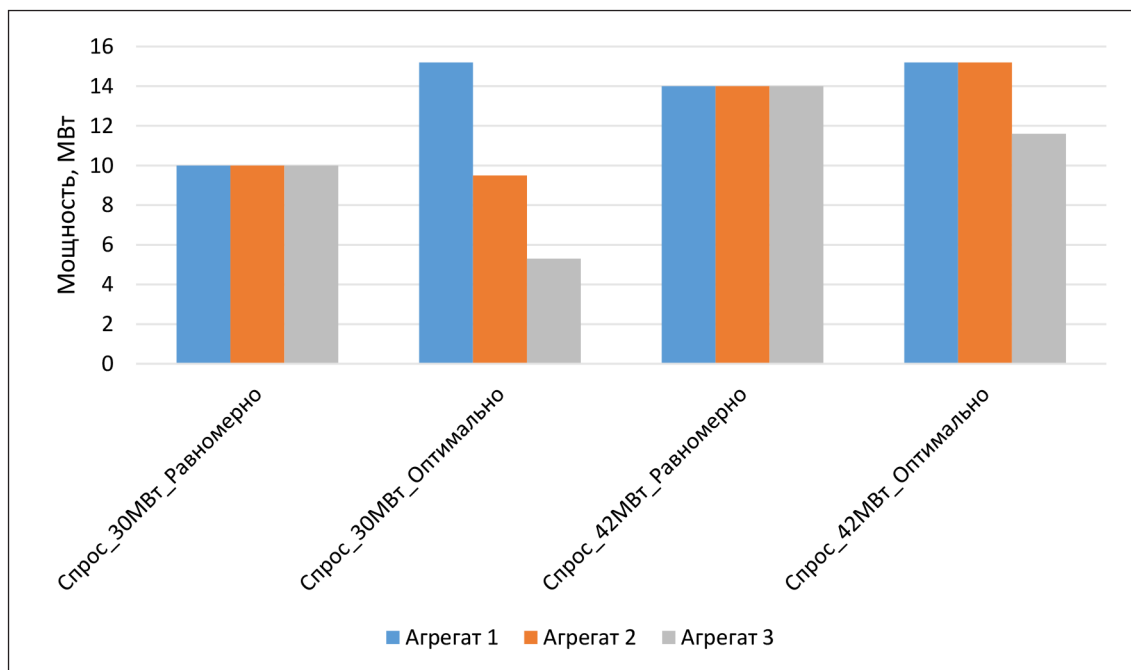


Рис. 4. Равномерное и оптимальное распределение при 30 МВт (10/10/10 против 15,2/9,5/5,3) и 42 МВт (14/14/14 против 15,2/15,2/11,6): экономия 3,7% и 2,1%
Примечание: составлено авторами

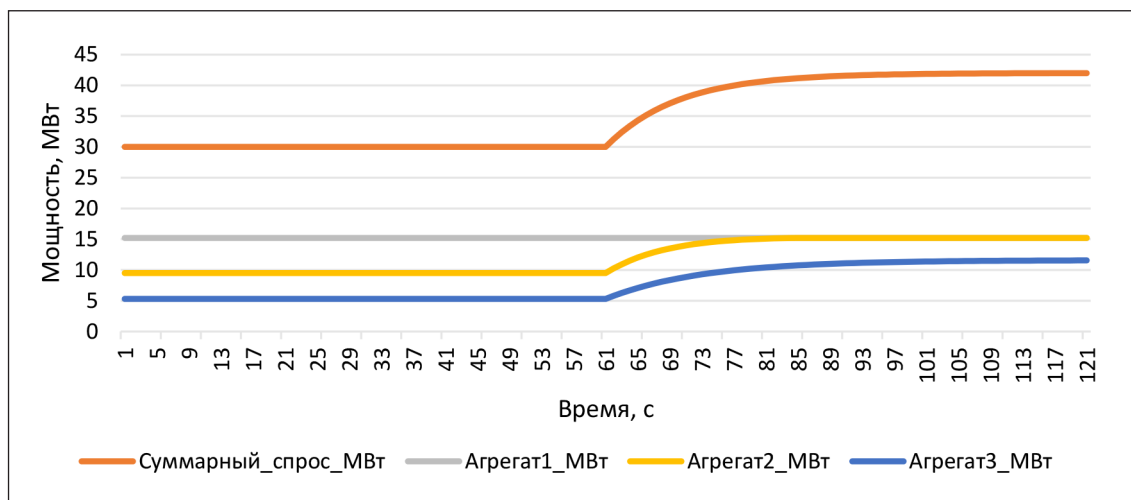


Рис. 5. Динамика перераспределения загрузки трёх ГТЭ-16 в SimInTech при скачке спроса
Примечание: составлено авторами

При скачке нагрузки агрегат № 1 остаётся на максимально допустимой нагрузке (15,2 МВт), а приращение оптимально распределяется между агрегатами № 2 и № 3, что подтверждает согласованную работу ГА-оптимизатора и динамических регуляторов; сходимость за 1–2 с (40–60 поколений) позволяет вести оперативное управление в реальном времени.

Экстраполяция на годовой график даёт экономию газа 2,5–3,5% (миллионы рублей

в год) при быстрой окупаемости: внедрение требует лишь доработки ПО верхнего уровня АСУ ТП. ГА обрабатывает негладкие характеристики и запрещённые зоны без ручного перебора, а после ремонта достаточно обновить коэффициенты модели; экономия 2–4% критична для энергетики, а недогрузка изношенного агрегата № 3 продлевает его ресурс. Подход согласуется с современными теориями оптимизации, а отечественная среда SimInTech отвечает требованиям

импортозамещения и обеспечивает независимость критической инфраструктуры.

Заключение

Таким образом, в работе апробирован генетический алгоритм, интегрированный с имитационной моделью станции в SimInTech, для оптимального перераспределения загрузки трёх ГТЭ-16. Экономия газа составляет 3,7% при спросе 30 МВт и 2,1% при 42 МВт; в годовом исчислении 2,5–3,5%, что соответствует нескольким миллионам рублей. ГА сходится за 40–60 поколений (1–2 с), перераспределение в динамике происходит безударно за 150–200 с.

Перспективы дальнейших научных исследований включают в себя уточнение существующей математической модели. В частности, планируется интеграция методов смешанного целочисленного нелинейного программирования для принятия оптимальных решений о пуске и останове агрегатов в зависимости от графика нагрузок. Также предусмотрено введение поправочных коэффициентов, учитывающих влияние температурно-климатических условий на характеристики оборудования. Завершающим этапом разработки станет опытно-промышленная апробация алгоритма на базе действующей газотурбинной электростанции.

Список литературы

1. Ильичев В. Ю., Морозова В. С. Оптимизация отбора признаков для качества прогнозирования в условиях высокой размерности данных // Научные технологии. 2021. Т. 22. № 4. С. 16–25. EDN: VNNTEX.
2. Ильичев В. Ю., Каширин Д. С. Исследование динамики поведения клеточных автоматов // E-Scio. 2023. № 1(76). С. 223–233. EDN: EZVNVE.
3. Варганова А. В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 3. С. 76–85. DOI: 10.14529/power170309. EDN: ZGQBYH.
4. Александров О. И., Лялько А. А. Решение задачи оптимального распределения активных мощностей в энергосистеме в среде MATLAB // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2019. № 1(218). С. 39–44. EDN: VWNELJ.
5. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: утв. приказом Минэнерго России от 04.10.2022 № 1070. М., 2023. 156 с.
6. Алехин Р. А., Кубарьков Ю. П., Закамов Д. В., Умаров Д. В. Обзор метаэвристических методов оптимизации, применяемых при решении электроэнергетических задач // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 3(63). С. 6–19. EDN: CWAUMA.
7. Стенников В. А., Барахтенко Е. А., Майоров Г. С. Разработка интегрированной мультиагентной модели энергонабжающей системы в программной среде AnyLogic // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 5. С. 1080–1092. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-1080-1092. EDN: IHYCBI.
8. Сиддигов И. Х., Порубай О. В., Лазарева М. В., Абдулхамидов А. А. Тенденции развития интеллектуальных систем при принятии управленческих решений в Узбекистане // Universum: технические науки. 2020. № 2-1(71). С. 10–13. EDN: CMMGOP.
9. Антонова А. М., Воробьев А. В., Воробьев В. А., Дутова Е. М., Покровский В. Д. Моделирование распространения в атмосфере загрязняющих веществ выбросов электростанций на базе программного комплекса «SKAT» // Известия Томского политехнического университета. 2019. Т. 330. № 6. С. 174–186. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2138. EDN: MZXAJR.
10. Секретарев Ю. А., Мятёж Т. В. Методика построения баланса в гидротепловой энергосистеме с учетом режимных особенностей ГЭС на основе определения стоимости гидроресурса // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 6. С. 641–655. DOI: 10.17516/1999-494X-0340. EDN: YYMERL.
11. Варганова А. В., Джагаров Н. Ф. Комплексная оптимизация режимов работы промышленных тепловых электростанций // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 11–16. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16. EDN: MNSWRM.
12. Ковалёв Д. А., Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Рубцова М. А. Разработка имитационной модели системы автоматического управления уровнем зелёного шёлока в баке-растворителе плава содорегенерационного котлоагрегата // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2023. № 67(93). С. 74–78. EDN: EYNWWD.
13. Михайленко Л. А., Еремин Е. Л. Параметрический синтез регулятора метаэвристическим алгоритмом в среде SimInTech // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 3. С. 45–56. DOI: 10.24143/2073-5529-2020-3-45-56. EDN: RKUNTE.
14. Кубарьков Ю. П., Макаров Я. В., Голубева К. А. Оптимизация электрической сети при помощи генетического алгоритма с внедрением активно-адаптивных элементов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1. С. 112–122. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-112-122. EDN: WOOVEN.
15. Гайбиров Т. Ш., Насиров Т. Х. Учет ограничений при оптимизации режимов энергосистем генетическими алгоритмами // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. Т. 63. № 4. С. 315–328. DOI: 10.21122/1029-7448-2020-63-4-315-328. EDN: MZXABC.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.