

УДК 004.932

DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.626-634

Повышение эффективности алгоритма оптимизации температурного режима помещений многоквартирных зданий

А. П. Шуравин, С. В. Вологдин*, М. М. Горохов, Г. А. Благодатский

¹ Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия

426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

*vologdin_sv@mail.ru

Аннотация

В статье обосновывается актуальность решения задач энергосбережения с применением методов математической оптимизации. Дается обзор российских и зарубежных работ по теме энергосбережения и оптимизации энергопотребления. Поясняется необходимость решения задач оптимизации теплогидравлических режимов зданий в рамках проекта «Умный город». В статье приводится математическая постановка задачи оптимизации температурного режима помещений с помощью регулируемых устройств, а также два метода решения поставленной задачи: метод покоординатного поиска и генетический алгоритм. Приводится описание вышеуказанных алгоритмов, включая используемый математический аппарат. Описана целевая функция как среднеквадратичное отклонение температуры отапливаемых помещений. Приводится методика расчета температуры воздуха в отапливаемом помещении методом решения уравнения теплового баланса, включая методику расчета входящих тепловых потоков от радиатора и исходящих тепловых потоков через ограждающие конструкции. Даны расчетные формулы. Рассматривается идея улучшения данных методов за счет предварительных утеплительных мероприятий, которые заключаются в установке дополнительных секций радиаторов в «холодных» комнатах. Описан алгоритм автоматической выдачи рекомендаций по установке дополнительных секций радиаторов. Данный алгоритм заключается в чтении информации из базы данных и сравнении расчетного теплоприхода от радиаторов с их номинальной мощностью. В случае нехватки мощности выдается рекомендации об установке дополнительных секций радиаторов. Представлены результаты численного эксперимента для рассматриваемых методов оптимизации. Расчеты проводились для типового здания при средних расчетных условиях г. Ижевска для фактического состояния ограждающих конструкций и отопительных приборов помещений. В заключении сделан вывод о том, вышеупомянутые предварительные мероприятия улучшают показатели оптимизации.

Ключевые слова: методы оптимизации, энергосбережение, тепловые сети, искусственный интеллект.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта 27.06.01/18BCB ИжГТУ им. Калашникова.

Для цитирования: Шуравин А. П., Вологдин С. В., Горохов М. М., Благодатский Г. А. Повышение эффективности алгоритма оптимизации температурного режима помещений многоквартирных зданий // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 3. С. 626-634. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.626-634

© Шуравин А. П., Вологдин С. В., Горохов М. М., Благодатский Г. А., 2019



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Improving the Efficiency of the Optimization Algorithm of the Temperature Regime of Multi-Apartment Building Indoor Areas

A. P. Shuravin, S. V. Vologdin*, M. M. Gorokhov, G. A. Blagodatsky

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

7 Studencheskaya Str., Izhevsk 426069, Russia

* vologdin_sv@mail.ru

Abstract

The article substantiates the relevance of optimization algorithms research as for solving various applied problems as for the science of artificial intelligence. The need to solve problems of optimizing the thermal and hydraulic modes of buildings as part of the project "Smart City" explains. The article presents a mathematical formulation of the problem of optimizing the temperature mode of rooms using adjustable devices, as well as two methods for solving the posed problem: the coordinates search method and the genetic algorithm. A description of the above algorithms, including the mathematical apparatus used, is given. The objective function is described as the standard deviation of the temperature of the heated rooms. A method for calculating the temperature of air in a heated indoor area is given by solving the heat balance equation, including a method for calculating incoming heat fluxes from a radiator and outgoing heat fluxes through enclosing structures. Calculation formulas are given. The idea of improving these methods through preliminary insulation measures, which consists in installing additional sections of radiators in "cold" rooms, is considered. An algorithm for automatically issuing recommendations on the installation of additional sections of radiators is described. This algorithm consists in reading information from the database and comparing the calculated heat input from radiators with their rated power. In the event of a power lack, recommendations are issued on the installation of additional radiator sections. The results of the computational experiment for the considered optimization methods are presented. In conclusion, it was shown that the genetic algorithm shows better optimization results than the coordinates search method, but it has a large computational cost. The hypothesis was confirmed that in order to increase the efficiency of solving the considered class of problems, it is necessary to combine the genetic algorithm and gradient methods.

Keywords: Optimization methods, energy saving, heating networks, artificial intelligence.

Funding: This work was supported by the grant 27.06.01/18BCB of Kalashnikov Izhevsk State Technical University.

For citation: Shuravin A.P., Vologdin S.V., Gorokhov M.M., Blagodatsky G.A. Improving the Efficiency of the Optimization Algorithm of the Temperature Regime of Multi-Apartment Building Indoor Areas. *Sovremennyye informacionnyye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2019; 15(3):626-634. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.626-634



Введение

В настоящее время актуальны различные задачи энергосбережения, так как это оказывает положительное влияние на экологию. Данные вопросы рассматриваются в программе «Умный город»¹. Вопросы повышения эффективности использования энергетических ресурсов исследовались как в работах российских [1-13], так и зарубежных авторов [14-25].

Российские исследования

В работе [1] исследовался вопрос оптимального распределения реактивной мощности в системах электроснабжения и электрических сетях. Для этих целей авторы предложили применить алгоритм роевого интеллекта. Компьютерная программа, предназначенная для расчета тепловых сетей разных уровней, была предложена в [2]. Авторы представили методики расчета и оптимизации тепловых сетей, используемых при эксплуатации данного программного продукта. Проблема оперативного регулирования теплоснабжения в зависимости от температуры наружного воздуха решалась в [3]. Авторы применили имитационное моделирование и метод оптимизации температуры теплоносителя, который основан на использовании штрафных функций в зависимости от температуры воздуха в помещениях и количества потребляемой тепловой энергии. Обзор оптимизационных задач термогидравлических режимов здания в статье [4] обосновывает необходимость дальнейшей автоматизации оптимизационных процессов. Также существует задача оптимизации затрат на транспортировку теплоносителя. Данная задача решалась в [5]. В целях оптимизации структуры тепловой сети в работе [6] авторы применили алгоритм перебора деревьев и метод имитации отжига. Задачи оптимизации гидравлических режимов пассивах древовидных сетей решалась в [7]. Для решения данной задачи авторы использовали многошаговый процесс. Задача оптимального отопления зданий рассматривалась в работе [8]. Авторы поставили цель найти условия достижения минимума потерь энергии при обогреве здания в системе центрального отопления. В качестве критерия оптимизации была взята задача поддержания комфортной температуры и минимум потери энергии. Авторы нашли простейшие частные решения и предложили расчетные формулы. В работе [9] была предложено в целях оптимизации потребления тепловой энергии отапливаемым зданием использовать технологии «умный дом» и машинное обучение. Авторы описали компьютерную программу, предназначенную для проведения моделирования теплообмена внутри здания и с внешней средой, включая объектно-ориентированную модель. Основная идея предлагаемого подхода основана на возможности получения детализированной информации с датчиков температуры, ее интерпретации, мониторинга изменений и продуцирования адекватных решений по управлению теплоснабжением в режиме реального времени. Метод оптимизации тупиковых тепловых сетей с использованием технологии динамического программирования представлен в [10]. В результате работы описанных в статье алгоритмов выявляются конфигурации теплосетей с лучшими экономическими показателями. Так же актуальны исследования энергосбережения в электроэнергетике. В частности, в работе [11] предлагается вычислительно эффективный подход, направленный на внедрение динамиче-

ского расчета воздушных линий электропередачи в сети переменного тока для проблемы определения оптимального потока мощности. Предложенная математическая модель расчета режимов электрических сетей учитывает уравнение теплового баланса, применяемого к проводам воздушных линий электропередачи. Также в задачах энергосбережения и оптимизации потребления энергии используются новейшие достижения в области искусственного интеллекта. В частности, в работе [12] представлена модификация алгоритма роя частиц для оптимизации распределительной сети. Алгоритм муравьиной оптимизации широко используется для решения различных задач на графах, в том числе транспортной задачи [13], к которым часто сводятся задачи оптимизации в энергетике.

Зарубежные исследования

Модель иерархической оптимизации для сети станций зарядки электромобилей представлена в работе [14]. Авторы предложили трехслойную модель оптимизации, включающую оптимизацию местоположений заправочных станций (первый слой), модель очередей (второй слой) и оптимизации динамики зарядки аккумулятора (третий слой). В работе [15] была предложена крикинг модель для снижения потерь энергии в распределительных сетях. Авторы представили алгоритм аппроксимации сложных распределительных сетей для ускорения процесса поиска решения. В статье [16] показано применение метода Монте-Карло для оптимизации энергосистем, моделирования безопасности и отказов передачи энергии в режиме реального времени. В работе [17] приведены решения задач оптимизации в электроэнергетике с целью снижения затрат с учетом безопасности. Оптимизация потребления электроэнергии в республике Крым с использованием системного подхода описана в работе [18]. Авторы произвели расчет различных сценариев энергоснабжения Крыма, в том числе при пиковых и средних режимах энергопотребления, с различными вариантами солнечной активности, временем года, с учетом и без учета источников энергии на стадии строительства, а также ремонтных работ источников в межсезонье. В статье исследовано влияние вырабатываемой мощности солнечных электростанций на режимы работы энергосистемы Крыма. Авторы предложили методологию оптимизации производства солнечных электростанций, которые влияют на надежность и качество энергоснабжения. На основании результатов расчетов сделаны выводы о надежности энергосистемы в регионе при различных сценариях электроснабжения, а также о необходимости использования силового моста для подачи электроэнергии с материка в обоих направлениях. В [19] исследован экономический поведенческий подход к потреблению электроэнергии в жилых помещениях. Анализ эмерджентного поведения этого подхода с помощью имитационных исследований показал, что он действительно полезен, поскольку не требует подробных данных о всех деталях поведения человека. Тем не менее, это способствует пониманию отношений между различными объектами, участвующими в потреблении электроэнергии. Сотовый подход к концепции энергии NET-ZERO, основанный на балансе между потенциальным источником солнечной энергии и существующими моделями потребления в масштабе городских единиц, представлен в работе [20]. Авторы разработали и опробовали модель разграниче-

¹ Умный Город [Электронный ресурс]. URL: <http://city-smart.ru> (дата обращения: 16.06.2019).



ния географических городских единиц. Их модель объединяет геoinформационные системы, параметрическое моделирование и анализ солнечной динамики. В [21] представлена интеллектуальная энергетическая система совместной диспетчеризации для ветряной электростанции и насосно-накопительной электростанции, а на основе стохастического программирования и результаты моделирования такой системы. Используя метод иерархической кластеризации, авторы документа [22] проанализировали влияние энергетического и экологического налогообложения на поведение экономических субъектов. Результаты этих исследований подтверждают, что на уровне ЕС-28 могут существовать элементы для достижения конвергенции налогообложения энергии и что государство должно продвигать более точную налогово-бюджетную политику, чтобы улучшить потерю конкурентоспособности, вызванную неточным налогообложением энергии. Так же ведутся работы по оптимизации стоимости потребляемой электроэнергии. В частности, в [23] представлена оптимальная по затратам система, основанная на 100% возобновляемых источниках энергии, получена для Юго-Восточной Азии и Тихоокеанского региона на 2030 год с почасовым разрешением на весь год. Актуальная проблема справедливого и эффективного географического распределения источников возобновляемой энергии. Данный вопрос исследовался в [24]. Авторы проанализировали данную проблему для Германии, авторы объединяем несколько методов, в том числе правовой анализ, экономическое и энергетическое моделирование, денежную оценку и численную оптимизацию. Они обнаружили, что минимальные расстояния между возобновляемыми электростанциями и населенными пунктами должны быть настолько малы, насколько это возможно по закону. Так же актуальна проблема выбросов парниковых газов в атмосферу, так как это может привести к глобальному изменению климата. Данная проблема рассмотрена в [25], авторы предложили оптимизировать использование глобальных биоэнергетических ресурсов для компенсации ископаемого топлива в 2050 году.

Цель исследования

Улучшения алгоритмов оптимизации температуры отапливаемых помещений является актуальной задачей. В частности, как было указано выше, в работе [3] была предложена компьютерная программа, производящая расчет тепловых сетей, однако функционал этой программы не предусматривает возможность итерационной оптимизации температуры в отапливаемых помещениях. Частично эта задача решена в работе [26], где авторы предложили использовать для этой цели генетический алгоритм и алгоритм координатного поиска. Эта задача так же решалась в [8], но авторами был предложен только математический аппарат оптимизации, без конкретных алгоритмов его решения.

В рамках данной статьи предлагается улучшение метода оптимизации температурного режима помещений, предложенного в [26] за счет проведения предварительных утеплительных мероприятий.

Теоретическая часть

В ходе исследования решалась задача оптимизации температурного режима помещений путем регулирования клапанов отопительных приборов. Целевая функция задачи оптимизации температурного режима – минимум среднеквадратичного отклонения температуры помещений от нормативной величины:

$$\Phi(s_1, s_2, \dots, s_z) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i(s_1, s_2, \dots, s_z) - t_{om})^2 \right]^{1/2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где z – количество регулировочных клапанов отопительных приборов, i – номер помещения, N – количество помещений, t_i – расчетная температура в помещении, $t_{>?B}$ – температура в помещении, которой планируется достичь (в статье применено два варианта оптимизации: относительно нормативной температуры и средней температуры помещений по зданию), s_j – сопротивление j -ого клапана.

Размерность набора оптимизируемых параметров порядка сотен и определяется количеством регулируемых клапанов.

В связи с тем, что регулировочные клапаны имеют свой диапазон значений сопротивлений, то введем ограничение:

$$s_j^{\min} \leq s_j \leq s_j^{\max}, \quad (2)$$

где s_j^{\min} и s_j^{\max} минимальное и максимальное сопротивление соответственно [15].

Оптимизация проходит в несколько итераций, на каждый итерации подбираются оптимизируемые параметры (гидравлические сопротивления клапанов) и вычисляется температура воздуха внутри отапливаемых помещений, затем по формуле (1) вычисляется целевая функция, на основании которой принимается решения о новых значениях оптимизируемых параметров на следующей итерации.

Для нахождения температуры помещения в каждом из N помещений отдельно записывается и решается уравнение теплового баланса:

$$Q_{cm}^T + Q_{пол}^T + Q_{ном}^T + Q_{де}^T + Q_{де}^H + Q_{окн}^T + Q_{окн}^H + Q_{возд}^H = Q_{np} + Q_{тр}, \quad (3)$$

где Q_{cm}^T – теплообмен со стенами, $Q_{пол}^T$ – теплообмен с полом, $Q_{ном}^T$ – теплообмен с потолком, $Q_{де}^T$ – теплообмен с дверями, $Q_{де}^H$ – инфильтрация через двери, $Q_{окн}^T$ – теплообмен с окнами, $Q_{окн}^H$ – инфильтрация через окна, $Q_{возд}^H$ – инфильтрация воздуха, Q_{np} – приход тепла от отопительных приборов, $Q_{тр}$ – приход тепла от труб.

Теплообмен через стены, пол, потолок, а также балконные и оконные конструкции вычисляется по следующей формуле:

$$Q_{cm}^T = \frac{F_{cm}}{R_{cm}} (t_e - t_n) n \beta, \quad (4)$$

где F_{cm} – площадь стен (пола, потолка и т. д.), R_{cm} – приведенное сопротивление теплопередачи ограждения; t_e – температура воздуха внутри помещения; t_n – температура наружного воздуха; n – табличный поправочный коэффициент, зависящий от типа поверхности ограждения; β – поправочный коэффициент, учитывающий ориентацию стены относительно сторон света.

Теплопотери на нагревание наружного воздуха, поступившего путем инфильтрации через окна (аналогично входные двери), вычисляется по формуле:

$$Q_{окн}^H = A_{окн}^H G_{окн}^H F_{окн} c (t_e - t_n), \quad (5)$$



где $Q_{окн}^H$ - поправочный коэффициент, учитывающий тип окон; $F_{окн}$ - расчетная площадь окон; $G_{окн}^H$ - количество воздуха, поступившего путем инфильтрации; c - удельная массовая плотность воздуха.

Теплообмен через двери зависит от площади дверей, температуры воздуха в подъезде, а также материала и конструкции дверей

$$Q_{дв}^T = k \frac{F_{дв.кв}}{R_{дв.кв}} (t_в - t_n), \quad (6)$$

где k - количество дверей (квартир) в подъезде; $F_{дв.кв}$ - площадь квартирной двери; $R_{дв.кв}$ - приведенное сопротивление теплопередачи квартирной двери; t_n - температура в подъезде.

Теплоотдача отопительных приборов определяется исходя из его теплотокота на единицу площади. Тепловой поток зависит от расхода теплоносителя:

$$q_{np} = q_{ном} \left(\frac{\Delta t_{cp}}{70} \right)^{n+1} \left(\frac{X_{np}}{360} \right)^p c_{np}, \quad (7)$$

где X_{np} - действительный расход воды в приборе, кг/ч; n, p - эмпирические коэффициенты, c_{np} - коэффициент, учитывающий схему присоединения отопительного прибора; Δt_{cp} - температурный напор, равный разности полусуммы входной и выходной температуры и температуры воздуха в помещении.

Расход теплоносителя зависит от структуры теплосети и находится путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} Ax = q_0, \\ By = 0, \\ y + h_0 = SXx, \end{cases} \quad (8)$$

где A - матрица соединений узлов и ветвей, B - матрица контуров, построенная на исходном графе, x и y - вектора неизвестных, S - матрица гидравлических сопротивлений (включая сопротивления регулировочных клапанов радиаторов), X - матрица расходов, h_0 - вектор гидравлических напоров, q_0 - вектор расходов теплоносителя в узлах.

Как было отмечено выше, оптимизация происходит итерационно. Алгоритм можно описать следующими шагами [15]:

1. Задаются начальные значения сопротивлений клапанов ветвей и отопительных приборов. Способ задания: случайное значение из допустимого диапазона.

2. Чтение из базы данных структуры отопительной сети и характеристик помещений, включая ограждающие конструкции.

3. Рассчитывается термодинамический баланс отопительной системы.

4. Рассчитывается температура воздуха в помещениях методом расчета равновесных температур здания [3].

5. Вычисляется целевая функция.

6. Если достигнуто условие останова (в данном исследовании - заданное количество итераций) то выход из цикла.

7. Подбираются сопротивления клапанов ветвей и отопительных приборов. Метод подбора зависит от алгоритма оптимизации (подробнее будет описано ниже).

Переход к п. 2.

Шаг 7 данного алгоритма зависит от выбранного метода.

Для генетического алгоритма наборы оптимизируемых параметров изменяются случайным образом (мутация), а так же происходит создание новых наборов путем случайного копирования данных из двух разных наборов и их объединения в один (скрещивание). Затем из полученного множества происходит селекция наборов с лучшими значениями целевой функции.

Вероятность скрещивания вычисляется по формуле:

$$P_{cross} = \frac{2n - k_1 - k_2}{2n - 1}, \quad (9)$$

где n - количество наборов в выборке («особей» в «популяции»), k_1 и k_2 - соответственно первый и второй набор из пары, которая проверяется на возможность скрещивания, принимают значения от 0 до $n-1$. Удаление наборов из выборки при селекции также происходит случайным образом, вероятность удаления тем больше, чем хуже целевая функция. Данная вероятность выражена формулой:

$$P_{del} = \frac{m}{n}, \quad (10)$$

где m - номер удаляемого набора (начиная с нуля). Для набора с лучшей целевой функцией данный номер равен 0, то есть, он никогда не будет удален. Цикл удаления может повторяться несколько раз, пока количество наборов не станет меньше максимально допустимого количества. Если количество набора становится меньше минимально допустимого количества, то на данной итерации селекция не производится.

В методе покоординатного поиска значение сопротивления клапанов на следующей итерации изменяется на приращение ΔS , вычисленное по формуле [3]:

$$\Delta S_j^{(k)} = \frac{(s_j^{(k)} - s_j^{(k-1)})(t_2^p - t_2^{(k)})}{(t_2^{(k)} - t_2^{(k-1)})}, \quad (11)$$

где $j=1, \dots, z$ - номер клапана, k - номер итерации, t_2^p - требуемая температура в помещении, $t_2^{(k)}$ - расчетная температура помещения j на k -ой итерации.

Описание предварительных утеплительных мероприятий

Предварительные утеплительные мероприятия заключаются в установлении в помещениях, которые обогреваются недостаточно, дополнительных секций радиаторов. Авторами настоящей статьи был разработан алгоритм выдачи рекомендаций по установке дополнительных секций радиаторов, который реализован как дополнение к программному продукту, описанному в [3]. Алгоритм работает следующим образом:

1. Чтение из базы данных информации о рассчитанных ранее температурах помещений и количестве тепловой энергии, выдаваемой радиаторами отопления, а также об установленных в комнатах радиаторах и количестве секций.
2. Переходим к первой прочитанной записи.
3. Сравниваем тепловой поток от радиатора с требуемой мощностью. Если тепловой поток от радиатора меньше, то переходим к пункту 5.
4. Если обработали не все радиаторы, то переходим к следующему и возвращаемся к шагу 3, иначе прекра-



- щаем работу алгоритма.
- Выдаем рекомендацию об установке дополнительных секций радиаторов, количество равно отношению нехватки тепловой энергии к мощности секции с округлением в большую сторону.
 - Переходим к шагу 4.

Результаты эксперимента

Результаты вычислительных экспериментов приведены в таблице 1. Для оптимизации был использован генетический алгоритм, в котором шаг мутации σ [15] был взят 5 и 20 в единицах Па/(Кг/час)² и алгоритм координатного поиска. Рассчитывалось типовое здание при средних расчетных условиях г. Ижевска для фактического состояния ограждающих конструкций и отопительных приборов помещений. Оптимизация была произведена в двух вариантах:

- относительно нормативной температуры, которая была принята 20 °С;

- относительно средней температуры по помещениям.

Начальное приближение – случайное значение из диапазона формулы (2).

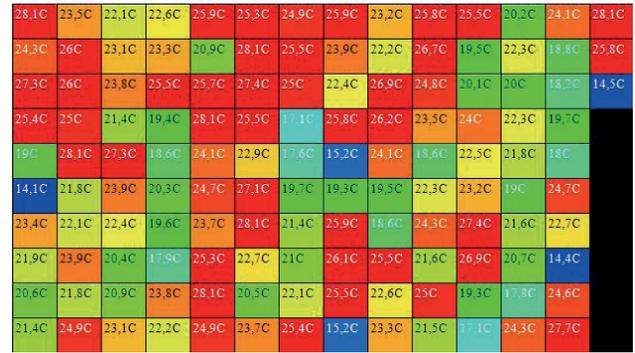
Таблица 1. Результаты вычислительных экспериментов по оптимизации температуры отапливаемых помещений

Table 1. The results of computational experiments in optimization the temperature of heated rooms

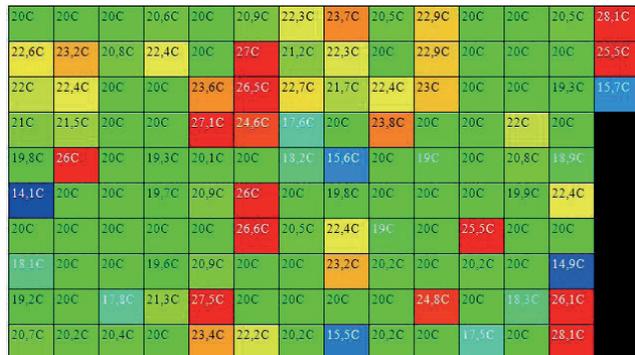
Метод	Тип целевой функции	Значение целевой функции после оптимизации до применения рекомендаций*	Значение целевой функции после оптимизации, если предварительно выполнить утеплительные мероприятия*
Генетический алгоритм, шаг 20	От нормы	3,34	3,1
Генетический алгоритм, шаг 20	От среднего	2,77	2,61
Координатный поиск	От нормы	2,63	2,59
Координатный поиск	От среднего	2,47	2,32
Без оптимизации	От нормы	4,32	4,23
Без оптимизации	от среднего	3,23	2,86

* Значения больше 5 – неудовлетворительно (сильный дисбаланс); 3-4 – удовлетворительно (имеется дисбаланс); 1.5-3 – хорошо (небольшой дисбаланс); 0.5 – 1- отлично (дисбаланс незначительный); менее 0.5 – идеально (дисбаланс практически отсутствует).

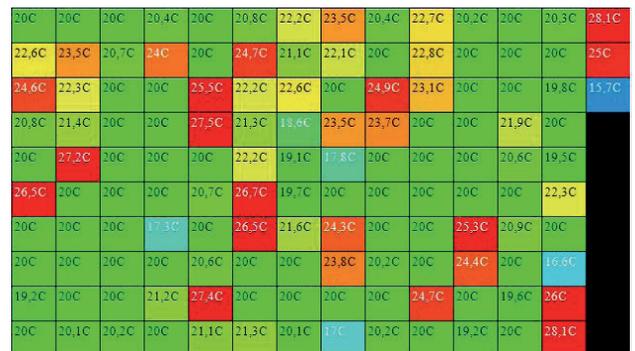
Для наглядности приводятся тепловые карты помещений. На рис. 1 показана тепловая карта до оптимизации, на рис. 2 после оптимизации методом координатного поиска и на рис. 3 также после оптимизации методом координатного поиска, но после предварительных утеплительных мероприятий.



Р и с. 1. Тепловая карта до оптимизации
F i g. 1. Heat map before optimization



Р и с. 2. Тепловая карта после оптимизации
F i g. 2. Heat map after optimization



Р и с. 3. Тепловая карта после оптимизации, но с предварительно проделанными утеплительными мероприятиями
F i g. 3. Heat map after optimization, but with previously taken insulation measures

Заключение

Как показывают результаты эксперимента, предварительные утеплительные мероприятия, которые заключаются в установке дополнительных секций в тех помещениях, где имеет место недостаток тепловой мощности, положительно сказываются на дальнейшей оптимизации температурного режима помещения. Данный положительный эффект наблюдается как в случае применения генетического алгоритма, так и в случае применения метода координатного поиска. При этом наилучших результатов удалось достичь в случае применения метода координатного поиска.



Список использованных источников

- [1] Манусов В. З., Матренин П. В., Киргизов А. К. Оптимизация распределения компенсирующих устройств в системах электроснабжения на основе роевого интеллекта // Энергобезопасность и энергосбережение. 2017. № 3. С. 28-32. DOI: 10.18635/2071-2219-2017-3-28-32
- [2] Вологдин С. В., Якимович Б. А. Методы и алгоритмы повышения энергоэффективности многоуровневой системы централизованного теплоснабжения: монография. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им М.Т. Калашникова, 2015. 264 с.
- [3] Басалаев А. А., Шнайдер Д. А. Метод оптимизации температуры подаваемого теплоносителя в системе централизованного теплоснабжения зданий на основе имитационного моделирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2017. Т. 17, № 1. С. 15-22. DOI: 10.14529/ctcr170102
- [4] Шуравин А. П. Обзор оптимизационных задач термодинамических режимов зданий // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ставрополь: Центр научного знания «Логос», 2018. С. 51-55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34858025> (дата обращения: 16.06.2019).
- [5] Байбаков С. А., Филатов К. В. Оптимизация температурного графика тепловых сетей // Энергетик. 2012. № 11. С. 26-30. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18104959> (дата обращения: 16.06.2019).
- [6] Стенников В. А., Чемерзов А. А. Применение алгоритма перебора деревьев и метода имитации отжига для схемно-структурной оптимизации тепловых сетей // Программные продукты и системы. 2018. № 2. С. 387-395. DOI: 10.15827/0236-235X.122.387-395
- [7] Луценко А. В., Новицкий Н. Н. Исследование задачи оптимизации гидравлических режимов пассивных древовидных тепловых сетей как многошагового процесса // VIII Международная заочная научно-практическая конференция. Энергетика в современном мире. Чита, 2017. С. 101-107. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32761400> (дата обращения: 16.06.2019).
- [8] Сабденов К. О., Байтасов Т. М. Оптимальное (энергоэффективное) теплоснабжение здания в системе центрального отопления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326, № 8. С. 53-60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25068679> (дата обращения: 16.06.2019).
- [9] Захаров А. А., Захарова И. Г., Ромазанов А. Р., Широких А. В. Моделирование теплового режима и управление теплоснабжением помещений умного здания // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Т. 4, № 2. С. 105-199. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-105-119
- [10] Никифоров А. Г., Яковлев А. В. Оптимизация топологии тепловых сетей // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 5(10). С. 129-132. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22603759> (дата обращения: 16.06.2019).
- [11] Кузнецов Е. А., Гиришин С. С., Горюнов В. Н., Петрова Е. В., Бигун А. Я., Шепелев А. О. Внедрение теплового расчета линий электропередачи в оптимизацию электрических сетей // Россия молодая: Передовые технологии – в промышленность! 2017. № 1. С. 129-133. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29073714> (дата обращения: 16.06.2019).
- [12] Халил Т. М., Горпинич А. В. Применение селективного метода роя частиц для оптимизации конфигурации распределительных сетей // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2010. № 11(81). С. 28-33. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22266985> (дата обращения: 16.06.2019).
- [13] Глушко С. И., Образцов В. В., Кузавко А. С. Применение алгоритма муравьиных колоний для решения задач оптимизации на графе // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2012. № 2. С. 70-74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20377914> (дата обращения: 16.06.2019).
- [14] Kong C., Jovanovic R., Bayram I. S., Devetsikiotis M. A Hierarchical Optimization Model for a Network of Electric Vehicle Charging Stations // Energies. 2017. Vol. 10, Issue 5. Pp. 675. DOI: 10.3390/en10050675
- [15] Wang D., Hu Q., Tang J., Jia H., Li Y., Gao S., Fan M. A Kriging Model Based Optimization of Active Distribution Networks Considering Loss Reduction and Voltage Profile Improvement // Energies. 2017. Vol. 10, Issue 12. Pp. 2162. DOI: 10.3390/en10122162
- [16] Navarro-Espinosa A., Moreno R., Lagos T., Ordoñez F., Sacaan R., Espinoza S., Rudnick H. Improving distribution network resilience against earthquakes // IET International Conference on Resilience of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2017), Birmingham, 2017. Pp. 1-6. DOI: 10.1049/cp.2017.0339
- [17] Dolan M. J., Davidson E. M., Kockar I., Ault G. W., McArthur S. D. J. Distribution Power Flow Management Utilizing an Online Optimal Power Flow Technique // IEEE Transactions on Power Systems. 2012. Vol. 27, No. 2. Pp. 790-799. DOI: 10.1109/TPWRS.2011.2177673
- [18] Vologdin S. V., Yakimovich B. A. Application of a systematic approach to improving the efficiency of power supply modes of the Republic of Crimea // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. Pp. 062036. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062036
- [19] Siebert L. C., Sbicca A., Aoki A. R., Lambert-Torres G. A Behavioral Economics Approach to Residential Electricity Consumption // Energies. 2017. Vol. 10, Issue 6. Pp. 768. DOI: 10.3390/en100607680rcid
- [20] Amado M., Poggi F., Amado A. R., Breu S. A Cellular Approach to Net-Zero Energy Cities // Energies. 2017. Vol. 10, Issue 11. Pp. 1826. DOI: 10.3390/en10111826
- [21] Hu Y., Li Y., Xu M., Zhou L., Cui M. A Chance-Constrained Economic Dispatch Model in Wind-Thermal-Energy Storage System // Energies. 2017. Vol. 10, Issue 3. Pp. 326. DOI: 10.3390/en10030326
- [22] Zaharia M., Pătrașcu A., Tănăsescu A., Gogonea M. R., Popescu C. A Cluster Design on the Influence of Energy Taxation in Shaping the New EU-28 Economic Paradigm // Energies. 2017. Vol. 10, Issue 2. Pp. 257. DOI: 10.3390/en10020257
- [23] Gulagi A., Bogdanov D., Breyer C. A Cost Optimized Fully Sus-



- tainable Power System for Southeast Asia and the Pacific Rim // *Energies*. 2017. Vol. 10, Issue 5. Pp. 583. DOI: 10.3390/en10050583
- [24] Drechsler M., Egerer J., Lange M., Masurowski F., Meyerhoff J., Oehlmann M. Efficient and equitable spatial allocation of renewable power plants at the country scale // *Nature Energy*. 2017. Vol. 2. Pp. 17124. DOI: 10.1038/nenergy.2017.124
- [25] Staples M. D., Malina R., Barrett S. R. H. The limits of bioenergy for mitigating global life-cycle greenhouse gas emissions from fossil fuels // *Nature Energy*. 2017. Vol. 2. Pp. 16202. DOI: 10.1038/nenergy.2016.202
- [26] Shuravin A. P., Vologdin S. V. Comparison of the characteristics of the genetic algorithm and the method of coordinates search for optimization of temperature modes indoor areas // *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the Data Science Session at the V International Conference on Information Technology and Nanotechnology (DS-ITNT 2019)*. Samara, Russia, May 21-24, 2019. Pp. 260-270. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2416/paper34.pdf> (дата обращения: 16.06.2019).

Поступила 16.06.2019; принята в печать 20.07.2018;
опубликована онлайн 30.09.2019.

Об авторах:

Шуравин Александр Петрович, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7225-7751>, webmaster@easyprog.ru

Вологдин Сергей Валентинович, профессор кафедры информационных систем, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7), доктор технических наук, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3013-7759>, vologdin_sv@mail.ru

Горохов Максим Михайлович, заведующий кафедрой информационных систем, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7), доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2314-5275>, insys2005@mail.ru

Благодатский Григорий Александрович, доцент кафедры информационных систем, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7942-1200>, blagodatsky@gmail.com

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Manusov V., Matrenin P., Kirgizov A. Swarm optimization for reactive power control in electrical grids. *Energy Safety and Energy Economy*. 2017; 3:28-32. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.18635/2071-2219-2017-3-28-32
- [2] Vologdin S., Jakimovich A. *Metody i algoritmy povysheniya energoeffektivnosti mnogourovnevoj sistemy centralizovannogo teplosnabzheniya* [Methods and algorithms for improving the energy efficiency of a multi-level district heating system]. Publishing ISTU named after M.T. Kalashnikov, Izhevsk, 2015. 264 pp. (In Russ.)
- [3] Basalaev A., Shnayder A. A Simulation-based Method for Supply Temperature Optimization in District Heating System. *Bulletin of the South Ural State University. Series Computer Technologies, Automatic Control, Radioelectronics*. 2017; 17(1):15-22. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.14529/ctcr170102
- [4] Shuravin A. Review of optimization problems of thermo-hydraulic modes of buildings. In: *Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation*. Center for Scientific Knowledge "Logos", Stavropol, 2018, pp. 51-55. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34858025> (accessed 16.06.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [5] Baybakov S., Filatov K. Optimization of heating networks for the cost of transporting the coolant (optimization of heat transportation). *Energetik*. 2012; 11:26-30. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18104959> (accessed 16.06.2019). (In Russ.)
- [6] Stennikov V., Chemerzov A. Application of a tree search algorithm and a annealing simulated method in optimization of heat network configuration and structure. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*. 2018; 2:387-395. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15827/0236-235X.122.387-395
- [7] Lutsenko A., Novitsky N. Investigation of the problem of optimizing the hydraulic modes of passive tree-like heat networks as a multi-step process. In: *Proceedings of the International correspondence scientific-practical conference. Energy in modern world*, Chita, 2017, pp. 101-107. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32761400> (accessed 16.06.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [8] Sabdenov K., Baitasov T. Optimal (energy efficient) heat supply of the building in the central heating system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015; 326(8):53-60. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25068679> (accessed 16.06.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [9] Zakharov A., Zakharova I., Romazanov A., Shirokikh A. The Thermal Regime Simulation and the Heat Management of a Smart Building. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2018; 4(2):105-199. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-105-119
- [10] Nikiforov A.G., Yakovlev A.V. Optimization of the topology of dead-end heating networks. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2014; 5(10):129-132. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22603759> (accessed 16.06.2019). (In Russ.)
- [11] Kuznetsov E.A., Girshin S.S., Goryunov V.P., Petrova E.V., Bi-



- gun A.Ya., Shepelev A.O. The introduction of thermal calculation of power lines in the optimization of electric networks. *Young Russia: Advanced Technologies - in the Industry!* 2017; 1:129-133. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29073714> (accessed 16.06.2019). (In Russ.)
- [12] Khalil T.M., Gorpnich A.V. Distribution Network Reconfiguration Using Selective Particle Swarm Optimization. *Energoberezhenie. Energetika. Ergoaudit = Energy saving. Power engineering. Energy audit.* 2010; 11(81):28-33. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22266985> (accessed 16.06.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [13] Glushko S.I., Obratsov V.V., Kuzavko A.S. Application of the ant colony algorithm for solving optimization problems on a graph. Priority areas of research: from theory to practice. 2012; 2:70-74. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20377914> (accessed 16.06.2019). (In Russ.)
- [14] Kong C., Jovanovic R., Bayram I.S., Devetsikiotis M. A Hierarchical Optimization Model for a Network of Electric Vehicle Charging Stations. *Energies.* 2017; 10(5):675. (In Eng.) DOI: 10.3390/en10050675
- [15] Wang D., Hu Q., Tang J., Jia H., Li Y., Gao S., Fan M. A Kriging Model Based Optimization of Active Distribution Networks Considering Loss Reduction and Voltage Profile Improvement. *Energies.* 2017; 10(12):2162. (In Eng.) DOI: 10.3390/en10122162
- [16] Navarro-Espinosa A., Moreno R., Lagos T., Ordoñez F., Sacaan R., Espinoza S., Rudnick H. Improving distribution network resilience against earthquakes. In: *IET International Conference on Resilience of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2017)*, Birmingham, 2017, pp. 1-6. (In Eng.) DOI: 10.1049/cp.2017.0339
- [17] Dolan M.J., Davidson E.M., Kockar I., Ault G.W., McArthur S.D.J. Distribution Power Flow Management Utilizing an Online Optimal Power Flow Technique. *IEEE Transactions on Power Systems.* 2012; 27(2):790-799. (In Eng.) DOI: 10.1109/TPWRS.2011.2177673
- [18] Vologdin S.V., Yakimovich B.A. Application of a systematic approach to improving the efficiency of power supply modes of the Republic of Crimea. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019; 537:062036. (In Eng.) DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062036
- [19] Siebert L.C., Sbicca A., Aoki A.R., Lambert-Torres G. A Behavioral Economics Approach to Residential Electricity Consumption. *Energies.* 2017; 10(6):768. (In Eng.) DOI: 10.3390/en10060768OrcID
- [20] Amado M., Poggi F., Amado A.R., Breu S. A Cellular Approach to Net-Zero Energy Cities. *Energies.* 2017; 10(11):1826. (In Eng.) DOI: 10.3390/en10111826
- [21] Hu Y., Li Y., Xu M., Zhou L., Cui M. A Chance-Constrained Economic Dispatch Model in Wind-Thermal-Energy Storage System. *Energies.* 2017; 10(3):326. (In Eng.) DOI: 10.3390/en10030326
- [22] Zaharia M., Pătrașcu A., Tănăsescu A., Gogonea M.R., Popescu C. A Cluster Design on the Influence of Energy Taxation in Shaping the New EU-28 Economic Paradigm. *Energies.* 2017; 10(2):257. (In Eng.) DOI: 10.3390/en10020257
- [23] Gulagi A., Bogdanov D., Breyer C. A Cost Optimized Fully Sustainable Power System for Southeast Asia and the Pacific Rim. *Energies.* 2017; 10(5):583. (In Eng.) DOI: 10.3390/en10050583
- [24] Drechsler M., Egerer J., Lange M., Masurowski F., Meyerhoff J., Oehlmann M. Efficient and equitable spatial allocation of renewable power plants at the country scale. *Nature Energy.* 2017; 2:17124. (In Eng.) DOI: 10.1038/nenergy.2017.124
- [25] Staples M.D., Malina R., Barrett S.R.H. The limits of bioenergy for mitigating global life-cycle greenhouse gas emissions from fossil fuels. *Nature Energy.* 2017; 2:16202. (In Eng.) DOI: 10.1038/nenergy.2016.202
- [26] Shuravin A.P., Vologdin S.V. Comparison of the characteristics of the genetic algorithm and the method of coordinates search for optimization of temperature modes indoor areas. In: *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the Data Science Session at the V International Conference on Information Technology and Nanotechnology (DS-ITNT 2019)*, Samara, Russia, May 21-24, 2019, pp. 260-270. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2416/paper34.pdf> (accessed 16.06.2019). (In Eng.)

Submitted 16.06.2019; revised 20.07.2019;
published online 30.09.2019.

About the authors:

Alexander P. Shuravin, Postgraduate Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7 Studencheskaya Str., Izhevsk 426069, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7225-7751>, webmaster@easyprog.ru

Sergey V. Vologdin, Professor of the Department of Information Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7 Studencheskaya Str., Izhevsk 426069, Russia), Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3013-7759>, vologdin_sv@mail.ru

Maxim M. Gorokhov, Head of the Department of Information Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7 Studencheskaya Str., Izhevsk 426069, Russia), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2314-5275>, in-sys2005@mail.ru

Grigory A. Blagodatsky, Associate Professor of the Department of Information Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7 Studencheskaya Str., Izhevsk 426069, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7942-1200>, blagodatsky@gmail.com

All authors have read and approved the final manuscript.

