

УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

DOI: 10.24143/2072-9502-2020-4-49-61
УДК 004.932

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

А. П. Шуравин, С. В. Вологдин

*Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашиникова,
Ижевск, Удмуртская Республика, Российская Федерация*

Рассматриваются вопросы энергосбережения в части решения задач с применением методов математической оптимизации, а также исследования математических алгоритмов оптимизации в приложении к данной задаче. Представлен обзор российских и зарубежных работ по теме энергосбережения и оптимизации энергопотребления. Поясняется необходимость решения задач оптимизации теплогидравлических режимов зданий. Приводится математическая постановка задачи оптимизации температурного режима помещений с помощью регулируемых устройств, а также два метода решения поставленной задачи: метод направленного поиска и генетический алгоритм. Приводится описание вышеназванных алгоритмов, включая используемый математический аппарат. Описана целевая функция как среднеквадратичное отклонение температуры отапливаемых помещений. Исследованы различные варианты использования генетического алгоритма. Предложена модификация генетического алгоритма, позволяющая получить лучшие результаты применительно к рассматриваемой задаче. Представлены результаты численного эксперимента для рассматриваемых методов оптимизации. Расчеты проводились для типового здания г. Ижевска при средних расчетных условиях с учетом фактического состояния ограждающих конструкций, системы отопления здания, в том числе отопительных приборов помещений. Проведен сравнительный анализ сходимости итерационного процесса для различных вариантов применения генетического алгоритма и направленного поиска. Сделан вывод о том, что новая модификация позволяет улучшить качество генетического алгоритма. Исследована зависимость сходимости генетического алгоритма от его параметров и предложена модификация данного алгоритма применительно к задаче оптимизации термогидравлических режимов отапливаемых помещений. Исследование представляет практическую ценность с точки зрения возможности использования предложенной методики в системе жилищно-коммунального хозяйства в целях экономии тепловой энергии.

Ключевые слова: искусственный интеллект, помещение, температурный дисбаланс, методы оптимизации, генетический алгоритм, алгоритм направленного поиска, энергосбережение, тепловые сети.

Для цитирования: Шуравин А. П., Вологдин С. В. Исследование характеристик генетического алгоритма, применяемого для оптимизации температурного режима отапливаемых помещений // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 4. С. 49–61. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-4-49-61.

Введение

Исследование систем искусственного интеллекта в настоящее время является актуальным направлением в области ComputerScience. К искусственному интеллекту относятся такие техно-

логии, как машинное обучение, компьютерное зрение, методы оптимизации, в том числе генетический алгоритм. Такие технологии широко применяются для решения различных экономических задач, например в задачах моделирования высокотехнологических производственных предприятий [1]. Методы оптимизации применяются в решении разнообразных задач, таких как машинное обучение, составление расписаний, планирование. Наиболее актуально применение методов оптимизации в экономических задачах, где требуется минимизировать или, напротив, максимизировать определенные экономические показатели, например издержки, размер прибыли, время простоя, производительность. Аналогичные задачи существуют в области энергосбережения [2], в частности, актуальным является решение оптимизационных задач в системах централизованного отопления, т. к. это положительно влияет на энергосбережение и экологическую обстановку. К таким задачам относится устранение температурного дисбаланса. Этот дисбаланс выражается в том, что есть «теплые» здания и «холодные» здания. То же самое относится и к помещениям внутри здания. Таким образом, проблема существует на двух уровнях. Она решается путем увеличения расходов теплоносителя или повышения его температуры в зданиях, где есть «холодные» комнаты. В результате в «теплых» помещениях температура становится еще выше. Такой температурный режим очень некомфортен для жильцов. В этом случае они просто открывают окна. По сути, жильцы «теплых» квартир «отапливают» улицу, что приводит к нерациональному расходу ресурсов, в частности угля, которым топят котельные, что, кроме всего прочего, увеличивает выбросы в атмосферу парниковых газов.

На этапе проектирования зданий проблему «теплых» и «холодных» помещений можно решить путем подбора отопительных приборов оптимальной мощности, которая обеспечивает нормативную температуру в помещении. В действующих зданиях можно установить дополнительные радиаторы в «холодных комнатах», однако это не всегда приводит к устранению температурного дисбаланса. Второй способ заключается в регулировании гидравлических сопротивлений клапанов стояков или отопительных приборов. Однако применение данного способа влечет за собой проблему системной сложности и нелинейности. Дело в том, что если мы путем регулирования клапана изменяем гидравлическое сопротивление в одной комнате, это влечет за собой изменение температуры не только в этой комнате, но также в других. Данная зависимость нелинейная. Следовательно, данная задача сводится к решению системы нелинейных уравнений размерностью порядка сотен (по количеству регулировочных клапанов во всех комнатах отапливаемого здания). В настоящее время аналитического способа решения данной математической задачи не существует, поэтому она решается приближенным итерационным методом. К таким методам относятся математические методы оптимизации.

Анализ существующих решений

Компьютерная программа, в которой можно выполнять расчет тепловых сетей разных уровней, представлена в [3]. При эксплуатации данного ПО используются методики и алгоритмы, предложенные авторами. Данный программный продукт содержит функционал по расчету гидравлических сетей и равновесных температур помещений, однако возможность оптимизации температурных режимов в нем отсутствует.

Решение задачи оперативного регулирования теплоснабжения было предложено в [4], где авторы применили имитационное моделирование зависимости температуры в помещениях от температуры наружного воздуха и других факторов. Предложенный ими метод основывался на штрафных функциях¹, которые зависят от температуры в помещении и количества потребляемой энергии. Данный метод позволяет экономить тепловую энергию. Следует отметить, что его применение не приводит к устранению температурного дисбаланса, т. к. нельзя просто запретить открывать форточки жильцам «теплых» квартир.

Задачи многокритериальной оптимизации рассмотрены в [5] – они, как правило, возникают перед началом отопительного сезона. Авторы рассмотрели задачи оптимизации распределительных тепловых сетей, имеющих древовидную и однолинейную структуру. Критерии оптимизации: минимизация мест приложения усилий, потери теплоносителя и риски возникновения критических ситуаций.

Другая идея представлена в работе [6]. Ее авторы предложили оптимизировать структуру тепловой сети. Метод состоит в применении алгоритма перебора деревьев и алгоритма имитации

¹ Штрафные функции зависят и от температуры, и от количества потребляемой тепловой энергии. Это двухкритериальная оптимизация.

отжига. Однако предложенную методику можно применить только для вновь создаваемых тепловых сетей, т. к. экономически невыгодно перестроить существующую. В [7] авторы решали задачу оптимального отопления зданий. Их цель – оптимизировать энергопотребление в системе центрального отопления путем определения достижения минимума потерь энергии обогреваемого здания. Решалась двухкритериальная задача: с одной стороны, необходимо поддерживать комфортную температуру, но одновременно минимизировать потери тепловой энергии. Данные критерии являются противоречивыми. Авторы нашли простейшие частные решения и предложили расчетные формулы. В результате было предложено снизить коэффициент теплоотдачи через наружные стены (это весьма дорогостоящее мероприятие) и строго соблюдать температурный график, индивидуальный для каждого здания. Данные решения не всегда приемлемы. Кроме того, авторами не было предложено регулировать температуру внутри помещений.

Отдельно можно отметить ряд зарубежных исследований, посвященных использованию методов искусственного интеллекта для решения задач энергосбережения. В работе [8] авторы представили иерархическую оптимизацию сети станций зарядки электромобилей. Была предложена трехслойная модель, включающая (на первом слое) оптимизацию местоположений заправочных станций, далее – модель очередей (второй слой) и, наконец, третий слой – оптимизация динамики зарядки аккумулятора.

В работе [9] была обнародована крикинг-модель, назначение которой – снижать потери энергии в распределительных сетях. Для ускорения процесса поиска решения авторами был предложен алгоритм аппроксимации сложных распределительных сетей.

Применение искусственного интеллекта актуально во всех сферах энергосбережения, включая оптимизацию сетей центрального отопления и оптимизацию в сфере потребления электроэнергии. В частности, применение метода Монте-Карло для моделирования надежности оборудования сетевой инфраструктуры электрических сетей представлено в статье [10], авторы предлагают оптимизацию с помощью моделирования для поиска оптимального набора сетевых активов для повышения надежности системы. В частности, алгоритм Industrial Strength COMPASS реализуется для поиска оптимального набора новых линий передачи, который максимизирует надежность системы с учетом бюджетных ограничений.

В [11] описывается текущий режим подключения для распределенной генерации в Великобритании и представлено новое применение метода оптимального потока мощности для автоматического управления потоком энергии для управления тепловыми ограничениями в распределительных сетях. Авторы оценили и обосновали пригодность данного подхода для управления распределительной сетью в рамках онлайн-схемы и доказали, что такая схема обеспечивает устойчивость управления.

Таким образом, несмотря на многообразие решений в области энергосбережения, проблема устранения температурного дисбаланса рассмотрена недостаточно и в настоящий момент является актуальной, в связи с чем исследование алгоритмов оптимизации температурных режимов отапливаемых помещений является актуальной задачей.

Постановка задачи

Целевой функцией данной задачи оптимизации является среднеквадратичное отклонение от целевой температуры [2]

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

где z – число балансировочных клапанов стояков или регулировочных клапанов отопительных приборов; i – порядковый номер помещения; N – число помещений; t_i – расчетная равновесная температура в помещении; $t_{\text{онт}}$ – целевая температура в помещении (в рамках данного исследования это нормативная температура, принятая 20 °C); s_j – сопротивление j -го клапана; j – номер клапана, принимает значение от 1 до z .

Оптимизируемые параметры – это гидравлическое сопротивление регулировочных клапанов отопительных приборов и/или балансировочных клапанов стояков (можно оптимизировать и то, и другое). Размерность аргументов целевой функции – порядка сотен (количество клапанов во всем здании).

Ограничение – диапазон регулирования клапанов:

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

где s_j^{\min} и s_j^{\max} – минимальное и максимальное сопротивление соответственно.

Сопротивление клапанов влияет на расход теплоносителя $x_{\text{пр}}$ в данном тепловом приборе, а следовательно, на поток тепловой энергии от радиатора $Q_{\text{пр}}$, который пропорционален его нагревательной площади $F_{\text{пр}}$, и зависит от температуры воздуха в помещении $t_{\text{в}}$. Теплоотдача отопительного прибора рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{ном}} \left(\frac{0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}) - t_{\text{в}}}{70} \right)^{n+1} \left(\frac{x_{\text{пр}}}{360} \right)^p c_{\text{пр}} F_{\text{пр}}}{\beta_1 \beta_2}, \quad (3)$$

где $q_{\text{ном}}$ – номинальная мощность отопительного прибора; n, p – эмпирические коэффициенты, подбираемые экспериментальным путем; $c_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий схему подключения отопительного прибора; β_1 – коэффициент учета дополнительного теплового потока, который получается из-за округления расчетной величины; β_2 – коэффициент учета тепловых потерь отопительного прибора у наружных ограждений; $t_{\text{вх}}, t_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя на входе и выходе из отопительного прибора [3]. Следует отметить, что тепловой поток рассчитывается при стандартных условиях, когда средний температурный напор равен 70 °С, поэтому в формулу введен коэффициент 70. Коэффициент 360 – перевод единиц измерения.

Расходы теплоносителя в отопительных приборах $x_{\text{пр}}$ и трубах $x_{\text{тр}}$ образуют вектор расхода теплоносителя системы отопления здания x , который зависит от структуры теплосети, гидравлических сопротивлений s_j и определяется путем решения системы нелинейных уравнений Кирхгофа

$$\begin{cases} Ax = q_{\text{д}}; \\ By = 0; \\ y + h_{\text{д}} = Sxx, \end{cases} \quad (4)$$

где A – матрица соединений узлов и ветвей; B – матрица контуров; y – неизвестный вектор перепада давлений; S – диагональная матрица гидравлических сопротивлений (включая сопротивления регулировочных клапанов радиаторов s_j); X – диагональная матрица модулей расходов; $h_{\text{д}}$ – вектор гидравлических напоров; $q_{\text{д}}$ – вектор расходов теплоносителя в узлах.

От теплового потока, в свою очередь, зависит температура в отапливаемом помещении. При расчете решается уравнение теплового баланса, учитываются потери тепла в помещении через ограждающие конструкции, а также решается гидравлическое уравнение тепловой сети здания.

Температура в помещении $t_{\text{в}_i}$ определяется путем решения системы нелинейных уравнений теплового баланса, отдельно для каждого i -го помещения [3]:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ст}}^{\text{T}}(t_{\text{в}}) + Q_{\text{пол}}^{\text{T}}(t_{\text{в}}) + Q_{\text{пот}}^{\text{T}}(t_{\text{в}}) + Q_{\text{дв}}^{\text{T}}(t_{\text{в}}) + Q_{\text{окн}}^{\text{И}}(t_{\text{в}}) + Q_{\text{окн}}^{\text{T}}(t_{\text{в}}) + \\ + Q_{\text{окн}}^{\text{И}}(t_{\text{в}}) + Q_{\text{возд}}^{\text{И}}(t_{\text{в}}) = Q_{\text{пр}}(t_{\text{в}}, s_j) + Q_{\text{тр}}(t_{\text{в}}, s_j), \end{aligned} \quad (5)$$

где $Q_{\text{ст}}^{\text{T}}$ – теплообмен со стенами; $Q_{\text{пол}}^{\text{T}}$ – теплообмен с полом; $Q_{\text{пот}}^{\text{T}}$ – теплообмен с потолком; $Q_{\text{дв}}^{\text{T}}$ – теплообмен с дверями; $Q_{\text{дв}}^{\text{И}}$ – инфильтрация через двери; $Q_{\text{окн}}^{\text{T}}$ – теплообмен с окнами; $Q_{\text{окн}}^{\text{И}}$ – инфильтрация через окна; $Q_{\text{возд}}^{\text{И}}$ – инфильтрация воздуха; $Q_{\text{пр}}, Q_{\text{тр}}$ – приход тепла от отопительных приборов и труб.

Более подробно данный расчет описан в [12].

Описание генетического алгоритма, применяемого для целей данного исследования

В [12] нами проведено исследование генетического алгоритма, который решает задачу оптимизации гидравлических сопротивлений регулировочных клапанов отопительных приборов. Оптимизируется значение целевой функции (1).

Генетическим алгоритмом является алгоритм эвристического поиска, который используется для решения оптимизационных задач и моделирования посредством случайного комбинирования, подбора и вариации искомых параметров. При этом используются механизмы, аналогичные естественному отбору в природе. Задача формализована таким образом, что ее решение может быть закодировано в «генотипе» – специального вида векторе генов. Каждый ген может быть либо битом, либо числом, либо неким другим объектом. Такой набор параметров часто называется «особь», а множество особей в пределах одной итерации оптимизации – «популяцией». Хромосомой обычно является набор параметров, которые подлежат оптимизации в рамках решаемой алгоритмом задачи, это могут быть числа, строки и другие данные, в том числе объекты.

В рамках решаемой задачи хромосомой является массив чисел из диапазона (2). Количество чисел в массиве порядка сотен.

Генетический алгоритм, используемый в настоящем исследовании, можно описать следующими шагами:

1. Создается начальная выборка, в которой гидравлические сопротивления клапанов задаются случайным образом из диапазона (2).
2. Чтение из базы данных информации, необходимой для расчета целевой функции (1).
3. Рассчитывается целевая функция (1), включая расчет теплоотдачи от отопительных приборов (3) и решение уравнений (4), (5).
4. Выборка сортируется по возрастанию целевой функции (т. к. целевую функцию необходимо минимизировать).
5. Путем скрещивания, вероятность которого вычисляется по формуле

$$p_{cross} = \frac{2n - k_1 - k_2}{2n - 1}, \quad (6)$$

где n – число «особей» в «популяции» (наборов в выборке); k_1 и k_2 – первый и второй набор из проверяемой на возможность скрещивания пары соответственно, и мутации, вероятность которой вычисляется по формуле

$$p_{del} = \frac{m}{n}, \quad (7)$$

где m – номер набора, подлежащего удалению (начиная с нуля), создаются новые элементы и добавляются в выборку. Мутацией является изменение гидравлических сопротивлений согласно формулам

$$\Delta S_j = (\sigma \sqrt{-2 \ln(x_1)} \cdot \cos(2\pi x_2)) \cdot \Delta_s, \quad (8)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение случайной величины, имеющей гауссовское распределение (выбрано в размере 0,1); Δ_s – выбираемый эмпирическим путем шаг мутации; x_1 и x_2 – случайные числа (могут быть в пределах [0;1], распределение этих случайных величин равномерно (во многие языки программирования встроены подобные генераторы случайных чисел)), и

$$p = \begin{cases} |t_i - t_{тр}| / \Delta t_{max}, & \text{если } |t_i - t_{тр}| < \Delta t_{max} \\ 1, & \text{если } |t_i - t_{тр}| \geq \Delta t_{max} \end{cases}, \quad (9)$$

где Δt_{max} – максимально допустимое отклонение температуры от нормативной, при котором в любом случае происходит мутация (вероятность мутации равна 1).

После мутации выполняется проверка условия (2) и корректировка, если произошел выход за этот диапазон (устанавливается граничное значение).

6. Рассчитываются целевые функции у новых элементов.

7. Выборка сортируется по убыванию целевой функции (т. к. целевую функцию необходимо минимизировать).

8. Селекция выборки (случайным образом удаляются элементы, чем хуже значение целевой функции, тем больше вероятность удаления (7)).

9. Если достигнут критерий остановки, выходим из алгоритма, иначе переходим к шагу 5. Теперь рассмотрим более подробно некоторые моменты генетического алгоритма.

Скрещивание происходит по следующей схеме:

1. Из родительской популяции выбираются пары хромосом.

2. Для каждой такой пары случайно выбирается точка скрещивания: позиция гена (локус) в хромосоме, которая делит ее на две части.

3. Создается новая хромосома. В нее берется часть из первой хромосомы (та, что до точки скрещивания) и из второй (та, что после точки скрещивания).

Вероятность скрещивания определится по формуле (6). Данная величина принимает значения от 0 до $n - 1$. Вероятность удаления элемента из выборки при селекции определяется по формуле (7).

Для «особи» (набора), имеющей лучшую целевую функцию, данный номер равен 0, иными словами, он никогда не будет удален, деление происходит в цикле, который может быть повторен несколько раз до тех пор, пока количество наборов не достигнет значения меньшего, чем максимально допустимое количество. Если число наборов становится меньше, чем минимально допустимое количество, селекция не производится на данной итерации.

Мутация происходит путем изменения гидравлического сопротивления на случайную величину, вычисленную по формуле (8).

Вероятность мутации 0,5, т. е. примерно половина всех гидравлических сопротивлений в наборе, который получен скрещиванием, подвергаются мутации.

Модификация «Направленная мутация». Наряду с классической схемой мутации, описанной выше, в программном продукте, который был использован для настоящего исследования, предусмотрена модификация алгоритма «Направленная мутация». Идея состоит в том, чтобы объединить генетический алгоритм с другими видами алгоритмов, создав гибридный алгоритм. Из результатов вычислительных экспериментов следует, что гибридные алгоритмы позволяют достичь большей глубины оптимизации [13]. В данной модификации вероятность мутации зависит от температуры в помещении, где установлен прибор с клапаном, гидравлическое сопротивление которого подвергается мутации: чем больше отклонение температуры от требуемой, тем больше вероятность мутации. Данная вероятность вычисляется по формуле (9). Изменяется также сам способ вычисления размера мутации:

$$\Delta S_j = (b + \sigma \sqrt{-2 \ln(x_1)} \cdot \cos(2\pi x_2)) \cdot \Delta S,$$

где σ – среднеквадратическое отклонение случайной величины, имеющей гауссовское распределение (выбрано в размере 0,1); x_1, x_2 – случайные числа (могут быть в пределах [0;1]); b – смещение, зависящее от температуры в помещении, для которого происходит мутация гидравлического сопротивления клапана, вычисляется по формуле

$$b = \frac{|t_i - t_{\text{тр}}|}{\Delta t_{\text{max}}},$$

где t_i – температура в помещении; $t_{\text{тр}}$ – требуемая температура в помещении.

Описание алгоритма направленного поиска, применяемого для целей данного исследования

Данный алгоритм решает задачу оптимизации гидравлических сопротивлений регулировочных клапанов отопительных приборов. Описать его можно следующими шагами:

1. Начальная инициализация. Создаются два набора оптимизируемых параметров: прошлый и текущий, в которых гидравлические сопротивления клапанов задаются случайным образом из диапазона (2).

2. Чтение из базы данных информации, необходимой для расчета целевой функции (1). Рассчитывается целевая функция для каждого из наборов, включая расчет теплоотдачи от отопительных приборов (3) и решение уравнений (4), (5).

3. Вычисляются приращения для следующей итерации:

$$\Delta S_j^{(k)} = \frac{(s_j^{(k)} - s_j^{(k-1)})(t_b^p - t_{b_j}^{(k)})}{(t_{b_j}^{(k)} - t_{b_j}^{(k-1)})}, \quad (10)$$

где k – номер итерации; $j = 1, \dots, z$ – номер клапана; t_b^p – требуемая температура в помещении; $t_{b_j}^{(k)}$ – расчетная температура на k -ой итерации в помещении, где установлен прибор с клапаном j .

4. Создается новый набор оптимизируемых параметров за счет прибавления приращений к текущему набору параметров (приращение может быть и отрицательным).

5. Вычисляется целевая функция для нового набора.

6. Набор, названный «предыдущим», заменяется на «текущий».

7. Набор, названный «текущим», заменяется «новым».

8. Если выполняется условие останова, то выход из алгоритма, иначе переход к п. 4.

Целевая функция рассчитывается точно так же, как и для генетического алгоритма. Приращение сопротивлений клапанов вычисляется по формуле (10).

Результаты экспериментов

В целях сравнения минимумов достижения целевой функции в рамках данного исследования были проведены следующие вычислительные эксперименты:

- оптимизация гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов;
- оптимизация гидравлических сопротивлений балансировочных клапанов отопительных стояков.

В рамках данных вычислительных экспериментов был использован генетический алгоритм, в котором шаг мутации ΔS был взят 20 и 50 в единицах $\text{Па}/(\text{Кг}/\text{час})^2$, и алгоритм направленного поиска.

В первом эксперименте исследовалась зависимость глубины оптимизации (значение целевой функции, которую удалось получить в ходе оптимизации) от следующих характеристик алгоритма:

- шаг мутации (величина ΔS , которая подставляется в формулу (8));
- минимальный размер популяции (минимальное допустимое количество, после которого селекция элементов прекращается);
- максимальный размер популяции (количество элементов, больше которого не может быть в популяции, данный предел ограничивается селекцией, которая происходит до тех пор, пока размер популяции выше этого значения);
- начальный размер популяции (количество элементов, которое создается случайным образом на первой итерации алгоритма).

Размерность целевой функции:

- в случае оптимизации клапанов отопительных приборов (количество регулировочных клапанов в отапливаемом здании) – 254;
- в случае оптимизации клапанов стояков (количество балансировочных клапанов) – 44.

Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты работы генетического алгоритма при разных значениях характеристик алгоритма

Что оптимизируем	Шаг мутации	Размер популяции			Значение целевой функции*
		минимальный	максимальный	начальный	
Стояки	20	5	30	10	2,5
		15	50	20	2,45
		3	20	7	2,98
	50	3	20	7	2,31
		15	50	20	2,26
		5	30	10	3,30
Батареи	20	15	50	20	2,99
		3	20	7	3,42
		3	20	7	3,30
	50	15	50	20	2,88
		15	200	20	2,81

* Значения больше 5 – «неудовлетворительно» (значительный 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).

В табл. 2 отдельно выведены значения характеристик алгоритма, для которых получились наилучшие результаты, в табл. 3 – наихудшие.

Таблица 2

Наилучшие результаты оптимизации

Что оптимизируем	Шаг мутации	Размер популяции			Значение целевой функции
		минимальный	максимальный	начальный	
Стояки	50	15	50	20	2,26
Батареи			200		2,88
					2,81

Таблица 3

Наихудшие результаты оптимизации

Что оптимизируем	Шаг мутации	Размер популяции			Значение целевой функции
		минимальный	максимальный	начальный	
Стояки	20	3	20	7	2,98
Батареи					3,42

Таким образом, наилучшие результаты были получены при наибольших значениях характеристик «Шаг мутации», «Начальное количество элементов», «Максимальное количество элементов» и «Минимальное количество элементов».

Наглядно разница прослеживается на графике истории оптимизации (рис. 1) для варианта с худшими и лучшими параметрами (для варианта оптимизации клапанов отопительных приборов).

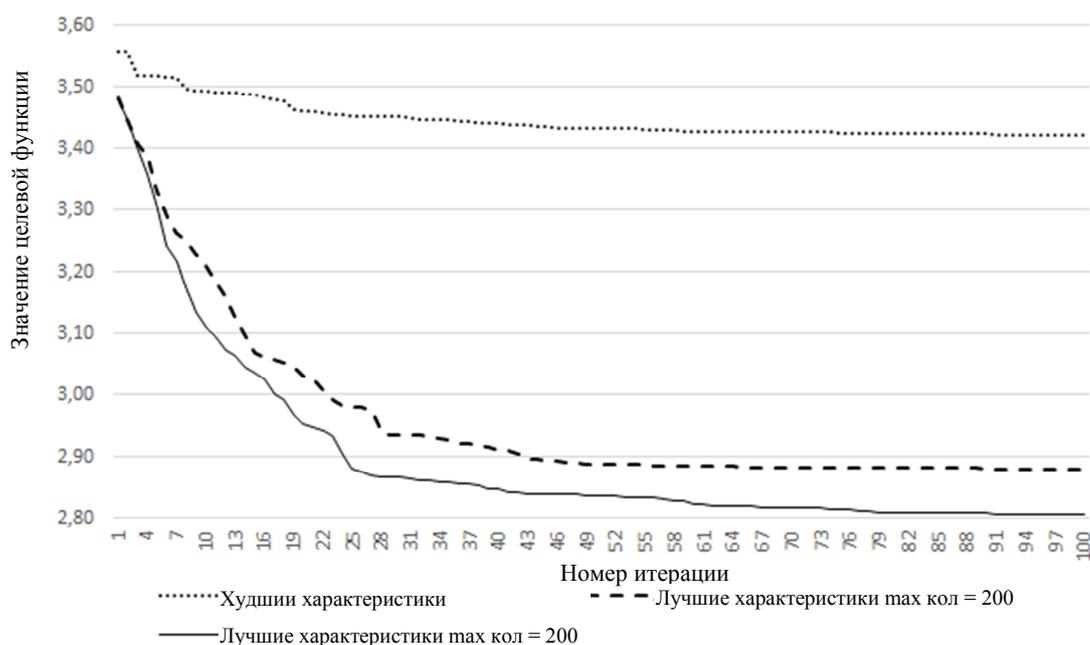


Рис. 1. История оптимизации гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов генетическим алгоритмом

Для выявления наиболее важной характеристики (которая оказывает наибольшее влияние на сходимость алгоритма оптимизации) были проведены эксперименты, когда только одна характеристика менялась, остальные были фиксированные.

В табл. 4 приведены результаты эксперимента, когда менялось минимальное количество элементов в популяции.

Таблица 4

Результаты оптимизации в зависимости от минимального количества элементов в популяции

Что оптимизируем	Шаг мутации	Размер популяции			Значение целевой функции
		минимальный	максимальный	начальный	
Батарей	20	3	20	7	3,42
		4			
		5			
		6			
		8			
		10			
15					

Таким образом, глубина оптимизации (столбец «Значение целевой функции») не менялась при изменении минимального размера популяции. Это можно объяснить тем, что размер популяции никогда не достигает минимума или достигает очень редко.

В табл. 5 приведены результаты эксперимента, когда менялось максимальное количество элементов в популяции.

Таблица 5

Результаты оптимизации в зависимости от максимального количества элементов в популяции

Что оптимизируем	Шаг мутации	Размер популяции			Значение целевой функции
		минимальный	максимальный	начальный	
Батарей	20	3	20	7	3,42
			21		3,41
			23		
			25		
			30		
			40		3,36
			50		3,32
					3,39

Таким образом, результат оптимизации почти всегда (за исключением последней строки) улучшается с увеличением максимального количества элементов в популяции. Такая закономерность связана с тем, что количество элементов в популяции после селекции сохраняется близким к верхней границе (максимальному значению); отодвигая верхнюю границу, мы увеличиваем количество элементов, участвующих в создании новых элементов (увеличиваем генетическое разнообразие), что ведет к увеличению вероятности найти лучшие решения. Однако из-за ограничения вычислительных ресурсов невозможно бесконечно увеличивать максимальное количество элементов в популяции. Следует также отметить, что время работы алгоритма пропорционально квадрату максимального количества элементов.

Исключение из закономерности связано с тем, что генетический алгоритм основан на факторе случайности.

В табл. 6 приведены результаты эксперимента, когда менялось начальное количество элементов в популяции.

Таблица 6

Результаты оптимизации в зависимости от начального количества элементов в популяции

Что оптимизируем	Шаг мутации	Размер популяции			Значение целевой функции
		минимальный	максимальный	начальный	
Батарей	20	3	20	7	3,42
				8	3,43
				10	3,32
				15	3,30
				20	3,10
				30	3,11
				50	

Здесь с ростом начального количества элементов улучшается глубина оптимизации. Это объясняется тем, что чем больше генетическое разнообразие в начале, тем больше вероятность того, что лучшее решение попадет в дальнейшие итерации.

В табл. 7 приведены результаты эксперимента, когда менялся шаг мутации.

Таблица 7

Результаты оптимизации в зависимости от шага оптимизации элементов в популяции

Что оптимизируем	Шаг мутации	Размер популяции			Значение целевой функции
		минимальный	максимальный	начальный	
Батарей	20	3	20	7	3,42
	21				3,37
	23				
	25				
	30				
	40				
50	3,34				
					3,30

Согласно табл. 7 с увеличением шага мутации (изменчивости) увеличивается глубина оптимизации. Это объясняется тем, что с увеличением изменчивости растет охват пространства параметров оптимизации и повышается вероятность найти лучшее решение.

Улучшает качество оптимизации также модификация «Направленная мутация». В табл. 8 приведено сравнение данной модификации с классическим вариантом алгоритма.

Таблица 8

Сравнение модификации «Направленная мутация» с классическим вариантом генетического алгоритма

Что оптимизируем	Шаг мутации	Размер популяции			Значение целевой функции	
		минимальный	максимальный	начальный	без модификации	с модификацией
Батарей	20	5	30	10	3,3	2,27
		15	50	20	2,99	2,14
		3	20	7	3,42	2,26
					3,3	2,35
		15	50	20	2,88	2,08

Таким образом, применение модификации «Направленная мутация» во всех случаях уменьшает значение достигнутой целевой функции. Качество оптимизации с применением данной модификации, как и в случае с классическим вариантом генетического алгоритма, увеличивается с увеличением шага мутации и количества элементов в популяции.

На рис. 2 приведен график истории целевой функции при данной модификации в сравнении с генетическим алгоритмом без модификаций и с алгоритмом направленного поиска.

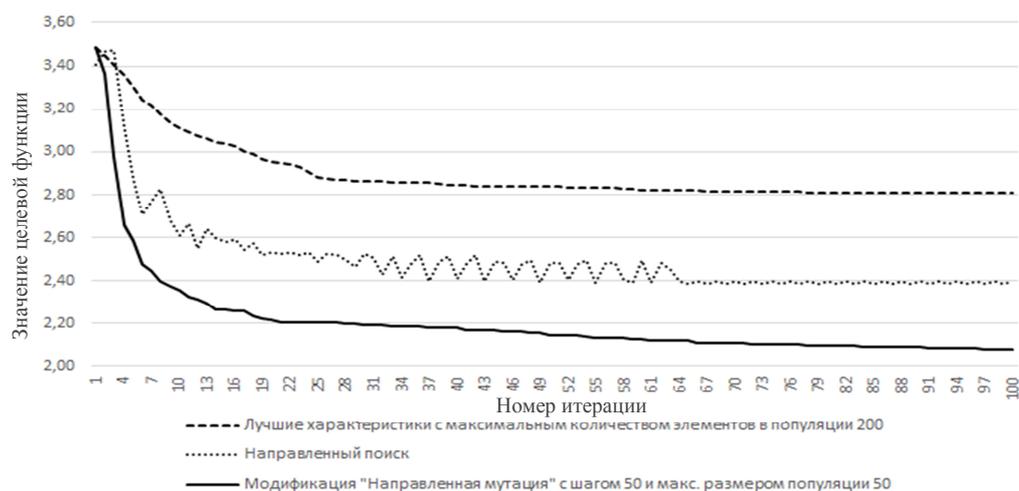


Рис. 2. История оптимизации гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов генетическим алгоритмом с модификацией «Направленная мутация» в сравнении с генетическим алгоритмом без модификации и с направленным поиском

Для определения экономической эффективности данной разработки сравним потребление тепловой энергии до и после оптимизации. Данные для сравнения сведены в табл. 9.

Сравнение потребления тепловой энергии до оптимизации и после оптимизации

Что оптимизировали	Шаг мутации	Размер популяции			Потребление тепловой энергии, Гкал/ч
		минимальный	максимальный	начальный	
Стояки	50	15	50	20	0,110
Батареи					
Без оптимизации					0,126

Из таблицы видно, что потребление энергии снизилось примерно на 14 %, или на 0,016 Гкал/ч в абсолютном значении с одного дома. По данным Федеральной службы государственной статистики, на 2018 г. число многоквартирных домов составляет примерно 2,7 млн [14]. Таким образом, в масштабах страны в отопительный сезон экономия тепловой энергии составляет 43 200 Гкал/ч. Стоимость 1 Гкал тепла примерно 2 000 руб. Итого в масштабах страны экономия составляет примерно 360 млн руб. только за один час во время отопительного сезона.

Заключение

В ходе эксперимента мы пришли к следующим выводам:

1. Генетический алгоритм позволяет добиться наилучших результатов при наибольшем значении максимального размера популяции, начального размера популяции и шага мутации.
 2. Минимальный размер популяции практически не влияет на качество оптимизации.
 3. Так как значительное увеличение количества элементов в популяции невозможно, необходимо провести исследование влияния на качество оптимизации больших значений шага мутации.
 4. Введение модификации «Направленная мутация» позволяет увеличить глубину оптимизации.
- В результате проведенной оптимизации гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов получены благоприятные эффекты:
- уменьшение тепловых выбросов в атмосферу (экологический эффект);
 - благоприятный температурный режим помещения (оздоровительный эффект);
 - уменьшение перерасхода тепловой энергии примерно на 14 % (экономический эффект).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Solomennikova S. I., Yakimovich B. A., Tenenev V. A.* Fuzzy-logic simulation of the development of a high-tech manufacturing enterprise // Russian engineering research. New York: Allerton Press, Inc., 2015. P. 363–368.
2. *Шуравин А. П., Вологдин С. В.* Применение генетического алгоритма для оптимизации температурного режима помещений посредством регулирования балансировочных клапанов стояков // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16. № 2. С. 113–120.
3. *Щенятский А. В., Якимович Б. А., Вологдин С. В.* Разработка пакета прикладных программ по повышению энергоэффективности системы централизованного теплоснабжения // Современные информационные технологии и ИТ-образование: сб. избр. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. М.: ИНТУИТ.РУ, 2012. С. 643–654.
4. *Басалаев А. А., Шнайдер Д. А.* Метод оптимизации температуры подаваемого теплоносителя в системе централизованного теплоснабжения зданий на основе имитационного моделирования // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2017. Т. 17. № 1. С. 15–22.
5. *Новицкий Н. Н., Луценко А. В.* Исследование задач и методов многокритериальной оптимизации гидравлических режимов распределительных тепловых сетей // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2016. № 3 (64). С. 131–145.
6. *Стенников В. А., Чемезов 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.
7. *Сабенов К. О., Байтасов Т. М.* Оптимальное (энергоэффективное) теплоснабжение здания в системе центрального отопления // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2015. № 8 (326). С. 53–60.
8. *Kong C., Jovanovic R., Bayram I. S., Devetsikiotis M.* A hierarchical optimization model for a network of electric vehicle charging stations // Energies. 2017. V. 10 (5), 675. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/675> (дата обращения: 04.02.2020).
9. *Wang D., Hu Q., Tang J., Lia 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. V. 10 (12). 2162. DOI: 10.3390/en10122162.
10. *Sacaan R., Rudnick H., Lagos T., Ordóñez F., Navarro-Espinosa A., Moreno R.* Improving power system reliability through optimization via simulation // 2017 IEEE Manchester PowerTech (Manchester, UK, 18–22 June 2017). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7981193> (дата обращения: 04.02.2020).
11. *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. V. 27. N. 2. P. 790–799.

12. *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 // The 5th International Conference On Information Technology And Nanotechnology (ITNT-2019) (Samara, 21–24 May 2019). Samara, 2019. P. 260–270.
13. *Дмитриев С. В., Тенев В. А.* Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью гибридных генетических алгоритмов // Изв. Ин-та математики и информатики Удмурт. гос. ун-та. 2006. Вып. 2 (36). С. 163–166.
14. *Безрукавая И. В., Борисова О. В. и др.* Жилищное хозяйство в России. 2019: стат. сб. М.: Росстат, 2019. 78 с.

Статья поступила в редакцию 01.04.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шуравин Александр Петрович – Россия, 426069, Ижевск; Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова; аспирант кафедры информационных систем; webmaster@easyprog.ru.

Вологдин Сергей Валентинович – Россия, 426069, Ижевск; Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова; д-р техн. наук, доцент; профессор кафедры информационных систем; vologdin_sv@mail.ru.



STUDYING CHARACTERISTICS OF GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING TEMPERATURE REGIME OF HEATED ROOMS

A. P. Shuravin, S. V. Vologdin

*Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation*

Abstract. The article discusses the problems of energy-saving, which can be solved by using mathematical optimization methods, and the mathematical optimization algorithms related to these problems. There has been given the review of Russian and foreign works on energy saving and energy optimization. The need for solving the problems of optimizing the thermohydraulic regimes of buildings is explained. There is given the mathematical formulation of the problem of optimizing the temperature regime of indoor areas using adjustable devices and two methods for solving the problem: the directed search method and the genetic algorithm. The above algorithms including the mathematical apparatus are described. The objective function is described as the standard deviation of the temperature of the heated rooms. Various options for using the genetic algorithm have been investigated. A modification of the genetic algorithm is proposed, which allows obtaining the best results in relation to the problem under consideration. The results of a computation experiment for the considered optimization methods are presented. The calculations were carried out for a typical building in Izhevsk under average design conditions, taking into account the actual condition of the enclosing structures, the heating system of the building, and heating devices of indoor areas. A comparative analysis of the convergence of the iterative process for various options for the application of the genetic algorithm and directional search has been carried out. It is concluded that the new modification allows us to improve the quality of the genetic algorithm. The dependence of the convergence of the genetic algorithm on its parameters was investigated and a modification of this algorithm was proposed in relation to the problem of optimizing the thermo-hydraulic modes of heated rooms. The study is of practical value in terms of using the proposed methodology of saving heat energy in the system of housing and communal services. Practical value is the ability to use in the housing and communal services to save thermal energy.

Keywords: artificial intelligence, room, temperature imbalance, optimization methods, genetic algorithm, direct search algorithm, energy saving, heat networks.

For citation: Shuravin A. P., Vologdin S. V. Studying characteristics of genetic algorithm for optimizing temperature regime of heated rooms. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2020;4:49-61. (InRuss.) DOI: 10.24143/2072-9502-2020-4-49-61.

REFERENCES

1. Solomennikova S. I., Yakimovich B. A., Tenenev V. A. Fuzzy-logic simulation of the development of a high-tech manufacturing enterprise. *Russian engineering research*. New York, Allerton Press, Inc., 2015. Pp. 363-368.
2. Shuravin A. P., Vologdin S. V. Primenenie geneticheskogo algoritma dlia optimizatsii temperaturnogo rezhima pomeshchenii posredstvom regulirovaniia balansirovochnykh klapanov stoiakov [Application of genetic algorithm to optimize room temperature by regulating pipe balancing valves]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 113-120.
3. Shcheniatskii A. V., Iakimovich B. A., Vologdin S. V. Razrabotka paketa prikladnykh programm po povysheniiu energoeffektivnosti sistemy tsentralizovannogo teplosnabzheniia [Development of package of applied programs to improve power efficiency of district heating system]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie: sbornik izbrannykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Moscow, INTUIT.RU Publ., 2012. Pp. 643-654.
4. Basalaev A. A., Shnaider D. A. Metod optimizatsii temperatury podavaemogo teplonositel'ia v sisteme tsentralizovannogo teplosnabzheniia zdaniia na osnove imitatsionnogo modelirovaniia [Method of optimizing temperature of supplied heat carrier in heating system of buildings based on simulation]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 15-22.
5. Novitskii N. N., Lutsenko A. V. Issledovanie zadach i metodov mnogokriterial'noi optimizatsii gidravlicheskikh rezhimov raspredelitel'nykh teplovykh setei [Research of tasks and methods of multicriteria optimization of hydraulic modes of distribution heating networks]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 3 (64), pp. 131-145.
6. Stennikov V. A., Chemezov A. A. Primenenie algoritma perebora derev'ev i metoda imitatsii otzhiga dlia skhemno-strukturnoi optimizatsii teplovykh setei [Application of tree search algorithm and simulated annealing method for circuit-structural optimization of heating networks]. *Programmnye produkty i sistemy*, 2018, no. 2, pp. 387-395.
7. Sabenov K. O., Baitasov T. M. Optimal'noe (energoeffektivnoe) teplosnabzhenie zdaniia v sisteme tsentral'nogo otopeniia [Optimal (energy saving) heat supply to building in central heating system]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2015, no. 8 (326), pp. 53-60.
8. 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 (5), 675. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/675> (accessed: 04.02.2020).
9. Wang D., Hu Q., Tang J., Lia 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 (12), 2162. DOI: 10.3390/en10122162.
10. Sacaan R., Rudnick H., Lagos T., Ordóñez F., Navarro-Espinosa A., Moreno R. Improving power system reliability through optimization via simulation. *2017 IEEE Manchester PowerTech (Manchester, UK, 18-22 June 2017)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7981193> (accessed: 04.02.2020).
11. 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.
12. 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. *The 5th International Conference On Information Technology And Nanotechnology (ITNT-2019) (Samara, 21-24 maia 2019 g.)*. Samara, 2019. Pp. 260-270.
13. Dmitriev S. V., Tenenev V. A. Optimizatsiia mnogoekstremal'nykh funktsii s pomoshch'iu gibridnykh geneticheskikh algoritmov [Optimization of multi-extremal functions using hybrid genetic Algorithms]. *Izvestiia Instituta matematiki i informatiki Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2006, iss. 2 (36), pp. 163-166.
14. Bezrukavaya I. V., Borisova O. V. i dr. *Zhilishchnoe khoziaistvo v Rossii. 2019: statisticheskii sbornik* [Housing in Russia. 2019: a statistical compendium]. Moscow, Rosstat Publ., 2019. 78 p.

The article submitted to the editors 01.04.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shuravin Alexander Petrovich – Russia, 426069, Izhevsk; Kalashnikov Izhevsk State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Information Systems; webmaster@easyprog.ru.

Vologdin Sergey Valentinovich – Russia, 426069, Izhevsk; Kalashnikov Izhevsk State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Information Systems; vologdin_sv@mail.ru.

