

Исследование влияния внешних условий на оптимальное значение гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов, установленных в отапливаемом помещении

А. П. Шуравин*, С. В. Вологдин

ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова», г. Ижевск, Российская Федерация

426069, Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

* webmaster@easyprog.ru

Аннотация

В статье обосновывается актуальность применения методов искусственного интеллекта для задач энергосбережения и приводятся примеры подобных работ, в том числе с использованием методом математической оптимизации. Даны несколько примеров актуальных оптимизационных задач. Обосновывается необходимость исследования ландшафта целевой функции при оптимизации гидравлических режимов системы отопления зданий. Приведена постановка задачи данного исследования, включая формулу расчета целевой функции. Дано краткое описание используемых алгоритмов оптимизации (генетический алгоритм и алгоритм направленного поиска). Дано описание вычислительного эксперимента, в ходе которого были исследованы результаты оптимизации термогидравлических режимов отапливаемых помещений при разных условиях: температуре наружного воздуха, температуре и расхода теплоносителя. Данное исследование выявило, что оптимальное значение гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов в общем случае уменьшается с уменьшением температуры наружного воздуха, а так же температуры и расхода теплоносителя. Отклонения от этой закономерности наблюдаются при экстремальных условиях: слишком низкая температура наружного воздуха, при низкой (для данных условий) температуре теплоносителя или низкого расхода теплоносителя.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шуравин, А. П. Исследование влияния внешних условий на оптимальное значение гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов, установленных в отапливаемом помещении / А. П. Шуравин, С. В. Вологдин. — DOI 10.25559/SITITO.16.202003.598-609 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2020. — Т. 16, № 3. — С. 598-609.

© Шуравин А. П., Вологдин С. В., 2020



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



Research of the Influence of External Conditions on the Optimal Value of the Valves Hydraulic Resistances of Heating Devices Installed in a Heating Indoor Area

A. P. Shuravin*, S. V. Vologdin

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation
4 Studencheskaya St., Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russian Federation

* webmaster@easyprog.ru

Abstract

The article substantiates the relevance of the use of artificial intelligence methods for energy saving problems and provides examples of such works, including using the method of mathematical optimization. Several examples of topical optimization problems are given. The necessity of studying the landscape of the objective function when optimizing the hydraulic regime of the heating system of buildings is substantiated. The formulation of the problem of this study, including the formula for calculating the objective function, is given. A brief description of the optimization algorithms used (genetic algorithm and directed search algorithm) is given. A description of a computational experiment is given, during which the results of optimization of thermohydraulic modes of heated rooms under different conditions were investigated: outside air temperature, temperature and coolant flow rate. This study revealed that the optimal value of the hydraulic resistances of the valves of heating devices generally decreases with a decrease in the outside air temperature, as well as the temperature and flow rate of the heat coolant. Deviations from this pattern are observed under extreme conditions: too low outside air temperature, at low (for these conditions) coolant temperature or low coolant flow rate.

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

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Shuravin A.P., Vologdin S.V. Research of the Influence of External Conditions on the Optimal Value of the Valves Hydraulic Resistances of Heating Devices Installed in a Heating Indoor Area. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2020; 16(3):598-609. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202003.598-609>



Введение

Применение технологий искусственного интеллекта для решения оптимизационных задач в энергетике является актуальным на сегодняшний день. В частности, нейронные сети и машинное обучение используются для прогнозирования потребления энергии и различных внешних условий, например, погоды, экспертные системы и алгоритмы нечеткой логики используются для повышения эффективности биогазовой электростанции [1]. Также нейронные сети могут быть использованы для уменьшения времени поиска и устранения отказов, рационализации использования энергетических ресурсов, автоматизации рутинных операций, снижении значимости человеческого фактора [2]. В работе [3] авторы рассмотрели вопросы создания программно-аппаратных комплексов для энергосбережения в промышленном производстве. Используются также и другие алгоритмы искусственного интеллекта, например, в работе [4] авторы предложили использовать роевой интеллект для решения задачи оптимального распределения реактивной мощности в электрических сетях. Комплексный подход для оптимизации использования электроэнергии от солнечных электростанций применили авторы в работе [5]. Их модель учитывает расположение электростанций и даже погодные условия. Модель на основе иерархической кластеризации помогла авторам работы [6] проанализировать влияние налогообложения в сфере энергетики и экологии на поведение экономических субъектов. Они сделали вывод, что государства должны продвигать более точную налогово-бюджетную политику, чтобы улучшить потерю конкурентоспособности, вызванную неточным налогообложением энергии. В работе [7] решался вопрос эффективного распределения возобновляемой энергии по географическим регионам. Авторы исследовали данную проблему для Германии. Было объединено несколько подходов в частности, экономическое моделирование и численная оптимизация. Авторы сделали вывод, что расстояние между возобновляемыми электростанциями должны быть на сколько малы, на сколько это возможно по закону. Так же весьма актуальна проблема выбросов парниковых газов, которая была рассмотрена в [8]. Данная проблема актуальна потому, что выбросы в атмосферу парниковых газов могут привести к глобальному потеплению. Авторы предложили оптимизировать использование глобальных биоэнергетических ресурсов для компенсации ископаемого топлива в 2050 году.

Можно отметить так же и муравьиный алгоритм, который широко применяется для решения различных задач на графе [9]. В частности, к таким задачам относятся и транспортная задача, к которой можно свести задачу оптимизации тепловой сети. Метод имитации отжига и алгоритм перебора деревьев был применен для оптимизации структуры тепловой сети [10]. Машинное обучение, совместно с технологией «умный дом» используется для оптимизации потребления тепловой энергии отапливаемым помещением [11].

Важным направлением исследования в сфере искусственного интеллекта являются методы математической оптимизации. Они так же нашли широкое применение в энергетике. Например, используя имитационное моделирование, авторы работы [12] решили проблему оперативного регулирования те-

поснабжения при изменении температуры наружного воздуха. Суть предложенного ими метода в использовании штрафных функции, зависящих от температуры воздуха в помещениях и количестве потребляемой энергии. Трехуровневая модель оптимизации была применена для станций заправки аккумуляторов электромобилей [13]. Авторы учли местоположение заправочных станций, построили модель очередей и оптимизировали динамику зарядки аккумуляторов. Другой способ экономии электрической энергии был предложен в [14]: авторы применили крикинг модель для того для аппроксимации сложных распределительных сетей, тем самым ускорив процесс решения. Монте-Карло для оптимизации энергосистем предложен в [15] авторы провели моделирование безопасности и отказов передачи энергии в режиме реального времени. В работе [16] приведены решения задач оптимизации в электроэнергетике с целью снижения затрат с учетом безопасности. В работе [17] авторы предложили использовать эквивалентную тепловую сеть для оптимизации затрат на транспортировку тепловой энергии. Также актуальна многокритериальная оптимизация распределительных отопительных сетей. Подобная задача решалась в [18]. Для решения задачи оптимизации по непрерывному критерию авторы использовали метод бисекции, на каждом шаге которого используется разработанный в ИСЭМ СО РАН метод внутренних точек. Математическое исследование задачи оптимального отопления зданий рассматривалось в работе [19]. В качестве критерия оптимизации авторы взяли задачу поддержания комфортной температуры при минимуме расхода энергии. Ими были предложены расчетные формулы простейших частных решений.

Вместе с тем, актуальны не только вопросы экономии энергии, но так же и другие сопутствующие оптимизационные задачи. Как было указано выше, при оптимизации потребления тепловой энергии, оптимизации подвергается так же и температура внутри отапливаемых помещений. Однако, сам факт устранения температурного дисбаланса приводит к уменьшению расхода тепловой энергии [20]. Эта задача так же решалась в [21,22]. Замечу, что устранение температурного дисбаланса в жилых помещениях имеет скрытый экономический эффект — за счет установления более комфортных условий люди испытывают меньше стресса, значит, меньше болеют.

Улучшение скорости и качества работы оптимизационного алгоритма можно обеспечить, учтя ландшафт целевой функции в пространстве оптимизационных параметров [23]. Научные исследования [24] показывают, что ландшафт целевой функции оказывает на результат более существенное влияние, чем используемые алгоритмы оптимизации и их комбинации. Так же можно отметить, что в работе [25] авторы предложили модификацию алгоритма роя частиц, основанном на методе анализа иерархий.

Исходя из всего вышеперечисленного можно полагать, что исследование влияния гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов на отклонение температуры отапливаемых помещений от нормативной является актуальной задачей.



Цель исследования

1. Выявить закономерность как влияет температура наружного воздуха, температура теплоносителя и расход теплоносителя на оптимальное значение гидравлического сопротивления клапанов отопительных приборов.
2. Выяснить способы, как можно улучшить глубину оптимизации.

Постановка задачи

Задача оптимизации термогидравлических режимов зданий состоит в устранении температурного дисбаланса. Под температурным дисбалансом понимается отклонение температуры воздуха в отапливаемом помещении от нормативной. Таким образом, целевая функция описана формулой:

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

где z — количество регулировочных клапанов отопительных приборов и балансировочных клапанов стояков; i — номер помещения; N — количество помещений; t_i — расчетная температура в помещении, °C, $t_{\text{норм}}$ — целевая температура, °C, в помещении, которую планируется достичь, в данном исследовании это нормативная температура; s_j — сопротивление, Па/(Кг/час)², j -го клапана, j — является номером клапана и 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 то). 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, Па/(Кг/час)², соответственно. Методика расчета температуры наружного воздуха и алгоритмы оптимизации приведены в работе [22]

Описание алгоритмов оптимизации

Оптимизация происходит итерационно. Алгоритм можно описать следующими шагами [22]:

1. Случайным образом задаются начальные значения сопротивлений клапанов отопительных приборов и стояков (ветвей).
2. Структуры отопительной сети и характеристик помещений, включая ограждающие конструкции, читается из базы данных.
3. Рассчитывается термогидравлический баланс отопительной системы.
4. Рассчитывается температура воздуха в помещениях методом расчета равновесных температур здания.
5. Вычисляется целевая функция.
6. Если достигнуто условие остановка (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).
8. Переход к п. 2.

Шаг 7 данного алгоритма зависит от выбранного метода. Для генетического алгоритма наборы оптимизируемых параметров изменяется 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. При использовании генетического алгоритма для подбора сопротивлений клапанов генерируется несколько наборов значений путем скрещивания друг с другом наборов из рабочей выборки и случайных мутаций. Под мутацией понимается изменение значения на величину мутации, которая имеет нормальное распределение и вычисляется по формуле [26]:

$$\Delta S_j = \sigma \sqrt{-2 \ln(x_1)} \cdot \cos(2\pi x_2), \quad (4)$$

где σ — шаг мутации, Па/(Кг/час)², (выбирается эмпирическим путем), x_1 и x_2 — случайные величины в пределах [0;1], имеющие равномерное распределение (генераторы таких чисел встроены во многие языки программирования).

Целевая функция рассчитывается для каждого набора, затем происходит селекция, в результате которой из выборки удаляются наборы с худшими значениями целевой функции. Конкретная методика создания новых наборов и селекции зависит от способа реализации генетического алгоритма. В данном исследовании пары для скрещивания выбираются случайным образом, причем вероятность скрещивания тем больше, чем лучше значение целевой функции участников пары. Каждая «особь» проверяется на возможность скрещивания со всеми остальными «особями». Математически данное правило скрещивания выражается формулой вероятности скрещивания:

$$P_{\text{cross}} = \frac{2n - k_1 - k_2}{2n - 1},$$

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 $n-1$. Нетрудно заметить, что наборы с номерами 0 и 1 будут скрещиваться всегда ($p=1$).

Удаление наборов из выборки при селекции происходит случайным образом, вероятность удаления тем больше, чем хуже целевая функция. Данная вероятность выражена формулой:

$$P_{\text{del}} = \frac{m}{n},$$

где m — номер удаляемого набора. 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 направленного поиска значение сопротивления клапанов на следующей итерации изменяется на приращение ΔS , вычисленное по формуле [20]:

$$\Delta S_j^{(k)} = \frac{(s_j^{(k)} - s_j^{(k-1)}) (t_a^p - t_{a_j}^{(k)})}{(t_{a_j}^{(k)} - t_{a_j}^{(k-1)})},$$

где $j=1, \dots, z$ — номер клапана, k — номер итерации, t_a^p — требуемая температура в помещении, °С, $t_{a_j}^{(k)}$ — средняя расчетная температура, °С, помещений по ветви j на k -ой итерации.

Описание эксперимента

Сначала была проведена оптимизация направленным поиском относительно нормативной температуры клапанов батарей (в отдельных экспериментах батарей и стояков). Затем гидравлические сопротивления были дооптимизированы генетическим алгоритмом. При этом минимальное количество наборов параметров («особей») в одной популяции было взято 15, начальное количество «особей» 20, максимальное — 50, шаг мутации — 50. Рассчитывалось типовое здание при средних расчетных условиях г. Ижевска для фактического состояния ограждающих конструкций и отопительных приборов помещений. Нормативная температура была принята 20°C.

В таблице 1 приведены результаты оптимизации при разных температурах наружного воздуха для следующих условий:

- расход теплоносителя 7.7 т/час
- температура теплоносителя 68.2°C.

В основном в ходе оптимизации менялось только гидравлическое сопротивление регуляторов в квартире со средней температурой (именно эти данные и приведены в таблице), и оно было тем больше, чем выше температура наружного воздуха, что логично, так как при повышении температуры наружного воздуха требуется меньше тепловой энергии для поддержа-

ния нужной температуры в помещении температуры. Однако из этого правила есть исключения — некоторое anomальное знание гидравлического сопротивления в случае, когда температура наружного воздуха очень низка, порядка -20°C. Это можно объяснить тем, что изменение гидравлического сопротивления в одном помещении косвенно влияет на температуру в других помещениях этого здания.

Таблица 1. Оптимизация при разной температуре наружного воздуха и температуре теплоносителя 68.2°C (соответствует температурному графику при температуре -12°C)

Table 1. Optimization at different outdoor temperatures and a coolant temperature of 68.2°C (corresponds to the temperature schedule at a temperature of -12°C)

Темп. нар. °С	Средняя температура, °С	Целевая функция, °С	Результаты		
			Кв №	Темп., °С	Сопр., Па/(Кг/час) ²
-20	17.0	4,00	37	14,1	42,46
-15	18.1	2,86	37	15,3	0
-10	19.8	1,74	37	18,9	0
-7	20.4	1,55	37	20,3	0
-6	20.6	1,66	37	20,1	0,11
-5	20.9	1,97	37	20,1	0,55
-4	21.2	2,27	37	20,2	2,28
-3	21.6	2,47	37	20,1	4,31
-2	22.0	2,81	37	20,1	13,71
-1	22.4	3,17	37	20,4	496,11
0	22.8	3,57	37	21	500
1	23.1	3,60	37	21,6	497,89
2	23.5	4,26	37	22,1	500

Проверим, что будет если полностью открыть регулировочные клапаны в комнатах, которые стали «холодными», при температуре наружного воздуха -20°C. Значение целевой функции стало 4.0607 (незначительно улучшилось).

21,1С	19С	16,7С	17,5С	20,6С	20,3С	20,3С	20,2С	18,2С	20,8С	20,4С	16,7С	14,1С	18,1С
кв. 1	кв. 11	кв. 21	кв. 31	кв. 41	кв. 51	кв. 61	кв. 71	кв. 81	кв. 91	кв. 101	кв. 111	кв. 121	кв. 131
17,6С	19,2С	14,8С	17,2С	14,1С	21,2С	21,1С	15,1С	14,7С	19,2С	14,3С	15,8С	14,1С	14,1С
кв. 2	кв. 12	кв. 22	кв. 32	кв. 42	кв. 52	кв. 62	кв. 72	кв. 82	кв. 92	кв. 102	кв. 112	кв. 122	кв. 132
19,9С	20,6С	17,4С	18,9С	19,1С	21,3С	16,8С	14,4С	20,8С	19,2С	15,4С	14,1С	14,1С	14,1С
кв. 3	кв. 13	кв. 23	кв. 33	кв. 43	кв. 53	кв. 63	кв. 73	кв. 83	кв. 93	кв. 103	кв. 113	кв. 123	кв. 1001
22,2С	14,1С	14,1С	14,1С	21,1С	19,7С	14,1С	20,5С	18,8С	18,6С	19,5С	17,8С	14,1С	
кв. 4	кв. 14	кв. 24	кв. 34	кв. 44	кв. 54	кв. 64	кв. 74	кв. 84	кв. 94	кв. 104	кв. 114	кв. 124	
14,1С	21,1С	20,7С	14,1С	18,9С	16,6С	14,1С	14,1С	17,2С	14,1С	16,7С	15,6С	14,1С	
кв. 5	кв. 15	кв. 25	кв. 35	кв. 45	кв. 55	кв. 65	кв. 75	кв. 85	кв. 95	кв. 105	кв. 115	кв. 125	
23,4С	14,1С	18,2С	14,1С	19,6С	21,3С	14,1С	15,5С	14,1С	17,5С	18,8С	14,1С	16,3С	
кв. 6	кв. 16	кв. 26	кв. 36	кв. 46	кв. 56	кв. 66	кв. 76	кв. 86	кв. 96	кв. 106	кв. 116	кв. 126	
14,1С	16С	17,1С	14,1С	18,4С	21,6С	17С	14,2С	15С	18,9С	17,8С	14,4С	14,1С	
кв. 7	кв. 17	кв. 27	кв. 37	кв. 47	кв. 57	кв. 67	кв. 77	кв. 87	кв. 97	кв. 107	кв. 117	кв. 127	
14,1С	18,2С	14,1С	14,1С	20,4С	14,1С	14,1С	20,2С	20,7С	17С	14,8С	15,5С	14,1С	
кв. 8	кв. 18	кв. 28	кв. 38	кв. 48	кв. 58	кв. 68	кв. 78	кв. 88	кв. 98	кв. 108	кв. 118	кв. 128	
16,1С	14,1С	16,8С	15,1С	20,6С	14,7С	14,1С	18,3С	16,6С	20,1С	14,1С	14,1С	14,1С	
кв. 9	кв. 19	кв. 29	кв. 39	кв. 49	кв. 59	кв. 69	кв. 79	кв. 89	кв. 99	кв. 109	кв. 119	кв. 129	
18,7С	17,6С	18,5С	14,4С	17,7С	14,1С	20,6С	14,1С	18,7С	17С	14,1С	19,9С	20,5С	
кв. 10	кв. 20	кв. 30	кв. 40	кв. 50	кв. 60	кв. 70	кв. 80	кв. 90	кв. 100	кв. 110	кв. 120	кв. 130	

Р и с. 1. Температура наружного воздуха -20°C, после оптимизации

Fig. 1. Outside air temperature -20°C, after optimization



19,9C	18,2C	15,3C	16,1C	19,8C	19,6C	19,3C	19,3C	17,5C	19,9C	19,5C	15,1C	17,7C	17,2C
кв. 1	кв. 11	кв. 21	кв. 31	кв. 41	кв. 51	кв. 61	кв. 71	кв. 81	кв. 91	кв. 101	кв. 111	кв. 121	кв. 131
16,6C	18,3C	15,2C	15,8C	14,4C	19,9C	20C	14,3C	14,1C	18,4C	14,1C	14C	14,1C	20,1C
кв. 2	кв. 12	кв. 22	кв. 32	кв. 42	кв. 52	кв. 62	кв. 72	кв. 82	кв. 92	кв. 102	кв. 112	кв. 122	кв. 132
19C	19,7C	15,7C	17,1C	18,1C	19,9C	15,7C	15,3C	19,9C	18,3C	14,9C	14,2C	14,1C	14,1C
кв. 3	кв. 13	кв. 23	кв. 33	кв. 43	кв. 53	кв. 63	кв. 73	кв. 83	кв. 93	кв. 103	кв. 113	кв. 123	кв. 1001
19,4C	17,4C	14,4C	14,1C	19,9C	18,7C	14,1C	19,7C	17,8C	18C	18,7C	15,8C	14,1C	
кв. 4	кв. 14	кв. 24	кв. 34	кв. 44	кв. 54	кв. 64	кв. 74	кв. 84	кв. 94	кв. 104	кв. 114	кв. 124	
14,1C	20C	19,9C	14,1C	18C	15,5C	14,1C	14,1C	16,1C	14,5C	15,9C	14,8C	14,1C	
кв. 5	кв. 15	кв. 25	кв. 35	кв. 45	кв. 55	кв. 65	кв. 75	кв. 85	кв. 95	кв. 105	кв. 115	кв. 125	
22,5C	14,1C	17,4C	14,1C	18,7C	19,9C	14,1C	15,1C	14,1C	16,8C	18C	14,1C	15,2C	
кв. 6	кв. 16	кв. 26	кв. 36	кв. 46	кв. 56	кв. 66	кв. 76	кв. 86	кв. 96	кв. 106	кв. 116	кв. 126	
15,5C	15,4C	15,9C	14,1C	17,6C	19,9C	14,1C	18,4C	14,5C	18,1C	16,7C	14,8C	16,6C	
кв. 7	кв. 17	кв. 27	кв. 37	кв. 47	кв. 57	кв. 67	кв. 77	кв. 87	кв. 97	кв. 107	кв. 117	кв. 127	
16,4C	17,4C	14,1C	14,1C	19,5C	14,1C	14,1C	19,3C	19,9C	16,3C	19,6C	14,9C	14,1C	
кв. 8	кв. 18	кв. 28	кв. 38	кв. 48	кв. 58	кв. 68	кв. 78	кв. 88	кв. 98	кв. 108	кв. 118	кв. 128	
14,1C	14,1C	15,1C	14,2C	19,6C	14,2C	16,2C	17,4C	15,7C	19,1C	14,1C	14,1C	19,4C	
кв. 9	кв. 19	кв. 29	кв. 39	кв. 49	кв. 59	кв. 69	кв. 79	кв. 89	кв. 99	кв. 109	кв. 119	кв. 129	
15C	15,7C	16,6C	14,1C	16,9C	15,8C	19,9C	14,1C	17,9C	16,4C	14,1C	19C	19,5C	
кв. 10	кв. 20	кв. 30	кв. 40	кв. 50	кв. 60	кв. 70	кв. 80	кв. 90	кв. 100	кв. 110	кв. 120	кв. 130	

Р и с. 2. Температура наружного воздуха -20 °С, открыли клапаны во всех «холодных» комнатах
Fig. 2. Outside air temperature -20 °C, valves were opened in all "cold" rooms

19,9C	19,9C	20,1C	20,6C	20,1C	21,2C	22,4C	22,1C	20,6C	22,9C	20,1C	20,1C	21C	22,2C
кв. 1	кв. 11	кв. 21	кв. 31	кв. 41	кв. 51	кв. 61	кв. 71	кв. 81	кв. 91	кв. 101	кв. 111	кв. 121	кв. 131
21,5C	20,5C	20,9C	22,4C	20,1C	25C	21,3C	22,4C	20,1C	23,1C	20,1C	20,3C	20,1C	20,2C
кв. 2	кв. 12	кв. 22	кв. 32	кв. 42	кв. 52	кв. 62	кв. 72	кв. 82	кв. 92	кв. 102	кв. 112	кв. 122	кв. 132
21,9C	22,7C	20C	20,3C	23,9C	22,5C	20,1C	20,1C	22,4C	21,6C	20,1C	20,1C	19,8C	15,8C
кв. 3	кв. 13	кв. 23	кв. 33	кв. 43	кв. 53	кв. 63	кв. 73	кв. 83	кв. 93	кв. 103	кв. 113	кв. 123	кв. 1001
20,9C	21,8C	20,1C	20,1C	25,8C	21,5C	18,7C	20,2C	21,8C	20C	20,1C	20,9C	20,2C	
кв. 4	кв. 14	кв. 24	кв. 34	кв. 44	кв. 54	кв. 64	кв. 74	кв. 84	кв. 94	кв. 104	кв. 114	кв. 124	
20,1C	24,8C	20,1C	20,1C	20,2C	20,4C	19,2C	17,9C	20,1C	20,1C	20,1C	20,8C	19,7C	
кв. 5	кв. 15	кв. 25	кв. 35	кв. 45	кв. 55	кв. 65	кв. 75	кв. 85	кв. 95	кв. 105	кв. 115	кв. 125	
26,8C	20C	20,1C	20,2C	21,1C	24,5C	20,2C	20C	20,1C	20C	20,1C	20C	21,1C	
кв. 6	кв. 16	кв. 26	кв. 36	кв. 46	кв. 56	кв. 66	кв. 76	кв. 86	кв. 96	кв. 106	кв. 116	кв. 126	
20,1C	20,1C	20,1C	20,1C	20,2C	23,2C	20,1C	21,5C	20,1C	20,1C	24,1C	20,5C	20,3C	
кв. 7	кв. 17	кв. 27	кв. 37	кв. 47	кв. 57	кв. 67	кв. 77	кв. 87	кв. 97	кв. 107	кв. 117	кв. 127	
20,3C	20,1C	20,2C	20,3C	21C	20,1C	20,2C	21,2C	20,3C	20,1C	20,8C	20,1C	16,7C	
кв. 8	кв. 18	кв. 28	кв. 38	кв. 48	кв. 58	кв. 68	кв. 78	кв. 88	кв. 98	кв. 108	кв. 118	кв. 128	
20,1C	20,2C	19,9C	21,4C	25,4C	20,1C	20C	20C	20,2C	23,4C	20,2C	19,7C	21,3C	
кв. 9	кв. 19	кв. 29	кв. 39	кв. 49	кв. 59	кв. 69	кв. 79	кв. 89	кв. 99	кв. 109	кв. 119	кв. 129	
20,1C	20,2C	20,3C	20,1C	21,1C	20,5C	20,2C	17C	20,3C	20,1C	19,3C	20C	20,1C	
кв. 10	кв. 20	кв. 30	кв. 40	кв. 50	кв. 60	кв. 70	кв. 80	кв. 90	кв. 100	кв. 110	кв. 120	кв. 130	

Р и с. 3. Карта распределения температур после оптимизации при температуре наружного воздуха -7°С
Fig. 3. Temperature distribution map after optimization at an outdoor temperature of -7 °C

Если мы посмотрим карту температур до того, как открыли клапаны (рис. 1) и после (рис. 2), то увидим, в холодных комнатах, где мы полностью открыли клапаны, температура не особо добавилась, а во многих других комнатах стало холоднее. Таким образом, прикрытие клапанов в холодных комнатах позволило повысить температуру в других комнатах.

Из таблицы 1 мы так же видим, что при некоторой температуре наружного воздуха мы получаем наилучшие значения оптимизации. Это объясняется тем, что значение расхода и температуры теплоносителя наилучшим образом соответствует именно данной температуре наружного воздуха. В нашем случае это температура наружного воздуха -7°С. Посмотрим карту распределения температур при оптимальном значении

гидравлических сопротивлений клапанов отопительных приборов (рис. 3).

Гидравлическое сопротивление в самых «теплых» комнатах, при этом, как правило, стоит на максимуме. Было выдвинуто предположение, что решить эту проблему можно увеличив гидравлическое сопротивление клапанов стояков, на которых находятся эти комнаты. Но тогда уменьшится температура в других комнатах на этих стояках. Значит гидравлическое сопротивление клапанов стояков и отопительных приборов нужно оптимизировать совместно. Такое решение действительно привело к тому, что глубина оптимизации улучшилась, значение целевой функции понизилось до 1.3744, против 1.6889. Карта температур после такой оптимизации представлена на рис. 4.



15,8С	18,8С	17,7С	20,3С	20,8С	21,4С	20,6С	20,3С	19,1С	19,8С	20,4С	18,6С	20,5С	20,8С
кв. 1	кв. 11	кв. 21	кв. 31	кв. 41	кв. 51	кв. 61	кв. 71	кв. 81	кв. 91	кв. 101	кв. 111	кв. 121	кв. 131
20,4С	20,4С	20,4С	21С	21,5С	20,2С	20,2С	21С	20,4С	19,8С	19,2С	20,4С	19,3С	19,9С
кв. 2	кв. 12	кв. 22	кв. 32	кв. 42	кв. 52	кв. 62	кв. 72	кв. 82	кв. 92	кв. 102	кв. 112	кв. 122	кв. 132
20,7С	21,8С	19,9С	20,8С	21С	20,9С	21,4С	20,5С	21,4С	21,3С	19,7С	20,7С	18,5С	19,7С
кв. 3	кв. 13	кв. 23	кв. 33	кв. 43	кв. 53	кв. 63	кв. 73	кв. 83	кв. 93	кв. 103	кв. 113	кв. 123	кв. 1001
23,5С	14,8С	20,4С	19,4С	20,6С	19,1С	18С	19,6С	19,9С	20С	19С	21,6С	19,1С	
кв. 4	кв. 14	кв. 24	кв. 34	кв. 44	кв. 54	кв. 64	кв. 74	кв. 84	кв. 94	кв. 104	кв. 114	кв. 124	
18,5С	20,7С	20,5С	20,3С	19,7С	18С	20,3С	17,1С	20,7С	19,7С	20,3С	20,8С	18,4С	
кв. 5	кв. 15	кв. 25	кв. 35	кв. 45	кв. 55	кв. 65	кв. 75	кв. 85	кв. 95	кв. 105	кв. 115	кв. 125	
22,4С	19,7С	18,9С	18,4С	20,8С	20,4С	18,3С	21С	19,3С	19,7С	19,9С	19,5С	20,7С	
кв. 6	кв. 16	кв. 26	кв. 36	кв. 46	кв. 56	кв. 66	кв. 76	кв. 86	кв. 96	кв. 106	кв. 116	кв. 126	
23,1С	20,2С	17,8С	19,3С	20,9С	20,7С	19,9С	20,6С	19,8С	21,2С	20,8С	20С	20,3С	
кв. 7	кв. 17	кв. 27	кв. 37	кв. 47	кв. 57	кв. 67	кв. 77	кв. 87	кв. 97	кв. 107	кв. 117	кв. 127	
18,4С	20,6С	20,4С	20,5С	18,2С	21С	19,3С	20С	20С	19С	19,9С	21,1С	16,8С	
кв. 8	кв. 18	кв. 28	кв. 38	кв. 48	кв. 58	кв. 68	кв. 78	кв. 88	кв. 98	кв. 108	кв. 118	кв. 128	
20С	21,2С	19,6С	21,2С	20,6С	19,7С	20С	23,3С	19,6С	21,1С	19С	19,4С	14,8С	
кв. 9	кв. 19	кв. 29	кв. 39	кв. 49	кв. 59	кв. 69	кв. 79	кв. 89	кв. 99	кв. 109	кв. 119	кв. 129	
20,5С	18,5С	20,4С	16,7С	20,4С	20,1С	20,3С	16,4С	21,1С	20,3С	18,8С	19,9С	21С	
кв. 10	кв. 20	кв. 30	кв. 40	кв. 50	кв. 60	кв. 70	кв. 80	кв. 90	кв. 100	кв. 110	кв. 120	кв. 130	

Р и с. 4. При совместной оптимизации клапанов стояков и отопительных приборов удалось устранить «горячие» комнаты, но появились «холодные»
Fig. 4. With joint optimization of riser valves and heating devices, it was possible to eliminate "hot" rooms, but "cold" ones appeared

15,8С	18,8С	17,7С	20,3С	20,8С	21,4С	20,6С	20,3С	19,1С	19,8С	20,4С	18,6С	20,5С	20,8С
кв. 1	кв. 11	кв. 21	кв. 31	кв. 41	кв. 51	кв. 61	кв. 71	кв. 81	кв. 91	кв. 101	кв. 111	кв. 121	кв. 131
20,4С	20,4С	20,4С	21С	21,5С	20,2С	20,2С	21С	20,4С	19,8С	19,2С	20,4С	19,3С	19,9С
кв. 2	кв. 12	кв. 22	кв. 32	кв. 42	кв. 52	кв. 62	кв. 72	кв. 82	кв. 92	кв. 102	кв. 112	кв. 122	кв. 132
20,7С	21,8С	19,9С	20,8С	21С	20,9С	21,4С	20,5С	21,4С	21,3С	19,7С	20,7С	18,5С	19,7С
кв. 3	кв. 13	кв. 23	кв. 33	кв. 43	кв. 53	кв. 63	кв. 73	кв. 83	кв. 93	кв. 103	кв. 113	кв. 123	кв. 1001
23,5С	14,8С	20,4С	19,4С	20,6С	19,1С	18С	19,6С	19,9С	20С	19С	21,6С	19,1С	
кв. 4	кв. 14	кв. 24	кв. 34	кв. 44	кв. 54	кв. 64	кв. 74	кв. 84	кв. 94	кв. 104	кв. 114	кв. 124	
18,5С	20,7С	20,5С	20,3С	19,7С	18С	20,3С	17,1С	20,7С	19,7С	20,3С	20,8С	18,4С	
кв. 5	кв. 15	кв. 25	кв. 35	кв. 45	кв. 55	кв. 65	кв. 75	кв. 85	кв. 95	кв. 105	кв. 115	кв. 125	
22,4С	19,7С	18,9С	18,4С	20,8С	20,4С	18,3С	21С	19,3С	19,7С	19,9С	19,5С	20,7С	
кв. 6	кв. 16	кв. 26	кв. 36	кв. 46	кв. 56	кв. 66	кв. 76	кв. 86	кв. 96	кв. 106	кв. 116	кв. 126	
23,1С	20,2С	17,8С	19,3С	20,9С	20,7С	19,9С	20,6С	19,8С	21,2С	20,8С	20С	20,3С	
кв. 7	кв. 17	кв. 27	кв. 37	кв. 47	кв. 57	кв. 67	кв. 77	кв. 87	кв. 97	кв. 107	кв. 117	кв. 127	
18,4С	20,6С	20,4С	20,5С	18,2С	21С	19,3С	20С	20С	19С	19,9С	21,1С	16,8С	
кв. 8	кв. 18	кв. 28	кв. 38	кв. 48	кв. 58	кв. 68	кв. 78	кв. 88	кв. 98	кв. 108	кв. 118	кв. 128	
20С	21,2С	19,6С	21,2С	20,6С	19,7С	20С	23,3С	19,6С	21,1С	19С	19,4С	14,8С	
кв. 9	кв. 19	кв. 29	кв. 39	кв. 49	кв. 59	кв. 69	кв. 79	кв. 89	кв. 99	кв. 109	кв. 119	кв. 129	
20,5С	18,5С	20,4С	16,7С	20,4С	20,1С	20,3С	16,4С	21,1С	20,3С	18,8С	19,9С	21С	
кв. 10	кв. 20	кв. 30	кв. 40	кв. 50	кв. 60	кв. 70	кв. 80	кв. 90	кв. 100	кв. 110	кв. 120	кв. 130	

Р и с. 5. Температурная карта оптимизации при температуре теплоносителя 63 °С
Fig. 5. Optimization temperature map at a coolant temperature of 63 °С

Теперь перейдем к исследованию зависимости оптимизации от температуры теплоносителя. Исследование проводилось при температуре наружного воздуха -5°С (средняя температура Ижевска во время отопительного сезона¹. Результаты представлены в таблице 2.

Здесь мы наблюдаем, что при снижении температуры теплоносителя улучшается значение целевой функции (до определенного предела), так как при данной температуре наружного воздуха и данным расходом температура теплоносителя в 68

°С является излишней. Наилучшего значения целевой функции мы достигаем при оптимизации, когда температура теплоносителя равна 63 °С. Температурная карта оптимизации с данными условиями приведена на рис. 5.

Следующая серия вычислительных экспериментов была проведена для температуре наружного воздуха -20 °С, расчеты проведены для различных значений расхода теплоносителя. Результаты представлены в таблице 3.

¹ Архив погоды в Ижевске (Удмуртия) [Электронный ресурс] // Погода в России и мире. 2020. URL: <https://global-weather.ru/archive/izhevsk> (дата обращения: 17.08.2020).



Таблица 2. Оптимизация при разной температуре теплоносителя и температуре наружного воздуха -5°C

Table 2. Optimization at different coolant temperature and outdoor air temperature -5°C

Темп. Теплоносителя, °С	Средняя температура, °С	Целевая функция, Па/(Кг/час) ²	Результаты		
			Кв №	Темп., °С	Сопр., Па/(Кг/час) ²
68	20.9	1.88	25	20.0	45.06
67	20.7	1.69	25	20.1	33.60
66	20.5	1.57	25	20.1	28.01
65	20.3	1.48	25	20.0	23.62
63	20.1	1.32	25	20.1	14.82
60	19.6	1.51	25	20.0	7.65
55	18.6	2.20	25	20.0	2.24
50	17.5	3.10	25	20.0	0.28
45	16.0	4.29	25	19.3	0
40	15.0	5.14	25	17.4	0

Таблица 3. Оптимизация при разном расходе теплоносителя

Table 3. Optimization for different coolant flow rates

Расход теплоносителя, т/час	Средняя температура, °С	Целевая функция, Па/(Кг/час) ²	Результаты		
			Кв №	Темп., °С	Сопр., Па/(Кг/час) ²
2	14.3	5.73	37		500
4	15.1	5.23	37	14.1	330.60
6	16.4	4.54	37	14.1	374.50
8	17.1	3,97	37	14,2	0
10	17.6	3,39	37	14,7	0
12	18.0	3,09	37	16	0
15	18.7	2,63	37	17,4	0
20	19.3	2,41	37	19,8	0
25	19.5	2,24	37	20,1	0,11

Предложения по улучшению алгоритма

Использовать готовые настройки гидравлических сопротивлений для конкретных домов при типовых условиях, которые были ранее получены путем использования алгоритмов оптимизации. В случае отклонения от типичных условий:

- вводить поправочные коэффициенты;
- использовать оптимизационные алгоритмы в которых начальными приближениями являются настройки для ближайших типовых условий.

Заключение

Результаты вычислительных экспериментов показали следующее:

1. При повышении температуры наружного воздуха для поддержания оптимального термогидравлического

режима в общем случае требуется увеличить гидравлическое сопротивление клапанов отопительных приборов. В отдельных частных случаях (например, при очень низких температурах) эта закономерность может не соблюдаться, что объясняется косвенным влиянием изменения гидравлического сопротивления в одной комнате на все помещения. В частности, закрытие клапанов в одних комнатах повышает температуру в других комнатах.

2. Наилучшей глубины оптимизации можно достичь в тех случаях, когда температура и расход теплоносителя адекватны температуре наружного воздуха.
3. В некоторых случаях (например, в случае если после оптимизации сохранились «горячие» комнаты) улучшить глубину оптимизации позволяет дополнительное регулирование клапанов отопительных стояков.
4. При снижении температуры теплоносителя для поддержания оптимального термогидравлического режима в общем случае требуется уменьшить гидравлическое сопротивление клапанов отопительных приборов. В отдельных частных случаях эта закономерность не соблюдается, что объясняется косвенным влиянием изменения гидравлического сопротивления в одной комнате на все помещения.
5. При увеличении расхода теплоносителя для поддержания оптимального термогидравлического режима в общем случае требуется увеличить гидравлическое сопротивление клапанов отопительных приборов. В отдельных частных случаях эта закономерность не соблюдается, что объясняется косвенным влиянием изменения гидравлического сопротивления в одной комнате на все помещения.
6. Были сделаны предположения для дальнейшего исследования алгоритмов оптимизации

Список использованных источников

- [1] Могиленко, А. В. Искусственный интеллект: методы, технологии, применение в энергетике. Аналитический обзор / А. В. Могиленко // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2019. — № 7(120). — С. 22-29. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38496806> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [2] Роженцова, Н. В. Тенденция развития искусственного интеллекта в энергетике / Н. В. Роженцова, М. В. Пятникова // Наука. Технология. Производство — 2019: Моделирование и автоматизация технологических процессов и производств, энергообеспечение промышленных предприятий. Материалы Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 100-летию образования Республики Башкортостан. — Уфа: Из-во УГНТУ, 2019. — С. 133-135. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42323244> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [3] Software and technical implementation of intelligent energy-saving control systems based on industrial controllers / D. Yu. Muromtsev [et al.]. — DOI 10.1088/1742-6596/1260/3/032027 // Journal of



- Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1260, issue 3. — Article 032027. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1260/3/032027> (дата обращения: 17.08.2020).
- [4] Манусов, В. З. Оптимизация распределения компенсирующих устройств в системах электроснабжения на основе роевого интеллекта / В. З. Манусов, П. В. Матренин, А. К. Киргизов. — DOI 10.18635/2071-2219-2017-3-28-32 // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2017. — № 3. — С. 28-32. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29328201> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [5] Amado, M. A Cellular Approach to Net-Zero Energy Cities / M. Amado, F. Poggi, A. R. Amado, S. Breu. — DOI 10.3390/en10111826 // Energies. — 2017. — Vol. 10, issue 11. — Article 1826. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1826> (дата обращения: 17.08.2020).
- [6] Zaharia, M. A Cluster Design on the Influence of Energy Taxation in Shaping the New EU-28 Economic Paradigm / M. Zaharia, A. Pătrașcu, M. R. Gogonea, A. Tănăsescu, C. Popescu. — DOI 10.3390/en10020257 // Energies. — 2017. — Vol. 10, issue 2. — Article 257. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/2/257> (дата обращения: 17.08.2020).
- [7] Efficient and equitable spatial allocation of renewable power plants at the country scale / M. Drechsler [et al.]. — DOI 10.1038/nenergy.2017.124 // Nature Energy. — 2017. — Vol. 2. — Article 17124. — URL: <https://www.nature.com/articles/nenergy2017124> (дата обращения: 17.08.2020).
- [8] The limits of bioenergy for mitigating global life-cycle greenhouse gas emissions from fossil fuels / M. D. Staples, R. Malina, S. R. H. Barrett. — DOI 10.1038/nenergy.2016.202 // Nature Energy. — 2017. — Vol. 2. — Article 16202. — URL: <https://www.nature.com/articles/nenergy2016202> (дата обращения: 17.08.2020).
- [9] Глушко, С. И. Применение алгоритма муравьиных колоний для решения задач оптимизации на графе / С. И. Глушко, В. В. Образцов, А. С. Кузавко // Приоритетные научные направления: от теории к практике. — 2012. — № 2. — С. 70-74. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20377914> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [10] Стенников, В. А. Применение алгоритма перебора деревьев и метода имитации отжига для схемно-структурной оптимизации тепловых сетей / В. А. Стенников, А. А. Чемезов. — DOI 10.15827/0236-235X.031.2.387-395 // Программные продукты и системы. — 2018. — Т. 31, № 2. — С. 387-395. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35560715> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [11] Захаров, А. А. Моделирование теплового режима и управление теплоснабжением помещений умного здания / А. А. Захаров, И. Г. Захарова, А. Р. Ромазанов, А. В. Широких. — DOI 10.21684/2411-7978-2018-4-2-105-119 // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. — 2018. — Т. 4, № 2. — С. 105-119. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35154194> (дата обращения: 17.08.2020).
- [12] Басалаев, А. А. Метод оптимизации температуры подаваемого теплоносителя в системе централизованного теплоснабжения зданий на основе имитационного моделирования / А. А. Басалаев, Д. А. Шнайдер. — DOI 10.14529/ctcr170102 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2017. — Т. 17, № 1. — С. 15-22. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28199414> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [13] Kong, C. A Hierarchical Optimization Model for a Network of Electric Vehicle Charging Stations / C. Kong, R. Jovanovic, I. S. Bayram, M. Devetsikiotis. — DOI 10.3390/en10050675 // Energies. — 2017. — Vol. 10, issue 5. — Article 675. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/675> (дата обращения: 17.08.2020).
- [14] Wang, D. A Kriging Model Based Optimization of Active Distribution Networks Considering Loss Reduction and Voltage Profile Improvement / D. Wang, Q. Hu, J. Tang, H. Jia, Y. Li, S. Gao, M. Fan. — DOI 10.3390/en10122162 // Energies. — 2017. — Vol. 10, issue 12. — Article 2162. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2162> (дата обращения: 17.08.2020).
- [15] Sacaan, R. Improving power system reliability through optimization via simulation / R. Sacaan, H. Rudnick, T. Lagos, F. Ordóñez, A. Navarro-Espinosa, R. Moreno. — DOI 10.1109/PTC.2017.7981193 // 2017 IEEE Manchester PowerTech. — Manchester, 2017. — Pp. 1-6. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7981193> (дата обращения: 17.08.2020).
- [16] Dolan, M. Distribution power flow management utilising an online Optimal Power Flow technique / M. Dolan, E. Davidson, I. Kockar, G. Ault, S. McArthur. — DOI 10.1109/PESGM.2012.6345287 // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. — San Diego, CA, USA, 2012. — Pp. 1-1. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6345287> (дата обращения: 17.08.2020).
- [17] Байбаков, С. А. Оптимизация тепловых сетей по затратам на транспортирование теплоносителя (оптимизация транспортирования тепла) / С. А. Байбаков, К. В. Филатов // Энергетик. — 2012. — № 12. — С. 26-33. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18367092> (дата обращения: 17.08.2020).
- [18] Новицкий, Н. Н. Исследование задач и методов многокритериальной оптимизации гидравлических режимов распределительных тепловых сетей / Н. Н. Новицкий, А. В. Луценко. — DOI 10.17212/1814-1196-2016-3-131-145 // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. — 2016. — № 3(64). — С. 131-145. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27178576> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [19] Сабденов, К. О. Оптимальное (энергоэффективное) теплоснабжение здания в системе центрального отопления / К. О. Сабденов, Т. М. Байтасов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2015. — Т. 326, № 8. — С. 53-60. — URL:



- <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25068679> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [20] Шуравин, А. П. Применение генетического алгоритма для оптимизации температурного режима помещений посредством регулирования балансировочных клапанов стояков / А. П. Шуравин, С. В. Вологдин. — DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-113-120 // Интеллектуальные системы в производстве. — 2018. — Т. 16, № 2. — С. 113-120. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35104130> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [21] Вологдин, С. В. Методы и алгоритмы повышения энергоэффективности многоуровневой системы централизованного теплоснабжения / С. В. Вологдин, Б. А. Якимович. — Ижевск: Изд-во ИжГТУ им М.Т. Калашникова, 2015. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25939508> (дата обращения: 17.08.2020).
- [22] Shuravin, A. P. Comparison of the characteristics of the genetic algorithm and the method of coordinates search for optimization of temperature modes indoor areas / A. P. Shuravin, S. V. Vologdin // CEUR Workshop Proceedings: Proceedings of the Data Science Session at the V International Conference on Information Technology and Nanotechnology (Samara, Russia, May 21-24, 2019); V. Fursov, Ye. Goshin, D. Kudryashov (ed.). — 2019. — Vol. 2416. — Pp. 260-270. — URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2416/paper34.pdf> (дата обращения: 17.08.2020).
- [23] Коляда, А. В. Исследование ландшафтов целевых функций при эволюционной оптимизации: дисс. ... канд. тех. наук. — Таганрог: ТРТУ, 2005.
- [24] Остроух, Е. Н. К вопросу эффективности методов и алгоритмов решения оптимизационных задач с учетом специфики целевой функции / Е. Н. Остроух, Ю. О. Чернышев, Л. Н. Евич, П. А. Панасенко. — DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-81-85 // Вестник Донского государственного технического университета. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 81-85. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38096803> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [25] Королев, С. А. Модификация алгоритма роя частиц на основе метода анализа иерархий / С. А. Королев, Д. В. Майков // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2019. — № 4. — С. 36-46. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41480287> (дата обращения: 17.08.2020). — Рез. англ.
- [26] Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. — М: Мир, 1978.

Поступила 17.08.2020; одобрена после рецензирования 23.10.2020; принята к публикации 17.11.2020.

Об авторах:

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

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Mogilenko A.V. *Iskusstvennyj intellekt: metody, tekhnologii, primeneniye v energetike. Analiticheskij obzor* [Artificial Intelligence: Methods, Technologies, Application in Energy. Analytical Review]. *Avtomatizatsiya i IT v jenergetike = Automation & IT in the Energy Industry*. 2019; (7):22-29. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38496806> (accessed 17.08.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
- [2] Rozhentsova N.V., Pyatnikova M.V. *Tendetsiya razvitiya iskusstvennogo intellekta v energetike* [Trends in the Development of Artificial Intelligence]. In: *Nauka. Tehnologiya. Proizvodstvo — 2019: Modelirovaniye i avtomatizatsiya tehnologicheskikh processov i proizvodstv, jenergoobespecheniye promyshlennyyh predpriyatij. Materialy Vserossiyskoj nauchno-metodicheskoy konferentsii, posvjashhennoj 100-letiju obrazovaniya Respubliki Bashkortostan* [Proceedings of the All-Russian scientific and methodological conference dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Republic of Bashkortostan]. USPTU Publ., Ufa; 2019. p. 133-135. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42323244> (accessed 17.08.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
- [3] Muromtsev D.Yu. et al. Software and technical implementation of intelligent energy-saving control systems based on industrial controllers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1260(3):032027. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/3/032027>
- [4] Manusov V.Z., Matrenin P.V., Kirgizov A.K. *Optimizatsiya raspredeleniya kompensiruyushchih ustrojstv v sistemah elektrosnabzheniya na osnove roevogo intellekta* [Swarm Optimization for Reactive Power Control in Electrical Grids]. *Jenergobezopasnost' i jenergosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*. 2017; (3):28-32. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2017-3-28-32>
- [5] 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: <https://doi.org/10.3390/en10111826>
- [6] Zaharia M., Pătrașcu A., Gogonea M.R., Tănăsescu A., 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: <https://doi.org/10.3390/en10020257>
- [7] Drechsler M. et al. Efficient and equitable spatial allocation of renewable power plants at the country scale. *Nature Energy*. 2017; 2(9):17124. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.124>



- [8] 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(2):16202. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.202>
- [9] Glushko S.I., Obraztsov V.V., Kuzavko A.S. *Primenenie algoritma murav'inyh kolonij dlya resheniya zadach optimizacii na grafe* [Application of the Ant Colony Algorithm for Solving Optimization Problems on a Graph]. *Prioritetnye nauchnye napravleniya: ot teorii k praktike* [Priority Research Areas: from Theory to Practice]. 2012; (2):70-74. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20377914> (accessed 17.08.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
- [10] Stennikov V.A., Chemezov A.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; 31(2):387-395. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.031.2.387-395>
- [11] Zakharov A.A., Zakharova I.G., Romazanov A.R., Shirokhix A.V. *Modelirovanie teplovogo rezhima i upravlenie teplosnabzheniem pomeshchenij umnogo zdaniya* [The Thermal Regime Simulation and the Heat Management of a Smart Building]. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, jenergetika* = Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy. 2018; 4(2):105-119. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2018-4-2-105-119>
- [12] Basalaev A.A., Shnayder D.A. *Metod optimizacii temperatury podavaemogo teplonositelya v sisteme centralizovannogo teplosnabzheniya zdaniy na osnove imitacionnogo modelirovaniya* [A Simulation-based Method for Supply Temperature Optimization in District Heating System]. *Vestnik Ūžno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya, Komp'uternye tehnologii, upravlenie, elektronika* = Bulletin of the South Ural State University. Series, Computer technologies, automatic control, radio electronics. 2017; 17(1):15-22. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.14529/ctcr170102>
- [13] 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: <https://doi.org/10.3390/en10050675>
- [14] 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: <https://doi.org/10.3390/en10122162>
- [15] Saccaan R., Rudnick H., Lagos T., Ordóñez F., Navarro-Espinosa A., Moreno R. Improving power system reliability through optimization via simulation. In: *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester; 2017. p. 1-6. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981193>
- [16] Dolan M., Davidson E., Kockar I., Ault G., McArthur S. Distribution power flow management utilising an online Optimal Power Flow technique. In: *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. San Diego, CA, USA; 2012. p. 1-1. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345287>
- [17] Baibakov S.A., Filatov K.V. *Optimizaciya teplovyh setej po zatratam na transportirovanie teplonositelya (optimizaciya transportirovaniya tepla)* [Optimization of Heating Networks for the Cost of Transporting the Coolant (Optimization of Heat Transportation)]. *Energetik*. 2012; (12):26-33. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18367092> (accessed 17.08.2020). (In Russ.)
- [18] Novitsky N.N., Lutsenko A.V. *Issledovanie zadach i metodov mnogokriterial'noj optimizacii gidravlicheskih rezhimov raspredelitel'nyh teplovyh setej* [Study of objectives and methods of multiobjective optimization of hydraulic modes of heat distribution systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university. 2016; (3):131-145. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.17212/1814-1196-2016-3-131-145>
- [19] Sabdenov K., Baitasov T. *Optimal'noe (energoeffektivnoe) teplosnabzhenie zdaniya v sisteme central'nogo otopleniya* [Optimal (energy efficient) heat supply to buildings in central heating system]. *Izvestiya Tomskogo Politeknicheskogo Universiteta* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2015; 326(8):53-60. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25068679> (accessed 17.08.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
- [20] Shuravin A.P., Vologdin S.V. *Primenenie geneticheskogo algoritma dlya optimizacii temperaturnogo rezhima pomeshchenij posredstvom regulirovaniya balansirovochnykh klapanov stoyakov* [Application of the genetic algorithm for optimizing the room temperature regime through balancing valves of risers]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* = Intelligent Systems in Manufacturing. 2018; 16(2):113-120. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.22213/2410-9304-2018-2-113-120>
- [21] Vologdin S.V., Jakimovich B.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. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25939508> (accessed 17.08.2020). (In Russ.)
- [22] 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*. 2019; 2416:260-270. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2416/paper34.pdf> (accessed 17.08.2020). (In Eng.)
- [23] Kolyada A.V. *Issledovanie landshaftov celevyh funkciy pri evolyucionnoj optimizacii: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Investigation of landscapes of target functions in evolutionary optimization: diss. ... Ph.D. (Engineering)]. Taganrog State Radio Engineering University, Taganrog; 2005. (In Russ.)
- [24] Ostroukh E.N., Chernyshev Yu.O., Evich L.N., Panasenko P.A. On efficiency of methods and algorithms for solving optimization problems considering objective function specifics. *Vestnik of Don State Technical University*. 2019; 19(1):81-85. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-81-85>
- [25] Korolev S.A., Maykov D.V. *Modifikacija algoritma roja chastic*



na osnove metoda analiza ierarhij [Modification of particle swarm algorithm based on hierarchy analysis method]. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies*. 2019; (4):36-46. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41480287> (accessed 17.08.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

- [26] Rabiner L.R., Gold B. *Theory and Application of Digital Signal Processing*. Prentice Hall, First Edition; 1975. (In Eng.)

*Submitted 17.08.2020; approved after reviewing 23.10.2020;
accepted for publication 17.11.2020.*

About the authors:

Alexander P. Shuravin, Postgraduate Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (4 Studencheskaya St., Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russian Federation), 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 (4 Studencheskaya St., Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russian Federation), Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3013-7759>, vologdin_sv@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

