



Расчёт теплового баланса здания таунхауса и подбор ИТП на основе экспериментально доступных параметров

Сложившийся в Российской Федерации научно-технический уровень диктует новые требования к составу энергетических систем и комплексов, как на стадии их проектирования, так и на стадии эксплуатации. Переход к шестому технологическому укладу означает в том числе скачкообразное развитие востребованных технических комплексов. Энергетические системы и их составляющие в новых технико-экономических условиях должны быть готовы к быстрому введению новых производственных мощностей.

Современные энергосистемы, помимо требований к надёжности и долговечности, должны обладать рядом свойств, касающихся гибкости, устойчивости, эффективности, способности быстро трансформироваться, обладать свойствами мобилизации на новом техническом, экологическом, интеллектуальном, информационном и коммуникативном уровне.

Для обеспечения ускоренной адаптации энергосистем и комплексов в новых режимах необходимо в том числе существенное повышение качества прогнозирования спроса на энергетические ресурсы для предприятий, организаций и учреждений, что зафиксировано в программе «Цифровая энергетика России». Разработка новых подходов к накоплению и обработке данных создают новые возмож-

ности для профилирования конечных потребителей, а также для экономии ресурсов в натуральном и финансовом выражении посредством персонализации и индивидуализации договоров поставки энергоресурсов на основе прогнозирования профиля энергопотребления.

Для обеспечения ускоренной адаптации энергосистем и комплексов к новым режимам необходимо существенное повышение качества прогнозирования спроса на энергетические ресурсы для предприятий, организаций и учреждений

Активное развитие научно-технического прогресса в XX–XXI веках стимулировало развитие множества новых методов обработки статистических данных. В зависимости от типа анализируемой статистической величины, дискретности и возможного множества её значений выбираются те или иные методы обработки и анализа. Превалирующие на сегодняшний день подходы к прогнозированию потребления топливно-энергетических ресурсов энергетическими системами и комплексами находятся на недостаточ-

Рецензия эксперта на статью получена 03.08.2022 [The expert review of the article received on August 3, 2022].

УДК 621.3. Научная специальность: 05.23.03.

Расчёт теплового баланса здания таунхауса и подбор ИТП на основании экспериментально доступных параметров

С. В. Гузов, к.т.н., доцент; Е. В. Крылова, к.т.н., доцент; М. А. Гавриленков, студент, [Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» \(НИУ «МЭИ»\)](#)

Современный уровень развития математического аппарата по обработке больших данных (big data) позволяет создавать и обучать нейросетевые модели зданий. Опираясь на свойство подобия становится возможным разработать универсальную нейросетевую модель для прогнозирования теплового баланса и каждой его составляющей. В статье приведён пример массива данных, доступных в условиях эксплуатации здания. Показано, что применение искусственного интеллекта при проектировании системы теплоснабжения таунхауса преждевременно.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, нормативно-техническая документация, проектирование, коттедж, тепловой баланс, теплопроводность, методика, микроклимат, тепловые потери.

UDC 621.3. The number of scientific specialty: 05.23.03.

Calculation of the heat balance of a townhouse building and selection of ITP based on experimentally available parameters

S. V. Guzhov, PhD, Associate Professor; E. V. Krylova, PhD, Associate Professor; M. A. Gavrilentkov, student, [National Research University "Moscow Power Engineering Institute" \(MPEI\)](#)

The modern level of development of the mathematical apparatus for big data processing allows you to create and train neural network models of buildings. Based on the similarity property, it becomes possible to develop a universal neural network model for predicting the thermal balance and each of its components. The article provides an example of an array of data available in the operating conditions of a building. It is shown that the use of artificial intelligence in the design of the heating system of a townhouse is premature.

Key words: artificial neural network, regulatory and technical documentation, design, cottage, heat balance, thermal conductivity, methodology, microclimate, heat losses.

но высоком уровне и обладают рядом недочётов. Безусловно, определяющую роль в выборе подходов к анализу статистических массивов данных оказывает тип поставленной проблемы. Задачи, связанные с прогнозным продлением статистического ряда или рядов значений исследуемых факторов, используют при решении достаточно обширную группу методов. Процедура формирования прогнозных функций потребления энергоресурсов энергетическими системами и комплексами, в силу своей специфики, может использовать только некоторую часть всего разнообразия существующих подходов. Дополнительными особенностями являются такие специфично прогнозируемые факторы, как наличие диапазона возможных значений, обозначение которого



доступно экспертным способом, а также возможность появления периодической или разовой шумовой составляющей.

Следует отметить, что существенным ограничивающим фактором при исследовании и прогнозировании поведения энергетических систем и комплексов является невозможность поставить контролируемый эксперимент. Особый вопрос состоит в определении механизма объединения различных методов с целью повышения точности и достоверности результатов прогнозирования.

Проведённый анализ подходов к прогнозированию теплового баланса здания показал его недостаточно высокий уровень для решения задач, поставленных в программе «Цифровая энергетика Российской Федерации». Существующие подходы и методы обладают рядом недостатков, индивидуальных для каждого отдельного метода. Дополнительными ограничениями в обработке данных являются недостаточность исходной информации,

её низкая достоверность, часто отсутствие информации для оценки точности. Многие статистические данные об энергопотреблении энергетическими комплексами и системами необходимо дополнительно обрабатывать с привлечением аналогов метода экспертных оценок, что снижает управляемость, повторяемость и снижает автоматизацию процесса. Для устранения недостатков методов необходимо использовать компенсирующие эти недостатки другие методы.



Компенсация недостаточности исходных данных посредством использования нескольких взаимно усиливающих подходов по обработке статистической информации показала хороший результат, что позволяет применять методологию формулирования спроса на энергетические ресурсы используя свойство подобия. Определение резервов развития может быть выполнено как индивидуально для объекта, так и на основе анализа статистических данных о группе аналогичных объектов. Индивидуальный подход требует существенных трудовых, временных, финансовых и экспертных затрат на обследование объекта, составление математических моделей его составляющих, формулирования сценарных прогнозов. Подход, основанный на подобии группы сходных объектов, позволяет относительно быстро определить преимущества и недостатки анализируемого объекта, выявить их причины и сразу перейти к математическому описанию именно тех участков, которые необходимо улучшить. Тем самым достигается существенная экономия финансовых и человеческих ресурсов.

Используемый подход по повышению эффективности прогнозирования энергопотребления зданиями является комбинированным, позволяющим использовать возможности искусственных нейронных сетей и многофакторного регрессионного анализа. Компенсация недостаточности исходных данных посредством использования нескольких взаимно усиливающих подходов по обработке статистической информации показали хороший результат, что позволяет получить методологию формулирования спроса на энергетические ресурсы энергетическими системами и комплексами различного масштаба используя свойство их подобия.

Сформулированный математический аппарат по составлению прогнозных теплового баланса позволяет решить несколько практических задач: возможность определения резервов экономии энергоресурсов, проверка вносимых оператором показаний приборов учёта на их корректность и анализ воздействия фактора времени на изменение характеристик энергопотребляющего оборудования.

Параметры распределения случайной величины $x(\tau)$ существенно зависят от момента времени наблюдения τ , поэтому значения $x(\tau_i)$ и $x(\tau_j)$ в два различных момента времени $\tau = \tau_i$ и $\tau = \tau_j$ взаимозависимы. Прогнозируемый на период $(\tau + 1)$ показатель, характеризующий протекающий во времени процесс, в общем случае может являться функцией от четырёх переменных: развитие процесса в прошлом периоде; исходная величина текущего развития в момент времени τ , независимая от развития в прошлом; компоненты процесса, независимые от развития в прошлом и исходной величины (эвристические компоненты); случайные величины (шум).

Сглаживание временных рядов производится посредством оценки детерминированной компоненты, параметры которой в большинстве случаев легко интерпретируются. Оценивается также вариация прогноза и коэффициент расхождения. Для нахождения тесноты линейной связи между отдельными элементами матрицы целесообразно определить линейные коэффициенты корреляции. При необходимости рекомендуется использовать метод наибольшего правдоподобия, оценки по Фишеру и Стьюденту. В отдельных случаях следует выполнять исключение тренда из временных рядов показателей и факторов, выявлять временной лаг влияния факторов на выходной показатель, проверять наличие мультиколлинеарности.

В качестве примера рассмотрим объединение детерминированного и стохастического расчётов теплового баланса здания таунхауса. Таунхаус является зданием, состоящим из двух однотипных домов с одинаковой планировкой. Дом площадью 500 м² расположен в Подмоскowie и представляет из себя двухэтажное здание с гаражом и цокольным этажом. Для расчёта используются актуальные климатические данные [1, 2]. Первый этаж включает в себя прихожую, гараж, санузел, гостевую спальню, кухню, гостиную, столовую, а также холл с лестницей. Второй этаж включает в себя две детских комнаты, кабинет, два санузла, гардероб, спальную комнату, телевизионный холл,

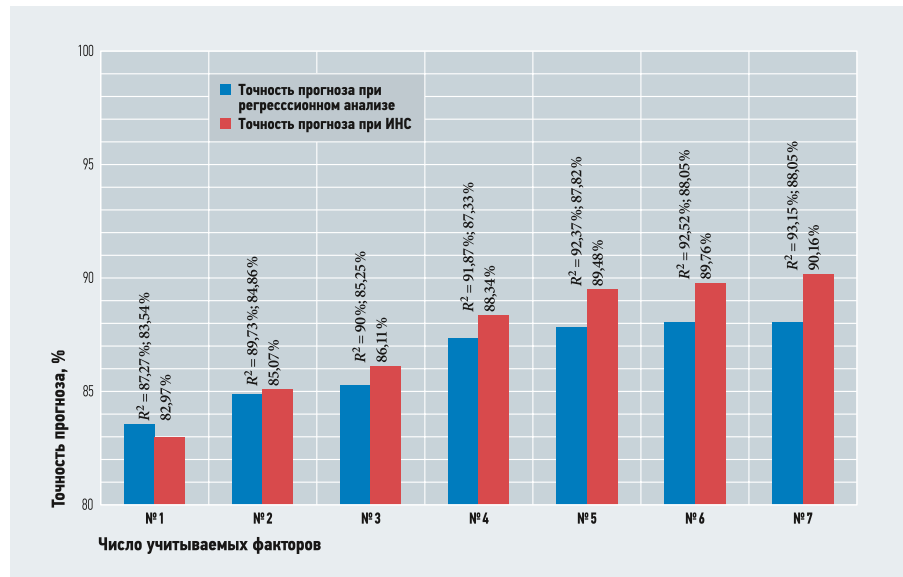


Рис. 1. Результаты расчёта прогнозной функции теплопотребления зданием таунхауса посредством многофакторного регрессионного анализа и искусственных нейронных сетей

а также холл с лестницей. Цокольный этаж включает в себя кладовую, холл, помещение для котельной.

Система отопления — водяная с индивидуальным тепловым пунктом (ИТП). Схема присоединения к тепловым сетям — независимая. Расчёт теплообменного аппарата выполняется по актуальной методике [3]. Необходимые для расчёта данные не всегда возможно получить по причинам отсутствия доступа к месту исследования, существенного локального физического износа оборудования, высокой стоимости исследования и пр.

Данные о здании, доступные для простого сбора и последующего анализа:

- материал стен — керамический красный плотный кирпич [0,78 Вт/(м·К)] [4] толщиной 0,25 м;
- пароизоляция [0,037 Вт/(м·К)] [5] толщиной 0,001 м;
- утеплитель — минеральная вата [0,44 Вт/(м·К)] [4];
- штукатурка (0,9 Вт/(м·К)] толщиной 0,005 м;
- материал внутренних стен — газобетон [0,011 Вт/(м·К)] толщиной 0,03 м;
- материал стен цокольного этажа — бетон на каменном щебне [0,9 Вт/(м·К)] [5] толщиной 0,4 м;
- пол цокольного этажа — плита железобетонная [1,11 Вт/(м·К)] толщиной 0,3 м; щебень шлаковый [0,16 Вт/(м·К)] толщиной 0,02 м; пенополистирол [0,032 Вт/(м·К)] толщиной 0,6 м; раствор цементно-песчаный [0,6 Вт/(м·К)] толщиной 0,04 м;
- материалы теплоизоляции кровли: пароизоляция [0,037 Вт/(м·К)] толщиной 0,01 м; штукатурка известковая [0,87 Вт/(м·К)] толщиной 0,01 м; минеральная вата [0,044 Вт/(м·К)] толщиной 0,18 м; бетонная черепица [1,1 Вт/(м·К)] толщиной 0,22 м.

Результаты расчёта прогнозной функции теплопотребления зданием посред-

ством многофакторного регрессионного анализа приведены на рис. 1. В качестве входных данных использованы факторы: среднемесячная температура уличного воздуха (№1); абсолютная влажность воздуха (№2); ежемесячное потребление электроэнергии (№3); ежемесячное число часов пребывания жильцов (№4); ежемесячное число часов работы электроводонагревателей (№5); среднемесячная температура воздуха внутри здания (№6); средние ежемесячные расчётные теплопотери через ограждающие конструкции (№7).

Точность прогноза не возрастает при включении в расчёт данных, полученных на основании детерминированного расчёта с использованием тех же данных

В расчётах использовалась нейронная сеть с линейной нормализацией входных и выходных данных, одним скрытым слоем из 15 нейронов, функции активации — сигмоидные.

Точность прогноза, выполненного с применением регрессионного анализа, возрастает с увеличением числа факторов. Но точность не возрастает при включении в расчёт данных, полученных на основании детерминированного расчёта с использованием тех же исходных данных: значение остаётся равно 88,05% для расчёта как по шести, так и по семи факторам, в состав которых входит фактор «средние ежемесячные расчётные теплопотери через ограждающие конструкции», полученный расчётным путём на основании первых шести факторов.

Это свидетельствует о коллинеарности и мультиколлинеарности [6] нескольких переменных.

Расчётное значение действительного сопротивления теплопередачи составляет $4,63 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, что удовлетворительно. На основании собранных данных возможно произвести покомнатный расчёт тепловых потерь. Для примера приведём расчёт помещения спальни комнаты. Данное помещение имеет размеры (д $\times$ г $\times$ в) $4,2 \times 3 \times 2,8 \text{ м}$, а площадь окна на северной стене составляет $1,96 \text{ м}^2$. Расчётные тепловые потоки: западная стена — $89,8 \text{ Вт}$, северная стена — $109,3 \text{ Вт}$, пол и окно — $192,8$ и $230,2 \text{ Вт}$. Затраты теплоты на нагрев поступающего воздуха — 381 Вт . Затраты теплоты на бытовые тепловыделения исходя из 10 Вт на 1 м^2 — 126 Вт . Общий тепловой поток для спальни равен 1429 Вт .

Произведя все расчёты, становится возможным определить общий тепловой поток для дома — $21,78 \text{ кВт}$. Аналогично определяется средняя нагрузка на ГВС: для летнего периода — $3,78 \text{ кВт}$, для зимнего — $4,55 \text{ кВт}$. Максимальная нагрузка на ГВС — $10,465 \text{ кВт}$. Суммарная тепловая нагрузка на дом — $26,3 \text{ кВт}$. Тогда суммарная тепловая нагрузка на таунхаус составит $52,674 \text{ кВт}$.

На основании полученных данных произведём выбор аппаратов на отопление. Исходные данные греющий теплоноситель: температура на входе — 120°C ; температура на выходе — 70°C . Нагреваемый теплоноситель: температура на входе — 45°C ; температура на выходе — 60°C .

На основании теплового расчёта расход греющего теплоносителя составил $0,199 \text{ кг/с}$ ($0,622 \text{ м}^3/\text{ч}$), нагреваемого теплоносителя — $0,693 \text{ кг/с}$ ($2,49 \text{ м}^3/\text{ч}$). Расчётное соотношение числа ходов теплоносителей в теплообменном аппарате — $1,1$. Примем оптимальную скорость движения воды $v_{\text{опт}} = 0,4 \text{ м/с}$; требуемое число каналов — 1575 ; общая площадь живого сечения каналов в пакете — $0,00173 \text{ м}^2$. Расчётные фактические скорости теплоносителей — $0,1$ и $0,4 \text{ м/с}$, соответственно. Требуемая поверхность нагрева — $0,415 \text{ м}^2$.

По каталогу теплообменного оборудования «Ридан» [7] выберем пластины для разборного теплообменника «Ридан» НН№04: поверхность теплообмена одной пластины — $f = 0,04 \text{ м}^2$. Расчётное общее число пластин составит $n = F/f = 0,415/0,04 = 12$ единиц.

Используя [конфигуратор пластинчатых теплообменников Danfoss](#) [8] подберём пластинчатый теплообменник. Результаты технического расчёта совпадают с результатами подбора теплообменников по [конфигуратору ПТО Danfoss](#).

Для подбора насосного оборудования ИТП необходимо определить напор. Скорость течения в трубах примем [9]



$v = 1 \text{ м/с}$. Расчётные потери давления для всех этажей составят $9,372 \times 10^4 \text{ Па}$. Тогда диаметр труб — $0,025 \text{ м}$.

Число Рейнольдса равно $8,62 \times 10^4$. Поскольку $40 d/k < Re < 500 d/k$, коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Альтшуля и составляет $0,0315$. Пример радиаторы четырёхсекционными с мощностью одной секции 200 Вт . Тогда расчётное число радиаторов на этаже — 28 единиц. Для радиатора коэффициент местного сопротивления — $\epsilon_{\text{рад}} = 5,6$ [9]. Полные потери давления по всей системе составят $6,67 \times 10^5 \text{ Па}$. Для компенсации выбираем [10] насос для системы отопления: CR 3-15 A-A-A-E-HQQ производителя [Grundfos](#).

Полученные результаты позволяют уверенно утверждать, что использование нейронной сети в процессе формирования прогнозного теплового баланса здания таунхауса позволяет повысить точность расчёта. В условиях недостаточности данных часть неизвестных данных позволяет определить корректно настроенная нейронная сеть. Тем не менее, многие технические характеристики инжене-

ру-проектировщику приходится брать по укрупнённым показателям. Таким образом, использование нейросетевых математических моделей позволяет повысить точность оперативных тепловых балансов: на час, на сутки и пр.

Проектирование системы поддержания искусственного микроклимата в здании производится как исходя из усреднённых климатических показателей, так и на основе наихудших сценариев, что указывается в техническом задании на проектирование. Использование нейросетевых математических моделей на этапе проектирования новой системы тепло- или холодоснабжения здания на современном уровне развития инженерных нейросетевых моделей не всегда является целесообразным. ●



1. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализ. ред. СНиП 23-02-2003 (с Изм. №1 и №2) / Дата введ.: 01.07.2013.
2. СП 131.13330.2018. Строительная климатология / Дата введ.: 26.05.2019.
3. Антышев И.А., Портнов В.Д., Сасин В.Я. Расчёт тепломассообменных аппаратов: учеб. пособие. — М.: Изд-во МЭИ, 2006. 32 с.
4. Thermalinfo.ru [Электр. текст]. Режим доступа: thermalinfo.ru. Дата обрац.: 10.06.2022.
5. ООО «АСГ ТрейдИнвест» [Электр. текст]. Режим доступа: asg54.ru. Дата обрац.: 15.06.2022.
6. Гужов С.В., Гапо Е.Г., Шепель В.А. Составление прогнозного топливно-энергетического баланса котельной в условиях недостаточности данных / Энергетические системы: Мат. IV Межд. науч.-техн. конф. (31.10–01.11.2019) / Отв. ред. П.А. Трубаев. — Белгород (Республика Беларусь): БГТУ, 2019. С. 33–39.
7. Каталог разборных пластинчатых теплообменников «Ридан». — М.: ГК «Новые технологии», 2021. 40 с.
8. Подбор пластинчатых теплообменников «Ридан»: расчётная программа «OPEN.Ридан» [Электр. текст]. Режим доступа: ridan.ru/selection-ptp. Дата обрац.: 17.06.2022.
9. Справочник коэффициентов местных сопротивлений [Электр. текст]. Режим доступа: minkot.ru. Дата обрац.: 18.06.2022.
10. Grundfos (ООО «Грундфос») [Электр. текст]. Режим доступа: grundfos.com/ru. Дата обрац.: 16.06.2022.

References — see page 78.

Calculation of the heat balance of a townhouse building and selection of ITP based on experimentally available parameters. Pp. 44–47.

Sergey V. Guzhov, PhD, Associate Professor; **Elena V. Krylova**, PhD, Associate Professor; **Maxim A. Gavrilentov**, student, [National Research University "Moscow Power Engineering Institute" \(MPEI\)](#)

1. *SP 50.13330.2012* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 50.13330.2012]. *Teplovaja zashhita zdaniy* [Thermal protection of buildings]. Aktualiz. red. SNiP 23-02-2003 (s Izm. №1 i №2) [Updated edition of Building Norms & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 23-02-2003 (with Amend. No. 1 and No. 2)]. The impl. date: July 1, 2013. [In Russian]
2. *SP 131.13330.2018* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 131.13330.2018]. *Stroitel'naja klimatologija* [Building climatology]. The impl. date: May 26, 2019. [In Russian]
3. I.A. Antyshev, V.D. Portnov, V.Ja. Sasin. *Raschet teplomassoobmennyykh apparatov: uchebnoe posobie po kursu "Teplomassoobmennyye apparaty" po napravleniju "Teplojenergetika"* [Calculation of heat and mass transfer devices: A textbook for the "Heat and mass transfer devices" training course in the "Heat power engineering" direction]. Moscow. *Izd-vo MJeI* [Publishing House of National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. 2006. 32 p. [In Russian]
4. Thermalinfo.ru. Web-source: thermalinfo.ru. Access date: June 10, 2022.
5. OOO "ASG TrejdInvest" ["ASG TradeInvest", LLC]. Web-source: asg54.ru. Access date: June 15, 2022. [In Russian]
6. S.V. Guzhov, E.G. Gasho, V.A. Shepel'. *Sostavlenie prognoznogo toplivno-jenergeticheskogo balansa kotel'noj v uslovijah nedostatochnosti dannyh* [Compilation of the predictive fuel and energy balance of a boiler house in conditions of insufficient data]. *Jenergeticheskie sistemy: Mat. IV Mezhd. nauch.-tehn. konf.* [Energy systems: Proc. of the IV International Scientific and Technical Conference]. October 31 — November 1, 2019. Edited by P.A. Trubaev. Belgorod (Republic of Belarus). BG TU [Belgorod State Technological University]. 2019. Pp. 33–39. [In Russian]
7. *Katalog razbornykh plastinchatykh teploobmennikov "Ridan"* ["Ridan" catalog of collapsible plate heat exchangers]. Moscow. GK "Novye tehnologii" ["New technologies" Group]. 2021. 40 p. [In Russian]
8. *Podbor plastinchatykh teploobmennikov "Ridan": raschetnaja programma "Open.Ridan"* [Selection of "Ridan" plate heat exchangers: "Open.Ridan" calculation program]. Web-source: open.danfoss.ru/selection-ptu. Access date: June 17, 2022. [In Russian]
9. *Spravochnik koeficientov mestnykh soprotivlenij* [Handbook of local resistance coefficients]. Access date: minkor.ru. Access date: June 18, 2022. [In Russian]
10. *Grundfos (OOO "Grundfos")* ["Grundfos", LLC]. Web-source: grundfos.com/ru. Access date: June 16, 2022. [In Russian]