# Нейронные сети: оптимальное управление отпуском тепловой энергии

***М. М. Бродач,*** **канд. техн. наук, профессор МАрхИ, ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН»**

***Н. В. Шилкин,*** **канд. техн. наук, профессор МАрхИ, ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН»**

*Окончание. Начало статьи читайте в «АВОК», № 8, 2019.*

**Ключевые слова:** нейронные сети, оптимальное управление отпуском тепловой энергии, самообучение

В настоящей статье рассматривается пример реализации контроллера управления отоплением с использованием искусственных нейронных сетей NEUROBAT, разработанного швейцарскими специалистами [3]. В первой части статьи приведена концепция управления на основе нейросетей, описаны блок-схема контроллера и алгоритм оптимального управления, направленный на оптимизацию теплового комфорта и энергопотребления в течение фиксированного временного интервала.

## Упрощенная версия контроллера

Была также разработана упрощенная и удешевленная версия контроллера – без датчиков интенсивности солнечной радиации и температуры воздуха в помещении. Упрощенная версия контроллера направлена на снижение затрат на ввод в эксплуатацию. Энергопотребление при использовании упрощенной версии выше по сравнению с полной версией (примерно на 11 %), но даже и в этом случае достигается экономия по сравнению со стандартными способами регулирования отопления.

В упрощенной версии показания недостающих датчиков определяются косвенными способами. Оценка интенсивности солнечной радиации осуществляется за счет анализа характера изменения температуры наружного воздуха. Вместо физических данных от датчика температуры воздуха в помещении используется расчетное значение, определенное с использованием математической модели здания на основе нейронной сети. Расчетная температура воздуха в помещении корректируется по данным измерений температуры обратного теплоносителя.

## Имитационные исследования и апробация модели на основе использования фактических данных

На этапе разработки проекта контроллера было проведено обширное имитационное исследование на платформе MATLAB. Была разработана имитационная программа, имитирующая тепловой режим офисного помещения в годовом цикле.

Имитационная программа представляет собой узловую сеть (nodal network) из 28 узлов, эквивалентную моделируемому офисному помещению, с дополнительными четырьмя узлами для системы отопления, а также с узлами для моделирования температуры соседних помещений и температуры наружного воздуха. Для моделирования использовались реальные измеренные данные с периодом выборки 10 минут (температура наружного воздуха и интенсивность солнечной радиации на горизонтально ориентированную поверхность). Программа моделирования предполагала возможность определения различных граничных случаев: положение жалюзи, искусственное освещение, внутренние теплопоступления и т.д.

- Для положения жалюзи α (α = 1 – полностью открыты; α = 0 – полностью закрыты) вычислена корреляция с интенсивностью солнечной радиации, падающей на поверхность окна (для $S < 100$ Вт/м$^2$ α = 1; для $S > 450$ Вт/м$^2$ α = 0,2; значения между граничными случаями получаются посредством линейной интерполяции). Эта корреляция была установлена на основе натурных испытаний в реальных офисных зданиях.
- Требования к искусственному освещению оценивались по уровню освещенности рабочего места пользователя, который определяется по соотношению уровня естественного дневного освещения и искусственного освещения. Уровень естественного дневного освещения оценивался посредством расчета КЕО, а искусственное освещение использовалось в дополнение к естественному освещению по мере необходимости.
- Для внутренних теплопоступлений использовались постоянные значение 100 Вт при занятом помещении, что приближенно соответствует тепловыделениям одного человека (без электроприборов, кроме искусственного освещения). Помещение считалось занятым в будни с 8:00 до 18:00 и незанятым – в остальное время.

Для оценки возможностей контроллера NEUROBAT он сравнивался с контроллерами отопления других типов: упрощенным контроллером «начального уровня» нижнего ценового сегмента и более продвинутым контроллером с расширенным функционалом (учет температуры воздуха в помещении, солнечной радиации, алгоритма пуска/останова; адаптация параметров управления; оптимальный алгоритм пуска/останова). Особенности контроллеров указаны в таблице.

**Самообучающийся контроллер управления отоплением NEUROBAT был разработан как совместный проект между CSEM (Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique – ведущая организация) и инжиниринговой компанией ESTIA Ltd, промышленным партнером SAUTER и LESO-PB (Solar Energy and Building Physics Laboratory, Швейцария).**

Расчеты показали, что применение контроллера отопления NEUROBAT обеспечивает снижение теплопотребления до 35 % по сравнению контроллером «начального уровня» и до 11 % по сравнению с контроллером с расширенным функционалом. Наиболее эффективно использование контроллера NEUROBAT в переходный период года (осень и весна), когда экономия энергии может быть очень значительна.

Результаты испытаний на реальном объекте подтвердили результаты имитационного моделирования – снижение теплопотребления составило 13 % по сравнению с контроллером с расширенным функционалом.

Суточный график тепловой мощности системы отопления для офисного помещения представлен на **рис. 2**. Использование алгоритмов самообучения на основе нейросетей позволяет рассчитать оптимальные периоды начала и окончания натопа на основе

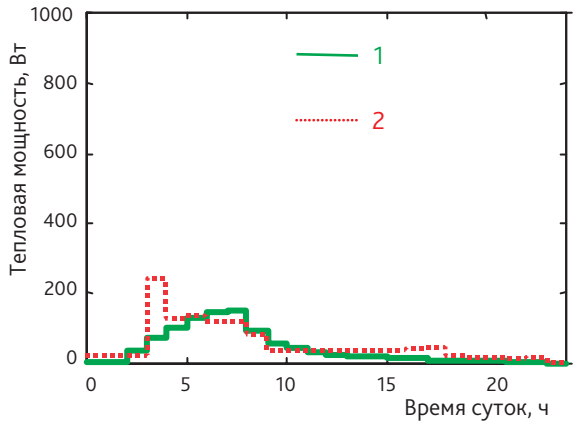


**Рис. 2. Тепловая мощность системы отопления для офисного помещения: 1 – контроллер NEUROBAT, 2 – контроллер с расширенным функционалом**

Сравнительные характеристики контроллеров отопления

| Тип контроллера | Используемые датчики | | | | | Алгоритм управления |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $T_{in}$ | $T_{out}$ | $T_{flow}$ | $T_{ret}$ | $T_{sol}$ | |
| Контроллер «начального уровня» | – | + | + | + | – | Общий алгоритм ПИД-регулирования[1]: заданное значение температуры подаваемого теплоносителя определяется температурным графиком |
| Контроллер с расширенным функционалом | + | + | + | + | + | Общий алгоритм ПИД-регулирования: заданное значение температуры подаваемого теплоносителя определяется температурным графиком; автоматическая адаптация параметров управления; оптимальный алгоритм пуска/останова |
| Контроллер NEUROBAT | + | + | + | + | + | Оптимальное предиктивное управление на основе нейросетевых самообучающихся алгоритмах |

В таблице используются следующие обозначения:
$T_{in}$ – температура воздуха в помещении; $T_{out}$ – наружная температура; $T_{flow}$ – температура подаваемого теплоносителя; $T_{ret}$ – температура обратного теплоносителя; $E_{sol}$ – интенсивность солнечной радиации на горизонтально ориентированную поверхность.

прогноза. Контроллер традиционного типа обеспечивает натоп непосредственно до начала рабочего дня, и это приводит к увеличению теплопотребления и появлению перетопов.

Следует отметить, что строгое решение задачи минимизации затрат энергии при натопе как задачи оптимального управления было получено Ю. А. Табунщиковым [6, 12] методом Л. С. Понтрягина и подтверждено экспериментально [13]. В результате было определено, что минимизация затрат энергии на разогрев помещения достигается в том случае, если время перехода от начальной температуры помещения до требуемой конечной температуры помещения минимально (прием «максимального быстродействия»). В этой связи чрезвычайно перспективной представляется разработка алгоритмов оптимального управления, которые, с одной стороны, обеспечивают предиктивное управление, а с другой – реализуют стратегию оптимального натопа, минимизирующую энергопотребление. Представляется, что в этом случае экономия энергии может быть весьма значительной.

## Аппаратная реализация

Аппаратная реализация контроллера требует использования относительно мощного процессора из-за большого объема вычислений. Предиктивная концепция и применение нейросетевых алгоритмов самообучения требуют использования энергонезависимой памяти для сохранения параметров модели в случае прерывания подачи электропитания.

Аппаратная платформа основана на коммерческом контроллере отопления с мощным, 16-разрядным процессором. Для алгоритма управления требуется 128 Кбайт ПЗУ и 512 Кбайт ОЗУ. Для хранения параметров моделей нейронной сети используется модуль энергонезависимой памяти EEPROM[2] объемом 64 Кбайт.

Пользовательские параметры, такие как заданное значение температуры в помещении, а также сервисные параметры (широта, долгота, ориентация здания и максимальная мощность системы отопления), могут быть определены через интерфейс пользователя. Параметры управления и измеренные сигналы от датчиков могут быть загружены на ПК.

## Заключение

В соответствии с результатами имитационного моделирования и испытаниями на реальных объектах было показано, что при использовании нейросетевых алгоритмов самообучения можно

[1] Пропорционально-интегрально-дифференцирующее (ПИД) регулирование – формирование управляющего сигнала, являющегося суммой трех слагаемых, первое из которых пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе – интеграл сигнала рассогласования, третье – производная сигнала рассогласования.

[2] EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) – электрически стираемое перепрограммируемое ПЗУ. Развитием этой технологии является флеш-память NOR и NAND. – *Ред.*

обеспечить, по крайней мере, 10–15 %-ное снижение теплопотребления даже по сравнению с самыми совершенными контроллерами отопления традиционного типа. Одновременно оптимизируется тепловой комфорт для пользователя. Кроме того, применение нейросетевых алгоритмов самообучения позволяет упростить как ввод в эксплуатацию, так и саму эксплуатацию контроллера.

### Литература


1. Бродач М. М., Шилкин Н. В. Нейросети: возможности использования алгоритмов самообучения в системах управления теплоэнергопотреблением зданий // АВОК. – 2019. – № 4. – С. 40–44.
2. Бродач М. М., Шилкин Н. В. Оптимизация управления отпуском тепловой энергии с использованием искусственных нейросетей // АВОК. – 2019. – № 5. – С. 38–41.
3. Krauss J., Bauer M., Bichsel J., Morel N. Energy and HVAC: NEUROBAT – a Self-Commissioned Heating Control System Using Neural Networks / In book: Sensors in Intelligent Buildings. – Vol. 2. – P. 63–83.
4. Olesen B. W. Критерии теплового комфорта при проектировании систем отопления // АВОК. – 2009. – № 5.
5. ГОСТ Р ИСО 7730–2009 «Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта».
6. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002.
7. Lute P., van Paassen D. Optimal Indoor Temperature Control Using a Predictor, IEEE Control Systems. 1995. P. 4–9.
8. Rosset M. M. Gestion thermique optimale d'un batiment // PhD Thesis Universite de Paris-Sud. Centre d'Orsay (France), 1986.
9. Parent P. Optimal Control Theory Applied to Dwelling Heating Systems, IRCOSE, Agence francaise pour la maotrise de l'énergie. Paris, 1987.
10. Nygard A. M. Predictive Thermal Control of Building Systems, PhD Thesis No 876. EPFL. Lausanne, 1990.
11. Fanger P. O. Thermal Comfort, Krieger Malabor. 1981.
12. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Минимизация расхода энергии, затрачиваемой на натоп помещения // Строительство и архитектура. – 1988. – № 12.
13. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Экспериментальные исследования оптимального управления расходом энергии // АВОК. – 2006. – № 1.

Коллектив НИИСФ РААСН, коллектив НП «АВОК» и редакция журнала «АВОК» поздравляют

*Нину Павловну УМНЯКОВУ*

с юбилеем и желают ей творческой активности, вдохновения, здоровья, счастья и благополучия!

Творческих и научных достижений и великих свершений!