

# 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»*

---

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

В работах [1] и [2] были рассмотрены возможности использования алгоритмов самообучения на основе искусственных нейронных сетей в системах управления теплоэнергопотреблением зданий. Показано, что использование нейросетевых алгоритмов позволяет обеспечить не просто управление, но и реализовать стратегию оптимального предиктивного (прогнозного) управления отпуском тепловой энергии на основе нелинейного моделирования теплового режима здания с учетом поведения пользователей и прогноза изменения климатических (погодных) условий, что, в свою очередь, позволяет обеспечить минимизацию энергопотребления при одновременном обеспечении высокого уровня комфорта.

В настоящей статье рассматривается пример реализации контроллера управления отоплением с использованием искусственных нейронных сетей NEUROBAT, разработанного швейцарскими специалистами [3].

## Концепция управления на основе нейросетей

В отличие от традиционных коммерческих систем управления отпуском тепловой энергии, концепция управления на основе нейросетей основана на оптимизационных самообучающихся алгоритмах – минимизации затрат в течение фиксированного временного горизонта. Система управления отоплением обеспечивает оптимальные комфортные условия при минимизации потребления энергии с помощью алгоритма динамического программирования<sup>1</sup>.

Еще одним преимуществом использования искусственных нейронных сетей является их способность решать задачи с избыточными параметрами: нейросетевые алгоритмы позволяют игнорировать избыточные данные, которые имеют минимальное значение и оказывают минимальное возмущающее воздействие.

Важным преимуществом является то обстоятельство, что за счет использования самообучающихся нейросетевых алгоритмов значительно сокращается время ввода контроллера в эксплуатацию.

## Входные параметры

Контроллер NEUROBAT предназначен для управления системой отопления, в котором для оптимального управления теплоснабжением реализуются предиктивные (прогнозирующие) и адаптивные алгоритмы.

Как и контроллеры традиционного типа, контроллер NEUROBAT сопряжен с четырьмя датчиками температуры. Контролируются следующие значения:

- температура теплоносителя в подающей магистрали;
- температура теплоносителя в обратной магистрали;
- температура в обслуживаемом помещении (внутренняя температура);
- наружная температура.

Кроме того, используется расходомер. Измерение расхода и температуры теплоносителя позволяют оценить количество тепловой энергии, передаваемой зданию от отопительного контура.

Отдельные датчики используются для оценки интенсивности солнечной радиации. В контроллере используются предиктивные алгоритмы, позволяющие

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

прогнозировать изменение интенсивности солнечной радиации.

## Блок-схема контроллера

Необходимость использования самообучающихся нейросетевых алгоритмов обусловлена в том числе и сложностью задачи математического моделирования теплового режима здания с достаточной степенью точности при минимальном использовании вычислительных ресурсов и максимальном быстродействии.

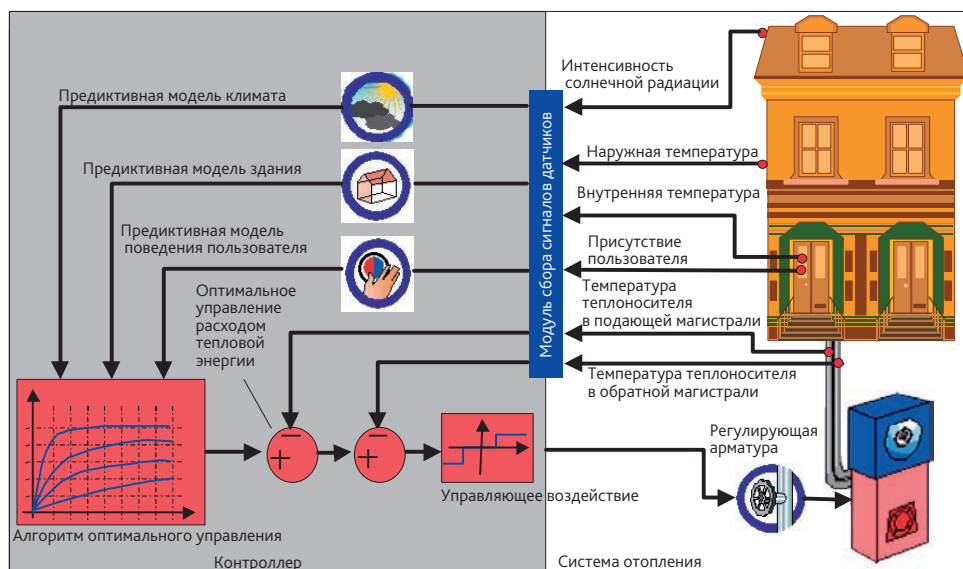
На рис. 1 показана блок-схема контроллера, реализующего предиктивное оптимальное управление на основе использования самообучающихся нейросетевых алгоритмов.

Контроллер содержит внешний контур управления, рассчитывающий оптимальную потребляемую мощность отопления для следующего временного шага, и каскадный внутренний контур управления, функцией которого является стабилизация температуры потока в отопительном контуре.

Контроллер имеет модульную структуру. Различные модули контроллера реализуют следующие функции:

- модуль, описывающий здание. Модуль моделирует тепловой режим здания. Используя прогноз изменения характеристик наружного климата (температура наружного воздуха и солнечной радиации), данные о текущем тепловом режиме здания, текущей мощности системы отопления, прогнозируется характер изменения теплового режима на определенном фиксированном временном интервале;
- климатический модуль. Посредством непрерывного измерения температуры наружного воздуха и интенсивности солнечной радиации климатический модуль прогнозирует изменение

<sup>1</sup> Динамическое программирование – способ решения сложной задачи посредством ее разбиения на некоторое количество более простых подзадач. Количество вычислений в этом случае можно существенно сократить.



■ Рис. 1. Блок-схема контроллера NEUROBAT

температуры наружного воздуха и интенсивности солнечной радиации на определенном фиксированном временном интервале;

- модуль поведения пользователя. В данном модуле определяется режим использования (занятость) помещения, т.е. расписание использования помещения, а также целевая функция – требуемая температура воздуха в помещении;
- модуль оптимального управления. Реализует алгоритм динамического программирования, оптимизируя «функцию затрат» («cost function») на поддержание комфортных условий для пользователя при минимальных затратах энергии в определенном фиксированном временном интервале. Комфорт пользователя количественно оценивается посредством индекса комфортности PMV (Predicted Mean Vote – прогнозируемая средняя оценка)<sup>1</sup> в соответствии со стандартом ISO 27730<sup>2</sup>;
- модуль управляющего воздействия. Обеспечивает интерфейс алгоритма оптимального управления и системы климатизации. Осуществляется управление смесительным клапаном. Выходной сигнал контроллера – требуемая оптимальная мощность отопления. Определяется как температура теплоносителя в подающей магистрали с учетом температуры в обратной магистрали отопительного контура.

Инновационный характер концепции оптимального предиктивного управления на основе использования самообучающихся нейросетевых алгоритмов не только обеспечивает оптимизацию эксплуатационных затрат, но и позволяет снизить затраты и трудоемкость ввода в эксплуатацию. При вводе контроллера в эксплуатацию требуется ввод (инициализация) ограниченного набора сервисных параметров. Необходимое воздействие пользователя ограничивается определением желаемого значения температуры в помещении и графика использования помещения. Функции самообучения алгоритма управления не требуют дополнительного определения или адаптации параметров при запуске в эксплуатацию или в качестве мер технического обслуживания. Контроллер адаптирует и оптимизирует параметры модели здания и модели климата посредством процедур самообучения на основе непрерывного измерения требуемых параметров непосредственно во время работы.

Даже в случае неоптимальной настройки внутренних параметров контроллера при его вводе в эксплуатацию они будут скорректированы за счет самообучения непосредственно во время работы. Испытания на реальных объектах и обширные имитационные исследования показали, что оптимальная работа контроллера отопления может быть достигнута в трехнедельный интервал. При этом в данном интервале характеристики контроллера отопления

<sup>1</sup> Подробнее см. статью Olesen B. W. «Критерии теплового комфорта при проектировании систем отопления» [4].

<sup>2</sup> Отечественная версия этого документа – ГОСТ Р ISO 7730–2009 [5].

сравнимы с характеристиками обычного коммерческого контроллера отопления.

## Алгоритм оптимального управления

Алгоритм оптимального управления направлен на оптимизацию теплового комфорта и энергопотребления в течение фиксированного временного интервала (для рассматриваемого контроллера временной интервал составляет 6 часов). Оптимизация осуществляется за счет минимизации «функции затрат» с учетом обоих параметров – энергопотребления и теплового комфорта.

Методика использования оптимального управления для управления отоплением зданий впервые в мире была разработана Ю. А. Табунщиковым и описана в [6]. Среди зарубежных авторов отмечаются работы [7–10].

Модуль оптимального управления в качестве входных параметров получает прогнозы от модулей, описывающих здание и наружный климат. Эти прогнозные данные используются для выработки оптимальной последовательности команд управления отоплением в течение последующих 6 часов.

На каждом временном шаге  $k$  ( $\Delta k = 15$  мин) в модуле оптимального управления обрабатываются следующие входные сигналы:

- текущее значение температуры воздуха в помещении  $T_{in}(k)$ ;
- предыдущее значение температуры воздуха в помещении  $T_{in}(k-1)$ ;
- прогноз (профиль) теплоступлений с солнечной радиацией через светопрозрачные ограждающие конструкции в течение фиксированного временного интервала (6 часов)  $G_{sol}(n+1) \dots G_{sol}(n+6)$ ;
- прогноз (профиль) температуры наружного воздуха в течение фиксированного временного интервала (6 часов), усредненный за последние 24 часа  $T_{out}(n+1) \dots T_{out}(n+6)$ .

На каждом следующем временном шаге  $k$  оптимальным управляющим воздействием (в данном случае – мощность натопа)  $P_{heat}$  является команда, которая минимизирует «функцию стоимости»  $J$ . Математическое выражение «функции стоимости», используемой для алгоритма оптимального управления, представлено следующим образом:

$$J(P_{heat}, T_{in}, T_{setpoint}) = C_{P_{heat}} P_{heat} + C_{comf} (\exp(PMV(T_{in}, T_{setpoint})^2) - 1),$$

где  $P_{heat}$  – оптимальное управляющее воздействие – мощность натопа, Вт;

## Поставки

Мицубиси Электрик (РУС) осуществляет поставку на следующих условиях:

- самовывоз из Италии,
- со склада в Москве,
- доставка до клиента в любом городе России.

## Контакты

ООО «Мицубиси Электрик (РУС)»

Москва, ул. Летниковская, д. 2, стр. 1

[aircon@mer.mee.com](mailto:aircon@mer.mee.com)

Москва: +7 (495) 721-31-64

Санкт-Петербург: +7 (812) 633-34-93

Екатеринбург: +7 (343) 379-90-49

Уфа: +7 (347) 246-10-47

Краснодар: +7 (926) 369-16-55

Новосибирск: +7 (913) 011-74-13

Казань: +7 (917) 221-25-44



JAPAN

Реклама

 **CLIMVENETA**  
SUSTAINABLE COMFORT

A Group Company of

 **MITSUBISHI ELECTRIC**

[aircon@mer.mee.com](mailto:aircon@mer.mee.com)

PMV ( $T_{in}$ ,  $T_{setpoint}$ ) – индекс комфортности по Фангеру, прогнозируемая (ожидаемая) средняя оценка степени теплового комфорта;

$T_{in}$  – температура воздуха в помещении, °С;

$T_{setpoint}$  – заданная температура воздуха в помещении (уставка), °С;

$C_{P_{heat}}$  – весовой коэффициент для показателя мощности тепловой энергии;

$C_{comf}$  – весовой коэффициент для индекса комфортности.

Два показателя в правой части выражения функции стоимости соответствуют потреблению тепловой энергии и тепловому комфорту, который испытывает «средний пользователь». Тепловой комфорт выражается отклонением от оптимального значения прогнозируемой средней оценки PMV по Фангеру [11] по семибалльной шкале, по которой индекс PMV принимает значение от –3 (ощущение человека – холодно) до +3 (жарко). Значение PMV = 0 соответствует нейтральному ощущению – оптимальному тепловому комфортному состоянию человека.


Для учета присутствия пользователя коэффициент  $C_{comf}$  устанавливается равным 1, когда пользователь присутствует в помещении, и равным 0, когда пользователь отсутствует. В последнем случае нет необходимости обеспечивать тепловой комфорт, и единственные затраты на оптимизацию – это потребление энергии.

Расчет оптимальной мощности нагрева  $P_{heat}$  осуществляется в соответствии с алгоритмом динамического программирования. Этот метод позволяет найти глобальный минимум функции стоимости, но требует большой вычислительной мощности. Поэтому необходимо найти баланс между подробной дискретизацией переменных, описывающих температуру воздуха в помещении  $T_{in}$  и мощность натопа  $P_{heat}$ , и техническими ограничениями машинных вычислений (вычислительной мощности), которые не позволяют пересчитать оптимальное управляющее воздействие на каждом временном шаге.

## Применяемые датчики

Контроллер отопления NEUROBAT использует: датчик температуры наружного воздуха, датчики температуры подаваемого и обратного теплоносителя, датчик температуры воздуха в помещении и датчик интенсивности солнечной радиации.

Датчики температуры, применяемые в контроллере NEUROBAT, – никелевые термометры сопротивления стандартного типа.

Интенсивность солнечной радиации определяется посредством двух измерений температуры: один датчик температуры подвергается воздействию солнечной радиации, а другой защищен от солнца. Разность показаний пропорциональна интенсивности солнечной радиации. 

## 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. М., 2009.
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 bati-ment // 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'nergie. 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, Kriegerjo 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.

Окончание статьи читайте  
в следующем номере.