

УДК [004.852:681.518]:697

**КОНЦЕПЦИЯ СУПЕРВИЗОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТОПЛЕНИЕМ
В КОММЕРЧЕСКИХ ЗДАНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ***

Тюков Антон Павлович, аспирант

Камаев Валерий Анатольевич, доктор технических наук

Щербаков Максим Владимирович, кандидат технических наук

Волгоградский государственный технический университет

400131, Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28

E-mail: anton.tyukov@gmail.com, kamaev@cad.vstu.ru, maxim.shcherbakov@gmail.com

В статье предложена новая концепция супервизорного управления системами климат-контроля (HVAC-системами) в крупных коммерческих зданиях на основе прогнозирующих моделей. Предложенная концепция управления сокращает потребление газа, используемого для отопления помещения, при сохранении допустимого диапазона требуемой температуры. Авторы прогнозируют изменение температуры внутри помещения и энергопотребление HVAC-системы при помощи моделей линейной регрессии, включающих упреждающие значения параметров погоды. Исследования были проведены на основе данных, основанных на реальных 15-минутных измерениях температуры внутри и снаружи помещения, потребления газа в системе отопления, данных с ближайшей метеорологической станции, целевой температуры, определяемой календарем работы здания. Стратегия управления формируется методом управления с прогнозирующими моделями. Разработанная стратегия управления применяется к системе климат-контроля через программно-аппаратный комплекс, состоящий из клиента, подключаемого к системе, и сервера, прогнозирующего изменения температуры внутри помещения, потребления газа и формирующего стратегию управления. Испытания, в рамках которых реализовывалась предложенная концепция, были произведены в коммерческом здании в г. Ейндховен (Голландия). Показана эффективность предложенной концепции по сравнению с алгоритмом управления, встроенного в HVAC-систему.

Ключевые слова: супервизорное управление, система климат-контроля, HVAC, управление с прогнозирующими моделями, линейная регрессия, прогнозирование потребления газа, прогнозирование температуры внутри помещения, прогноз погоды, интеллектуальный анализ данных, энергоэффективность.

**CONCEPT OF SUPERVISOR HEATING CONTROL
IN COMMERCIAL BUILDINGS USING PREDICTIVE MODELS**

Tyukov Anton P., post-graduate student

Kamaev Valery A., D.Sc. (Engineering)

Shcherbakov Maxim V., Ph.D. (Engineering)

Volgograd State Technical University

28 Lenin av., Volgograd, 400131, Russia

E-mail anton.tyukov@gmail.com, kamaev@cad.vstu.ru, maxim.shcherbakov@gmail.com

* РФФИ (грант № 10-07-97008-р_поволжье_a).

The paper proposes a new concept of supervisor control of climate-control system (HVAC-systems) in large commercial buildings on the basis of predictive models. The proposed control concept reduces the consumption of gas used for heating, while maintaining the required temperature of range. The authors predict changes in internal building temperature and power consumption of HVAC-system using linear regression models, including weather forecast. The studies were carried out on the basis of real fifteen minute temperature measurements inside and outside of building, measurements of gas consumption in heating system and data from the nearest meteorological station. Target temperature is defined by occupancy calendar of the building. Control strategy is formed by predictive model control. The strategy is applied to climate-control system through the hardware-software complex consisting of client connected to HVAC-system and a server, which predicts changes of internal temperature and gas consumption and forms control strategy. The experiments were carried out in commercial building in the city of Eindhoven (the Netherlands). The effectiveness of the proposed concept as compared to the control algorithm built into the HVAC-system is shown.

Keywords: *Supervisor control, Climate-control system, HVAC, Predictive model control, Linear regression, Gas consumption forecast, Internal temperature forecast, Weather forecast, Intellectual data analysis, Energy efficiency.*

Введение

По данным разных научных исследований, 30–50 % мирового потребления электроэнергии используется в крупных зданиях. При этом 40–60 % энергопотребления каждого крупного здания используется в системе климат-контроля (HVAC-системами) для поддержания комфорта в помещении. В статье освещается вопрос снижения энергопотребления HVAC-систем на 15–20 % с помощью применения более эффективных методов управления [4, 7].

В связи с тем, что эффективность работы HVAC-системы невозможно повысить, основываясь только на исторических данных [5], в работе используется алгоритм управления с прогнозирующими моделями, включающими прогноз температуры окружающей среды и календарь работы здания.

ОПИСАНИЕ КОНЦЕПЦИИ СУПЕРВИЗОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

1.1. Архитектура системы управления hvac-системой

Блок управления HVAC-системой управляет печами, котлами и вентиляцией для поддержания заданного допустимого диапазона температур в каждом помещении, обслуживаемом системой.

К блоку управления HVAC-системы подключается клиент, получающий данные с датчиков HVAC-системы. Данные, полученные клиентом с блока управления HVAC, отправляются на сервер для формирования управляющих воздействий на следующие 24 часа.

Алгоритм управления HVAC-системой реализуется в четыре шага:

- 1) сбор данных;
- 2) моделирование процессов в помещении;
- 3) формирование управляющих воздействий;
- 4) применение алгоритма управления.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

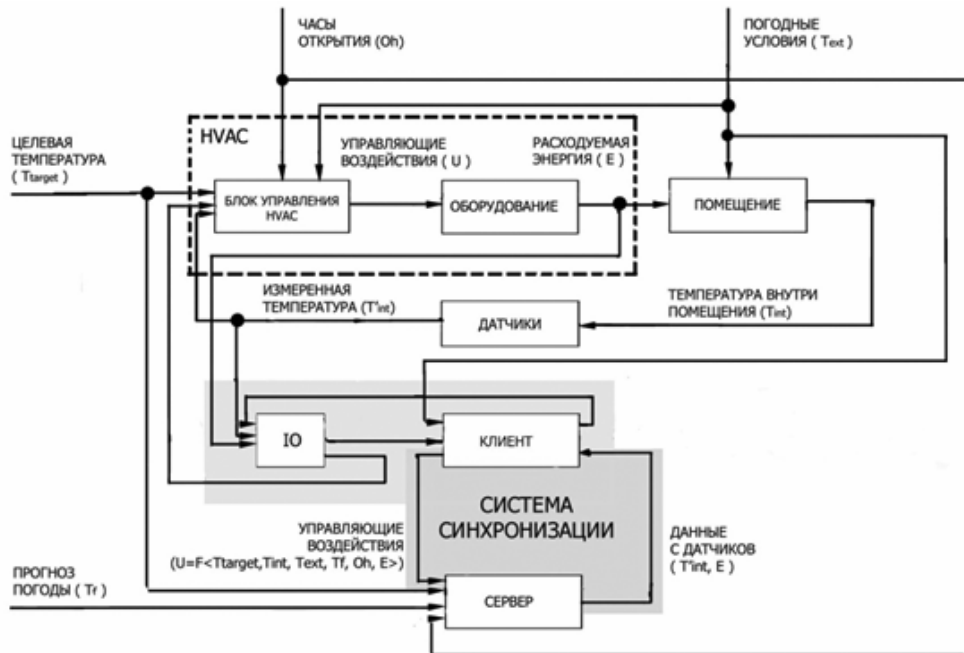


Рис. Функциональная схема управления HVAC-системой

1.2. Сбор данных

Сервер собирает и подготавливает данные, используемые для моделирования процессов в помещении. Переменные моделей можно отнести к трем видам: целевые, управляемые и внешние возмущения. В качестве целевой переменной используется заданная температура внутри помещения x_{tar} (определяется календарем работы здания и температурой комфорта в часы открытия и закрытия здания). К контролируемым HVAC-системой параметрам относятся температура внутри помещения x_{int} и количество потраченного газа gc в системе отопления. К внешним возмущениям относятся: температура вне помещения и прогноз изменения температуры на следующие 24 часа. Полученные данные очищаются от аномальных значений, интерполируются пропуски значений, и все параметры приводятся к единому формату [6].

1.3. Моделирование процессов в помещении

На данном этапе строятся прогнозирующие модели изменения температуры внутри помещения и отопления на горизонт прогнозирования h . Прогнозирование производится в 6 интервалов по 4 часа. Значение температуры внутри помещения \hat{x}_{int} определяется следующей формулой:

$$\hat{x}_{int}(t+1) = h_{\theta}(x_{int}(t), \hat{x}_{ext}(t), gc(t)), \quad (1)$$

где x_{int} – температура внутри помещения, \hat{x}_{ext} – прогноз температуры, gc – потребление газа. Прогноз потребления газа \hat{gc} определяется по следующей формуле:

$$\hat{gc}(t) = h_{\theta}(x_{tar}(t), x_{int}(t), \hat{x}_{int}(t+1), gc(t-1)). \quad (2)$$

На данном этапе система генерирует $6 \cdot 2^{16}$ возможных сценария изменения температуры в зависимости от работы системы отопления.

1.4. Формирование управляющих воздействий

На этапе 1.2. было получено $6 \cdot 2^{16}$ возможных вариантов управления. Целью данного этапа является определение наилучшего варианта из них. Выбор варианта оптимального управления производится путем поиска варианта с минимальным значением целевой функции:

$$J_{MPC} = \sum_{i=t_k}^{t_k+h} (m(i)[x_{tar}(i) - \hat{x}_{int}(i)]^2) + \sum_{i=t_k}^{t_k+h} k(i)[\hat{g}c(i) - \hat{g}c(i-1)]^2, \quad (3)$$

где m – коэффициент, характеризующий важность поддержания выбранного уровня комфорта (в зависимости от времени суток), x_{tar} – целевая температура внутри помещения, \hat{x}_{int} – прогноз целевой температуры внутри помещения, k – коэффициент, характеризующий важность сокращения энергопотребления.

После нахождения стратегии управления HVAC-системой с минимальной целевой функцией J_{MPC} сервер создает набор управляющих воздействий для включения/выключения HVAC-системы [3] и синхронизируется с клиентом.

ТЕСТОВЫЙ ПРИМЕР

Метод был проверен на экспериментальных данных, собранных в офисном здании площадью 3000 м² в г. Эйндохвен (Голландия). Особенностью эксперимента было то, что температура была измерена во всех 9 помещениях здания, однако при этом только один датчик учитывал энергопотребление, используемое для отопления всех помещений.

Авторами было исследовано три интервала собранных данных (в сумме 7199 значений каждого параметра):

- 1) 19 октября – 14 ноября 2011;
- 2) 12 января – 17 февраля 2012;
- 3) 29 февраля – 13 марта 2012.

Метод прогнозирования изменения температуры в помещении для повышения качества управления освещался в работах [1, 2, 8]. При прогнозировании изменения температуры авторами было сравнено 6 моделей с различными комбинациями переменных. Наибольшую точность (сумма квадратов ошибок обучающей и тестовой выборок 0,03 и 0,01 соответственно) прогнозирования внутренней температуры показала следующая модель линейной регрессии:

$$\hat{x}_{int}(t+1) = 0,21 - 0,17 \cdot x_{int}(t-1) + 1,16 \cdot x_{int}(t) + 0,0026 \cdot x_{ext}(t-1) - 0,036 \cdot x_{ext}(t) + \\ + 0,037 \cdot x_{ext}(t+1) + 0,007 \cdot gc(t-1) + 0,032 \cdot gc(t). \quad (4)$$

При прогнозировании потребления газа было построено и протестировано 6 моделей с разными комбинациями переменных. Обнаружилось, что наиболее точной является (сумма квадратов обучающей и тестовой выборок 20,01 и 1,25 соответственно) следующая модель линейной регрессии:

$$\hat{g}c(t+1) = 3,17 + 0,032 \cdot x_{tar}(t-1) - 0,064 \cdot x_{tar}(t) + 0,035 \cdot x_{tar}(t+1) + \\ + 1,36 \cdot x_{int}(t-1) - 3,54 \cdot x_{int}(t) + 2,03 \cdot x_{int}(t+1) + 0,01 \cdot gc(t-1) + 0,64 \cdot gc(t). \quad (5)$$

Для определения эффективности предложенного метода управления использовался метод сравнения, описанный в [8]. Метод управления J_{MPC} сравнивался с J_{HVAC} (встроенное управление HVAC-системы) в:

- теплый день – 20 октября 2011 г. (мин. – 2°C, макс. – 10°C, ср. – 5,6°C);
жаркий день – 28 октября 2011 (мин. – 8°C, макс. – 19°C, ср. – 12,5°C);

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

холодный день – 5 февраля (мин. – -19°C , макс. – -5°C , ср. – $11,2^{\circ}\text{C}$).

Результаты сравнения методов управления показаны в таблице 1.

20 октября 2011 г. и 28 октября 2011 г. метод управления *Имрс* показал себя более эффективным по сравнению с *Инвас*.

Таблица

Результаты сравнения управляющих моделей

	20 октября 2011	28 октября 2011	5 февраля 2012
<i>Инвас</i>	300,91	298,92	338,14
<i>Имрс</i>	178,52	87,47	867,11
Эффективность	68,56 %	241,73 %	-61,00 %

Заключение

Авторами был предложен алгоритм супервизорного управления системами контроля отопления коммерческих зданий, основанных на технологии управления с прогнозирующими моделями, использующих прогноз погоды.

Алгоритм супервизорного управления HVAC-системой показал лучшие результаты в расчете на весенне-осенний сезон по сравнению со встроенным в HVAC-систему алгоритмом.

Список литературы

1. Камаев В. А. Системы автоматизации управления энергосбережением / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. Бребельс // Открытое образование. – 2010. – № 2. – С. 227–231.
2. Щербаков М. В. Методика выявления потенциала энергосбережения на основе интеллектуального анализа данных / М. В. Щербаков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2010. – № 2. – С. 51–55.
3. Tyukov A. Automatic two way synchronization between server and multiple clients for HVAC system / A. Tyukov, M. Shcherbakov, A. Brebels. – Ho Chi Minh City, Vietnam: iiWAS, 2011. – С. 461–471.
4. Atthajariyakul S. Neural computing thermal comfort index for HVAC systems / S. Atthajariyakul, T. Leephakpreeda // Energy conversion and management. – 2005. – Vol. 46, no. 15. – P. 2553–2565.
5. Bemporad A. Robust model predictive control: A survey / A. Bemporad, M. Morari // Robustness in identification and control. – 1999. – P. 207–226.
6. Hernández M. A. Real-world data is dirty: Data cleansing and the merge/purge problem / M. A. Hernández, S. J. Stolfo // Data mining and knowledge discovery. – 1998. – Vol. 2, no. 1. – P. 9–37.
7. Oldewurtel F. Energy efficient building climate control using stochastic model predictive control and weather predictions / F. Oldewurtel // American Control Conference (ACC). – 2010. – P. 5100–5105.
8. Wallace M. Energy efficient model predictive building temperature control / M. Wallace // Chemical Engineering Science. – 2011.

References

1. Kamaev V. A., Shcherbakov M. V., Brebel's A. Sistemy avtomatizacii upravlenija jenergosberezheniem [Systems of automation of energy saving management]. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education], 2010, no. 2, pp. 227–231.
2. Werbakov M. V. Metodika vyjavlenija potenciala jenergosberezhenija na osnove intellektual'nogo analiza dannyh [Technique of identification of energy saving potential on the basis of intellectual data analysis]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2010, no. 2, pp. 51–55.
3. Tyukov A., Shcherbakov M., Brebels A. Automatic two way synchronization between server and multiple clients for HVAC system. Ho Chi Minh City, Vietnam: iiWAS, 2011, pp. 461–471.
4. Atthajariyakul S., Leephakpreeda T. Neural computing thermal comfort index for HVAC systems. *Energy conversion and management*, 2005, vol. 46, no. 15, pp. 2553–2565.

5. Bemporad A., Morari M. Robust model predictive control: A survey. Robustness in identification and control, 1999, pp. 207–226.

6. Hernández M. A., Stolfo S. J. Real-world data is dirty: Data cleansing and the merge/purge problem. Data mining and knowledge discovery, 1998, vol. 2, no. 1, pp. 9–37.

7. Oldewurtel F. Energy efficient building climate control using stochastic model predictive control and weather predictions. American Control Conference (ACC), 2010, pp. 5100–5105.

УДК 681.3.069

СИСТЕМОАНАЛИЗ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПОИСКОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ: КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ

Хоменко Татьяна Владимировна, кандидат технических наук
Васильева Татьяна Валерьевна, ассистент

Астраханский государственный технический университет
414025, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
E-mail: t_v_khomenko@mail.ru, vasilevatv77@mail.ru

Существующие автоматизированные системы поискового конструирования позволяют генерировать образ проектируемого объекта в соответствии с некоторыми алгоритмами в процессе взаимодействия человека и ЭВМ. В основу подобных автоматизированных систем легли несколько различных подходов:

- *подход формализованного описания естественнонаучных и научно-технических эффектов на основе онтологии научно-технических характеристик;*
- *энерго-информационная модель цепей и метод структурных параметрических схем (ЭИМЦ);*
- *подход структурирования физических знаний и поискового конструирования.*

В статье приводятся результаты сравнительного анализа автоматизированных систем поискового конструирования, который позволил построить функциональные модели рассматриваемых автоматизированных систем поискового конструирования; выявить существование: инвариантной составляющей, присущей рассматриваемым автоматизированным системам поискового конструирования; вариативной составляющей, присущей одной автоматизированной системе поискового конструирования по каждой модели процесса проектирования: концептуальной модели, инфологической модели, даталогической модели; проанализировать вариативную составляющую автоматизированной системы поискового конструирования по каждой модели процесса проектирования.

На основании чего сделан вывод: автоматизированные системы концептуального проектирования, основанные только на инвариантной составляющей, реализуют не полный цикл проектирования технического объекта с точки зрения системного анализа. Интеграция вариативной составляющей по каждой модели процесса проектирования на платформу автоматизированной системы, базирующейся на инвариантной составляющей, позволила бы расширить её возможности и, как следствие, повысить эффективность поиска новых технических решений, тем самым решить задачу опережающего развития.

Ключевые слова: *онтология системных подходов, общие категории, структура знаний, автоматизированные системы поискового конструирования, физический эффект, физический принцип действия, чувствительные элементы систем управления.*