

МОДЕЛЬНО-УПРЕЖДАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЯ

В.В. Абдуллин

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Рассматривается использование метода модельно-упреждающего управления тепловым режимом многоэтажного здания. Описана структура системы модельно-упреждающего управления, включающая в себя реализуемый в стандартных автоматизированных тепловых пунктах контур базового управления по основному возмущающему воздействию – температуре наружного воздуха – и корректирующий контур, в котором реализовано модельно-упреждающее управление с использованием модели обратной динамики. Предлагаемая модель осуществляет оценку в реальном времени влияния неизмеряемых возмущающих факторов на температуру воздуха в помещениях здания. В рассматриваемой модели осуществлено разделение протекающих в системе процессов на имеющие быструю и медленную динамику. Измерение температуры воздуха в помещениях здания осуществляется с использованием датчиков, объединенных в распределенную сеть полевого уровня. Оценка обобщенного температурного возмущения осуществлена с применением прогнозирующих свойств экспоненциального сглаживания. Статья также содержит результаты внедрения системы на учебно-лабораторном корпусе университета. Полученные результаты демонстрируют снижение потребления тепловой энергии системой отопления, вместе с тем, повышение уровня комфорта в здании.

Ключевые слова: тепловой режим здания, модельно-упреждающее управление, модель обратной динамики, отопление зданий, АИТП.

Введение

Энергосбережение в сфере жилищно-коммунального хозяйства и, в частности, в процессе отопления многоэтажных зданий, является важной задачей как с точки зрения объема рынка, так и с точки зрения состояния инженерных систем. По данным Росстата в Российской Федерации около 3,2 млн многоквартирных жилых домов; суммарная мощность источников теплоснабжения составляет 590,3 тыс. Гкал/ч, в 2014 г. произведено 237,51 млн Гкал тепловой энергии, потребителям отпущено 223,55 млн Гкал [1]. Рынок тепловой энергии исчисляется сотнями миллиардов рублей в год. В этой связи важно иметь систему отопления, отвечающую критериям энергоэффективности, надежности и комфорта. Одним из актуальных мировых трендов в энергосбережении является внедрение различных передовых алгоритмов управления [2–5].

Потребительское качество отопления определяется стабильным поддержанием температуры воздуха в здании T_{ind} на заданном комфортном уровне. Однако существует ряд проблем, затрудняющих реализацию классического подхода к управлению по ошибке регулируемой координаты [6]:

- в различных помещениях многоэтажного здания температура воздуха различается, в связи с чем в больших зданиях возникает проблема выбора представительного помещения;
- на здание влияет множество возмущающих факторов (рис. 1), действие которых затруднительно измерить или оценить на практике (солнечная радиация J_{rad} , ветер V_{wind} , теплопоступления от внутренних бытовых источников Q_{int} и др.);
- здание обладает большой инерционностью, на динамику температуры воздуха в помещениях также влияет тепло, аккумулированное в ограждающих конструкциях здания Q_{acc} ;
- система отопления здания проявляет свойства нелинейного распределенного объекта, процессы теплообмена в здании описываются дифференциальными уравнениями в частных произ-

водных [7–8], что затрудняет управление по температуре воздуха в помещении с использованием известных инженерных методов.

Регулирование по T_{ind} применяется только в небольших зданиях, обладающих однородностью характеристик и малой инерционностью, а в большинстве существующих на рынке и массово реализуемых на практике систем управления отоплением многоэтажных зданий значение T_{ind} либо не учитывается вовсе, либо используется лишь для контроля качества управления без непосредственного влияния на формирование управляющего воздействия.

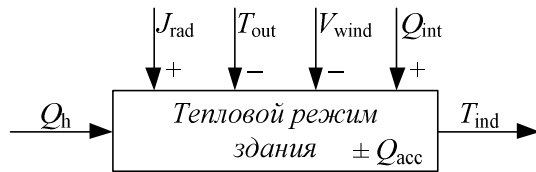


Рис. 1. Факторы, влияющие на температуру воздуха в помещении

Получивший распространение в России способ погодного регулирования подачи тепла (без обратной связи по T_{ind}) обеспечивает приемлемое качество регулирования при относительной простоте реализации.

Регулирование температуры подаваемого теплоносителя осуществляется в зависимости от основного возмущающего воздействия – температуры наружного воздуха T_{out} , однако при этом не учитывается действие таких возмущений, как J_{rad} , V_{wind} , Q_{int} , Q_{acc} , влияние которых на T_{ind} также существенно (см. рис. 1). В результате, T_{ind} поддерживается с недостаточной точностью: например, в дневное время наблюдается перетоп (статическая ошибка), прежде всего, под влиянием факторов J_{rad} , V_{wind} и Q_{int} .

Указанные проблемы потребовали разработки нового алгоритма энергоэффективного управления отоплением здания, оценивающего и компенсирующего влияние возмущающих факторов в реальном времени.

1. Структура системы модельно-упреждающего управления

Для учета неизмеряемых факторов, воздействующих на здание, был использован подход, основанный на концепции обобщенного температурного возмущения $T_z(t)$ [7], учитывающего влияние вышеназванных возмущений на T_{ind} .

Обобщенная структура предложенной системы упреждающего управления приведена на рис. 2. Как видно из рис. 2, базовое управление подачей тепла на отопление здания производится по стандартной схеме с использованием АИТП здания. Регулирование тепловой энергии $Q_h^{T_{out}}$ осуществляется в зависимости от основного возмущающего воздействия – температуры наружного воздуха. Дополнительно в систему вводится контур модельно-упреждающего управления, который осуществляет коррекцию подачи тепла на отопление здания в зависимости от упреждающего значения (прогнозной оценки) T'_z обобщенного температурного возмущения T_z . Тепловая мощность $Q_h^{T_{ind}}$, подаваемая в систему отопления здания, формируется как сумма выходов базового и корректирующего контуров:

$$Q_h^{T_{ind}} = Q_h^{T_{out}} + \Delta Q_h^{T_{ind}}, \tag{1}$$

где $\Delta Q_h^{T_{ind}}$ – корректирующее значение тепловой мощности, вырабатываемое контуром модельно-упреждающего управления [6].

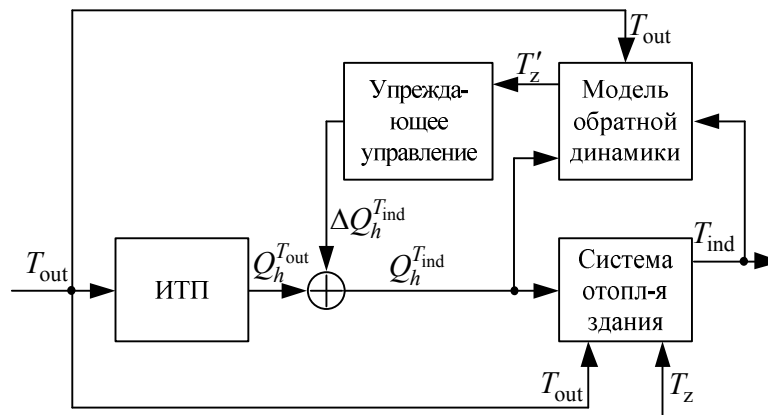


Рис. 2. Обобщенная структура системы модельно-упреждающего управления тепловым режимом здания

Вычисление прогнозной оценки обобщенного температурного возмущения осуществляется в блоке «Модель обратной динамики» (см. рис. 2).

В соответствии с рис. 1 и Законом сохранения энергии, $T_{ind} = \text{const}$ при условии

$$Q_h(t) + \sum_i Q_{PF_i}(t) = 0, \tag{2}$$

где $Q_h(t)$ – тепловая энергия, передаваемая зданию системой отопления; $Q_{PF_i}(t)$ – поток тепловой энергии, отражающий влияние i -го возмущающего воздействия.

Основываясь на концепции обобщенного температурного возмущения, с учетом (2), можно записать уравнение теплового баланса в виде

$$T'_{ind}(t) = \frac{Q_h(t)}{q_h \cdot V} + T_{out}(t) - T_z(t), \tag{3}$$

где $T'_{ind}(t)$ – упреждающая (прогнозная) оценка температуры воздуха в помещении (горизонт прогнозирования определяется колебаниями T_{ind} под воздействием возмущающих факторов (см. рис. 1)); q_h – удельные тепловые потери (на единицу объема – м^3); V – наружный объем здания [7]. Инертность происходящих в здании процессов отразим динамическим оператором:

$$T_{ind}(t) = F_0 \{ T'_{ind}(t) \}. \tag{4}$$

Однако различные возмущающие факторы воздействуют на здание с различной динамикой [9]. В ходе исследования было признано целесообразным разделение происходящих в системе процессов на *быстрые* и *медленные*. К медленным процессам относится действие факторов, отделенных от температуры воздуха в помещении ограждающими конструкциями здания. Медленные процессы включают действие основного возмущающего воздействия T_{out} , а также возмущений V_{wind} и Q_{acc} , влияние которых отражено в T_{out} . Быстродействие указанных факторов характеризуется инертностью ограждающих конструкций здания. К быстрым процессам относится воздействие факторов, непосредственно влияющих на температуру воздуха в помещении (J_{rad} , Q_{int}), влияние которых отражено в T_z , а также влияние управляющего воздействия Q_h . Разделенная таким образом динамическая модель теплового режима здания примет вид, представленный на рис. 3. Данная модель описывается операторным выражением

$$T_{ind}(t) = F_{LS} \{ T_{out}(t) \} + F_{HS} \{ Q_h(t)/(q_h \cdot V) - T_z(t) \}, \tag{5}$$

где $F_{LS} \{ \bullet \}$ – динамический оператор «медленных» процессов; $F_{HS} \{ \bullet \}$ – динамический оператор «быстрых» процессов.

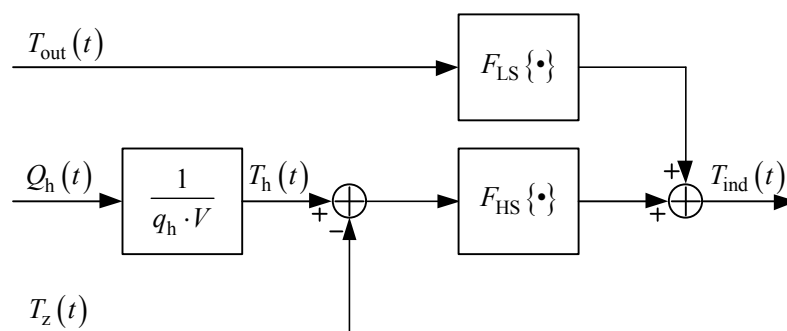


Рис. 3. Структурная схема динамической модели теплового режима здания

Произведем обращение динамической модели, изображенной на рис. 3. Структурная схема модели обратной динамики теплового режима здания примет вид, представленный на рис. 4.

Полученная структура, позволяющая получить оценочное значение обобщенного температурного возмущения, описывается операторным выражением

$$T'_z(t) = Q_h(t)/(q_h \cdot V) - F_{HS}^{-1} \{ F_{LS} \{ T_{out}(t) \} - T_{ind}(t) \}, \tag{6}$$

где $F_{HS}^{-1} \{ \bullet \}$ – оператор обратной динамики «быстрых» процессов [7].

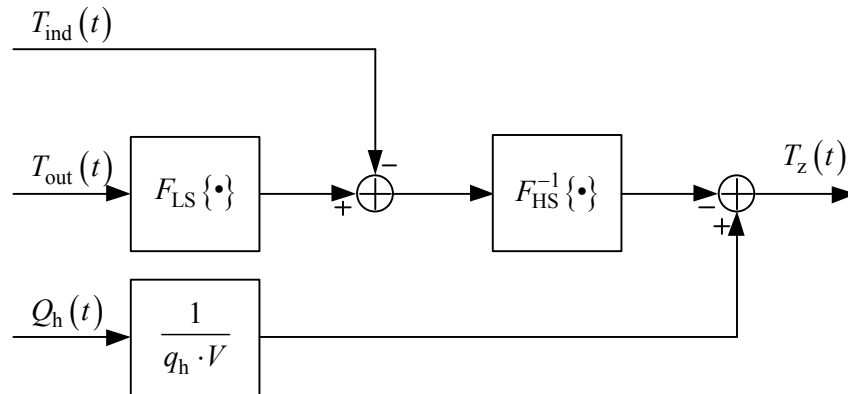


Рис. 4. Структурная схема модели обратной динамики теплового режима здания

Построение оператора обратной динамики осуществлено с использованием метода, использующего прогнозирующие свойства экспоненциального сглаживания [7, 8, 10].

3. Результаты внедрения на объекте

Предложенный алгоритм модельно-упреждающего управления реализован на практике в учебно-лабораторном корпусе ЗБВ Южно-Уральского государственного университета. Управление подачей тепловой энергии в систему отопления здания осуществляется с использованием АИТП. Алгоритмическое обеспечение, включая базовый и корректирующий контура управления и динамическую модель здания, реализованы в ПЛК *Segnetics SMH-2Gi*. Для измерения температуры в различных помещениях здания была развернута распределенная сеть *MicroLan (I-wire)* из 24 цифровых датчиков температуры *Dallas 18B20* [11]. Дополнительно был протестирован сбор данных о температуре воздуха в помещениях здания по беспроводной протоколу *WirelessHART* с использованием встраиваемых коммуникационных модулей *RFM XDM2510HP* [12].

Внедренная система в реальном времени осуществляет моделирование процесса отопления и оценку следующих параметров:

- удельных теплопотерь q_h ,
- оценочного значения обобщенного температурного возмущения $T'_z(t)$,
- упреждающей оценки температуры воздуха $T'_{ind}(t)$.

Это позволяет осуществлять непрерывную коррекцию подаваемого в систему отопления здания тепла, компенсируя влияние как быстрых, так и медленных возмущающих факторов, что повышает стабильность поддержания температуры воздуха в помещениях и снижает энергопотребление здания.

На рис. 5 представлен график прогнозной оценки обобщенного температурного возмущения вместе с графиками температуры наружного воздуха и температуры воздуха в помещениях (результаты измерений за апрель 2015 г.). На рис. 6 представлены графики температуры теплоносителя в подающем трубопроводе при погодном регулировании (по температуре наружного воздуха) и при использовании предложенного метода модельно-прогнозирующего управления. Поведение системы в ночное время близко к проектным значениям и требуется минимальная коррекция подачи тепла в здание. В дневные часы, напротив, под воздействием возмущающих факторов: прежде всего солнечной радиации и внутренних бытовых источников тепла (работающего оборудования и находящихся в здании людей) – наблюдается рост величины обобщенного температурного возмущения. Возникает необходимость компенсации указанных факторов путем уменьшения температуры подаваемого теплоносителя, что приводит к уменьшению количества потребляемой тепловой энергии.

Кроме того, возрос уровень комфорта здания. На рис. 7 показаны графики температуры воздуха в помещениях здания при использовании погодного регулирования и предложенного метода модельно-упреждающего управления. Как видно из рис. 7, суточные колебания температуры воздуха в помещении снизились с ± 1 °С до $\pm 0,5$ °С. Также удалось полностью исключить статическую ошибку, характерную для погодного регулирования.

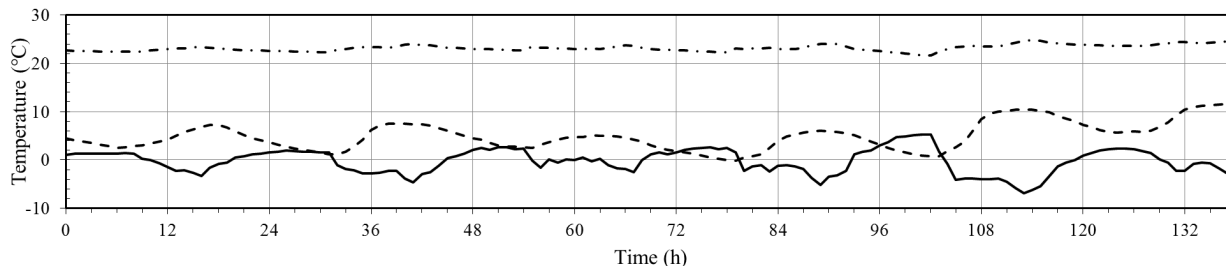


Рис. 5. Суточные колебания величины обобщенного температурного возмущения: пунктирная линия – температура наружного воздуха, штрих-пунктирная линия – температура воздуха в помещениях здания, сплошная линия – оценочное значение обобщенного температурного возмущения

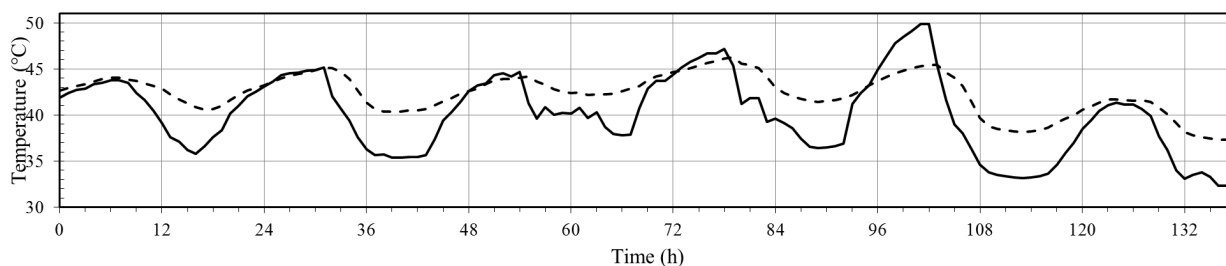


Рис. 6. Уставка температуры теплоносителя в подающем трубопроводе: пунктирная линия – при погодном регулировании, сплошная линия – при модельно-упреждающем управлении

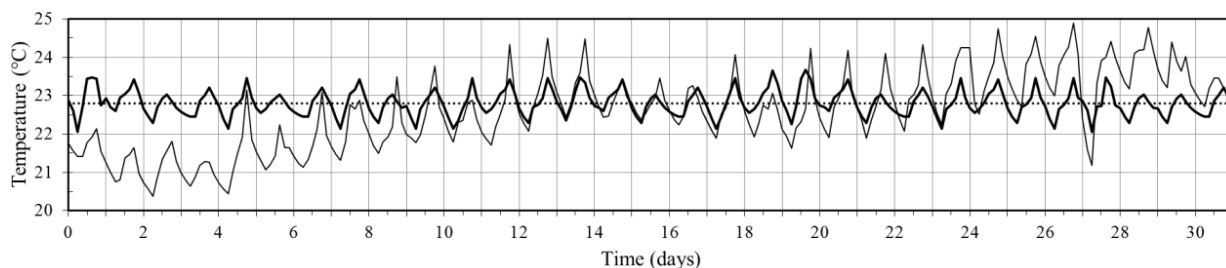


Рис. 7. Температура воздуха в помещении: тонкая линия – при погодном регулировании, жирная линия – при модельно-упреждающем управлении, пунктирная линия – уставка

Заключение

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность предложенного подхода и положительный эффект от его применения. Внедрение модельно-прогнозирующего управления тепловым режимом корпуса ЗБВ ЮУрГУ позволило исключить статическую ошибку регулирования, а также снижать в дневное время температуру подаваемого в систему отопления теплоносителя. Тем самым исключается явление перетопа и снижается энергопотребление на нужды отопления. Также в результате внедрения предложенного подхода существенно уменьшилась амплитуда суточных колебаний температуры воздуха в помещениях, что повышает потребительское качество отопления и положительно влияет на комфорт здания.

Работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках проекта «Разработка энергосберегающей геоинформационной системы реального времени для оптимального управления теплогидравлическими режимами систем теплоснабжения муниципального образования», в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии № 14.577.21.0026 от 05.06.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0026.

Литература/References

1. Федеральная служба государственной статистики – Центральная База Статистических Данных. URL: <http://cbsd.gks.ru/> (дата обращения: 19.06.2015). [*Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki – Tsentral'naya Baza Statisticheskikh Danykh* (Federal State Statistics Service – Central Statistics Database). Available at: <http://cbsd.gks.ru/> (accessed 19 June 2015).]

2. Salmerón J.M., Álvarez S., Molina J.L., Ruiz A., Sánchez F.J. Tightening the Energy Consumptions of Buildings Depending on their Typology and on Climate Severity Indexes. *Energy and Buildings*, 2013, vol. 58, pp. 372–377. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.09.039
3. Salsbury T., Mhaskar P., Qin S.J. Predictive Control Methods to Improve Energy Efficiency and Reduce Demand in Buildings. *Computers and Chemical Engineering*, 2013, vol. 51, pp. 77–85. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.08.003
4. Shaikh P.H., Nor N.M., Nallagownden P., Elamvazuthi I., Ibrahim T. A Review on Optimized Control Systems for Building Energy and Comfort Management of Smart Sustainable Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 34, pp. 409–429. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.027
5. Oldewurtel F., Parisio A., Jones C., Morari M., Gyalistras D., Gwerder M., et al. Energy Efficient Building Climate Control Using Stochastic Model Predictive Control and Weather Predictions. *Proceedings of American Control Conference 2010*, ACC 2010, 30 June–2 July, 2010, Baltimore, MD, USA, pp. 5100–5105. DOI: 10.1109/ACC.2010.5530680
6. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Basalaev A.A. Building Heating Feed-Forward Control Based on Indoor Air Temperature Inverse Dynamics Model. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2014*, WCECS 2014, 22–24 October, 2014, San Francisco, CA, USA, pp. 886–892.
7. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Kazarinov L.S. Method of Building Thermal Performance Identification Based on Exponential Filtration. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering 2013*, WCE 2013, 3–5 July, 2013, London, U.K., pp. 2226–2230.
8. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Kazarinov L.S. Identification of Multistorey Building's Thermal Performance Based on Exponential Filtering. *Transactions on Engineering Technologies*. – Springer Netherlands, 2014. pp. 501–512. DOI: 10.1007/978-94-017-8832-8_36
9. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 2001. [Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti* (Central Heating and Heating Networks). Moscow, MEI, 2001. (in Russ.)]
10. Горелик С.И., Казаринов Л.С. Прогнозирование случайных колебательных процессов на основе метода экспоненциального сглаживания // Автоматика и Телемеханика. 1994. № 10. С. 27–34. [Gorelik S.I., Kazarinov L.S. (Prediction of Random Oscillatory Processes on the Basis of the Exponential Smoothing Method). *Automation and Remote Control*, 1994, 55:10, pp. 1413–1419. (in Russ.)]
11. Шнайдер Д.А. Адаптивный регулятор отопления здания на основе искусственных нейронных сетей // Автоматизация и управление в технических системах: сб. науч. тр. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. С. 131–134. [Shnayder D.A., Shishkin M.V. (Adaptive Controller for Building Heating Systems Applying Artificial Neural Network). *Automatics and Control in Technical Systems, Edited Book*. Chelyabinsk, South Ural State University press, 2000, pp. 131–134. (in Russ.)]
12. Shnayder D.A., Abdullin V.V. A WSN-based System for Heat Allocating in Multiflat Buildings. *2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing Proceedings*, TSP 2013, 2–4 July, 2013, Rome, Italy, Article number 6613915, pp. 181–185. DOI: 10.1109/TSP.2013.6613915

Абдуллин Вильдан Вильданович, младший научный сотрудник кафедры автоматике и управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vildan@ait.susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 16 июня 2015 г.

BUILDING THERMAL PERFORMANCE FEED-FORWARD CONTROL*V.V. Abdullin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, vildan@ait.susu.ac.ru*

This paper proposes an implementation of method of heating feed-forward control system for multi-storey buildings. The proposed structure incorporates baseline control loop that controls heating power depending on the key perturbing factor – outdoor air temperature and adjusting control loop implementing feed-forward control based on indoor air temperature inverse dynamics model. The suggested model structure enables real-time assessment of the impact of unmeasurable perturbing factors on indoor air temperature, along with distinguishing between fast and slow processes occurring within the system. To measure current indoor air temperature values, the authors used a distributed field-level sensor network. The estimation of generalized temperature perturbation was performed using predicting ability of exponential smoothing. The paper also contains the actual results obtained by deployment of the suggested heating control system in the university academic building. The results obtained demonstrate the reducing of overall energy consumption by building heating system, at the same time increasing the comfort level of the building.

Keywords: building thermal performance, feed-forward control, inverse dynamics model, heating of buildings, automated heat station.

*Received 16 June 2015***ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Абдуллин, В.В. Модельно-упреждающее управление тепловым режимом здания / В.В. Абдуллин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 33–39. DOI: 10.14529/ctcr150305

FOR CITATION

Abdullin V.V. Building Thermal Performance Feed-Forward Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 33–39. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr150305