

Гибридное прогнозирующее управление микроклиматом и энергопотреблением зданий

О. Ю. Марьясин¹, А. А. Огарков²

Ярославский государственный технический университет
Ярославль, Россия

¹maryasin2003@list.ru, ²drivemox@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена система управления микроклиматом и энергопотреблением здания, включающая как непрерывные (теплообменники, радиаторы, конвекторы), так и дискретные (термостаты, вентиляторы, насосы) элементы, работающие по принципу включено/выключено. Такие системы описываются смешанными логико-динамическими моделями. Для управления системой предлагается подход, который позволяет интегрировать традиционное климатическое оборудование и новейшие системы на базе прогнозирующих контроллеров. Рассматриваются различные варианты реализации гибридного прогнозирующего управления. Результаты моделирования подтверждают эффективность предлагаемого подхода для управления микроклиматом и энергопотреблением зданий.

Ключевые слова: микроклимат; смешанная логическая-динамическая система; гибридное прогнозирующее управление; MATLAB

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные городские жители более 80% своей жизни проводят в закрытых помещениях. Доказано, что микроклимат помещений существенно влияет на физическое и эмоциональное состояние людей, а также на их работоспособность [1]. Поэтому поддержание параметров микроклимата, определенных известными санитарными нормами и комфортных для проживания людей, является главной задачей климатического оборудования, установленного в зданиях. С другой стороны, необходимость энергосбережения и снижения коммунальных платежей требует минимизации затрат энергоресурсов на поддержание микроклимата. Обеспечить выполнение этих, часто противоречивых требований, должны системы управления микроклиматом и энергопотреблением (Energy and Comfort Management System – ECMS) зданий, включающие оборудование систем отопления, вентиляции и кондиционирования (Heating, Ventilation, Air Conditioning - HVAC).

Традиционно для управления микроклиматом помещений используются обогреватели, вентиляторы, системы “теплый пол” и другие, работающие по принципу включено/выключено, а также различные системы регулирования на базе двухпозиционных, трехпозиционных и ПИД-регуляторов. В настоящее время, в научной прессе, для управления микроклиматом и

энергопотреблением зданий широко предлагаются оптимальные и адаптивные системы управления, системы прогнозирующего управления (Model Predictive Control - MPC), а также системы на базе нечеткой логики, нейроконтроллеры и другие [2]. При этом наибольшее число публикаций приходится на системы, использующие MPC-подход. Эти системы позволяют осуществлять более качественное управление микроклиматом зданий, с учетом ограничений, при минимуме энергозатрат. Такие системы сейчас начинают активно внедряться на практике [3]. Однако традиционное HVAC оборудование, еще очень долго будет использоваться, в том числе, совместно с новейшими климатическими системами.

В общем случае, система управления микроклиматом и энергопотреблением современного здания включает как непрерывные (теплообменники, радиаторы, конвекторы), так и дискретные (термостаты, вентиляторы, насосы) элементы, работающие по принципу включено/выключено. Кроме того, на микроклимат зданий могут оказывать влияние различные внутренние или внешние события, связанные с жизнедеятельностью людей, работой оборудования и другими факторами. С точки зрения математического описания современное здание представляет собой непрерывно-дискретную или гибридную динамическую систему, состоящую из взаимодействующих элементов различной природы, поведение которых описывается как непрерывными, так и дискретными процессами.

В научной прессе, пока еще мало работ, посвященных задаче управления микроклиматом и энергопотреблением зданий, с использованием MPC-подхода, рассматриваемых как гибридные динамические системы. Имеющиеся работы [4], [5] в основном, связаны с использованием нетрадиционных источников энергии и не учитывают российскую специфику, вызванную влиянием особых климатических условий и особенностями отечественных инженерных систем зданий.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Для реализации современных методов управления микроклиматом и энергопотреблением зданий, таких как оптимальные и адаптивные законы управления, необходимо наличие моделей объектов управления. Вопросам построения математических и компьютерных

моделей микроклимата зданий посвящено большое число публикаций [6], [7]. Для целей управления пока пригодны только динамические модели с сосредоточенными параметрами. Использование математических моделей с распределенными параметрами, в настоящее время не оправдано из-за их высокой вычислительной сложности.

Большинство разработанных моделей микроклимата являются нелинейными и нестационарными. Достоинством MPC-подхода является то, что так как он реализует закон управления с обратной связью по состоянию, и управление рассматривается и реализуется на очень коротком промежутке времени, то для синтеза управления достаточно использовать лишь приближенные, линейные модели. Поэтому далее мы будем рассматривать линейные стационарные модели в виде уравнений состояния, с дискретным временем, полученные из более сложных нелинейных и нестационарных моделей. Такие модели могут быть представлены в виде

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gw(k), \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k), \quad (2)$$

где $x(k)$ – вектор переменных состояния, $u(k)$ – вектор управления, $w(k)$ – вектор контролируемых возмущений, $y(k)$ – вектор выходных (контролируемых) переменных. На вектора управления и выходных переменных наложены ограничения

$$u(k)_{\min} \leq u(k) \leq u(k)_{\max}, \quad (3)$$

$$y(k)_{\min} \leq y(k) \leq y(k)_{\max}. \quad (4)$$

Как указано ранее на микроклимат зданий могут оказывать влияние различные внутренние или внешние события. Появление некоторых из них может быть запрограммировано заранее, а другие могут возникать совершенно случайно. Например, в целях экономии потребления электроэнергии можно периодически отключать работу циркуляционных насосов системы отопления общественных и административных зданий. Этому событию может быть присвоена бинарная логическая переменная $\delta_1 \in \{0, 1\}$. Если $\delta_1 = 0$, то это соответствует включенному состоянию насоса. В этом случае модель системы может описываться уравнениями (1) и (2). Если $\delta_1 = 1$, то это соответствует выключенному состоянию насоса. В этом случае в модели системы (1), (2) вместо матрицы B будет использоваться новая матрица B_1 .

В общем случае каждому событию может быть присвоена логическая переменная $\delta_s, s = 1, \dots, S$, а каждой логической переменной может быть поставлен в соответствие набор $N_{s\delta} = \{A_{s\delta}, B_{s\delta}, G_{s\delta}, C_{s\delta}, D_{s\delta}, x(k)_{\min s\delta}, x(k)_{\max s\delta}, y(k)_{\min s\delta}, y(k)_{\max s\delta}\}$, $\delta \in \{0, 1\}$, включающий матрицы уравнений (1), (2) и границы условий (3), (4). Тогда функционирование системы может быть описано

логико-динамической моделью в виде множества правил типа Если ... Тогда ... Иначе Если разные события не связаны, то множество правил будет включать только правила вида Если δ_s Тогда N_{s0} Иначе N_{s1} . В более сложном случае, когда учитываются цепочки событий, одни правила будут вкладываться в другие правила.

Логико-динамические модели формально могут быть описаны как дискретные гибридные автоматы (Discrete Hybrid Automata - DHA). Частным случаем DHA является класс кусочно-аффинных (Piecewise Affine - PWA) систем [8]. Такие системы часто также называют переключаемыми линейными системами (Switched Linear Systems). Согласно [9] систему логических условий можно преобразовать в систему целочисленных линейных неравенств, а логику-динамическую модель в смешанную логику-динамическую (Mixed Logical Dynamical - MDL). Как показано в [9] MDL форма модели охватывает большой класс гибридных динамических систем. От MDL модели можно, например, перейти к эквивалентной PWA модели.

III. ГИБРИДНАЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗДАНИЕМ

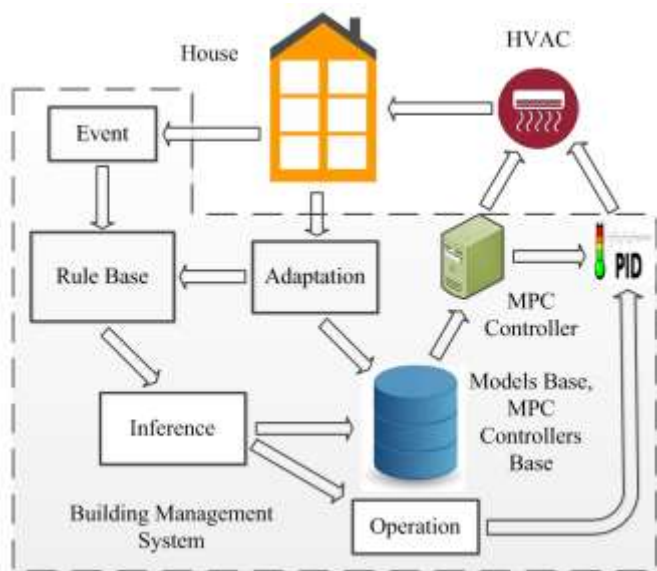
Большинство существующих реализаций гибридного MPC-алгоритма выполнено для пакета программ MATLAB/Simulink. Применение математических пакетов оправдано тем, что при реализации любого MPC-алгоритма выполняется большой объем операций с векторами и матрицами и может решаться задача математического программирования. В частности, для реализации гибридного MPC контроллера, использующего MDL модель необходимо решить задачу смешанного целочисленного программирования.

Наиболее известным инструментом для проектирования и моделирования гибридных MPC контроллеров для MATLAB/Simulink является Hybrid Toolbox [10] разработанный Альберто Бемпорад. Hybrid Toolbox поддерживает MDL и PWA формы моделей. Для описания логику-динамических моделей используется специальный язык моделирования HYSDEL. Hybrid Toolbox поддерживает популярные решатели для решения задач линейного, квадратичного и смешанного целочисленного программирования, такие как CPLEX, Xpress, Gurobi и другие. Hybrid Toolbox может использоваться для управления достаточно сложными гибридными динамическими системами. К недостаткам Hybrid Toolbox можно отнести некоторые ограничения, связанные с языком HYSDEL.

Другим инструментом для MATLAB/Simulink, позволяющим создавать MPC контроллеры для управления гибридными динамическими системами является YALMIP [11]. YALMIP Toolbox использует только PWA форму моделей. Как и Hybrid Toolbox YALMIP поддерживает широкий набор внешних решателей задач линейного, квадратичного и смешанного целочисленного программирования.

Общим недостатком рассмотренных инструментов является то, что они приводят задачу прогнозирующего управления гибридной динамической системой к задаче

Авторы предлагают альтернативный подход к решению задачи управления гибридными динамическими системами. Данный подход использует исходную логико-динамическую модель, представленную в виде множества правил. Из правил модели строится база знаний продукционного типа. Условия правил продукции (IF-part) повторяют систему условий исходной модели, а части действия (THEN-part) правил продукции определяют или операцию, выполняемую HVAC-оборудованием, и/или MPC-контроллер, соответствующий модели, определяемой набором $N_{\text{сб}}$. Схема системы гибридного прогнозирующего управления микроклиматом и энергопотреблением здания показана на рис. 1.



На рис. 1 события, возникающие при функционировании здания (блок House) классифицируются блоком Event и поступают в базу правил (блок Rule Base). Механизм логического вывода реализуется с использованием блоков Rule Base и Inference. В результате логического вывода определяется операция управления HVAC-оборудованием и/или вариант MPC, соответствующий текущему набору событий. Найденный вариант MPC выбирается из базы контроллеров (блок MPC Controller Base) и передается в блок MPC Controller, где он реализуется для получения текущего значения управляющего воздействия. Полученное управление выдается на HVAC оборудование здания.

вычислительные затраты при расчете оптимального управления.

Предложенный подход позволяет интегрировать в единую систему традиционное HVAC-оборудование, управляемое на основе сценариев или простейших систем регулирования и новейшие системы на базе MPC контроллеров. При этом часть правил базы правил может использоваться для реализации сценариев управления HVAC-оборудованием.

Кроме того, предложенный подход позволяет одновременно использовать как традиционные, так и гибридные MPC контроллеры. Применение гибридных MPC контроллеров может быть полезно для уменьшения числа вариантов, синтезируемых MPC контроллеров. При этом блок MPC Controller должен быть способен выполнять как традиционные, так и гибридные MPC-алгоритмы. Использование нескольких гибридных MPC контроллеров может оказаться более выгодным, чем использование единого гибридного MPC контроллера.

В предложенную авторами систему может быть добавлен механизм адаптации (блок Adaptation), позволяющий добавлять реакцию на новые, еще не зарегистрированные в системе события.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проверки предложенного подхода авторами проведено компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink. Создание компьютерной модели системы гибридного управления значительно упростило появление в новых версиях системы Simulink блока MultipleMPC, который позволяет оперативно переключаться с одного MPC контроллера на другой в процессе моделирования. Список используемых MPC контроллеров вводится в виде массива в соответствующий параметр блока MultipleMPC.

В качестве модели микроклимата использовалась модель, описанная в [7]. Система управления микроклиматом должна поддерживать температуру в помещении, площадью 144 м^2 , состоящим из четырех кирпичных стен, бетонного пола, потолка и двух окон, на уровне $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Измерение температуры осуществлялось с точностью до $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменение температуры внешней среды моделировалось гладкой периодической функцией с амплитудой $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и центральным значением $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Основным регулирующим воздействием, используемым для поддержания заданного теплового режима в помещениях, является изменение температуры теплоносителя в системе водяного отопления. Регулирование температуры осуществляется с помощью MPC контроллера. В качестве критерия оптимальности использовался интегральный квадратичный критерий. На управляющие и выходные переменные были наложены ограничения, которые не изменялись при моделировании.

В процессе моделирования предусмотрено возникновение следующих четырех событий:

- включение/выключение циркуляционного насоса системы отопления;
- включение/выключение вентилятора системы приточной вентиляции;
- включение/выключение системы «теплый пол»;
- открытие окон в помещении.

Для четырех событий возможно шестнадцать различных вариантов возникновения событий, включая базовый вариант, соответствующий отсутствию всех событий. Поэтому, для проведения экспериментов было подготовлено шестнадцать вариантов моделей типа (1), (2) и синтезировано шестнадцать вариантов MPC контроллеров.

На рис. 2 и рис. 3 показаны результаты численных экспериментов с моделью. На рисунках штриховой линией показан график переходного процесса для базового варианта MPC контроллера. Сплошной линией на рис. 2 показан график переходного процесса для варианта MPC контроллера, учитывающего событие включение системы «теплый пол», а на рис. 3 для варианта MPC контроллера учитывающего события включение системы «теплый пол» и включение вентилятора системы приточной вентиляции.

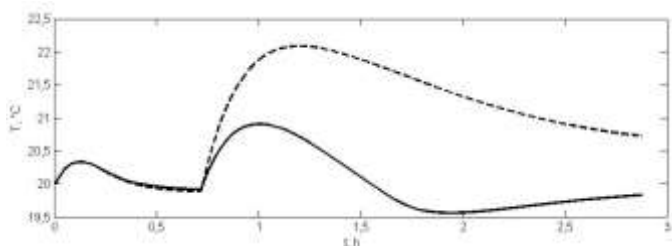


Рис. 2. Графики переходных процессов для базового варианта MPC контроллера и MPC контроллера учитывающего одно событие

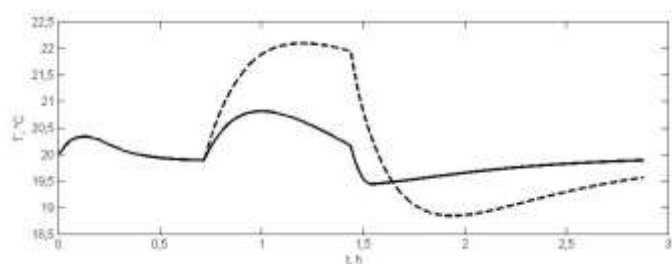


Рис. 3. Графики переходных процессов для базового варианта MPC контроллера и MPC контроллера учитывающего два события

Видно, что качество переходного процесса для вариантов MPC контроллеров, учитывающих события существенно лучше.

V. ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В настоящей работе рассмотрена система гибридного прогнозирующего управления микроклиматом и

энергопотреблением здания. Основным достоинством предложенного авторами подхода является возможность использования в рамках единой системы как традиционного HVAC-оборудования, управляемого на основе сценариев или простейших систем регулирования, так новейших MPC контроллеров. К другим достоинствам можно отнести более простую процедуру синтеза MPC контроллеров, не приводящую к задаче смешанного целочисленного программирования.

К недостаткам предложенного подхода можно отнести то, что при увеличении числа учитываемых событий очень быстро растет число правил, число вариантов моделей и число вариантов MPC контроллеров. Уменьшить число правил можно за счет анализа правил и исключения правил, содержащих события, одновременное появление которых практически исключено. Уменьшить число вариантов MPC контроллеров позволяет использование гибридных MPC контроллеров.

В дальнейшем планируется включить в систему гибридного прогнозирующего управления не только HVAC-оборудование, но и оборудование других инженерных систем здания, например, систему безопасности здания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кувшинов Ю.Я., Самарин О.Д. Основы обеспечения микроклимата зданий. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2012. 200 с.
- [2] P.H. Shaikh, N.M. Nor, P. Nallagowden, I. Elamvazuthi, T. Ibrahim, "Review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 2014, pp. 409-429.
- [3] D. Kolokotsa, A.D. Pouliezios, G. Stavrakakis, "Predictive control techniques for energy and indoor environmental quality management in buildings," *Building and Environment*, 44, 2009, pp. 1850-1863.
- [4] R.R. Negenborn, M. Houwing, B. De Schutter, "Model predictive control for residential energy resources using a mixed-logical dynamic model," *International Conference on Networking, Sensing and Control*, 2009.
- [5] A. Khakimova, A. Shamshimova, A. Kusatayeva, D. Sharipova, A. Bemporad, Y. Familant, A. Shintemirov, V. Ten and M. Rubagotti, "Hybrid model predictive control for optimal energy management of a smart house," *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2015.
- [6] Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: Пресс-АВОН, 2002. 325 с.
- [7] Марьясин О.Ю., Колодкина А.С. Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей. *Вестник СамГТУ*, № 1 (53), 2017. С. 122-132.
- [8] E.D. Sontag, "Nonlinear regulation: The piecewise linear approach," *IEEE Trans. Automatic Control*, 26(2), 1981 pp. 346-358.
- [9] A. Bemporad, M. Morari, "Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints," *Automatica*, vol. 35, no. 3, 1999, pp. 407-427.
- [10] Hybrid Toolbox – Hybrid Systems, Control, Optimization (2018). Available at: <http://cse.lab.imtlucca.it/~bemporad/hybrid/toolbox> (accessed 5 May 2018).
- [11] YALMIP (2018). Available at: <https://yalmip.github.io> (accessed 5 May 2018).