

УДК 697

Андрійчук В. Н.,  
д.т.н. Соколов В. И.,  
д.т.н. Андрійчук Н. Д.

(ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, vlad19790401@gmail.com)

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

*В работе рассмотрен вопрос обоснования возможности совершенствования процессов регулирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования использованием адаптивного прогнозирующего управления, повышения на его основе качества регулирования приточной вентиляционной системы. Изложен принцип управления с использованием прогнозирующей модели, отмечены особенности управления с использованием МРС-регулятора, рассмотрена структура регулятора и критерий выбора оптимальных значений управляющего сигнала. Показана реализация МРС-подхода на примере приточной вентиляционной системы VAV учебной аудитории. Для моделирования вентиляционной системы в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, для синтеза МРС-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox. Проведено исследование переходных процессов в вентиляционной системе VAV, сопоставлены переходные процессы в системе без регулятора, с ПИД-регулятором и МРС-регулятором. Сравнение результатов показало, что использование МРС-регулятора позволяет совершенствовать процессы регулирования теплового режима в помещении и повысить качество регулирования приточной вентиляционной системы.*

**Ключевые слова:** микроклимат, регулятор, вентиляционная система, температура, переходный процесс.

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК) являются одной из наиболее важных составляющих проектирования и разработки промышленных и административных зданий и жилых помещений [1–3]. Системы ОВК с помощью подачи наружного воздуха поддерживают в них безопасные и комфортные условия по температуре, влажности, скорости движения воздуха и чистоте воздушной среды.

Составной частью систем ОВК являются вентиляционные системы. Для управления инженерным оборудованием систем вентиляции ставятся следующие основные задачи [1, 4, 5]: создание и поддержание микроклимата в пределах здания, сооружения или помещения, комфортного для человека или животных и растений, а также материальных предметов (оборудования, веществ, изделий, произведений искусства и т. п.); энергосбережение или экономия энергии, затрачиваемой на создание и поддержание микроклимата; тех-

нологическая безопасность системы и снижение затрат на ее эксплуатацию.

Затраты на вентиляционные системы составляют значительную часть затрат на эксплуатацию здания и во многом определяются правильным построением автоматизированных систем управления микроклиматом. При анализе совокупных затрат в ряде случаев получается, что покупная стоимость составляет иногда очень небольшую часть, часто около 10 %. Остальные 90 % идут на эксплуатационные затраты.

Для эффективного управления системами ОВК необходимо вести оперативный контроль параметров микроклимата и состояния параметров исполнительных механизмов, а также формировать разные режимы работы оборудования [3, 5, 6]. Так, в системах вентиляции следует выбирать режим работы в соответствии с внешними и внутренними факторами (температура и влажность воздуха, загруженность помещений, концентрация вредных ве-

ществ). Чаще всего такое задание возникает в переходный период, когда диапазон изменения температуры варьируется в больших границах. Автоматизация и диспетчеризация требуют достижения определенных условий: комфортность, энергосбережение, технологическая безопасность, снижение затрат на эксплуатацию.

В этой связи актуальной задачей является совершенствование процессов регулирования систем ОВК, в частности повышение качества регулирования вентиляционных систем.

В настоящее время появились новые тенденции в построении систем автоматического управления [7, 8], которые дают возможности совершенствования процессов управления инженерным оборудованием зданий и помещений. И здесь следует отметить активно обсуждаемый подход для управления различными технологическими процессами, использующий прогнозирующие модели — Model Predictive Control (MPC) [9, 10].

Идея MPC-подхода к адаптивному управлению с обратной связью состоит в том, чтобы найти последовательность оптимальных управляющих воздействий, которая обеспечит наилучшее прогнозируемое состояние объекта управления на ограниченном горизонте прогнозирования [9, 11]. Задача синтеза адаптивного управления нелинейными объектами на основе данного подхода состоит из трех основных шагов. Сначала дифференциальные уравнения нелинейного объекта представляются приближенными линеаризованными системами на каждом интервале управления. Далее, с использованием линеаризованных моделей строятся прогнозирующие модели по выходным сигналам объекта управления на определенное количество шагов вперед. И на последнем этапе на основе прогнозирующих моделей минимизируется функционал качества по алгоритму квадратичного программирования для определения оптимального управляющего воздействия на систему.

MPC-подход хорошо зарекомендовал себя в различных областях управления нелинейными объектами, в том числе при решении задач управления тепловым режимом зданий [12]. К основным преимуществам MPC-подхода необходимо отнести то, что оптимальный регулятор, синтез которого проведен согласно данному подходу, обеспечивает отсутствие статической ошибки в системе, выполнение требуемых ограничений на управляющие и выходные переменные, а также достижение компромисса между робастностью и качеством регулирования [9, 10]. Вместе с тем, как и большинство других оптимальных систем, он требует наличия модели объекта управления. Поскольку MPC-подход реализует закон управления с обратной связью по состоянию, а управление рассматривается и выполняется на очень коротком временном промежутке, то важным его достоинством является то, что для синтеза системы управления можно использовать приближенные линейные модели.

В этой связи несомненный интерес вызывает апробация MPC-подхода для управления системами ОВК, его реализация на конкретном примере и сопоставление качества регулирования с традиционными подходами, в частности с использованием ПИД-регуляторов.

**Целью работы** является обоснование возможности совершенствования процессов регулирования систем ОВК использованием адаптивного прогнозирующего управления, повышение на его основе качества регулирования приточной вентиляционной системы.

Для наглядности реализации MPC-подхода рассмотрим систему ОВК как одномерную систему, т. е. рассматриваем ее как объект управления (ОУ) с одной выходной величиной  $y$ . Также считаем, что система автоматического управления (САУ) воспринимает одно задающее воздействие  $g$  и одно возмущающее воздействие  $f$ . Тогда САУ с MPC-регулятором можно представить структурной схемой, показанной на рисунке 1.

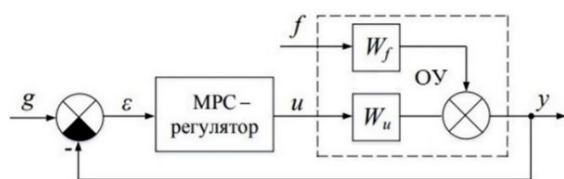


Рисунок 1 Структурная схема САУ с MPC-регулятором

На рисунке 1 обозначены:  $g$  — задающее воздействие (уставка);  $f$  — возмущающее воздействие (возмущение);  $u$  — управляющее воздействие (сигнал управления);  $W_u$  — передаточная функция ОУ по сигналу управления;  $W_f$  — передаточная функция ОУ по возмущению;  $y$  — выходная (регулируемая) величина (переменная);  $\varepsilon$  — ошибка управления,  $\varepsilon = g - y$ .

На рисунке 2 показана структурная схема MPC-регулятора. В состав регулятора входит прогнозирующая модель ОУ и оптимизатор.

Основная идея управления с прогнозирующей моделью заключается в следующем. Пусть имеются вход объекта по управлению  $u(t)$  и выходная регулируемая переменная  $y(t)$ . Задающее воздействие  $g(t)$  является желаемой величиной (зависимостью) изменения регулируемой переменной. Систему рассматриваем в дискретные моменты времени, т. е. только в моменты времени  $t = k\Delta T$ , где  $\Delta T$  — период квантования, а  $k$  — целое число.

Главной особенностью управления с помощью MPC-регулятора является наличие математической модели ОУ, которая достаточно точно описывает его поведение. Наличие адекватной математической модели ОУ позволяет прогнозировать значения регулируемой переменной на определенное число шагов вперед (рис. 3).

На рисунке 3 значения регулируемой величины  $y(t)$ , предсказанные в момент времени  $t$ , обозначены через  $\hat{y}(t)$ . Горизонт предсказания строится на определенное число шагов  $n_p$ . Прогнозируемая траектория регулируемой переменной будет зависеть от будущих значений управляю-

щего воздействия  $u(t)$ . Суть MPC-подхода состоит в определении последовательности значений управляющего сигнала  $u(t)$ , которая позволит обеспечить наилучшую прогнозируемую траекторию для регулируемой переменной  $y(t)$ . Длина последовательности  $n_c$  рассчитываемых управляющих воздействий  $u(t)$  является фиксированной величиной и называется горизонтом управления. Необходимая последовательность значений управляющего воздействия устанавливается решением задачи оптимизации. Выбор наилучшей траектории регулируемой переменной определяется показателем качества регулирования, которым принимают квадрат рассогласования между прогнозируемой выходной переменной  $y(t)$  и задающим воздействием (желаемой траекторией)  $g(t)$ . Также оценивается изменение величины управляющего сигнала. Таким образом, для выбора оптимальных значений сигнала управления  $u(t)$  MPC-регулятор стремится минимизировать следующий функционал:

$$J = \sum_{i=k}^{k+n_p} (y(i) - g(i))^2 + \sum_{i=k}^{k+n_c} (u(i) - u(k))^2, \quad (1)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  — целое число, соответствующее текущему моменту времени;  $n_p$  — число шагов, на которые строится прогноз поведения регулируемой переменной  $y(t)$  (горизонт предсказания);  $n_c$  — длина последовательности будущих значений управляющего сигнала  $u(t)$  (горизонт управления).

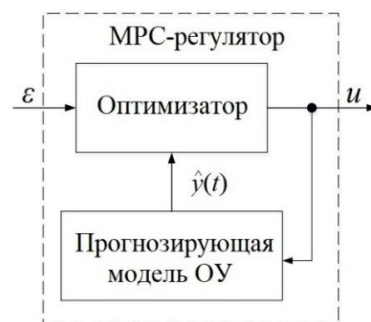


Рисунок 2 Структурная схема MPC-регулятора

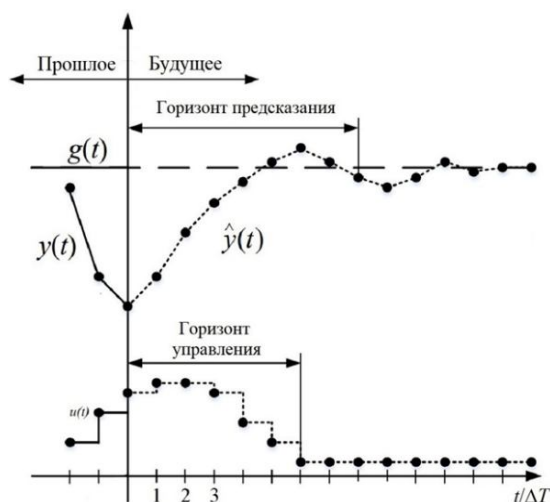


Рисунок 3 Принцип управления на основе MPC-подхода

После подачи на ОУ вычисленного оптимального управляющего воздействия  $u(t)$  на следующем шаге вся процедура повторяется заново с учетом вновь поступившей информации.

Для реализации MPC-подхода в пакете прикладных программ MATLAB имеется набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox для проектирования и моделирования MPC-регуляторов [11].

Покажем реализацию MPC-подхода для управления системами ОВК на примере приточной вентиляционной системы VAV (от английского названия Variable Air Volume — переменный объем воздуха) [13–15] учебной аудитории (рис. 4) в осенне-весенний период, которая поддерживает заданный температурный режим  $T(t)$  в помещении путем изменения объема подаваемого нагретого воздуха.

В рассматриваемой вентиляционной системе VAV изменение тепловой нагрузки помещения компенсируется изменением количества приточного воздуха  $G(t)$ , поступающего от центральной приточной вентиляционной установки при его постоянной температуре. Вентиляционная система VAV работает при общем значении расхода воздуха, меньшем, чем необходимо при суммарной максимальной тепловой нагрузке. Это обеспечивает снижение потребляемой энергии при сохранении заданного качества воздуха внутри помещения. Вентиляционная система VAV может быть полностью интегрирована с комплексной системой управления зданием BAS (Building Automation System), что обеспечивает пользователю здания возможность мониторинга и управления параметрами работы всей системы ОВК.

Основным элементом вентиляционной системы VAV является терминал VAV (регулятор или клапан VAV) [13–14], схема которого представлена на рисунке 5. Основной задачей терминала VAV является поддержание расхода воздуха в зависимости от необходимой потребности, величина которого определяется управляющим сигналом  $u(t)$ . Поддержание необходимого значения расхода обеспечивается положением дроссельной заслонки 1. Заданному значению расхода соответствует перепад давлений на дифференциальном манометре, установленном в воздуховоде 2. При отклонении перепада давлений от заданного значения электропривод изменяет положение дроссельной заслонки, тем самым поддерживая требуемое значение расхода.

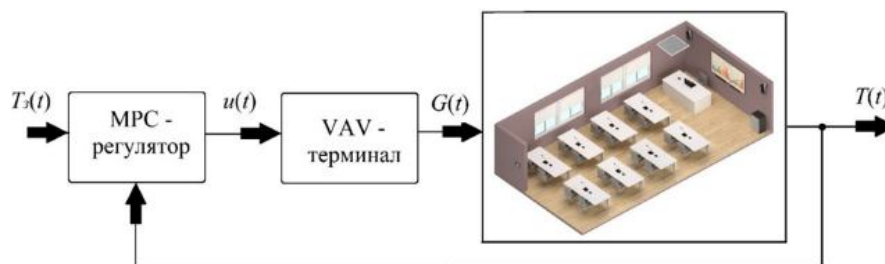
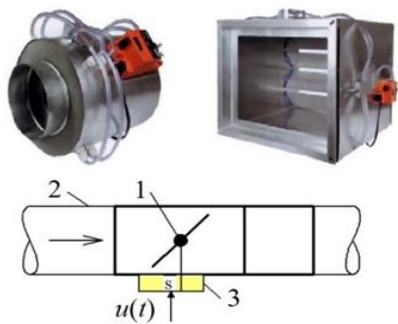


Рисунок 4 Схема вентиляционной системы VAV



1 — дроссельная заслонка; 2 — воздуховод;  
3 — электропривод дроссельной заслонки

Рисунок 5 Терминалы VAV для воздушных каналов круглого и прямоугольного сечения

Исследование вентиляционной системы VAV проводим по задающему воздействию — заданной температуре в помещении  $T_3(t)$ . Предварительно известными методами [7, 8] на основе экспериментальных исследований выполнена параметрическая идентификация вентиляционной системы как ОУ температурой воздуха в помещении  $T(t)$  по поступающему в него массовому расходу нагретого воздуха  $G(t)$ . Для идентификации математической модели использованы возможности блока программных инструментов System Identification Toolbox пакета прикладных программ MATLAB. Получена следующая передаточная функция для температуры в помещении по массовому расходу воздуха для безразмерных переменных:

$$W_{TG}(s) = \frac{e^{-54s}}{78s^2 + 320s + 1}, \quad (2)$$

где  $s$  — переменная Лапласа.

Передаточная функция (2) представляет собой произведение двух типовых звеньев: апериодического звена 2-го порядка и звена запаздывания со временем  $\tau = 54$  с. Передаточная функция (2) составлена для безразмерных отклонений переменных.

Для моделирования вентиляционной системы VAV в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, представленная на

рисунке 6. Для синтеза МРС-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox. Для этого предварительно в командной строке MATLAB была задана передаточная функция ОУ:

```
>> plant=tf(1,[78 320 1],'IODelay',54);
```

Далее следующими командами соответственно спроектирован МРС-регулятор и заданы его ограничения:

```
>> mpcobj=mpc(plant, 10, 100, 30);  
>> mpcobj.MV=struct('Min',0,'Max',2);
```

Период квантования задан  $\Delta T = 10$  с, горизонт прогнозирования  $n_p = 100$  шагов, горизонт управления  $n_c = 30$  шагов. Минимальное значение управляющего сигнала  $u(t)$  равно 0, что соответствует полностью закрытому терминалу VAV, а максимальное значение равно 2, что соответствует максимальному количеству воздуха на выходе терминала VAV, которое в 2 раза превышает среднее значение расхода приточного нагретого воздуха  $G(t)$ , поступающего в помещение от центральной вентиляционной системы.

Результаты расчета переходных процессов в вентиляционной системе VAV показаны на рисунке 7. Здесь сопоставлены переходные процессы в системе без регулятора, с ПИД-регулятором, оптимизированным по быстродействию, и МРС-регулятором. Сравнение результатов показывает, что использование МРС-регулятора позволяет совершенствовать процесс регулирования теплового режима в помещении. Во-первых, существенно повышается быстродействие системы. Так, длительность переходного процесса системы без регулятора составляет 1008 с (16,8 мин), с ПИД-регулятором 512 с (8,5 мин), с МРС-регулятором 262 с (4,2 мин). Во-вторых, при использовании МРС-регулятора практически отсутствует перерегулирование системы, что не приводит к «перетопам», когда температура в помещении поднимается выше заданной, что исключает дополнительные потери тепла.

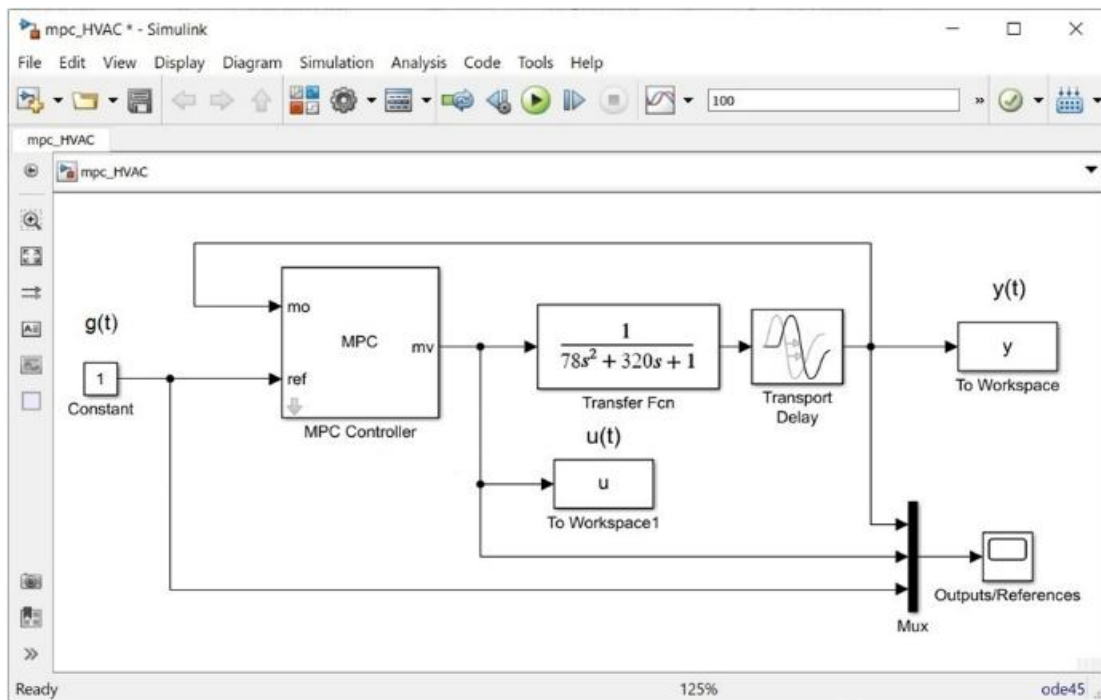


Рисунок 6 Блок-диаграмма системы в среде Simulink

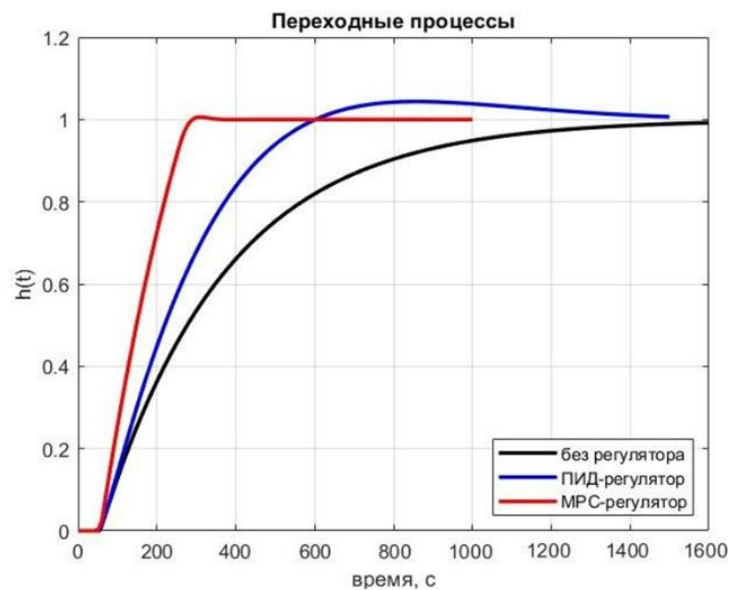


Рисунок 7 Переходные процессы в вентиляционной системе VAV

Следует отметить, что вышеизложенную методику управления системами ОВК на основе MPC-подхода можно обобщить в многомерные САУ и системы с несколькими задающими и возмущающими воздействиями.

Таким образом, в работе обоснованы возможности совершенствования процессов регулирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования использованием адаптивного прогнозирующего управления, показано на его основе повы-

шение качества регулирования приточной вентиляционной системы.

С этой целью детально показана реализация MPC-подхода, изложен принцип управления с использованием прогнозирующей модели, отмечены особенности управления с использованием MPC-регулятора. Также рассмотрена структура регулятора и критерий выбора оптимальных значений управляющего сигнала.

Показана реализация MPC-подхода для управления системами ОВК на примере приточной вентиляционной системы VAV учебной аудитории. Для моделирования вентиляционной системы VAV в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, для

чего была использована предварительно установленная передаточная функция системы как ОУ. Для синтеза MPC-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox пакета MATLAB.

Проведено исследование переходных процессов в вентиляционной системе VAV, сопоставлены переходные процессы в системе без регулятора, с ПИД-регулятором и MPC-регулятором. Сравнение результатов показало, что использование MPC-регулятора позволяет совершенствовать процессы регулирования теплового режима в помещении и повысить качество регулирования приточной вентиляционной системы.

### Библиографический список

1. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика [Текст] / В. А. Ананьев, Л. Н. Балуева, А. Д. Гальперин [и др.]. — М. : Евроклимат, 2003. — 416 с.
2. Sokolov, V. Diffusion of circular source in the channels of ventilation systems [Text] / V. Sokolov // *Advances in engineering research and application. ICERA 2018. Lecture notes in networks and systems*. — 2019. — Vol. 63. — P. 278–283.
3. Соколов, В. І. Гідравліка [Текст] / В. І. Соколов, О. С. Кроль, О. В. Єніфанова. — Северодонецьк : СХУ ім. В. Даля, 2017. — 160 с.
4. Sokolov, V. Criteria analysis of diffusion processes in channels of industrial ventilation systems [Text] / V. Sokolov // *Proceedings of the 7th international conference on industrial engineering. ICIE 2021. Lecture notes in mechanical engineering*. — 2022. — Vol. 2. — P. 725–731.
5. Свистунов, В. М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства [Текст] / В. М. Свистунов, Н. К. Пушняков. — СПб. : Политехника, 2007. — 423 с.
6. Sokolov, V. Increased measurement accuracy of average velocity for turbulent flows in channels of ventilation systems [Text] / V. Sokolov // *Proceedings of the 6th international conference on industrial engineering. ICIE 2020. Lecture notes in mechanical engineering*. — 2021. — Vol. 2. — P. 1182–1190.
7. Теория автоматического управления [Текст] : учебник / Е. Э. Страшинин, А. Д. Заколяпин, С. П. Трофимов [и др.]. — Екатеринбург : УФУ, 2019. — 456 с.
8. Лурье, Б. Я. Классические методы теории автоматического управления [Текст] / Б. Я. Лурье, П. Дж. Энрайт. — СПб. : БХВ-Петербург, 2004. — 640 с.
9. Надеждин, И. С. Системы управления нестационарным объектом на основе MPC-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой [Текст] / И. С. Надеждин, А. Г. Горюнов, Ф. Маненти // *Управление большими системами. Анализ и синтез систем управления*. — 2018. — Вып. 75. — С. 50–75.
10. Колодин, А. А. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирующей модели [Текст] / А. А. Колодин, В. В. Ёлиин // *Вест. Самар. гос. ун-та. Сер. : Технические науки*. — 2021. — Т. 29. — № 1. — С. 36–44.
11. Model predictive control toolbox [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.mathworks.com/help/mpc/>.
12. Марьясин, О. Ю. Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей [Текст] / О. Ю. Марьясин, А. С. Колодкина // *Вест. Самар. гос. ун-та. Сер. : Технические науки*. — 2017. — № 1 (53). — С. 122–132.

13. Судак, В. Системы VAV. Краткое описание / В. Судак, Я. Хендигер. — Краков : SMAU, 2009. — 80 с. ; То же [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://belimo.com.ua/files/VAV/VAV\\_book.pdf](http://belimo.com.ua/files/VAV/VAV_book.pdf).

14. Соколов, В. И. Дифузійні процеси в системах вентиляції [Текст] / В. И. Соколов, О. С. Кріль, О. В. Єніфанова. — Сєвєродонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2018. — 148 с.

15. Ратушняк, Г. С. Регулювання витрати аеродинамічних потоків в системах вентиляції та аспірації [Текст] : монографія / Г. С. Ратушняк, Р. В. Степанковський. — Вінниця : ВНТУ, 2015. — 112 с.

© Андрійчук В. Н.

© Соколов В. И.

© Андрійчук Н. Д.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ПГСА  
ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.,  
к.т.н., доц., зав. кафедрой ПС ДонГТИ Псюком В. В.*

*Статья поступила в редакцию 06.10.2022.*

**Andriychuk V. N., Doctor of Technical Sciences Sokolov V. I., Doctor of Technical Sciences  
Andriychuk N. D. (IBA and HCS of LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, vlad19790401@gmail.com)  
IMPROVING THE REGULATION QUALITY OF DRAW-IN AIR SYSTEM**

*The paper considers the issue of substantiating the possibility of improving the processes of regulation of heating, ventilation and air conditioning systems using adaptive predictive control, improving the regulation quality of draw-in air system on its basis. The principle of control using a predictive model is described, the features of control using an MPC-controller are noted, the structure of the controller and the criterion for choosing the optimal values of the control signal are considered. The implementation of the MPC-approach is shown on the example of the draw-in air system VAV of the classroom. A block diagram has been developed to simulate the ventilation system in the Simulink environment of the MATLAB application software package, and a set of software tools Model Predictive Control Toolbox has been used to synthesize the MPC-controller. A study of transients in the VAV ventilation system was conducted, transients in a system without a regulator, with a PID-controller and an MPC-controller were compared. The comparison of the results showed that the use of the MPC-controller allows improving the processes of regulating the thermal regime in the room and improving the regulation quality of draw-in air system.*

**Key words:** microclimate, regulator, ventilation system, temperature, transition process.