

Разработка математической модели системы вентиляции и кондиционирования воздуха и сравнение процесса управления с использованием ПИД-регулятора и управления скользящим режимом

М. Д. Нгуен✉, М. П. Белов, А. М. Белов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ haduna.hv@gmail.com

Аннотация. Построена нелинейная математическая модель системы вентиляции и кондиционирования воздуха, которая рассматривается как многовходовая многовыходная система управления. Рассмотрена задача синтеза линейных и нелинейных регуляторов для этой системы. Синтезирован нелинейный регулятор на основе метода скользящего режима управления и метода функций Ляпунова. Устойчивость системы управления с нелинейным регулятором исследуется методом функций Ляпунова. Для сравнения производительности с вышеуказанным регулятором в статье также построен линейный ПИД-регулятор. Представлены результаты сравнения с использованием вычислительной программы пакета MatLab SimuLink. Основное преимущество этих инструментов заключается в том, что среда моделирования обещает решать многомасштабные задачи, связанные со временем и пространством, обеспечивая при этом гибкую связь с моделями контроллеров. Полученные результаты моделирования управления с использованием ПИД-регуляторов и регуляторов скользящего режима в качестве основы для выбора наиболее оптимального метода управления реальными объектами.

Ключевые слова: система вентиляции и кондиционирования воздуха, ПИД-регулятор, регуляторы скользящего режима, функция Ляпунова, MatLab SimuLink

Для цитирования: Нгуен М. Д., Белов М. П., Белов А. М. Разработка математической модели системы вентиляции и кондиционирования воздуха и сравнение процесса управления с использованием ПИД-регулятора и управления скользящим режимом // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 7. С. 94–102. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-94-102.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Development of a Mathematical Model of Ventilation and Air Conditioning System and Comparison of the Control Process Using PID Controller and Sliding Mode Control

M. D. Nguyen✉, M. P. Belov, A. M. Belov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ haduna.hv@gmail.com

Abstract. In this article, a nonlinear mathematical model of the ventilation and air conditioning system is constructed, which is considered as a multi-input multi-output control system. The problem of synthesis of linear and nonlinear regulators for this system is considered. A nonlinear regulator is synthesized based on the sliding control mode method and the Lyapunov function method. The stability of a control system with a nonlinear regulator is investigated by the Lyapunov function method. To compare the performance with the above regulator, a linear PID regulator is also built in the article. In this paper presents the results of a comparison using the computing program package MatLab Simulink. The main advantage of these tools is that the simulation environment promises to solve multi-scale tasks related to time and space, while providing flexible communica-

tion with controller models. The obtained control simulation results using PID regulators and sliding mode regulators as the basis for choosing the most optimal control method for real objects.

Keywords: ventilation and air conditioning systems, PID regulator, sliding mode regulators, Lyapunov function, MatLab Simulink

For citation: Nguyen M. D., Belov M. P., Belov A. M. Development of a Mathematical Model of Ventilation and Air Conditioning System and Comparison of the Control Process Using PID Controller and Sliding Mode Control // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 94–102. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-94-102.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха – это нелинейные динамические системы, содержащие перекрестные связи, делающие модель объекта управления нелинейной. Процесс одновременного управления устройствами в системе для поддержания стабильности температуры и влажности представляет собой сложную задачу, особенно в условиях внешних воздействий окружающей среды, внутренних изменений или изменений параметров модели.

С быстрым развитием науки и техники постоянно исследуются и разрабатываются такие методы управления, как нечеткое управление [1]; адаптивное управление [2]; устойчивый контроль [3]; адаптивное управление компенсацией с использованием нейронных сетей [4]; управление скользящего режима [5]; адаптивное робастное управление [6]. Однако для повышения производительности системы по-прежнему необходим регулятор, устойчивый к возмущениям и адаптирующийся к неопределенным параметрам модели. В данной статье представлен процесс управления с применением регулятора скользящего режима для улучшения качества системы, ограничения влияния шума и изменения параметров модели. Результаты сравнения с линейным ПИД-регулятором выполнены на том же объекте управления с использованием расчетного инструмента MatLab Simulink.

Общее описание объекта управления. Основным объектом управления служит система вентиляции и кондиционирования воздуха. В настоящее время в мире используется множество методов моделирования для построения систем управления системы вентиляции и кондиционирования воздуха [7]. Основные компоненты системы (рис. 1) включают в себя системы вентиляции, увлажнения/осушения, отопления и трубопроводов (1 – регуляторы; 2 – приточные вентиляторы; 3 – увлажнитель; 4 – воздухопровода; 5 – нагреватель; 6 – помещение).

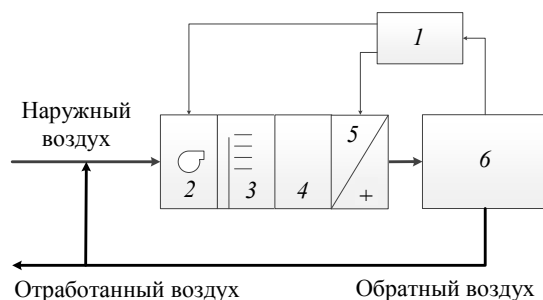


Рис. 1. Основные компоненты системы вентиляции и кондиционирования воздуха

Fig. 1. The main components of the ventilation and air conditioning system

Основными объектами регулирования в технологическом процессе служат система вентиляции и нагреватель (для многих тропических муссонных стран с высокой влажностью может потребоваться изучение регулирования производительности системы увлажнения/осушения). Блок-схема процесса управления представлена на рис. 2, где 1 – регуляторы; 2 – приточные вентиляторы; 3 – увлажнитель; 4 – нагреватель; 5 – помещение; T_{set} – заданная температура; d_{set} – заданный коэффициент влажности (количество влаги, содержащейся в 1 кг сухого воздуха (с. в.)); T_{h} – выходная температура воздуха в увлажнителе; d_{h} – коэффициент влажности воздуха в увлажнителе, кг/кг с. в.; T_{heat} – выходная температура воздуха в нагревателе; d_{heat} – коэффициент влажности воздуха в нагревателе, кг/кг с. в.; T_{room} – температура воздуха в помещении; d_{room} – коэффициент влаж-

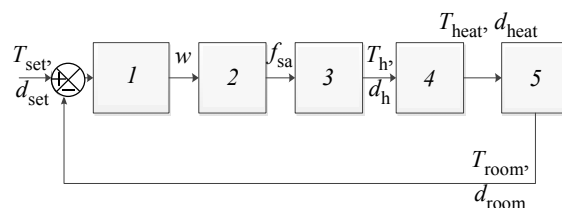


Рис. 2. Блок-схема процесса управления

Fig. 2. Block diagram of the management process

ности воздуха в помещении, кг/кг с. в.; f_{sa} – расход воздуха в системе вентиляции; w – скорость вращения двигателя вентилятора.

Разработка математической модели объекта управления. Два основных параметра управления – это мощность системы отопления Q_{heat} и расход воздуха в системе вентиляции f_{sa} .

Входная воздушная смесь (включая наружный воздух и рециркуляционный воздух), проходящая через систему увлажнения, будет «увлажнена» – будет увеличена масса водяного пара в воздушной смеси.

Математическая модель системы увлажнения построена на балансе массы и энергии, представленном в следующем уравнении:

$$c_h \left(\frac{\partial T_h}{\partial t} \right) = f_{sa} c_a (T_{sa} - T_h) + \alpha_h (T_{out} - T_h)$$

или

$$c_h \dot{T}_h(t) = f_{sa} c_a (T_{sa} - T_h(t)) + \alpha_h (T_{out} - T_h(t)), \quad (1)$$

где c_h – полная теплоемкость увлажнителя; c_a – удельная теплоемкость воздуха; $T_h(t)$ – температура воздуха в увлажнителе зависит от времени t ; α_h – общий коэффициент теплопередачи увлажнителя, кДж/(с · К); T_{out} , T_{sa} – температуры наружного и приточного воздуха соответственно.

Аналогично, скорость изменения влажности в помещении равна разнице между количествами водяного пара, добавленного в помещение и удаленного из него. Следовательно, уравнение баланса влажности можно записать в виде

$$v_{zh} \left(\frac{\partial d_h}{\partial t} \right) = f_{sa} (d_{sa} - d_h) + \frac{h(t)}{\rho_a}$$

или

$$v_{zh} \dot{d}_h(t) = f_{sa} (d_{sa} - d_h(t)) + \frac{h(t)}{\rho_a}, \quad (2)$$

где v_{zh} – объем увлажнителя; d_h – абсолютная влажность воздуха в увлажнителе, кг/кг с. в.; d_{sa} – абсолютная влажность приточного воздуха, кг/кг с. в.; $h(t)$ – коэффициент влажности воздуха, создаваемого в увлажнителе; ρ_a – плотность воздуха, кг/м³.

Через систему воздуховодов увлажненный воздух подается в систему отопления. В системе отопления воздушной смесью энергия соответствует мощности системы отопления. Согласно закону сохранения энергии имеем формулу для расчета мощности системы отопления Q_{heat} :

$$Q_{heat} = f_{sa} c_a \rho_a (T_2 - T_1), \quad (3)$$

где T_1 , T_2 – температура воздушной массы на входе в систему отопления на выходе из нее. Если пренебречь потерями тепла в системе трубопроводов, то имеем $T_1 = T_h$ и $T_2 = T_{heat}$.

Уравнение (3) можно переписать следующим образом:

$$T_{heat}(t) = \frac{Q_{heat}(t)}{f_{sa} c_a \rho_a} + T_h(t). \quad (4)$$

После этого процесса воздух подается в помещение.

Уравнение теплового баланса. Согласно уравнению энергетического баланса системы, простое уравнение энергии для однозонной системы HVAC можно записать в виде уравнения [8]:

$$Q_{sa} + Q_{room} = Q_{out} + Q_{acc} + Q_{loss},$$

где Q_{sa} – тепло от приточного воздуха; Q_{room} – тепло, выделяемое людьми, оборудованием и т. д.; Q_{out} – потери тепла с отводимым воздухом из помещения; Q_{acc} – тепло во внутреннем пространстве; Q_{loss} – тепло, излучаемое из помещения наружу.

Из первого закона термодинамики и сохранения энергии (любое изменение энергии ΔQ пропорционально изменению температуры ΔT) имеем следующие уравнения теплопроводности:

$$Q_{sa} = f_{sa} c_a \rho_a T_{sa},$$

$$Q_{out} = f_{sa} c_a \rho_a T_{in},$$

$$Q_{acc} = V_z c_a \rho_a \frac{dT_{in}}{dt},$$

$$Q_{loss} = \frac{V_z c_a K}{3600} (T_{in} - T_{out}),$$

где V_z – объем помещения; K – кратность воздухообмена в час; T_{in} , T_{out} , T_{sa} – температура воздуха в помещении, на улице и приточного воздуха соответственно ($T_{sa} = T_{heat}$).

Из приведенных выше уравнений можно вывести общее уравнение:

$$V_z c_a \rho_a \frac{dT_{in}}{dt} = \frac{V_z c_a K}{3600} (T_{out} - T_{in}) + f_{sa} c_a \rho_a (T_{sa} - T_{in}) + Q_{room}. \quad (5)$$

Подставим T_{heat} из выражения (4) в (5), получим

$$V_z c_a \rho_a \dot{T}_{in}(t) = \frac{V_z c_a K}{3600} (T_{out} - T_{in}(t)) + f_{sa} c_a \rho_a (T_h(t) - T_{in}(t)) + Q_{heat}(t) + Q_{room}. \quad (6)$$

Уравнение баланса влажности:

$$V_z \left(\frac{\partial d_{in}}{\partial t} \right) = f_{sa} (d_h - d_{in}) + f_{out} K (d_{in} - d_{out}) + m \frac{q_p}{\rho_a}$$

или

$$V_z \dot{d}_{in}(t) = f_{sa} (d_h(t) - d_{in}(t)) + f_{out} K (d_{in}(t) - d_{out}) + m \frac{q_p}{\rho_a}, \quad (7)$$

где f_{out} – расход воздуха снаружи, м³/ч; d_h , d_{in} , d_{out} – абсолютная влажность приточного воздуха, воздуха в помещении и наружного соответственно, в кг/кг с. в.; m – количество человек в помещении; q_p – потери влаги человеком, кг/чел.

Из формул (1), (2), (6), (7) создадим систему уравнений:

$$\begin{cases} c_h \dot{T}_h(t) = f_{sa} c_a (T_{sa} - T_h(t)) + \alpha_h (T_{out} - T_h(t)); \\ V_{zh} \dot{d}_h(t) = f_{sa} (d_{sa} - d_h(t)) + \frac{h(t)}{\rho_a}; \\ V_z c_a \rho_a \dot{T}_{in}(t) = \frac{V_z c_a K}{3600} (T_{out} - T_{in}(t)) + f_{sa} c_a \rho_a (T_h(t) - T_{in}(t)) + Q_{heat}(t) + Q_{room}; \\ V_z \dot{d}_{in}(t) = f_{sa} (d_h(t) - d_{in}(t)) + f_{out} K (d_{in}(t) - d_{out}) + m \frac{q_p}{\rho_a}. \end{cases} \quad (8)$$

Пусть $x_1 = T_h$; $x_2 = d_h$; $y_1 = T_{in}$; $y_2 = d_{in}$; $u_1 = Q_{heat}$; $u_2 = f_{sa}$, где x_1 , x_2 – переменные состояния; u_1 , u_2 – входные переменные; y_1 , y_2 – выходные переменные.

Уравнение (8) можно сократить следующим образом:

$$\begin{cases} c_h \dot{x}_1 = u_2 c_a (T_{sa} - x_1) + \alpha_h (T_{out} - x_1); \\ V_{zh} \dot{x}_2 = u_2 (d_{sa} - x_2) + \frac{h(t)}{\rho_a}; \\ V_z c_a \rho_a \dot{y}_1 = \frac{V_z c_a K}{3600} (T_{out} - y_1) + u_2 c_a \rho_a (x_1 - y_1) + u_1 + Q_{room}; \\ V_z \dot{y}_2 = u_2 (x_2 - y_2) + f_{out} K (y_2 - d_{out}) + m \frac{q_p}{\rho_a}. \end{cases} \quad (9)$$

Преобразуем и упростим уравнение (9) следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{\alpha_h}{c_h} x_1 + \frac{c_a}{c_h} (T_{sa} - x_1) u_2 + \frac{\alpha_h}{c_h} T_{out}; \\ \dot{x}_2 = \frac{(d_{sa} - x_2)}{V_{zh}} u_2 + \frac{h(t)}{\rho_a V_{zh}}; \\ \dot{y}_1 = \frac{-K}{3600 \rho_a} y_1 + \frac{x_1 - y_1}{V_z} u_2 + \frac{K T_{out}}{3600 \rho_a} + \frac{u_1}{V_z c_a \rho_a} + \frac{Q_{room}}{V_z c_a \rho_a}; \\ \dot{y}_2 = \frac{f_{out} K}{V_z} y_2 + \frac{x_2 - y_2}{V_z} u_2 + m \frac{q_p}{\rho_a V_z} - \frac{f_{out} K}{V_z} d_{out}. \end{cases} \quad (10)$$

Введем обозначения (x , u – определено ранее; a , f – иррациональные числа, рассчитываются по формуле ниже):

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{\alpha_h}{c_h}, \quad a_2 = \frac{c_a}{c_h}, \quad a_3 = T_{sa}, \quad f_1 = \frac{\alpha_h}{c_h} T_{out}, \\ a_4 &= \frac{d_{sa}}{V_{zh}}, \quad a_5 = -\frac{1}{V_{zh}}, \quad f_2 = \frac{h(t)}{\rho_a V_{zh}}, \\ a_6 &= \frac{-K}{3600 \rho_a}, \quad a_7 = \frac{1}{V_z}, \quad a_8 = \frac{1}{V_z c_a \rho_a}, \\ f_3 &= \frac{K T_{out}}{3600 \rho_a} + \frac{Q_{room}}{V_z c_a \rho_a}, \\ a_9 &= \frac{f_{out} K}{V_z}, \quad f_4 = m \frac{q_p}{\rho_a V_z} - \frac{f_{out} K}{V_z} d_{out}. \end{aligned}$$

Тогда уравнение (10) можно сократить до следующего:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_1 + a_2 (a_3 - x_1) u_2 + f_1; \\ \dot{x}_2 = (a_4 + a_5 x_2) u_2 + f_2; \\ \dot{y}_1 = a_6 y_1 + a_7 (x_1 - y_1) u_2 + a_8 u_1 + f_3; \\ \dot{y}_2 = a_9 y_2 + a_7 (x_2 - y_2) u_2 + f_4. \end{cases} \quad (11)$$

Используя программное обеспечение MatLab Simulink для моделирования математической модели, получаем модель объекта управления.

Построение моделей регуляторов. Проектирование регулятора скользящего режима. Управление скользящим режимом – это классический, простой и более эффективный метод нелинейного управления [9]. Управление скользящим режимом часто используется во многих отраслях промышленности автомобилестроения, авиационной технике, автоматизации, робототехнике и т. д. Благодаря

точной регулировке движения системы такой метод управления помогает повысить эффективность и обеспечить безопасность при эксплуатации.

Управление скользящим режимом часто осуществляется с помощью контроллеров и датчиков для мониторинга и регулировки движения раздвижной системы. На основе информации, полученной от датчиков, контроллер рассчитывает и применяет команды управления для регулировки движения раздвижной системы. В промышленности он используется для удовлетворения конкретных требований производственного или операционного процесса, в области автоматизации – для управления положением и движением робота, в авиационной технике – для улучшения возможностей управления и регулировки воздушных судов.

Основной целью управления скользящим режимом служит повышение эксплуатационных характеристик и обеспечение безопасности эксплуатации. Для каждого конкретного применения они могут иметь свои особенности и требования – точность, скорость, долговечность, возможность регулировки и т. п. Технологии и методы контроля проскальзывания постоянно совершенствуются в соответствии со строгими требованиями современного промышленного применения.

Разработка регулятора управления скользящим режимом для вышеупомянутого объекта: Пусть $e_2 = y_2 - y_{2s}$, где y_{2s} – заданное значение y_2 , тогда, учитывая (11), имеем:

$$\dot{e}_2 = \dot{y}_2 - \dot{y}_{2s} = a_9 y_2 + a_7(x_2 - y_2)u_2 + f_4 - \dot{y}_{2s}. \quad (12)$$

Выбираем функцию Ляпунова V_2 , обладающую свойствами $V_2 = \frac{e_2^2}{2} > 0$, производная которой

$$\dot{V}_2 = e_2 \dot{e}_2 = e_2 [a_9 y_2 + a_7(x_2 - y_2)u_2 + f_4 - \dot{y}_{2s}]. \quad (13)$$

Для достижения $e_2 \rightarrow 0$ выбираем управляющий сигнал таким образом, чтобы $\dot{V}_2 < 0$.

Выбираем положительные числа K_2 , β_2 , чтобы удовлетворить условию: $K_2 > 0$ и $\beta_2 > |f_{4\max}| > 0$, где $f_{4\max}$ – максимальное значение f_4 . Устанавливаем

$$\dot{V}_2 = -K_2 e_2^2. \quad (14)$$

Уравнение (12) можно записать как

$$\dot{e}_2 = a_9 y_2 + a_7(x_2 - y_2)u_2 + \beta_2 \text{tg}(e_2) - \dot{y}_{2s}. \quad (15)$$

Из (13)–(15) имеем:

$$a_9 y_2 + a_7(x_2 - y_2)u_2 + \beta_2 \text{tg}(e_2) - \dot{y}_{2s} = -K_2 e_2. \quad (16)$$

Тогда:

$$u_2 = \frac{-a_9 y_2 + \dot{y}_{2s} - K_2 e_2 - \beta_2 \text{tg}(e_2)}{a_7(x_2 - y_2)}. \quad (17)$$

Подставим (17) в (13) и получим

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= e_2 \dot{e}_2 = e_2 (-K_2 e_2 - \beta_2 \tanh(e_2) + f_4) = \\ &= -K_2 e_2^2 - \beta_2 |e_2| + e_2 f_4. \end{aligned}$$

Имеем $e_2 f_4 \leq e_2 |f_4| \leq \beta_2 |e_2|$, следовательно, $\dot{V}_2 < 0 \Rightarrow e_2 \rightarrow 0$.

После того как нашли u_2 , переходим к поиску u_1 .

Пусть $e_1 = y_1 - y_{1s}$, где y_{1s} – заданное значение y_1 . Тогда:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{y}_1 - \dot{y}_{1s} = a_6 y_1 + \\ &+ a_7(x_1 - y_1)u_2 + a_8 u_1 + f_3 - \dot{y}_{1s}. \end{aligned} \quad (18)$$

Выбираем функцию Ляпунова V_1 , обладающую свойствами $V_1 = \frac{e_1^2}{2} > 0$, производная которой

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 = e_1 [a_6 y_1 + \\ &+ a_7(x_1 - y_1)u_2 + a_8 u_1 + f_3 - \dot{y}_{1s}]. \end{aligned} \quad (19)$$

Для достижения $e_1 \rightarrow 0$ выбираем управляющий сигнал таким образом, чтобы $\dot{V}_1 < 0$.

Выбираем положительные числа K_1 , β_1 , чтобы удовлетворить условию: $K_1 > 0$ и $\beta_1 > |f_{3\max}| > 0$, где $f_{3\max}$ – максимальное значение f_3 . Устанавливаем

$$\dot{V}_1 = -K_1 e_1^2. \quad (20)$$

Уравнение (16) можно записать как

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= a_6 y_1 + a_7(x_1 - y_1)u_2 + \\ &+ a_8 u_1 + \beta_1 \text{tg}(e_1) - \dot{y}_{1s}. \end{aligned} \quad (21)$$

Из (19)–(21) имеем

$$\begin{aligned} a_6 y_1 + a_7(x_1 - y_1)u_2 + a_8 u_1 + \\ + \beta_1 \text{tg}(e_1) - \dot{y}_{1s} = -K_1 e_1. \end{aligned} \quad (22)$$

Тогда

$$\begin{aligned} u_1 &= \\ &= \frac{-a_6 y_1 + \dot{y}_{1s} - K_1 e_1 - \beta_1 \text{tg}(e_1) - a_7(x_1 - y_1)u_2}{a_8}. \end{aligned} \quad (23)$$

Подставим (23) в (19) и получим

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 = e_1 (-K_1 e_1 - \beta_1 \tanh(e_1) + f_3) = \\ &= -K_1 e_1^2 - \beta_1 |e_1| + e_1 f_3. \end{aligned}$$

Имеем $e_1 f_3 \leq e_1 |f_3| \leq \beta_1 |e_1|$, следовательно,
 $\dot{V}_1 < 0 \Rightarrow e_1 \rightarrow 0$.

На основе (17) и (23) можно построить модель скользящего регулятора с помощью программного обеспечения MatLab Simulink.

Проектирование ПИД-регуляторов. ПИД-регуляторы имеют несложную конструкцию и просты в использовании, поэтому они широко используются для управления объектами по принципу обратной связи [10]. ПИД-регулятор отвечает за доведение погрешности $e(t)$ системы до 0, чтобы процесс перехода удовлетворял основным требованиям к его качеству. ПИД-регуляторы описываются моделью ввода-вывода (рис. 3).

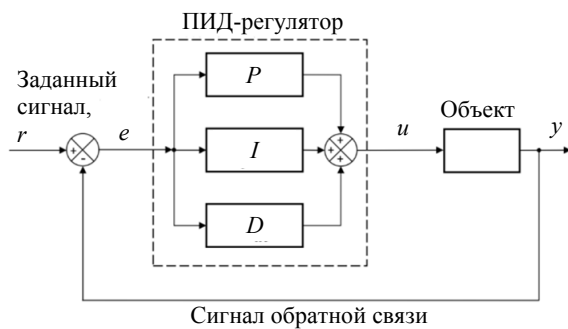


Рис. 3. Схема ПИД-регулятора
 Fig. 3. The scheme of the PID controller

Выходной сигнал ПИД-регулятора формируется на программном уровне в результате математических вычислений с тремя слагаемыми (P, I, D):

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt},$$

где $e(t)$ – входной сигнал; $u(t)$ – выходной сигнал; K_P – коэффициент усиления; T_I – постоянная интегрирования; T_D – дифференциальная константа.

Из приведенной выше модели ввода-вывода получаем передаточную функцию ПИД-регулятора:

$$R(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right).$$

В MatLab Simulink доступен набор инструментов для ПИД-регулятора, так как мы не будем разрабатывать модель для него.

Результаты моделирования процесса управления. Применительно к объекту управления используются два метода управления: с использованием регулятора скользящего режима; с использованием 2-традиционных ПИД-регуляторов. Схема моделирования в MatLab Simulink показана на рис. 4, где 1 – заданное значение; 2 – результирующее значение.

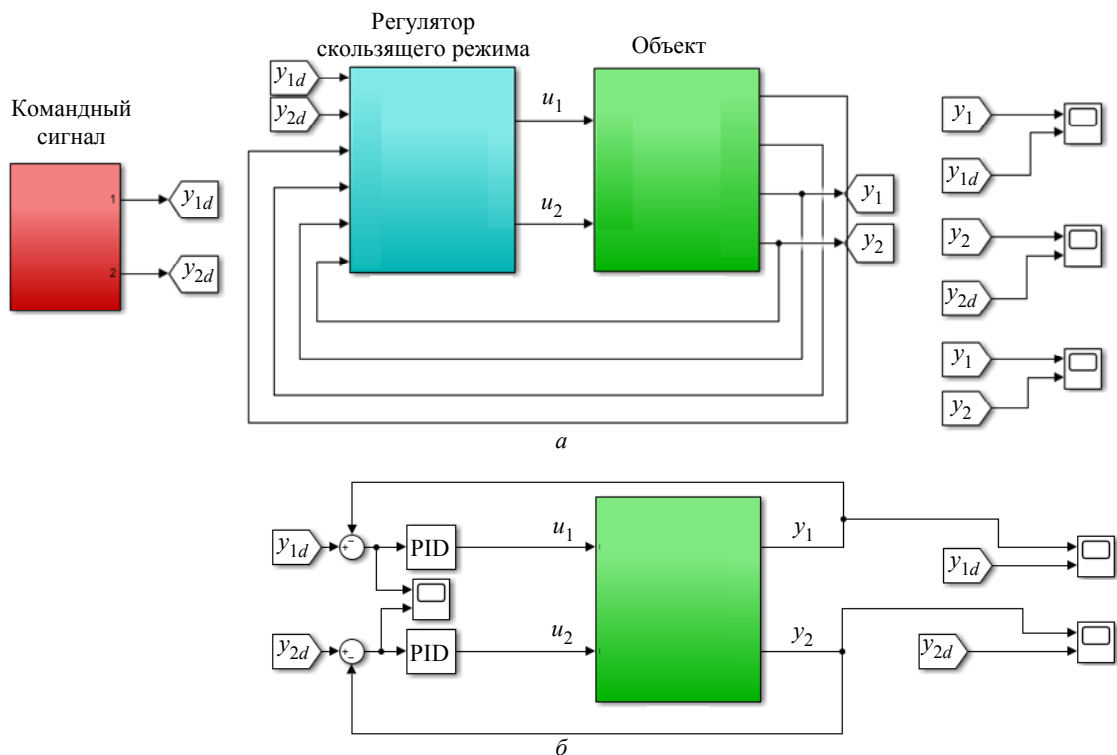


Рис. 4. Схема моделирования: а – с использованием регулятора скользящего режима;
 б – с использованием ПИД-регуляторов

Fig. 4. Simulation scheme: а – using a sliding mode controller; б – using PID controllers

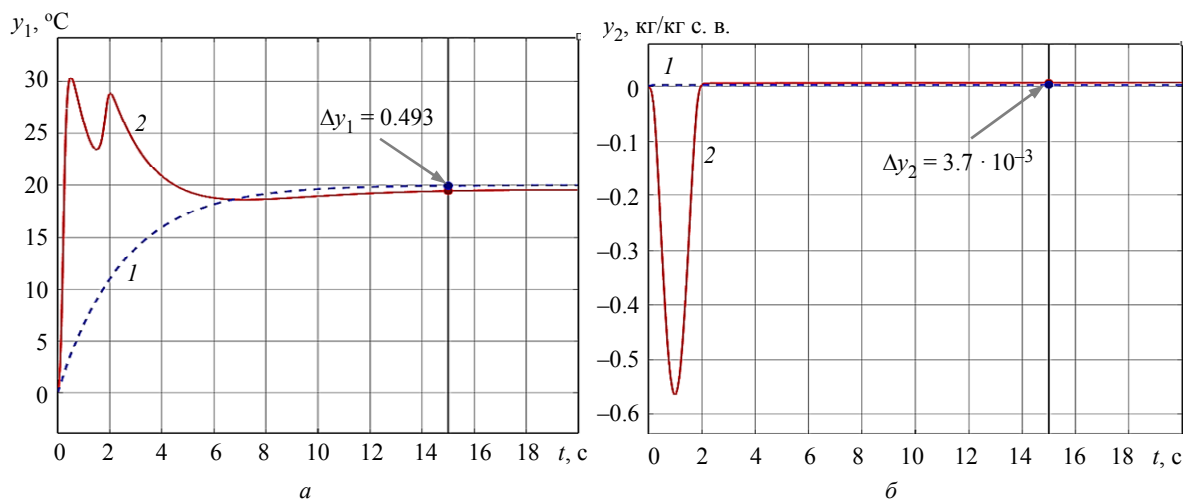


Рис. 5. Результаты моделирования регулирования основных параметров с использованием ПИД-регулятора: а – температура; б – влажность

Fig. 5. Simulation results of the main parameters using PID-controller: а – temperature; б – humidity

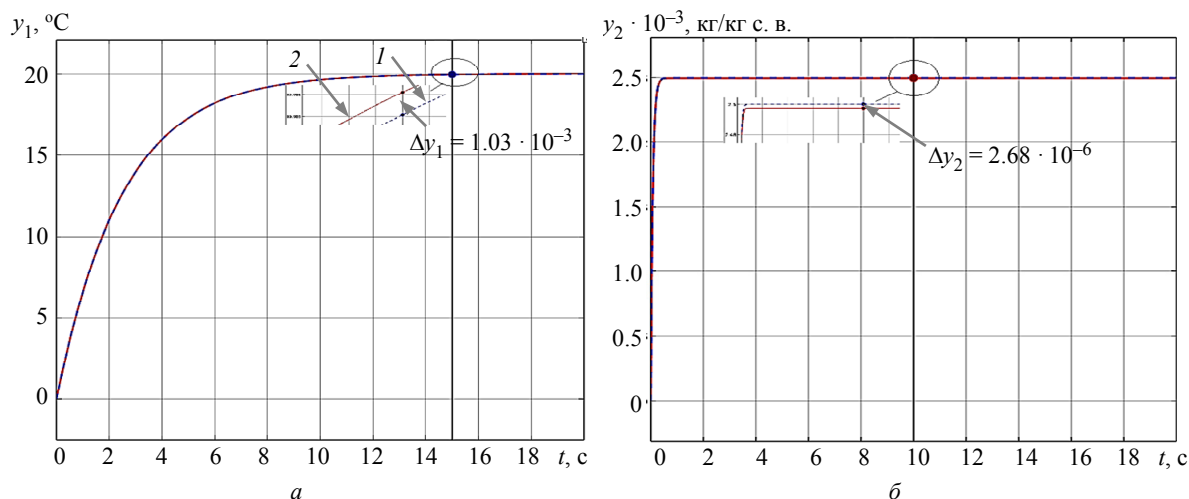


Рис. 6. Результаты моделирования регулирования основных параметров с использованием регулятора скользящего режима: а – температура; б – влажность

Fig. 6. Simulation results of the main parameters using a sliding mode controller: а – temperature; б – humidity

Результаты моделирования с использованием ПИД-регулятора представлены на рис. 5, где 1 – заданное значение; 2 – результирующее значение. В ходе моделирования мы видим, что погрешность для температуры составляет $0.493\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\sim 2.45\%$), в то время как погрешность абсолютной влажности – $3.7 \cdot 10^{-3}\text{ кг/кг с. в.}$ ($\sim 14\%$).

Результаты моделирования с использованием регулятора скользящего режима показаны на рис. 6. В ходе моделирования видно, что погрешность для температуры составляет $1.03 \cdot 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\sim 0.05\%$), в то время как погрешность абсолютной влажности – $2.68 \cdot 10^{-6}\text{ кг/кг с. в.}$ ($\sim 0.12\%$).

Заключение. В данной статье была проанализирована и построена математическая модель объекта управления, а также построена модель

скользящего управления для вышеуказанного объекта. Представлены результаты моделирования с использованием MatLab Simulink при управлении системой двумя способами – с использованием традиционного регулятора и регулятора управления скользящим режимом. Этот традиционный ПИД-регулятор имеет некоторые ограничения: когда объект управления нелинейный или параметры объекта меняются со временем, объект трудно точно определить по математической модели, параметры не могут быть автоматически скорректированы для адаптации к изменившимся условиям. Отсюда видно, что регулятор управления скользящим режимом дает лучшие результаты, а погрешность значительно меньше требуемого значения уставки.

Список литературы

1. Chong Ch., Xingqiao L. Application of fuzzy control in multi motor tension control system // Intern. Conf. on Intelligent System Design and Engin. Appl. Changsha, China: IEEE, 2010. doi: 10.1109/ISDEA.2010.108.
2. Robust gain-scheduled control of winding systems / H. Koc, D. Knittel, M. de. Mathelin, G. Abba // Proc. of 39th IEEE Conf. Decision and Control. Sidney, Australia: IEEE, 2000. Vol. 4. P. 4116–4119. doi: 10.1109/CDC.2000.912360.
3. No-tension sensor closed loop control method with adaptive PI parameters for two-motor winding system / Zh. Wang, H. Nan, T. Shi, Q. Geng, Ch. Xia // Math. Problems in Engin. 2018. P. 1–14. doi: 10.1155/2018/1851845.
4. Tension control for multi-span web transport systems with roll inertia compensation using RBF neural network / Thi Ly Tong, Th. T. Nguyen, D. D. Minh, D. H. Nguyen, T. L. Nguyen // Measurement, Control and Automation. 2021. Vol. 2, no. 1. P. 8–17.
5. Nonlinear sliding-mode control of a multi-motor web-winding system without tension sensor / N. R. Abjadi, J. Soltani, J. Askari, G. R. Arab Markadeh // IET Control Theory Appl. 2009. Vol. 3, iss. 4. P. 419–427. doi: 10.1049/iet-cta.2008.0118.
6. Нгуен З. Х., Путов В. В., Шелудько В. Н. Модифицированные алгоритмы адаптивного робастного управления с эталонной моделью нелинейными объектами в условиях неопределенности и неизвестных возмущений // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 90–100. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-90-100.
7. Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review / Z. Afroz, GM Shafiullah, T. Urmee, G. Higgins // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2017. Vol. 83(C). P. 64–84. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.044.
8. Imal M. A new system design for energy management in HVAC Control Systems for textile plants // Acta Phys. Polonica A. 2016. Vol. 130, no. 1. P. 245–248. doi: 10.12693/APhysPolA.130.245.
9. Minh N. D. Adaptive sliding control of nonlinear dynamic systems: diss. d-ra n. Ho Chi Minh. 2012. URL: https://grad.hcmut.edu.vn/hv/download/LATS/50006106/TOM_TAT_LATS_NDMinh.pdf (дата обращения: 10.04.25).
10. Tran Thi Nhu Ha, Tran H., Duong V. Kh. Design of PID controller based on Ziegler-Nichols method for ball and plate system // J. of Food Sci. and Technol. 2022. P. 213–221. URL: <https://vjol.info.vn/index.php/hufi/article/download/72592/61545> (дата обращения: 10.04.25).

Информация об авторах

Нгуен Минь Дык – аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: haduna.hv@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-5917-2675>

Белов Михаил Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: milesa58@mail.ru

Белов Александр Михайлович – аспирант, старший преподаватель кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: sana19976@mail.ru

References

1. Chong Ch., Xingqiao L. Application of fuzzy control in multi motor tension control system // Intern. Conf. on Intelligent System Design and Engin. Appl. Changsha, China: IEEE, 2010. doi: 10.1109/ISDEA.2010.108.
2. Robust gain-scheduled control of winding systems / H. Koc, D. Knittel, M. de. Mathelin, G. Abba // Proc. of 39th IEEE Conf. Decision and Control. Sidney, Australia: IEEE, 2000. Vol. 4. P. 4116–4119. doi: 10.1109/CDC.2000.912360.
3. No-tension sensor closed loop control method with adaptive PI parameters for two-motor winding system / Zh. Wang, H. Nan, T. Shi, Q. Geng, Ch. Xia // Math. Problems in Engin. 2018. P. 1–14. doi: 10.1155/2018/1851845.
4. Tension control for multi-span web transport systems with roll inertia compensation using RBF neural network / Thi Ly Tong, Th. T. Nguyen, D. D. Minh, D. H. Nguyen, T. L. Nguyen // Measurement, Control and Automation. 2021. Vol. 2, no. 1. P. 8–17.
5. Nonlinear sliding-mode control of a multi-motor web-winding system without tension sensor / N. R. Abjadi, J. Soltani, J. Askari, G. R. Arab Markadeh // IET Control Theory Appl. 2009. Vol. 3, iss. 4. P. 419–427. doi: 10.1049/iet-cta.2008.0118.
6. Nguen Z. H., Putov V. V., Shelud'ko V. N. Modificirovannye algoritmy adaptivnogo robastnogo upravleniya s jetalonnoj model'ju nelinejnymi ob#ektami v uslovijah neopredelennosti i neizvestnyh vozmushhenij //

Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2025. Т. 18, № 2. С. 90–100. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-90-100. (In Russ.).

7. Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review / Z. Afroz, GM Shafiullah, T. Urmee, G. Higgins // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2017. Vol. 83(C). P. 64–84. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.044.

8. Imal M. A new system design for energy management in HVAC Control Systems for textile plants // Acta Phys. Polonica A. 2016. Vol. 130, no. 1. P. 245–248. doi: 10.12693/APhysPolA.130.245.

9. Minh N. D. Adaptive sliding control of nonlinear dynamic systems: diss. d-ra n. Ho Chi Minh. 2012. URL: https://grad.hcmut.edu.vn/hv/download/LATS/50006106/TOM_TAT_LATS_NDMinh.pdf (data obraschenija: 10.04.25).

10. Tran Thi Nhu Ha, Tran H., Duong V. Kh. Design of PID controller based on Ziegler-Nichols method for ball and plate system // J. of Food Sci. and Technol. 2022. P. 213–221. URL: <https://vjol.info.vn/index.php/hufi/article/download/72592/61545> (data obraschenija: 10.04.25).

Information about the authors

Nguyen Minh Duc – postgraduate student, Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: haduna.hv@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-5917-2675>

Mikhail P. Belov – Dr Sci. (Eng.), Professor, Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: milesa58@mail.ru

Alexander M. Belov – postgraduate student, Senior lecturer, Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: sana19976@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.03.2025; принята к публикации после рецензирования 21.05.2025; опубликована онлайн 29.09.2025.

Submitted 13.03.2025; accepted 21.05.2025; published online 29.09.2025.
