

Совершенствование отопительно-вентиляционных систем коррекцией процессов регулирования

Рецензия эксперта на статью получена
08.04.2026 [The expert review of the article
was received on April 8, 2026]

Отопительно-вентиляционные системы (ОВС) в последнее время получили широкое распространение для обеспечения теплового режима зданий и сооружений [1–3]. ОВС также называют системами воздушного отопления.

ОВС являются современными системами отопления помещений, в которых роль теплоносителя выполняет воздух, в отличие от традиционных систем радиаторного отопления, где теплоносителем является жидкость. Малая тепловая инерционность ОВС обеспечивает такие основные преимущества воздушного отопления, как быстрый прогрев помещений, равномерное распределение тепла без холодных зон, а также возможность зонирования теплового режима и индивидуальной регулировки температуры в отдельных помещениях. В тёплый период года ОВС могут осуществлять кондиционирование воздуха.

Дальнейшее расширение использования отопительно-вентиляционных систем в современных условиях требует повышения их эффективности. Важным резервом повышения эффективности ОВС является сокращение потребляемой мощности за счёт снижения потерь энергии, связанных с процессами регулирования аэротермодинамических характеристик системы. Это может быть достигнуто разработкой систем автоматического управления (САУ), обеспечивающих улучшение показателей качества регулирования ОВС на основе алгоритмов и методов оптимального управления [2, 4].

В качестве примера на рис. 1а показана функциональная схема САУ воздушным отоплением на базе системы приточной вентиляции с калорифером и регулятором температуры (РТ). Заданный темпе-

ратурный режим в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения контролируется датчиком температуры (ДТ).

Задача САУ — устойчиво поддерживать заданное значение регулируемой величины в зависимости от внешних воздействий или изменять её по определённому закону. Кроме устойчивости, каждая САУ должна обеспечивать определённые качественные показатели процесса регулирования [4, 5]. Качество процесса регулирования обычно оценивается по переходной характеристике $h(t)$. Переходная характеристика системы отражает процесс изменения регулируемой переменной во времени при строго определённой величине возмущающих $f(t)$ или задающих воздействий $g(t)$. Для изучения переходной характеристики применяют ступенчатое воздействие.

Основными показателями качества регулирования САУ являются: установившаяся ошибка; время переходного процесса (время регулирования); перерегулирование; колебательность процесса [5, 6]. На практике часто требования к качеству работы САУ задаются не в виде величин отдельных показателей качества, а в виде характера реализации оптимального режима регулирования. Наиболее распространёнными являются три вида таких процессов: аperiodический; с 20%-м перерегулированием; с минимальным интегральным показателем качества.

Рассматривая системы ОВС как объект автоматического управления, в общем случае в качестве управляющего сигнала следует принимать изменение тепловой мощности, в частных случаях этим параметром может быть температура теплоносителя или его расход, температура или расход приточного воздуха и т.п.

УДК 697. Научная специальность: 2.1.3.

Совершенствование отопительно-вентиляционных систем коррекцией процессов регулирования

Владимир Ильич Соколов, д.т.н., профессор; Оксана Александровна Малыгина, к.т.н., доцент, Луганский государственный университет имени Владимира Даля (ЛГУ, г. Луганск)

Работа посвящена вопросу повышения качества регулирования отопительно-вентиляционных систем за счёт повышения быстродействия при допустимой величине перерегулирования и отсутствии ошибки регулирования. Предложено введение в систему интегрального регулятора температуры приточного (рабочей) зоне обслуживаемого помещения. Получена передаточная функция системы, установлены выражения для определения её параметров, а также предложена методика расчёта переходной характеристики. Сделан вывод о возможности повышения качества регулирования отопительно-вентиляционных систем за счёт повышения быстродействия и отсутствия ошибки регулирования путём использования интегрального регулятора температуры приточного воздуха и гибкой обратной связи по температуре в рабочей зоне.

Ключевые слова: отопительно-вентиляционная система, переходной процесс, качество регулирования, интегрирующий регулятор, гибкая обратная связь.

UDC 697. Scientific specialty number: 2.1.3.

Improvement of heating-ventilating systems by correcting regulation processes

Vladimir I. Sokolov, Doctor of Technical Sciences, Professor; Oksana A. Malygina, PhD (Engineering), Associate Professor, Lugansk State University named after Vladimir Dal (LSU, Lugansk)

The article discusses improving the quality of regulation of heating and ventilation systems by increasing the speed of response while maintaining a permissible overshoot and avoiding control errors. To achieve this, the article proposes the introduction of an integral regulator for the supply air temperature, as well as a flexible temperature feedback in the significant (working) area of the serviced room. The article presents a structural diagram of an automatic air heating control system with an integral regulator and flexible feedback. The article defines the transfer function of the system as a second-order element, establishes expressions for determining its parameters, and proposes a method for calculating the transient response. The results show that the integral controller's time constant has a greater impact on the duration of the transient process, while the flexible feedback time constant affects the system's oscillation. The research was funded by the Russian Science Foundation Grant No. 26-19-00006.

Key words: heating-ventilating system, transition process, regulation quality, integral controller, flexible feedback.

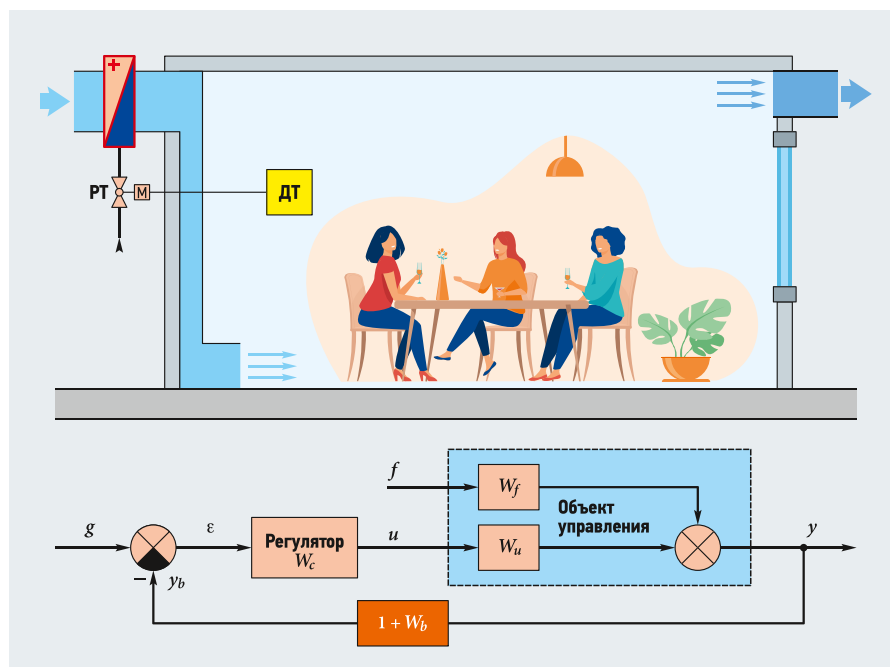


Рис. 1. САУ воздушным отоплением (а — функциональная схема, б — структурная схема)

Обычно в качестве регулируемой переменной рассматривается температура в значимой (рабочей) зоне помещения. Несмотря на сложность математического описания рабочих процессов в ОВС, они имеют общие черты [6, 7]. Данные системы инерционны и являются объектами с саморегулированием, то есть регулируемая переменная стабилизируется на некотором значении. Переходные процессы в них имеют не колебательный вид и характерное запаздывание.

Несмотря на известные подходы к идентификации математических моделей ОВС и методы повышения качества регулирования САУ, в настоящее время отсутствуют единые подходы к выбору для ОВС корректирующих звеньев и регуляторов, а также методики оценки оптимальных параметров их настройки.

Целью работы является исследование возможности повышения качества регулирования ОВС использованием интегрального регулятора и гибкой обратной связи, а также оценка рекомендуемых параметров настройки корректирующих звеньев.

При математическом описании САУ воздушным отоплением вполне уместным является применение методов с использованием передаточных функций, что позволяет представить взаимосвязь входных сигналов и выходных параметров составляющих элементов, отдельных частей и системы в целом.

Рассмотрим автоматическую ОВС как одномерную систему, имеющую объект управления с одной выходной величиной y . Считаем, что САУ воспринимает одно задающее воздействие x и одно возмущающее воздействие f . Тогда САУ воздушным отоплением с типовым регулятором можно представить обобщённой структурной

схемой согласно рис. 1. Здесь обозначены: g — задающее воздействие (уставка); y — выходная (регулируемая) величина (переменная); ε — ошибка управления, $\varepsilon = g - y$; f — возмущающее воздействие (возмущение); u — управляющее воздействие (сигнал управления); W_u — передаточная функция объекта управления по сигналу управления; W_f — передаточная функция объекта управления по возмущению; W_c — передаточная функция регулятора. В общем случае линия обратной связи может содержать дополнительное корректирующее звено с передаточной функцией W_b .

Проведём исследование возможности повышения качества регулирования ОВС с постоянным расходом и переменной температурой приточного воздуха. Для использования аналитических методов при оценке качества регулирования системы выполним некоторые упрощения и примем определённые допущения. Приближенно считаем объект управления (обслуживаемое помещение) теплоёмкостью с сосредоточенными параметрами с постоянной плотностью воздуха. Также принимаем допущение о линейной зависимости теплотерь через ограждающие конструкции от разницы температур в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения и температуры наружного воздуха.

Для получения передаточной функции объекта управления W_u по сигналу управления рассматриваем ОВС без учёта возмущающих воздействий, на основании чего можно записать следующее дифференциальное уравнение:

$$c\rho V = c\rho L(\theta_{\text{sup}} - \theta) - \frac{\theta - \theta_{\text{out}}}{R_e}, \quad (1)$$

где c и ρ — теплоёмкость и плотность воздуха, соответственно; V — объём помещения; L и θ_{sup} — расход и температура приточного воздуха; R_e — эквивалентное термическое сопротивление ограждающих конструкций, которое можно оценить согласно [7, 8]; θ и θ_{out} — температура в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения и наружного воздуха.

В условно стационарном режиме, когда $d\theta/dt = 0$, а температура приточного воздуха θ_{sup} и температура в рабочей зоне θ , принимают значения $\theta_{0\text{sup}}$ и θ_0 , соответственно, из уравнения (1) получаем следующее выражение:

$$0 = c\rho L(\theta_{0\text{sup}} - \theta_0) - \frac{\theta_0 - \theta_{\text{out}}}{R_e}. \quad (2)$$

Введём в рассмотрение отклонение температуры приточного воздуха

$$\Delta\theta_{\text{sup}} = \theta_{\text{sup}} - \theta_{0\text{sup}}$$

и отклонение температуры в рабочей зоне $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ от их значений в условно стационарном режиме, когда данные переменные сохраняют относительно постоянные значения в течение достаточно длинного промежутка времени. Выразим переменные θ_{sup} и θ через их отклонения $\Delta\theta_{\text{sup}}$ и $\Delta\theta$ и подставим в (1). Из полученного выражения исключим уравнение (2) и разделим на $c\rho L$.

Далее имеем:

$$\frac{V}{L} \frac{d\Delta\theta}{dt} = \Delta\theta_{0\text{sup}} - \Delta\theta - \frac{1}{c\rho L R_e} \Delta\theta. \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что величина L/V есть кратность воздухообмена K_V [2, 4], но в единицах измерения $[1/c]$, поэтому $V/L = 1/K_V$. В выражении (3) введём безразмерный коэффициент $a_t = 1/(c\rho L R_e)$, учитывающий тепловые потери. Используя подходы теории автоматического управления, введём в рассмотрение постоянную времени $T_0 = V/L = 1/K_V$.

Выполнив преобразование Лапласа [7, 17] для уравнения (3), с учётом принятых обозначений получим:

$$T_0 s \Delta\theta(s) + (1 + a_t) \Delta\theta(s) = \Delta\theta_{\text{sup}}, \quad (4)$$

где s — переменная Лапласа.

На основании (4) получаем передаточную функцию объекта управления $W_u(s)$ по сигналу управления:

$$W_u(s) = \frac{\Delta\theta(s)}{\Delta\theta_{\text{sup}}(s)} = \frac{1}{T_0 s + 1 + a_t}. \quad (5)$$

Переходная функция для данной передаточной функции при нулевых начальных условиях для отклонений переменных имеет вид:

$$h(t) = \frac{1}{1 + a_t} \left[1 - e^{-\frac{(1 + a_t)t}{T_0}} \right]. \quad (6)$$

Переходные характеристики для объекта управления, рассчитанные согласно (9), представлены на рис. 2. Результаты расчёта переходных процессов убедительно показывают, что объекты управления (обслуживаемые помещения) ОВС являются существенно инерционными системами, имеющими нелинейные статические характеристики, что требует разработки САУ, способной обеспечить необходимые показатели качества регулирования.

Для исследования возможности повышения качества регулирования ОВС с постоянным расходом и переменной температурой приточного воздуха выделим в схеме САУ на рис. 2 контур регулирования температуры в рабочей зоне по управляющему воздействию, то есть без рассмотрения возмущений, как показано на рис. 3б.

Здесь в качестве задающего воздействия (уставки) g показано заданное изменение температуры в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения $\Delta\theta_{\text{set}}$, вместо выходной регулируемой величины у отклонение температуры в рабочей зоне $\Delta\theta$, управляющее воздействие есть отклонение температуры приточного воздуха $\Delta\theta_{\text{sup}}$, а ошибка управления теперь $\varepsilon = \Delta\theta_{\text{set}} - \Delta\theta_b$, где $\Delta\theta_b$ — сигнал обратной связи.

В САУ воздушным отоплением нашли применение различные нелинейные и линейные регуляторы, в том числе отмеченные выше типовые, а именно пропорциональные (П), интегральные (И), пропорционально-интегральные (ПИ), а также пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД). Путём выбора коэффициента передачи П-регулятора можно существенно уменьшить установившуюся ошибку регулирования, однако её полное устранение не представляется возможным даже теоретически. Статическую ошибку, возникающую при регулировании, можно исключить, если использовать И-регулятор. Постоянная времени интегрирования в И-регуляторе равна времени, в течение которого с момента поступления на вход регулятора постоянного сигнала сигнал на выходе регулятора достигнет значения, равного значению входного сигнала.

Устраняя статическую ошибку, интегральный регулятор, однако, ухудшает качество переходного процесса за счёт появления существенной колебательности процесса регулирования. Поэтому на практике применяют комбинированные ПИ-регуляторы. ПИ-регулятор оказывает воздействие на объект управления пропорционально отклонению и интегралу от отклонения регулируемой величины.

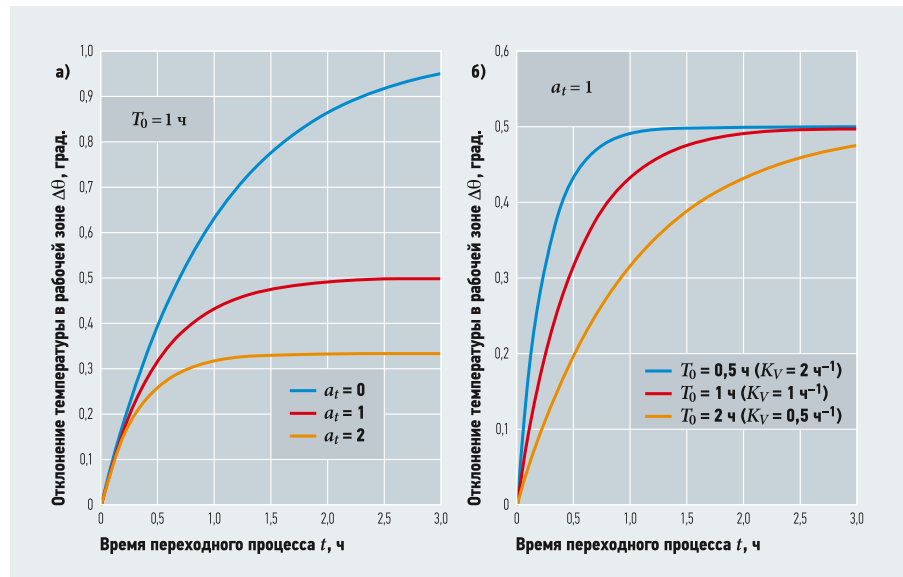


Рис. 2. Переходные процессы в отопительно-вентиляционной системе

П- и ПИ-регуляторы не могут упреждать ожидаемое отклонение регулируемой величины, реагируя только на уже имеющееся отклонение. Возникает необходимость в регуляторе, который вырабатывал бы дополнительное регулирующее воздействие, пропорциональное скорости отклонения регулируемой величины от заданного значения. Такое регулирующее воздействие используется в дифференциальных и ПИД-регуляторах. ПИД-регуляторы воздействуют на объект пропорционально отклонению ε регулируемой величины, интегралу от этого отклонения и скорости изменения регулируемой величины.

По возможностям ПИД-регуляторы являются универсальными. Используя их, можно получить любой закон регулирования. При скачкообразном изменении регулируемой величины ПИД-регулятор в начальный момент времени оказывает мгновенное бесконечно большое воздействие на объект регулирования, затем величина воздействия резко падает до значения, определяемого пропорциональной составляющей, после чего постепенно на-

чинает оказывать влияние интегральная составляющая регулятора.

Следует обратить внимание, что теоретические законы регулирования типовых регуляторов не всегда могут быть реализованы на практике техническими устройствами. Это обусловлено, в первую очередь, ограниченной мощностью воздушонагревательных устройств, которые не смогут обеспечить формирование необходимой величины управляющего сигнала $\Delta\theta_{\text{sup}}$, которая может значительно превосходить заданное значение требуемого изменения температуры. Так, дифференцирующее звено при скачкообразном заданном изменении регулируемой величины теоретически должно оказывать мгновенное бесконечно большое воздействие на объект регулирования, то есть $\Delta\theta_{\text{sup}} \rightarrow \infty$. Кроме того, быстроедействие технических устройств автоматики ОВС во многих случаях не позволит отработать изменение во времени управляющего сигнала. В этой связи в настоящее время отсутствуют чёткие рекомендации по заданию параметров настройки типовых регуляторов для САУ воздушным отоплением.

Учитывая вышесказанное, можно предложить следующий подход для повышения качества регулирования ОВС. Принимая во внимание, что пропорциональная составляющая вносит статическую погрешность, а дифференцирующая составляющая не всегда может быть технически реализована, то следует их исключить в канале управления. Поскольку регулируемая величина не изменяется скачкообразно, то разумным является перенос дифференцирующей составляющей в линию обратной связи, что в теории автоматического управления принято называть гибкой обратной связью (ГОС) [4, 5]. Тогда в канале управления следует использовать И-регулятор, а вносимая им колебательность будет демпфироваться ГОС.

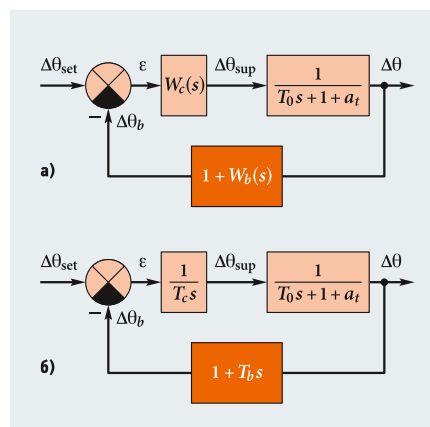


Рис. 3. Структурная схема САУ (а — с контуром регулирования по управляющему воздействию; б — с интегральным регулятором и гибкой обратной связью)

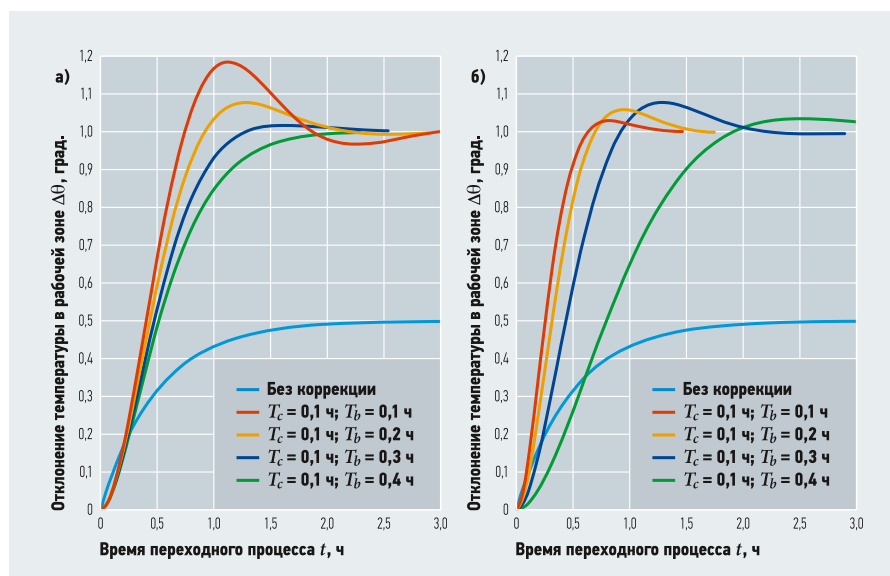


Рис. 4. Переходные процессы в САУ (а — при изменении постоянной времени ГОС; б — при изменении постоянной времени интегрального регулятора)

Тогда имеем:

$$W_c(s) = \frac{1}{T_c s}; W_b(s) = T_b s, \quad (7)$$

где T_c — постоянная времени И-регулятора; T_b — постоянная времени ГОС.

Таким образом, структурная схема САУ воздушным отоплением будет иметь вид, представленный на рис. 36.

Согласно структурной схеме, получаем передаточную функцию САУ воздушным отоплением по каналу управления:

$$W(s) = \frac{1}{T_c T_0 s^2 + (T_c + T_c a_t + T_b) s + 1}. \quad (8)$$

Проведены исследования по влиянию параметров настройки интегрального регулятора и ГОС-связи на качество регулирования САУ воздушным отоплением. На рис. 4а показаны результаты расчёта переходного процесса при различных значениях постоянной времени T_b ГОС для фиксированного значения постоянной времени T_c интегрального регулятора. На рис. 4б приведены результаты расчёта переходного процесса при различных значениях постоянной времени T_c интегрального регулятора для фиксированного значения постоянной времени T_b ГОС. Расчёты проводились для значений постоянной времени объекта управления $T_0 = 1$ ч и безразмерного коэффициента, учитывающего теплопотери, $a_t = 1$.

Отметим некоторые полученные результаты. Время переходного процесса в системе без регулятора и корректирующего звена при условии входа в $\pm 5\%$ зону от устранившегося значения составляет $t_{п.п} = 1,5$ ч. Согласно рис. 4а, при $T_c = 0,1$ ч и $T_b = 0,3$ ч время переходного процесса $t_{п.п} = 1,06$ ч, при этом максимальная величина перерегулирования равна $\Delta_{\max} = 1,73\%$. Согласно рис. 4б, при $T_c = 0,03$ ч и $T_b = 0,2$ ч время переходного

процесса $t_{п.п} = 0,54$ ч, при этом максимальная величина перерегулирования — $\Delta_{\max} = 2,82\%$. Представленные результаты показывают, что постоянная времени интегрального регулятора в большей степени влияет на длительность переходного процесса, а постоянная времени ГОС — на колебательность системы.

Выполненные исследования убедительно показывают возможность повышения качества регулирования ОВС за счёт повышения быстродействия при допустимой величине перерегулирования и отсутствии ошибки регулирования путём использования интегрального регулятора температуры приточного воздуха и гибкой обратной связи по температуре в рабочей зоне обслуживаемого помещения. Также отметим, что достижение того или иного результата по улучшению качества регулирования в реальной системе необходимо оценивать с точки зрения её технических возможностей, в частности, по максимально допустимой температуре нагрева приточного воздуха.

Таким образом, работа посвящена вопросу повышения качества регулирования ОВС за счёт повышения быстродействия при допустимой величине перерегулирования и отсутствии ошибки регулирования. С этой целью в системе предложено введение интегрального регулятора температуры приточного воздуха, а также дополнительного корректирующего звена в виде гибкой обратной связи по температуре в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения.

Для проведения исследований по влиянию параметров настройки интегрального регулятора и гибкой обратной связи ОВС как объект автоматического управления упрощённо представлена в виде апериодического звена первого порядка. В рассмотрение введена посто-

янная времени, определяемая кратностью воздухообмена, и безразмерный коэффициент, учитывающий теплопотери по эквивалентному термическому сопротивлению ограждающих конструкций. Представлена структурная схема САУ воздушным отоплением с интегральным регулятором и гибкой обратной связью. Получена передаточная функция системы как звена второго порядка, установлены выражения для определения её параметров, а также предложена методика расчёта переходной характеристики.

Проведены исследования и представлены результаты оценки влияния параметров настройки интегрального регулятора и гибкой обратной связи на качество регулирования САУ воздушным отоплением. Полученные результаты показывают, что постоянная времени интегрального регулятора в большей степени влияет на длительность переходного процесса, а постоянная времени гибкой обратной связи — на колебательность системы.

Выполненные исследования позволили сделать вывод о возможности повышения качества регулирования отопительно-вентиляционных систем за счёт повышения быстродействия при допустимой величине перерегулирования и отсутствии ошибки регулирования путём использования интегрального регулятора температуры приточного воздуха и гибкой обратной связи по температуре в рабочей зоне обслуживаемого помещения. ●

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 26-19-00006.

1. Свистунов В.М., Пушняков Н.К. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства. — СПб: Политехника, 2007. 423 с.
2. Howell R.H. Principles of heating ventilating and air conditioning. ASHRAE. Atlanta, Georgia, U.S. 2017. 594 p.
3. Штокман Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности. — М.: Изд-во «АСВ», 2001. 564 с.
4. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern control systems. Developing problem-solving skills through integrated design and analysis. 13th edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, U.S. 2016. 1032 p.
5. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под. ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ, 2004. 654 с.
6. Соколов В.И., Черникова И.Д., Салуквадзе Г.В. Идентификация отопительно-вентиляционных систем как объектов автоматического управления // Вестник евразийской науки, 2024. Т. 16. №2. 13 с.
7. Соколов В.И., Малыгина О.А. Экспертная оценка экономической эффективности теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях // Промышленное и гражданское строительство, 2025. №10. С. 48–54.
8. Малыгина О.А. Разработка математических моделей определения тепло-влажностного режима ограждающих конструкций зданий при нестационарном тепловом потоке // Современные проблемы гражданской защиты, 2024. №3. С. 93–104.

References — see page 78.

Improvement of heating-ventilating systems by correcting regulation processes.
Pp. 36–39.

Vladimir I. Sokolov, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Oksana A. Malygina**, PhD (Engineering), Associate Professor, Lugansk State University named after Vladimir Dal (LSU, Lugansk)

1. V.M. Svistunov, N.K. Pushnyakov. *Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh ob#ektov agropromyshlennogo kompleksa i zhilishchno-kommunal'nogo khozyajstva* [Heating, ventilation, and air conditioning of agricultural and housing and communal services facilities]. St. Petersburg. *Politehnika* ["Polytechnic" Publishing House]. 2007. 423 p. [In Russian]
2. R.H. Howell. Principles of heating ventilating and air conditioning. 8th edition. ASHRAE. Atlanta, Georgia, U.S. 2017. 594 p.
3. E.A. Shtokman. *Ventilyatsiya, konditsionirovanie i ochildka vozdukh na predpriyatiyakh pishchevoj promyshlennosti* [Air conditioning, and air purification at food industry enterprises]. Moscow. *Izd-vo "ASV"* [Publishing House of the Association of Construction Universities ("ASV" Publishers)]. 2001. 564 p. [In Russian]
4. R.S. Dorf, R.H. Bishop. Modern control systems. Developing problem-solving skills through integrated design and analysis. 13th edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, U.S. 2016. 1032 p.
5. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 1: Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern automatic control theory. Vol. 1. Mathematical models, dynamic characteristics, and analysis of automatic control systems]. Edited by K.A. Pupkova, N.D. Egupova. Moscow. *Izd-vo MGTU* [Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University]. 2004. 654 p. [In Russian]
6. V.I. Sokolov, I.D. Chernikova, G.V. Salukvadze. *Identifikatsiya otopitel'no-ventilyatsionnykh sistem kak ob#ektov avtomaticheskogo upravleniya* [Identification of heating and ventilation systems as automatic control objects]. *Vestnik evrazijskoj nauki* [Eurasian Scientific Journal]. 2024. Vol. 16. No. 2. 13 p. [In Russian]
7. V.I. Sokolov, O.A. Malygina. *Ekspertnaya otsenka ekonomicheskoy effektivnosti teploizolyatsionnykh materialov v ograzhdayushchikh konstruksiyakh* [Expert Assessment of the Economic Efficiency of Thermal Insulation Materials in Building Enclosing Structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* ["Industrial and Civil Engineering" Magazine]. 2025. No. 10. Pp. 48–54. [In Russian]
8. O.A. Malygina. *Razrabotka matematicheskikh modelej opredeleniya teplo-vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruksij zdaniy pri nestatsionarnom teplovom potoke* [Development of Mathematical Models for Determining the Heat and Humidity Conditions of Building Enclosing Structures with Non-Stationary Heat Flow]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity* ["Modern Problems of Civil Defense" Magazine]. 2024. No. 3. Pp. 93–104. [In Russian]