

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 1 / 2024, Vol. 16, Iss. 1 <https://esj.today/issue-1-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/33SAVN124.pdf>

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Соколов, В. И. Моделирование двухконтурной системы автоматического управления воздушным отоплением / В. И. Соколов, И. Д. Черникова, Г. В. Салуквадзе // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 1. —

URL: <https://esj.today/PDF/33SAVN124.pdf>

**For citation:**

Sokolov V.I., Chernikova I.D., Salukvadze G.V. Modeling of two-circuit automatic control system of air heating. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(1): 33SAVN124. Available at: <https://esj.today/PDF/33SAVN124.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 697

**Соколов Владимир Ильич**

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Россия

Профессор кафедры «Вентиляция, теплогазо- и водоснабжения»

Доктор технических наук, профессор

E-mail: [sokolov.snu.edu@gmail.com](mailto:sokolov.snu.edu@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0459-1824>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=439665](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439665)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191822948>

**Черникова Ирина Демьяновна**

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Россия

Старший преподаватель кафедры «Вентиляция, теплогазо- и водоснабжения»

E-mail: [chernikova\\_i\\_d@mail.ru](mailto:chernikova_i_d@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7633-2293>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58643068300>

**Салуквадзе Георгий Владимирович**

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Россия

Аспирант кафедры «Вентиляция, теплогазо- и водоснабжения»

E-mail: [georgysalukvadze@yandex.com](mailto:georgysalukvadze@yandex.com)

## Моделирование двухконтурной системы автоматического управления воздушным отоплением

**Аннотация.** Авторами представлена двухконтурная система автоматического управления воздушным отоплением. В отопительно-вентиляционной системе приточный воздух поступает от центральной вентиляционной установки при его постоянной температуре. Регулирование расхода приточного воздуха осуществляется специальным терминалом, а дополнительное изменение его температуры производится в теплообменном аппарате. Рабочие процессы, протекающие в системе, отражены функциональной схемой. В статье разработана линейная математическая модель отопительно-вентиляционной системы, на основании которой построена структурная схема двухконтурной системы автоматического управления воздушным отоплением. В системе управления предусмотрены общем случае различные регуляторы расхода и температуры приточного воздуха. Для моделирования системы в среде Симулинк разработана блок-диаграмма. Блок-диаграмма предусматривает моделирование системы автоматического управления при различных воздействиях и их комбинации. Выполнен расчет переходного процесса в двухконтурной системе автоматического управления

при скачке заданной температуры в обслуживаемом помещении. В представленном примере расчета для контура регулирования расхода приточного воздуха использован регулятор на основе прогнозирующей модели, а в контуре регулирования температуры приточного воздуха пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор. Результат расчета сопоставлен с переходной характеристикой объекта управления. Разработанная математическая модель, структурная схема и блок-диаграмма для моделирования в среде Симулинк позволяют исследовать процессы и качество регулирования аэротермодинамических характеристик двухконтурной системы автоматического управления воздушным отоплением. Рациональным сочетанием регуляторов расхода приточного воздуха и его температуры при оптимальной настройке их параметров, можно улучшить показатели качества регулирования системы автоматического управления воздушным отоплением и, как следствие, обеспечить повышение эффективности отопительно-вентиляционной системы.

**Ключевые слова:** отопительно-вентиляционная система; структурная схема; регулятор; блок-диаграмма; переходной процесс

## Введение

Составной частью зданий и сооружений являются системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВКВ), в зарубежной литературе HVAC [1; 2]. Системы ОВКВ осуществляют формирование воздушной среды в обслуживаемых помещениях, отвечающей санитарно-гигиеническим требованиям, а также необходимой для выполнения производственных и технологических процессов. Создание требуемого состояния воздушной среды обеспечивается удалением образующихся избытков тепла, влаги, газа, пыли и добавлением необходимого количества предварительно подготовленного воздуха путем его нагрева или охлаждения, осушки или увлажнения, фильтрации и др. [3; 4].

## Актуальность задачи

В настоящее время при разработке и проектировании систем ОВКВ особое внимание уделяется вопросам снижения их эксплуатационных затрат, которые в ряде случаев получаются гораздо выше, чем затраты на приобретение и установку. Обеспечить снижение эксплуатационных затрат возможно, в первую очередь, уменьшением энергопотребления и повышением надежности оборудования, элементов и устройств систем ОВКВ [5; 6].

Важным резервом уменьшения энергопотребления является сокращение потребляемой мощности за счет снижения потерь энергии, связанных с процессами регулирования аэротермодинамических характеристик систем ОВКВ и, прежде всего, отопительно-вентиляционных систем (ОВС). Это может быть достигнуто разработкой систем автоматического управления (САУ), обеспечивающих рациональное использование энергоресурсов за счет улучшения показателей качества регулирования ОВС [7; 8].

## Анализ литературных источников

Объектом управления САУ ОВКВ, ее базовым элементом, является обслуживаемое помещение, в котором постоянно совершается переход воздуха из одного состояния в другое. Для поддержания заданных (требуемых) его параметров в помещении в него подается приточный воздух, имеющий параметры, которые отличны от параметров внутри обслуживаемого помещения [9–11]. Приточный воздух перемешивается с внутренним

воздухом и вытесняет его, при этом подогревает и увлажняет воздух помещения или ассимилирует избыточное тепло и влагу.

Обслуживаемое помещение, в общем случае, характеризуется распределенными по объему параметрами воздуха. Учет распределенных характеристик вызывает затруднения, поэтому при решении задач автоматического управления помещение рассматривается как объект управления с сосредоточенными параметрами, для которого температура и другие параметры воздуха определяются в наиболее значимой (рабочей) зоне. И в такой зоне необходимо устанавливать датчики регулируемых параметров. Отдельные помещения характеризуются наличием зон с разными заданными параметрами, что требует использования многоканальных систем ОВКВ или применения местных доводчиков (автономные увлажнители, фанкойлы, кондиционеры и др.) [12–14].

В настоящее время получили развитие новые тенденции и подходы к построению САУ ОВКВ, которые дают возможности в совершенствовании процессов управления ОВС при организации воздушного отопления зданий и сооружения [15–18]. Например, вместо традиционных ПИД-регуляторов для управления тепловым режимом помещений по температурным графикам могут быть использованы более сложные алгоритмы и методы оптимального автоматического управления.

В САУ воздушным отоплением (или ОВС) обычно переменной является тепловая нагрузка, а влажностная и газовая относительно постоянные, либо требуют некоторого малого расхода наружного воздуха. Поэтому для таких ОУ возможны три вида систем регулирования температурного режима: системы с постоянным расходом и переменной температурой приточного воздуха, системы с переменным расходом приточного воздуха определенной температуры и смешанные (комбинированные или двухконтурные) системы [18–20]. Первые два вида САУ воздушным отоплением являются наиболее распространенными. Данные системы достаточно полно рассмотрены и исследованы как объекты автоматического управления, для них аналитически получены и экспериментально подтверждены передаточные функции, даны рекомендации по определению коэффициентов передач и постоянных времени.

В этой связи, несомненный интерес вызывает исследование двухконтурных САУ воздушным отоплением, анализ качества регулирования аэротермодинамических характеристик и разработка рекомендаций по повышению эффективности систем.

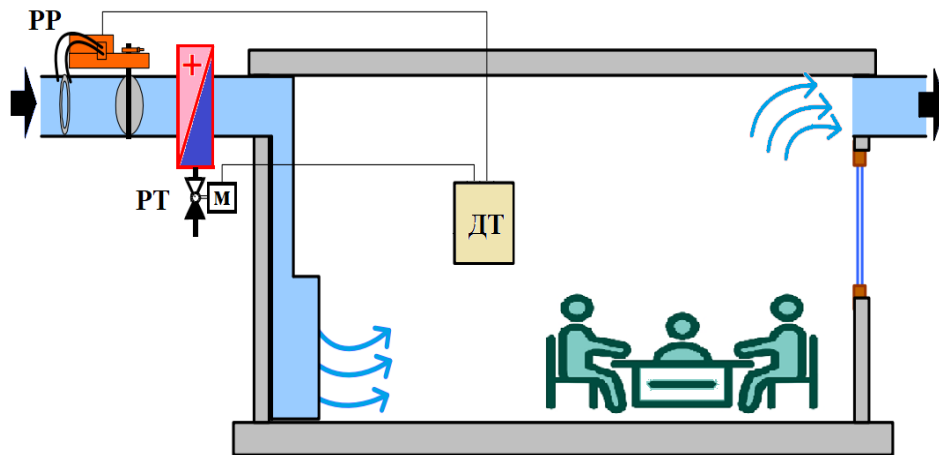
**Целью работы** является разработка типовой математической модели, структурной схемы и блок-диаграммы в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB для моделирования двухконтурной САУ воздушным отоплением.

### Материалы и результаты исследования

Рассмотрим двухконтурную ОВС, построенную на основе приточной вентиляционной системы VAV (от английского названия «Variable Air Volume» — переменный объем воздуха) [8; 19], которая имеет возможность дополнительного нагрева или охлаждения воздуха. Схема работы ОВС переменного расхода воздуха с регулированием его температуры приведена на рисунке 1.

В рассматриваемой ОВС приточный воздух поступает от центральной вентиляционной установки при его постоянной температуре. Регулирование расхода приточного воздуха осуществляется терминалом VAV (регулятор или клапан VAV) [8; 19], который на рисунке 1 обозначен как PP (регулятор расхода). Изменение температуры воздуха, как показано на рисунке 1, происходит в теплообменном аппарате при помощи регулятора температуры PT. Таким образом, в обслуживаемом помещении поддержание заданного температурного режима

в значимой (рабочей) зоне, который контролируется датчиком температуры ДТ, обеспечивается как регулированием расхода приточного воздуха, так и его температуры.

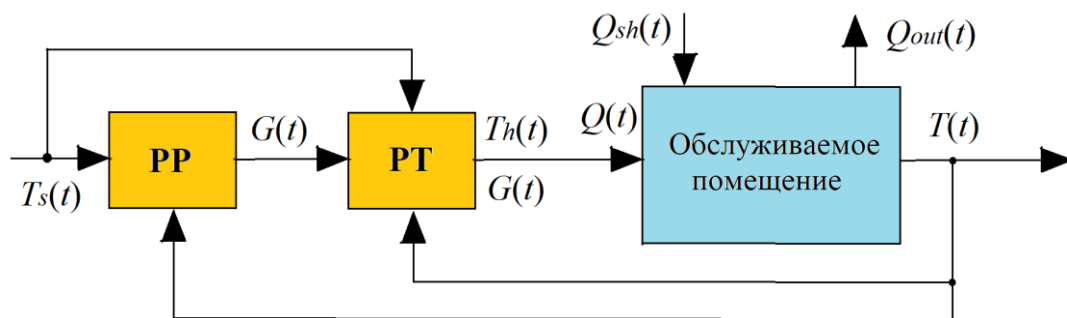


**Рисунок 1.** Схема работы двухконтурной ОВС переменного расхода воздуха с регулированием его температуры (разработано автором)

Рабочие процессы в двухконтурной ОВС можно отразить функциональной схемой, приведенной на рисунке 2. Согласно функциональной схеме ОВС рассматривается как двухконтурная САУ воздушным отоплением, в которой входным сигналом является заданная температура (закон изменения ее во времени  $t$ ) в обслуживаемом помещении  $T_s(t)$ . По расхождению  $\varepsilon(t)$  заданной температуры  $T_s(t)$  и температуры в значимой (рабочей) зоне  $T(t)$ :

$$\varepsilon(t) = T_s(t) - T(t), \quad (1)$$

регулятор расхода РР формирует значение массового расхода воздуха  $G(t)$  постоянной температуры, поступающего от центральной приточной вентиляционной системы. Далее приточный воздух поступает в теплообменный аппарат, в котором по расхождению температур  $\varepsilon(t)$  регулятор температуры РТ изменяет температуру приточного воздуха  $T_h(t)$ , который непосредственно поступает в обслуживаемое помещение. В дальнейшем температуру в наиболее значимой (рабочей) точке  $T(t)$  будем называть температурой в помещении.



**Рисунок 2.** Функциональная схема двухконтурной ОВС (разработано автором)

Расход приточного воздуха равен расходу удаляемого воздуха, поэтому теплопоступление от вентиляционной системы  $Q_{ah}$  в обслуживаемое помещение (рис. 2) будет определяться разницей температуры приточного воздуха  $T_h(t)$  и температуры в помещении  $T(t)$ :

$$Q_{ah}(t) = cG(t)(T_h(t) - T(t)), \quad (2)$$

где  $c$  — теплоемкость воздуха.

Кроме того, теплопоступления в обслуживаемое помещение могут быть от других источников (дополнительные теплоизбытки)  $Q_{sh}(t)$ , не связанных с приточной вентиляционной системой (рис. 2), а быть от людей, оборудования, освещения, солнечной радиации и др. Тогда общие теплопоступления  $Q_{in}(t)$  в обслуживаемое помещение можно определить зависимостью:

$$Q_{in}(t) = Q_{ah}(t) + Q_{sh}(t). \quad (3)$$

Теплопотери на функциональной схеме (рис. 2) обозначены как  $Q_{out}(t)$ . Суммарные теплоизбытки  $\Delta Q(t)$  (теплодефицит при отрицательном знаке) составят:

$$\Delta Q(t) = Q_{in}(t) - Q_{out}(t). \quad (4)$$

Вполне уместно считать, что ОВС может находиться в условно стационарном режиме, т. е. в состоянии для относительно длительного промежутка времени, когда ее параметры являются постоянными. Данному состоянию соответствуют значения массового расхода приточного воздуха  $G_0$ , его температуры  $T_h^0$ , температуры в помещении  $T_0$  и наружного воздуха  $T_{out}^0$ . Для стационарного режима теплопоступления  $Q_{in}^0$  равны теплопотерям  $Q_{out}^0$ , данные значения обозначим через  $Q_0$ :

$$Q_{in}^0 = Q_{out}^0 = Q_0. \quad (5)$$

Следует принимать во внимание, что теплопоступления для стационарного режима складываются из стационарных значений теплопоступлений от приточной вентиляционной системы  $Q_{ah}^0$  и дополнительных теплоизбытков  $Q_{sh}^0$ :

$$Q_{in}^0 = Q_{ah}^0 + Q_{sh}^0. \quad (6)$$

Схема работы (рис. 1) и функциональная схема ОВС (рис. 2) позволяют построить структурную схему двухконтурной САУ воздушным отоплением.

Изменение во времени теплоизбытков  $\Delta Q(t)$  в обслуживаемом помещении с учетом (5) определим как разницу между изменением теплопоступлений  $\Delta Q_{in}(t)$  и теплопотерь  $\Delta Q_{out}(t)$ :

$$\Delta Q(t) = \Delta Q_{in}(t) - \Delta Q_{out}(t). \quad (7)$$

Теплоизбытки  $\Delta Q(t)$  приводят к изменению температуры в помещении  $\Delta T(t)$ :

$$\Delta T(t) \sim \Delta Q(t). \quad (8)$$

Рассматривая обслуживаемое помещение как объект управления, свяжем безразмерные отклонения переменных, преобразованные по Лапласу [12; 17], через передаточные функции (рис. 3):

$$T(s) = W_{TQ}(s)(Q_{in}(s) - Q_{out}(s)) \quad (9)$$

или с учетом (3):

$$T(s) = W_{TQ}(s)(k_{ah}Q_{ah}(s) + k_{sh}Q_{sh}(s) - Q_{out}(s)), \quad (10)$$

где  $s$  — переменная Лапласа;  $T(s)$  — преобразование по Лапласу безразмерного отклонения температуры в помещении от стационарного значения  $T_0$  (отклонение делится на разницу стационарных значений температур в помещении  $T_0$  и наружного воздуха  $T_{out}^0$ ):

$$\Delta \bar{T}(t) = \Delta T(t) / (T_0 - T_{out}^0). \quad (11)$$

$Q_{in}(s), Q_G(s), Q_{sh}(s)$  — преобразование по Лапласу безразмерных отклонений суммарных теплоступлений, теплоступлений от приточной вентиляционной системы и дополнительных теплоизбытков от своих стационарных значений:

$$\Delta \bar{Q}_{in}(t) = \Delta Q_{in}(t) / Q_0; \quad (12)$$

$$\Delta \bar{Q}_G(t) = \Delta Q_{ah}(t) / Q_{ah}^0; \quad (13)$$

$$\Delta \bar{Q}_{sh}(t) = \Delta Q_{sh}(t) / Q_{sh}^0. \quad (14)$$

$Q_{out}(s)$  — преобразование по Лапласу безразмерного отклонения теплопотерь от стационарного значения  $Q_0$ :

$$\Delta \bar{Q}_{out}(t) = \Delta Q_{out}(t) / Q_0. \quad (15)$$

$W_{TQ}(s)$  — передаточная функция для температуры в помещении по суммарному тепловому потоку.

В силу (5) и (6) имеем:

$$k_{ah} = \frac{Q_{ah}^0}{Q_0}; \quad k_{sh} = \frac{Q_{sh}^0}{Q_0}; \quad k_{ah} + k_{sh} = 1. \quad (16)$$

Коэффициенты  $k_{ah}$  и  $k_{sh}$  имеют физический смысл, они показывают долю соответственно теплоступлений от приточной вентиляционной системы и дополнительных теплоизбытков в теплоснабжении обслуживаемого помещения для стационарного режима работы.

По уравнению (10) сформируем фрагмент структурной схемы ОВС, представленный на рисунке 3.

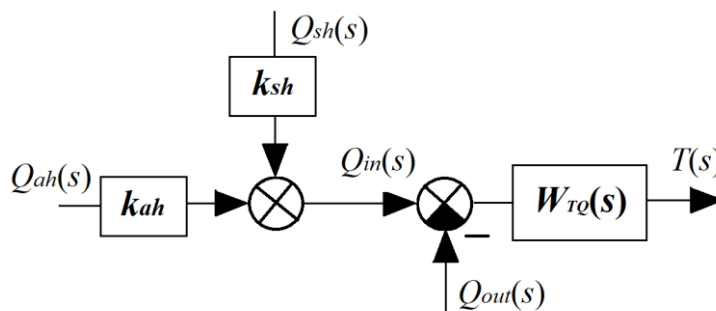


Рисунок 3. К построению структурной схемы ОВС (разработано автором)

Выполним линеаризацию зависимости (2) для теплоступлений от вентиляционной системы. Разложение в ряд Тейлора для отклонений переменных имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{ah}(t) &= \left. \frac{\partial Q_{ah}}{\partial G} \right|_0 \Delta G(t) + \left. \frac{\partial Q_{ah}}{\partial (T_h - T)} \right|_0 (\Delta T_h(t) - \Delta T(t)) = \\ &= c(T_h^0 - T_0) \Delta G(t) + cG_0 (\Delta T_h(t) - \Delta T(t)). \end{aligned} \quad (17)$$

Индекс «0» при производных в выражении (17) означает вычисление их для значений параметров в стационарном режиме работы ОВС. Записав уравнение (17) для безразмерных отклонений переменных (11), (13) и

$$\Delta \bar{G}(t) = \Delta G(t) / G_0, \quad (18)$$



$$\Delta \bar{T}_h(t) = \Delta T_h(t) / (T_h^0 - T_0), \quad (19)$$

и выполнив для них преобразование по Лапласу, получаем:

$$Q_{ah}(s) = \frac{cG_0(T_h^0 - T_0)}{Q_{ah}^0} G(s) + \frac{cG_0(T_h^0 - T_0)}{Q_{ah}^0} T_h(s) - \frac{cG_0 T_0}{Q_{ah}^0} T(s). \quad (20)$$

Нетрудно заметить, что:

$$cG_0(T_h^0 - T_0) = Q_{ah}^0, \quad (21)$$

поэтому выражение (20) можно привести к виду:

$$Q_G(s) = G(s) + T_h(s) - k_T T(s), \quad (22)$$

где

$$k_T = \frac{T_0 - T_{out}^0}{T_h^0 - T_0}. \quad (23)$$

Изменение теплотерь во времени  $Q_{out}(t)$  носит весьма сложный характер [5; 7], с некоторым приближением можно считать, что теплотери зависят от разности температуры в помещении  $T(t)$  и наружной температуры  $T_{out}(t)$ . Эту зависимость для безразмерных отклонений переменных, преобразованных по Лапласу, представим в следующем виде:

$$Q_{out}(s) = W_{QT}(s)(T(s) - T_{out}(s)), \quad (24)$$

где  $T_{out}(s)$  — преобразование по Лапласу безразмерного отклонения температуры наружного воздуха от стационарного значения  $T_{out}^0$ :

$$\Delta \bar{T}_{out}(t) = \Delta T_{out}(t) / (T_0 - T_{out}^0). \quad (25)$$

$W_{QT}(s)$  — передаточная функция для теплотерь по разнице температур в помещении и снаружи.

Подстановка (22) и (24) в (10) дает следующее выражение:

$$T(s) = W_{TQ}(s) \left[ k_{ah} (G(s) + T_h(s) - k_T T(s)) + k_{sh} Q_{sh}(s) - W_{QT}(s) (T(s) - T_{out}(s)) \right]. \quad (26)$$

После преобразований имеем:

$$\begin{aligned} T(s) & \left[ 1 + k_{ah} k_T W_{TQ}(s) + W_{TQ}(s) W_{QT}(s) \right] = \\ & = W_{TQ}(s) \left[ k_{ah} (G(s) + T_h(s)) + k_{sh} Q_{sh}(s) + W_{QT}(s) T_{out}(s) \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

Далее приводим (27) к виду:

$$T(s) = W_0(s) \left[ k_{ah} (G(s) + T_h(s)) + k_{sh} Q_{sh}(s) \right] + W_{out} T_{out}(s), \quad (28)$$

где  $W_0(s)$  — передаточная функция для температуры в помещении по общим теплоступлениям (теплоступлениям от приточной системы и теплоизбыткам).

$$W_0(s) = \frac{W_{TQ}(s)}{1 + k_{ah}k_T W_{TQ}(s) + W_{TQ}(s)W_{QT}(s)}, \quad (29)$$

$W_{out}(s)$  — передаточная функция для температуры в помещении по температуре наружного воздуха

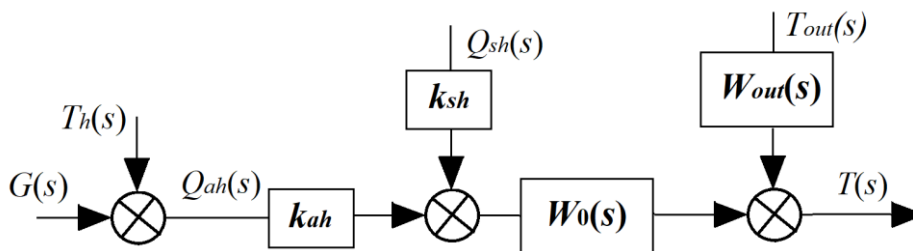
$$W_{out}(s) = \frac{W_{QT}(s)}{1 + k_{ah}k_T W_{TQ}(s) + W_{TQ}(s)W_{QT}(s)}. \quad (30)$$

Отметим, что передаточные функции  $W_0(s)$  и  $W_{out}(s)$  устанавливаются либо приближенно с использованием аналитических подходов, либо с использованием методов параметрической идентификации [1; 17].

На основе рисунка 3 и равнения (28) получаем структурную схему двухконтурной ОВС как объекта автоматического управления, приведенную на рисунке 4.

Безразмерное отклонение заданной температуры в помещении от стационарного значения  $T_0$  введем аналогично безразмерным отклонениям температуры в помещении (11) и температуры наружного воздуха (25):

$$\Delta \bar{T}_s(t) = \Delta T_s(t) / (T_0 - T_{out}^0). \quad (31)$$

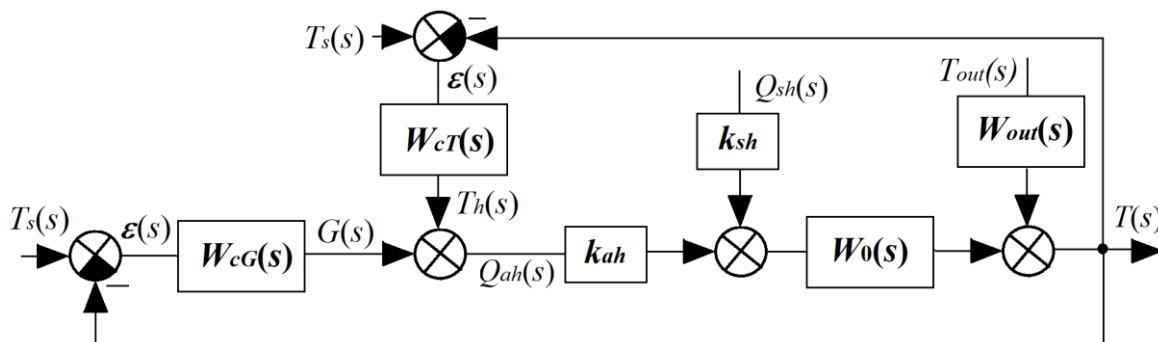


**Рисунок 4.** Структурная схема двухконтурной ОВС как объекта автоматического управления (разработано автором)

Согласно (1) рассогласование безразмерных отклонений заданной температуры и температуры в помещении, преобразованных по Лапласу:

$$\varepsilon(s) = T_s(s) - T(s). \quad (32)$$

В двухконтурной САУ воздушным отоплением в общем случае рассматриваем различные регуляторы для регулирования расхода и температуры приточного воздуха:



**Рисунок 5.** Структурная схема двухконтурной САУ воздушным отоплением (разработано автором)



$$G(s) = W_{cG}(s) \times \varepsilon(s), \tag{24}$$

$$T(s) = W_{cT}(s) \times \varepsilon(s), \tag{25}$$

где  $W_{cG}(s)$ ,  $W_{cT}(s)$  — передаточные функции регулятора расхода и регулятора температуры.

На основании (32–34) и рисунка 4 получаем структурную схему двухконтурной САУ воздушным отоплением, представленную на рисунке 5.

Для моделирования двухконтурной САУ воздушным отоплением в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, приведенная на рисунке 6. В качестве примера в контуре регулирования расхода приточного воздуха установлен MPC-регулятор (от английского Model Predictive Control) [16; 18], в контуре регулирования его температуры показан ПИД-регулятор, на выходе которого подключена типовая нелинейность типа «зона насыщения» [12; 17]. Отметим, что для синтеза MPC-регулятора в MATLAB используется набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox.

Блок-диаграмма предусматривает моделирование САУ при различных воздействиях и их комбинации. Прежде всего, предусмотрено исследование системы при воздействии входного сигнала заданной температуры в обслуживаемом помещении  $T_s(s)$ . Имеется возможность моделирования поведения системы при изменении температуры наружного воздуха  $T_{out}(s)$  как при скачкообразном, так и при колебательном характере ее изменения. Также, предусмотрен анализ воздействия изменения дополнительных теплоизбытков в помещении  $Q_{sh}(s)$ . Передаточная функция  $W_0(s)$  для обслуживаемого помещения как объекта автоматического управления, также как и передаточная функция  $W_{out}(s)$  для температуры в помещении по температуре наружного воздуха, заданы в виде последовательно установленных звена с дробно-рациональной функцией и звена запаздывания. Данные передаточные функции удобно получать методами параметрической идентификации.

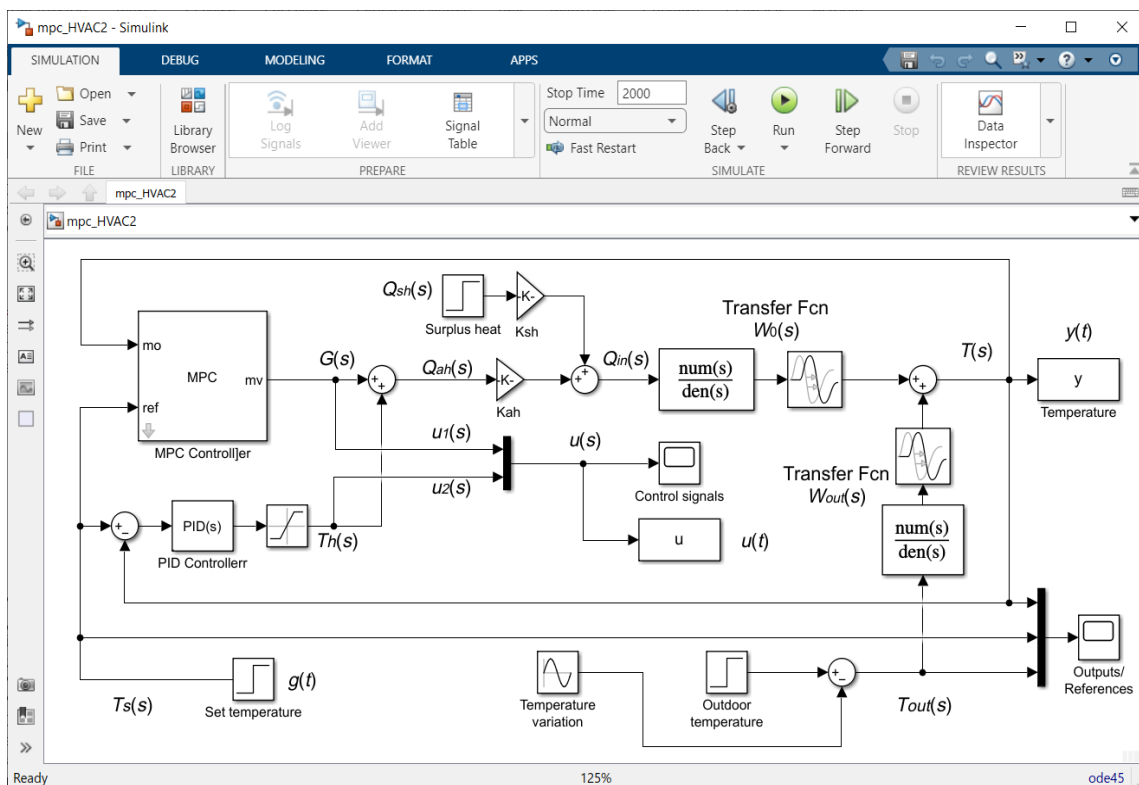


Рисунок 6. Блок-диаграмма САУ в среде Simulink (разработано автором)

Результаты расчета переходного процесса в двухконтурной САУ воздушным отоплением при скачке заданной температуры  $T_s(s)$  в обслуживаемом помещении представлены на рисунке 7. Здесь же представлена переходная характеристика объекта управления.

При моделировании рассматривалась следующая передаточная функция  $W_0(s)$  для объекта управления:

$$W_0(s) = \frac{e^{-49,7s}}{(25,8s + 1)(457s + 1)}. \quad (35)$$

Были заданы: коэффициент  $k_{ah} = 0,8$ ; ПИД-регулятор в контуре регулирования температуры приточного воздуха без дифференцирующей составляющей  $W_{cG}(s) = 1 + 1/(200s)$ , а минимальное и максимальное значение на его выходе ограничивалось нелинейным звеном типа «зона насыщения» соответственно значениями  $-1$  и  $+1$ . При синтезе MPC-регулятора принимался период квантования  $10$  с, горизонт прогнозирования  $100$  шагов, горизонт управления  $30$  шагов, минимальное значение на выходе было задано  $-1$ , а максимальное  $2$ . Синтез выполнен при помощи набора программных инструментов Model Predictive Control Toolbox пакета прикладных программ MATLAB.

Как видно из рисунка 7, САУ позволяет увеличить быстродействие системы, а следовательно, повысить стабильность контролируемых параметров ОВС. Рациональным сочетанием регуляторов расхода приточного воздуха и его температуры при оптимальной настройке их параметров, можно улучшить показатели качества регулирования САУ воздушным отоплением и, как следствие, обеспечить повышение эффективности ОВС.

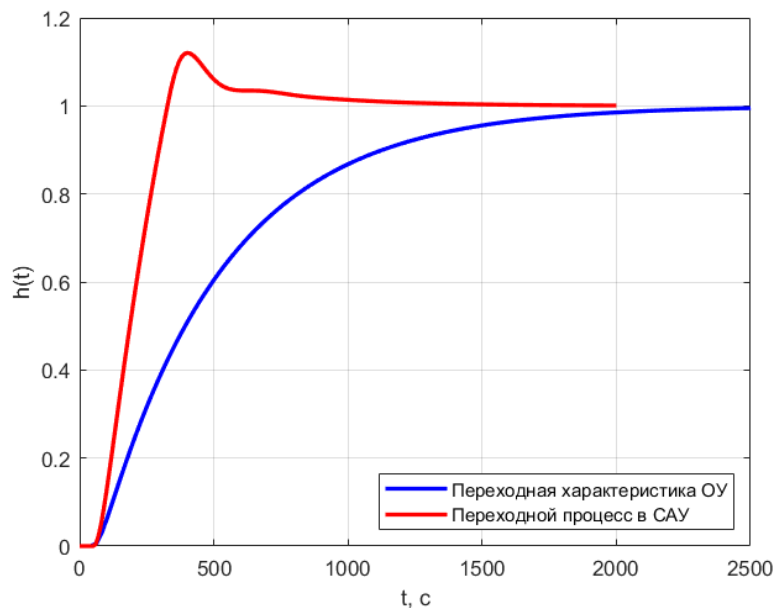


Рисунок 7. Переходной процесс в САУ (разработано автором)

### Выводы

Таким образом, в работе рассмотрена двухконтурная САУ воздушным отоплением. В ОВС приточный воздух поступает от центральной вентиляционной установки при его постоянной температуре. Регулирование расхода приточного воздуха осуществляется специальным терминалом, а дополнительное изменение его температуры производится в

теплообменном аппарате. Рабочие процессы, протекающие в системе, отражены функциональной схемой.

Разработана линейная математическая модель отопительно-вентиляционной системы, на основании которой построена структурная схема двухконтурной САУ управления воздушным отоплением. В системе управления предусмотрены общем случае различные регуляторы расхода и температуры приточного воздуха. Для моделирования системы в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма.

Выполнен расчет переходного процесса в двухконтурной САУ при скачке заданной температуры в обслуживаемом помещении. В представленном примере расчета для контура регулирования расхода приточного воздуха использован MPC-регулятор, а в контуре регулирования температуры приточного воздуха ПИД-регулятор. Результат расчета сопоставлен с переходной характеристикой объекта управления.

Разработанная математическая модель ОВС, структурная схема и блок-диаграмма для моделирования САУ в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB позволяют исследовать процессы и качество регулирования аэротермодинамических характеристик двухконтурной САУ воздушным отоплением. Рациональным сочетанием регуляторов расхода приточного воздуха и его температуры при оптимальной настройке их параметров, можно улучшить показатели качества регулирования САУ воздушным отоплением и, как следствие, обеспечить повышение эффективности ОВС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беккер, А.М. Системы вентиляции / А.М. Беккер. — Москва: Техносфера, Евроклимат, 2005. — 232 с.
2. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В.А. Ананьев, Л.Н. Балугева, А.Д. Гальперин [и др.]. — Москва: Евроклимат, 2003. — 416 с.
3. Посохин, В.Н. Вентиляция / В.Н. Посохин, Р.Г. Сафиуллин, В.А. Бройда. — Москва: АСВ, 2020. — 624 с.
4. Системы вентиляции: моделирование, оптимизация / Я.А. Гусенцова, К.Н. Андрийчук, А.А. Коваленко [и др.]. — Луганск: ВГУ имени В. Даля, 2005. — 206 с.
5. Штокман, Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности / Е.А. Штокман. — Москва: АСВ, 2001. — 564 с.
6. Sokolov, V. Increasing Efficiency of Ventilation Systems with Vortex Regulation Devices / V. Sokolov // Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. — Cham: Springer, 2023. — С. 1012–1022.
7. Стефанов, Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Е.В. Стефанов. — Санкт-Петербург: АВОК СЕВЕРОЗАПАД, 2005. — 400 с.
8. Pilavov, M. Improvement of Control Processes for VAV Ventilation Systems Using MPC Controller / M. Pilavov, V. Andriichuk, V. Sokolov // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). — IEEE, 2023. — С. 8–12.

9. Свистунов, В.М., Пушняков Н.К. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства / В.М. Свистунов, Н.К. Пушняков. — Санкт-Петербург: Политехника, 2007. — 423 с.
10. Improvement of HVAC systems based on adaptive predictive control / V. Sokolov, O. Krol, V. Andriichuk [et al.] // E3S Web of Conferences. — 2023. — Т. 420. — 07020.
11. Sokolov, V. Criteria Analysis of Diffusion Processes in Channels of Industrial Ventilation Systems / V. Sokolov // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. — Cham: Springer, 2022. — Т. 2. — С. 725–731.
12. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е.С. Бондарь, А.С. Гордиенко, В.А. Михайлов, Г.В. Нимич. — Киев: Аванпост-Прим, 2005. — 560 с.
13. Sokolov, V. Increased measurement accuracy of average velocity for turbulent flows in channels of ventilation systems / V. Sokolov // Proceedings of the 6th international conference on industrial engineering. ICIE 2020. Lecture notes in mechanical engineering. — Cham: Springer, 2021. — Т. 2. — С. 1182–1190.
14. Соколов, В.И. Инженерные задачи диффузии примеси в потоке / В.И. Соколов, А.А. Коваленко, Г.С. Калюжный [и др.]. — Луганск: ВУГУ, 2000. — 168 с.
15. Maddalena, E.T. Experimental data driven model predictive control of a hospital HVAC system during regular use / Emilio T. Maddalena, Silvio A. Müller, Rafael M. dos Santos, Christophe Salzmann, Colin N. Jones // Energy & Buildings. — 2022. — Т. 271. — 112316.
16. Надеждин, И.С. Системы управления нестационарным объектом на основе МРС-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой / И.С. Надеждин, А.Г. Горюнов, Ф. Маненти // Управление большими системами. Анализ и синтез систем управления. — 2018. — Вып. 75. — С. 50–75.
17. Теория автоматического управления / Е.Э. Страшинин, А.Д. Заколяпин, С.П. Трофимов [и др.]. — Екатеринбург: УФУ, 2019. — 456 с.
18. Колодин, А.А., Ёлшин В.В. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирующей модели / А.А. Колодин, В.В. Ёлшин // Вест. Самар. гос. ун-та. Сер. технические науки. — 2021. — Т. 29, № 1. — С. 36–44.
19. Судак, В. Системы VAV. Краткое описание / В. Судак, Я. Хендигер. — Краков: SMAУ, 2009. — 80 с. Режим доступа: URL: [http://belimo.com.ua/files/VAV/VAV\\_book.pdf](http://belimo.com.ua/files/VAV/VAV_book.pdf).
20. Марьясин, О.Ю. Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей / О.Ю. Марьясин, А.С. Колодкина // Вест. Самар. гос. ун-та. Сер. технические науки. — 2017. — № 1(53). — С. 122–132.

### **Sokolov Vladimir Il'yich**

Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk, Russia  
E-mail: sokolov.snu.edu@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0459-1824>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=439665](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439665)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191822948>

### **Chernikova Irina Demyanovna**

Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk, Russia  
E-mail: chernikova\_i\_d@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7633-2293>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58643068300>

### **Salukvadze Georgii Vladimirovich**

Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk, Russia  
E-mail: georgysalukvadze@yandex.com

## **Modeling of two-circuit automatic control system of air heating**

**Abstract.** The authors presented the two-circuit automatic control system for air heating. In the heating-ventilating system, the supply air comes from the central ventilation unit at its constant temperature. Regulation of the supply air flow is carried out by the special terminal, and additional change of its temperature is made in the heat exchanger. The work processes taking place in the system are reflected on the functional scheme. The article develops the linear mathematical model of the heating-ventilating system, on the basis of which the structural scheme for the two-circuit automatic air heating control system has been constructed. In the control system, in general, various controllers for the flow rate and temperature of the supply air are provided. The block-diagram has been developed to simulate the system in the Simulink environment. The block-diagram provides simulation of the automatic control system under various influences and their combinations. The calculation of the transient process in the two-circuit automatic control system is performed when the given temperature jumps in the serviced room. In the presented calculation example, the controller based on a predictive model is used for the supply air flow control circuit, and the proportional-integral-differentiating controller for the temperature control circuit. The calculation result is compared with the transient characteristic of control object. The developed mathematical model, structural scheme and block-diagrams for simulation in the Simulink environment allow us to study the regulation processes and regulation quality of aerothermodynamic characteristics for the two-circuit automatic air heating control system. By a rational combination of controllers for supply air flow and its temperature, with optimal adjustment of their parameters, it is possible to improve the regulation quality indicators of the automatic air heating control system and, as a result, to ensure an increase in the efficiency of the heating-ventilating system.

**Keywords:** heating-ventilating system; structural scheme; controller; block-diagram; transient process