

Совершенство- вание настроек одноконтурной АСР темпера- туры воздуха с ПИ-регулятором для вентустановки

Рецензия эксперта на статью получена
23.06.2025 [The expert review of the article
was received on June 23, 2025]

Тепловая схема вентустановки

Воздух, забираемый с улицы с температу-
рой $-27...+40^{\circ}\text{C}$, попадает в вентиляцион-
ную установку (рис. 1), находящуюся, как
правило, на последнем этаже здания [1–3].
С целью предотвращения негативных
последствий воздух, попадая в установку,
проходит фильтры, в которых очищает-
ся от внешних загрязнений (пыль, песок,
пыльца, пух).

После фильтров воздух проходит через
электрический воздухонагреватель пер-
вой ступени. Воздушный поток контакти-
рует с нагретыми элементами и поглощает
тепловую энергию. Датчики температуры
отслеживают температуру воздуха до
и после нагревателя и передают инфор-
мацию в автоматизированную систему
управления (АСУ) приточной вентиля-
ционной установкой (ПВУ). При дости-
жении заданного значения температуры
обрабатываемого воздуха нагрев умень-
шается или отключается.

Пройдя центробежный вентилятор
воздух попадает в подогреватель второй
ступени — калорифер, теплообменное
устройство типа «вода — воздух». Для
предотвращения обмерзания теплооб-
менного аппарата используется автома-
тический контроль температуры приточ-
ного воздуха после фильтра. Регулировка
температуры воздуха после калорифера
выполняется посредством изменения рас-
хода теплоносителя из сети теплоснабже-
ния на калорифер в зависимости от сиг-
налов датчиков измерения температуры

Регулировка температуры воз- духа после калорифера выпол- няется посредством изменения расхода теплоносителя из сети теплоснабжения на калорифер в зависимости от сигналов дат- чиков измерения температуры воздуха

воздуха. Следующая секция увлажнения
требует применения двух датчиков влаж-
ности — до и после секции, регулирова-
ние увлажнённости воздуха происходит
за счёт изменения расхода воды в увлаж-
нителе. Последний этап подготовки воз-
духа — снижение уровня шума с учётом
восприятия звуком человека. Монито-
ринг производится за счёт установки шу-
мометров на выходе после глушителя.

Приборы измерения для АСУ ПВУ

В воздушном тракте на обратном и по-
дающем трубопроводах системы тепло-
снабжения и ГВС устанавливаются датчи-
ки температуры. Это могут быть термо-
метры сопротивления, принцип действия
которых основан на изменении электри-
ческого сопротивления медного чувстви-
тельного элемента (50M) в зависимости
от измеряемой температуры. Спротив-
ление чувствительного элемента линейно
возрастает при увеличении температуры,
что фиксируется измерительной систе-
мой и преобразуется в аналоговый сигнал
(4–20 мА).

УДК 621.1.016. Научная специальность: 2.1.3.

О путях совершенствования настроек одноконтурной автоматизи- рованной системы регулирования температуры воздуха с ПИ-ре- гулятором для вентиляционной установки

Сергей Вадимович Гузов, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский
университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **Андрей
Андреевич Арбатский**, к.т.н., генеральный директор ООО «НИИ «Энерго-
эффективных технологий микроклимата»; **Елена Владимировна Крылова**,
к.п.н., доцент, заместитель директора по учебной работе Института тепло-
вой и атомной энергетики (ИТАЭ) НИУ «МЭИ»; **Анна Олеговна Сорокина**,
студент, НИУ «МЭИ»

Описана типовая схема приточной вентиляционной установки, располо-
женной в умеренной климатической зоне. Предложена компоновка датчи-
ками и предложены решения, наиболее оптимальные по критерию точно-
сти и стоимости. Рассмотрены некоторые проблемы эксплуатации АСУ,
связанные со сложностями формирования и настройки ERP-системы на
объекте, а также с несовместимостью программного обеспечения. Пока-
зана возможность решения ряда сложностей за счёт формирования аде-
кватных статистических dataset, внедрения цифровых фильтров и авто-
матической валидации накопленных данных. Для одноконтурной системы
с ПИ-регулятором сформирована передаточная функция, построен годо-
граф комплексной частотной характеристики (КЧХ) объекта управления,
рассчитаны переходные процессы в системах с цифровым и аналоговым
регуляторами при изменении задания в программе SimInTech. Показано
выполнение теоремы Котельникова — Шеннона.

Ключевые слова: приточная вытяжная вентиляционная установка, ав-
томатизированная система управления, ПИ-регулятор, система плани-
рования ресурсов предприятия (ERP-система), dataset, обработка статисти-
ческой информации; годограф, устойчивость.

UDC 621.1.016. Scientific specialty number: 2.1.3.

On ways to improve the settings of a single-circuit automated air tem- perature control system with a PI controller for a ventilation unit

Sergey V. Guzhov, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research Uni-
versity "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Andrey A. Arbatsky**,
PhD (Engineering), General Director of the "Research Institute of Energy-Efficient
Microclimate Technologies", LLC; **Elena V. Krylova**, PhD (Engineering), Asso-
ciate Professor, Deputy Director for Academic Affairs of the Institute Thermal
and Nuclear Power Engineering of the NRU "MPEI"; **Anna O. Sorokina**, student,
NRU "MPEI"

A typical scheme of a supply ventilation system located in a temperate climate
zone is described. An arrangement of sensors is proposed and solutions are pro-
posed that are most optimal in terms of accuracy and cost. Some problems of
operating an automatic control system related to the complexities of forming and
configuring an Enterprise Resource Planning (ERP) system on site, as well as soft-
ware incompatibilities, are considered. The possibility of solving a number of diffi-
culties through the formation of adequate statistical datasets, the introduction of
digital filters and automatic validation of accumulated data is shown. A transfer
function has been formed for a single-circuit system with a PI controller, a hodo-
graph of the complex frequency response of the control object has been construct-
ed, and transients in systems with digital and analog controllers have been cal-
culated when a task is changed in the SimInTech program. The fulfillment of the
Kotelnikov—Shannon theorem is shown.

Key words: supply and exhaust ventilation system, automated control system,
PI controller, enterprise resource planning system (ERP system), dataset, statisti-
cal information processing; hodograph, sustainability.

Очевидными преимуществами датчика для нашей схемы является его температурный диапазон $-50...+200^{\circ}\text{C}$, класс допуска В обеспечивает высокую точность измерения (отклонение $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$). Стоит отметить, что в схеме используется датчик с трёхпроводной схемой подключения, что увеличивает точность измерения температуры. Альтернативным вариантом являются термоэлектрические термометры, принцип действия которых основан на возникновении термоэлектродвижущей силы в замкнутой системе, состоящей из двух проводников с разными термоэлектрическими свойствами. Преимущества: экономичность (дешевле термометров сопротивления) и быстрый отклик на изменения температуры. Недостатки: низкая точность (погрешность $\pm 2^{\circ}\text{C}$ в системе ГВС может привести к нарушению нормативных значений нагрева горячей воды, например, $+58^{\circ}\text{C}$ вместо $+60^{\circ}\text{C}$, откуда возникает риск развития бактерий); низкая стабильность показаний, требующая дополнительных проверок датчика. В рассматриваемой системе отсутствуют резкие скачки температур. Выбраны термометры сопротивления.

Мониторинг давления в трубопроводах выполняется преобразователем давления. Датчик представляет собой преобразователь избыточного давления с керамической измерительной мембраной и сенсором типа «тензодатчик-на-керамике» (ТНК) с выходным сигналом 4–20 мА. Преимущества: класс точности 1,0, низкая стоимость и долговечность.

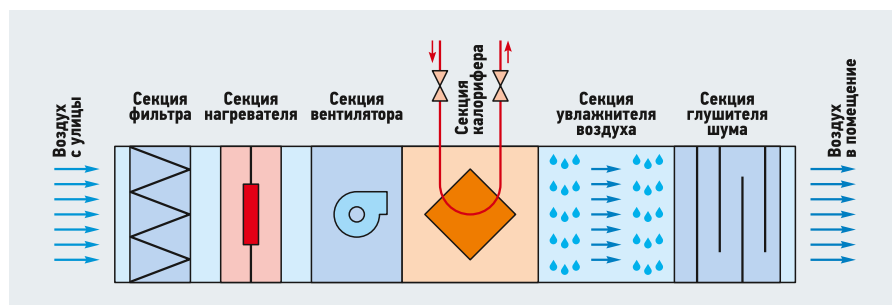
Альтернативным вариантом измерения давления является датчик с ёмкостным сенсором, который работает по принципу изменения ёмкости при деформации мембраны. При подаче давления на сенсор мембрана деформируется, и ёмкость между обкладками изменяется. Данный вариант обеспечивает более точные измерения (до 0,1 % от диапазона измерений), однако датчик имеет более сложную конструкцию и, соответственно, большую стоимость по сравнению с преобразователями давления тензорезистивного типа.

Для измерения значения влажности используется датчик влажности с выносным зондом ПВт100-Н5.2.И.2 производства «ОВЕН» [4]. Прибор состоит из электронного блока и измерительного зонда. Зонд состоит из защитного цилиндрического корпуса и чувствительного элемента (однокристалльного цифрового сенсора относительной влажности). Прибор масштабирует измеренные значения влажности и температуры, преобразовывая их в унифицированный аналоговый сигнал 4–20 мА. Преимущество: высокая

точность измерения $\pm 3\%$ от измеренного значения относительной влажности. Помимо ручных психрометров, альтернативой для ёмкостного датчика служат резистивные датчики. Такие датчики состоят из двух электродов, которые расположены на подложке из полимерных компонентов, а сверху покрыты слоем оксида алюминия. Рост уровня влажности изменяет её параметры электрического сопротивления, в результате напряжение пропущенного через электроды тока также меняется. Преимущество: дешевизна, недостаток: низкая точность.

ходомер. Преимущество: дешевизна. Недостатки: механический износ, необходимость частых калибровок, создают дополнительное сопротивление в воздуховоде.

Для контроля уровня шума в систему устанавливается датчик шума ИСВ300-06 производства компании «АйСиБиКом» [6], в котором ёмкостный микрофон преобразует звуковые волны в электрический сигнал (звуковое давление колеблется мембрану, расстояние между обкладками конденсатора меняется, ёмкость изменяется). Результаты передаются через интерфейс RS-485 (Modbus) на контроллер АСУ ПВУ.



❖ Рис. 1. Принципиальная схема вентиляционной установки

Мониторинг электрических параметров на электронагревателе осуществляется амперметром ИТС-Ф1.Щ и вольтметром ИНС-Ф1.2.Щ3. Для измерения скорости воздуха приняты вихревые накладные каналные датчики скорости потока.

Измерение расхода воздуха выполняется ультразвуковым расходомером [5]. Необходимость использования данного расходомера обусловлена большим номинальным расходом воздуха 11 700 м³/ч на объекте. Преимущества: выходной сигнал 4–20 мА; устойчивость к загрязнениям, чувствительные элементы не забиваются пылью; высокая надёжность. Также могут быть использованы термоанемометры, трубки Пито с дифференциальными датчиками (для больших сечений); ультразвуковые датчики (в условиях высокой запылённости). Альтернативным вариантом является крыльчатый (тахометрический) рас-

Таким образом, к применению приняты датчики температуры ДТС035-50М. В3.80, давления ПД100-ДИ1.0-371-1.0, влажности ПВт100-Н5.2.И.2, амперметра ИТС-Ф1.Щ, вольтметра ИНС-Ф1.2.Щ3, мультиметра ИМС-Ф1, а также ультразвукового расходомера «Взлёт РГ» и датчика шума ИСВ300-06. Это позволяет автоматизировать управление системой, обеспечивая точное и непрерывное измерение необходимых параметров.

Пути устранения недостатков АСУ

Сразу отметим некоторые проблемы эксплуатации автоматизированных систем управления:

1. Информация, поступающая от полевого уровня АСУ, может быть неполной или недостоверной [7].
2. Невозможность предусмотреть все сценарии работы АСУ.
3. Входящая в состав MES-системы автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления энергоресурсами (АСОДУЭ) может работать неэффективно по критериям экономичности и минимума эксплуатационных затрат.
4. Часто на объекте установлено несколько АСУ для разных подсистем, программное обеспечение которых несовместимо.
5. ERP-система требует длительной настройки пространства кодов системы с привязкой к определённой технологии, что требует высокооплачиваемых специалистов, долго и дорого [8].

Для измерения значения влажности используется датчик влажности с выносным зондом ПВт100-Н5.2.И.2. Прибор масштабирует измеренные значения влажности и температуры, преобразовывая их в унифицированный аналоговый сигнал 4–20 мА. Преимущество: высокая точность измерения $\pm 3\%$ от измеренного значения относительной влажности

Нивелировать некоторые из перечисленных проблем возможно с применением ряда мероприятий по:

- стандартизации процедур сбора данных — необходимо определить данные, необходимые для сбора, периодичность сбора данных, точность, синхронность сбора данных;
- внедрению систем мониторинга и оценки качества данных с использованием прецедентов и проверки по аномалиям;
- использованию систем для верификации и анализа информации для выявления закономерностей и трендов с последующей разработкой кратко- и среднесрочных сценариев объёмов теплопотребления приточной вентиляционной установкой и выбора наиболее энергоэффективного алгоритма функционирования.

Рассмотрим эксплуатацию АСУ ПВУ стандартной комплектации системы в составе с цифровым контроллером. Одноконтурная система состоит из объекта регулирования (температура воздуха), ПИ-регулятора и отрицательной обратной связи

К некоторым способам достижения поставленной цели могут относиться: формирование на объекте гибридной системы LIMS + Edds + Compufig; внедрение цифровых фильтров и автоматической валидации для отсева заведомо ложных значений (например, выход за диапазон); прогнозирование недостающих данных; установка резервных и контрольных датчиков с последующим сравнением дан-

ных с нескольких датчиков (кросс-валидация); автоматический опрос данных при пропуске; динамическая приоритизация (передача только значимых изменений); использование цифрового двойника здания в части модели его теплового баланса.

Расчёт одноконтурной автоматической системы регулирования температуры воздуха с ПИ-регулятором

Система регулирования температуры воздуха на выходе из калорифера представляет собой один из базовых элементов в системах подготовки воздуха. Рассмотрим эксплуатацию АСУ ПВУ стандартной комплектации системы в составе с цифровым контроллером. Система автоматического регулирования (АСР) — одноконтурная система с ПИ-регулятором. Одноконтурная система состоит из объекта регулирования (температура воздуха), ПИ-регулятора и отрицательной обратной связи. Передаточная функция сформирована на основании расчётных данных по объекту:

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{1e^{-20s}}{(100s + 1)^3}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{УП}}. \quad (1)$$

Отклик системы при изменении частоты входного сигнала приведён на годографе коэффициента частотной характеристики (КЧХ) объекта управления (рис. 2). Переходные процессы в системах с цифровым и аналоговым регуляторами при изменении задания в программе SimInTech приведены на рис. 3.

Проведённый анализ современного состояния систем регулирования температуры воздуха в теплообменном оборудовании показал, что наиболее эф-

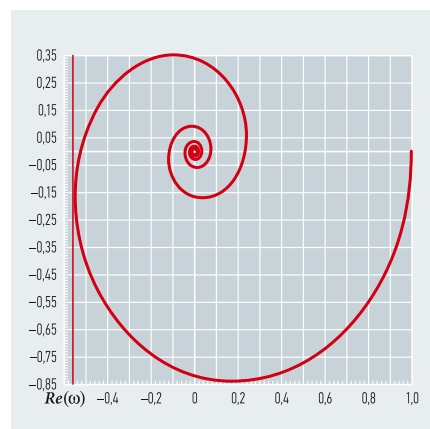


Рис. 2. Годограф КЧХ объекта управления

фективными являются системы с качественным и количественно-качественным регулированием.

Заключение

Построена математическая модель объекта в виде передаточной функции с учётом запаздывания. Рассчитана одноконтурная автоматизированная система регулирования (АСР) температуры воздуха с ПИ-регулятором, найдены параметры регулятора так, чтобы частотный показатель количества колебаний не превышал заданного значения, а именно $M = 1,55$; $k_p = 0,622 \% \text{УП} / \% \text{УС}$; $k_i = 0,012$. Методом подбора определен оптимальный интервал квантования $T = 7$ с. Построены переходные процессы, по которым можно сделать вывод: теорема Котельникова — Шеннона выполняется, система с цифровым регулятором ведёт себя подобно системе с аналоговым регулятором. Данная система обладает достаточной устойчивостью и может быть рекомендована к практическому применению в системах вентиляции. ●

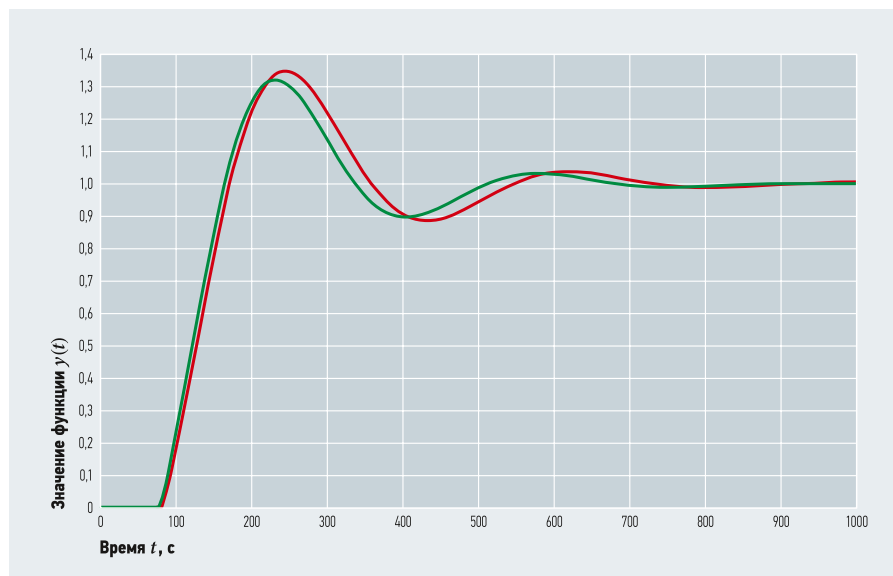


Рис. 3. Переходные процессы в системах с цифровым и аналоговым регуляторами при изменении задания в программе SimInTech

1. Яковлев И.В., Авдокунин Н.В., Горелов М.В. Экономика и затраты энергии при обеспечении тепловых режимов центров обработки данных, охлаждаемых наружным воздухом // Промышленная энергетика, 2025. №1. С. 41–49.
2. Арбатский А.А., Горелов М.В., Горячева Е.М. Разработка алгоритма регулирования теплоотдачи вентрипальных конвекторов // Журнал СОК, 2023. №7. С. 26–29.
3. Криницкий Е.В., Жерягин М.Д., Маскинская А.Ю. Прикладные аспекты координации цифровых информационных моделей инженерных систем зданий в MagiCAD для Revit // Журнал СОК, 2022. №1. С. 12–16.
4. Промышленный датчик влажности и температуры воздуха ПВТ-100 [Электр. текст]. «ОВЕН». Режим доступа: oven.ru. Дата обрац.: 20.06.2025.
5. Измерители расхода воздуха TROX [Электр. текст]. «Смарт Трейдинг». Режим доступа: smtrading.ru. Дата обрац.: 20.06.2025.
6. ICB300-06. Датчик шума (комнатный) [Электр. текст]. «АйСиБиКом». Режим доступа: icbcom.ru. Дата обрац.: 20.06.2025.
7. Соловьёв В.И. Жилищно-коммунальное хозяйство в контексте цифровизации и цифровой трансформации // Инновации в жизнь, 2020. №1. С. 116–130.
8. Харазов В.Г. Проблемы и пути развития интегрированных АСУ ТП // Известия СПбГТУ, 2013. №18. С. 89–92.

Reference — see page 80.

On ways to improve the settings of a single-circuit automated air temperature control system with a PI controller for a ventilation unit. Pp. 52–54.

Sergey V. Guzhov, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Andrey A. Arbatsky**, PhD (Engineering), General Director of the "Research Institute of Energy-Efficient Microclimate Technologies", LLC; **Elena V. Krylova**, PhD (Engineering), Associate Professor, deputy director for Academic Affairs of the Institute Thermal and Nuclear Power Engineering of the NRU "MPEI"; **Anna O. Sorokina**, student, NRU "MPEI"

1. I.V. Yakovlev, N.V. Avdokunin, M.V. Gorelov. *Ekonomiya i zatraty energii pri obespechenii teplovykh rezhimov tsentrov obrabotki dannykh, okhlazhdaemykh naruzhnym vozdukhom* [Energy savings and costs in ensuring thermal conditions for data processing centers cooled by outside air]. *Promyshlennaya energetika* ["Industrial Power Engineering" Magazine]. 2025. No. 1. Pp. 41–49. [In Russian]
2. [A.A. Arbatsky, M.V. Gorelov, E.M. Goryacheva. Razrabotka algoritma regulirovaniya teplootdachi vnutripol'nykh konvektorov](#) [Development of an algorithm for regulating in-floor convectors heat transfer]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2023. No. 7. Pp. 26–29. [In Russian]
3. [E.V. Krinitsky, M.D. Zheryagin, A.Yu. Maskinskaya. Prikladnye aspekty koordinatsii tsifrovyykh informatsionnykh modelej inzhenernykh sistem zdaniy v MagiCAD dlya Revit](#) [Applied aspects of coordinating digital information models of building engineering systems in MagiCAD for Revit]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2022. No. 1. Pp. 12–16. [In Russian]
4. *Promyshlennyy datchik (preobrazovatel') vlazhnosti i temperatury vozdukha PVT-100* [PVT-100 industrial air humidity and temperature sensor (converter)]. "OVEN". Web-source: owen.ru. Access date: June 20, 2025. [In Russian]
5. *Izmeriteli raskhoda vozdukha TROX* [TROX air flow meters]. "Smart Trejding" ["Smart Trading"]. Web-source: smtrading.ru. Access date: June 20, 2025. [In Russian]
6. *ICB300-06. Datchik shuma (komnatnyy)* [ICB300-06. Noise sensor (room)]. "AjSiBiKom" ["ICBCom"]. Web-source: icbcom.ru. Access date: June 20, 2025. [In Russian]
7. V.I. Soloviev. *Zhilishchno-kommunal'noe khozyajstvo v kontekste tsifrovizatsii i tsifrovoj transformatsii* [Housing and public utilities in the context of digitalization and digital transformation]. *Innovatsii v zhizni* ["Innovations in Life" Magazine]. 2020. No. 1. Pp. 116–130. [In Russian]
8. V.G. Harazov. *Problemy i puti razvitiya integriruyemykh ASU TP* [Problems and development paths of integrated automated process control systems]. *Izvestiya SPbGTU* [Bulletin of the Saint Petersburg State Technological Institute]. 2013. No. 18. Pp. 89–92. [In Russian]