

Модернизация систем вентиляции производственных помещений

Виктория Дмитриевна Павлидис, Марина Викторовна Чкалова, Владимир Александрович Шахов
Оренбургский государственный аграрный университет, г. Оренбург, Россия
e-mail: shahov-v@yandex.ru

Аннотация. В статье дается теоретическое обоснование возможности модернизации системы вентиляции производственного помещения. Актуальность исследования продиктована необходимостью повышения эффективности системы вентиляции производственного помещения через ресурсосбережение и снижение энергозатрат. На основании анализа функционирующей системы вентиляции авторами разработано инженерно-техническое решение, состоящее в установке функциональных элементов и изменении структуры системы. Моделирование технической системы и ее верификация проводились с использованием методов анализа линейных динамических систем в программной среде SimInTech. Определение основных параметров оптимизации технической системы и применение стохастических методов к анализу базы данных посуточных значений температур позволило сформировать область оптимума функционирования. Все исследования проводились на базе Института управления рисками и комплексной безопасности Оренбургского государственного аграрного университета, а производственной базой экспериментальных исследований являлось научно-производственное предприятие «ПневМакс», разрабатывающее проект модернизации системы вентиляции для производственного помещения ООО Стройландия (г. Оренбург). Производственные испытания модернизированной системы вентиляции функционирующего помещения показали повышение эффективности использования производственных ресурсов и существенное снижение энергозатрат.

Ключевые слова: система вентиляции; модернизация; автоматизированное управление; качественные показатели; энергоэффективность.

Для цитирования: Павлидис В. Д., Чкалова М. В., Шахов В. А. Модернизация систем вентиляции производственных помещений // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 158–166. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp158-166>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Modernization of ventilation systems for industrial premises

Victoria D. Pavlidis, Marina V. Chkalova, Vladimir A. Shakhov
Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia
e-mail: shahov-v@yandex.ru

Abstract. The article provides a theoretical justification for the possibility of modernizing the ventilation system of a production facility. The relevance of the study is dictated by the need to increase the efficiency of the ventilation system of a production facility through resource conservation and reduction of energy costs. Based on the analysis of the functioning ventilation system, the authors developed an engineering solution consisting of installing functional elements and changing the structure of the system. Modeling of the technical system and its verification were carried out using methods of analysis of linear dynamic systems in the SimInTech software environment. Determining the main parameters for optimizing a technical system and applying stochastic methods to analyze a database of daily temperature values made it possible to form an area of optimal functioning. All studies were carried out on the basis of the Institute of Risk Management and Integrated Safety of the Orenburg State Agrarian University, and the production base for the experimental studies was the research and production enterprise “PnevMax”, which is developing a project for modernizing the ventilation system for the production premises of Stroilandiya LLC (Orenburg). Production tests of the modernized ventilation system for the operating premises showed an increase in the efficiency of use of production resources and a significant reduction in energy costs.

Keywords: ventilation system; modernization; automated control; qualitative indicators; energy efficiency.

For citation: Pavlidis V. D., Chkalova M. V., Shakhov V. A. Modernization of ventilation systems for industrial premises. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2023;(12):158–166. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp158-166>.





Введение. Современные производственные помещения требуют эффективных систем вентиляции для обеспечения комфортных и безопасных условий деятельности.

Техническое оснащение производственного помещения различными инженерными системами связано с ростом непроизводственных затрат. Всякое производственное помещение оснащается системой вентиляции, модернизация которой сможет существенно снизить непроизводственные затраты предприятия. Проблема повышения эффективности технических систем путем снижения эксплуатационных затрат становится весьма актуальной [1, 2].

Предметом исследования являлась система автоматизированного управления (САУ) вентилярованием производственного помещения.

Цель работы – повышение эффективности системы вентиляции производственного помещения посредством ее модернизации.

Для достижения цели были решены следующие задачи: проведен анализ технической системы вентиляции производственного помещения и дано обоснование необходимости ее модернизации; получено инженерно-техническое решение, позволяющее модернизировать систему вентиляции; построена модель управления системой вентиляции производственного помещения, проведена ее проверка на соответствие принципам управления и определены основные качественные показатели системы управления; проведены инженерно-математические расчеты эффективности модернизации системы вентиляции производственного помещения.

Анализ функциональных элементов технической системы, принципов ее работы, требований к эксплуатации и комплектации позволил выдвинуть рабочую гипотезу: модернизация системы вентиляции производственного помещения посредством конструктивных изменений и усовершенствования ее САУ приведет к повышению эффективности всей системы через снижение энергозатрат.

Методика исследований. Производственной базой экспериментальных исследований являлось научно-производственное предприятие «ПневМакс», разрабатывающее проект модернизации системы вентиляции для производственного помещения ООО Стройландия (г. Оренбург).

Система вентиляции – это комплекс инженерных решений и технических средств, разработанных для обеспечения оптимального состояния воздуха в помещении. Основная задача системы вентиляции состоит в обеспечении постоянного поступления свежего воздуха и удаления, загрязненного или перегретого воздуха из помещения. Вентиляция не только обеспечивает комфортные условия для пребывания людей, но и играет важную роль в поддержании безопасности, здоровья и эффективности работы в производственных помещениях [1–3].

Система вентиляции производственного помещения представлена своей принципиальной схемой (рис. 1).

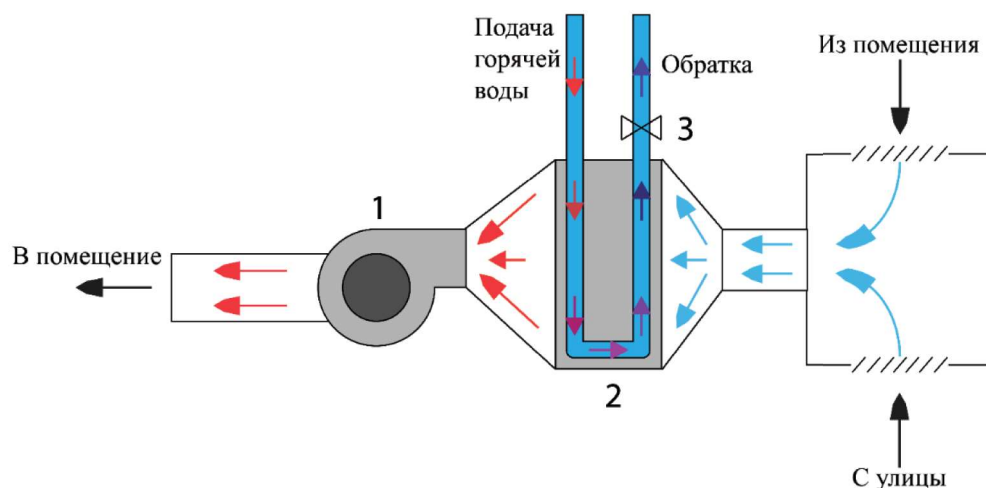


Рис. 1. Принципиальная схема системы вентиляции производственного помещения до модернизации:
1 – вентилятор, 2 – калорифер, 3 – клапан подачи горячей воды

Существующая САУ вентилярованием имеет ограничение: скорость вращения вентилятора невозможно регулировать, так как на двигатель вентилятора подаются константные значения силы тока и напряжения [4].

В качестве основного показателя эффективности системы вентиляции производственного помещения был выбран уровень энергозатрат.

Выбор основных параметров оптимизации (частота вращения вентилятора, мощность двигателя вентилятора, мощность калорифера) основывается на исследованиях и анализе энергетической эффективности системы вентиляции [4, 5] и позволяет достичь наилучшего баланса между требуемой произво-



длительностью системы и минимальным потреблением энергии, что является определяющим в области ресурсосбережения.

Анализ параметров и необходимость в круглогодичном использовании системы вентиляции производственного помещения определили конструктивные и функциональные изменения системы: установка частотного преобразователя на двигатель вентилятора и формирование подсистемы охлаждения приточного воздуха (рис. 2).

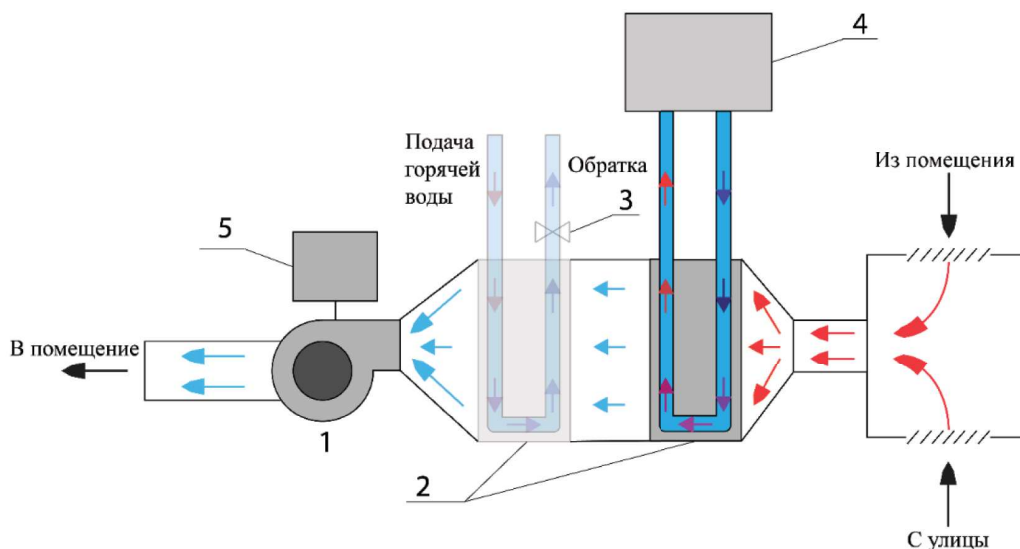


Рис. 2. Принципиальная схема системы вентиляции производственного помещения после модернизации: 1 – вентилятор, 2 – калорифер, 3 – клапан регулировки подачи горячей воды, 4 – чиллер, 5 – частотный преобразователь

Установка частотного преобразователя позволит уменьшить износ двигателя вентилятора и увеличить его энергоэффективность. Охлаждение приточного воздуха будет осуществляться за счет его прохождения через калорифер, в котором циркулирует вода, охлажденная чиллером до температуры 5–10 °С. Дополнительный контур охлаждения приточного воздуха увеличит эксплуатационный ресурс всей системы, за счет снижения нагрузки на кондиционеры, которые могут быть установленные локально в вентилируемом помещении.

В ходе модернизации для оптимизации энергопотребления двигателя вентилятора был использован частотный преобразователь производства компании «ОВЕН». Модель частотного преобразователя подбиралась в соответствии с рабочей мощностью двигателя вентилятора – 11 кВт (ПЧВЗ-11К-В).

Установка частотного преобразователя уменьшает износ электродвигателя, увеличивает срок его службы и снижает затраты на ремонт и энергопотребление за счет следующих факторов: регулирование скорости: вращения электродвигателя, защита от перегрузок, управление моментом: вращения электродвигателя, плавный пуск и остановка, контроль нагрузки: на электродвигатель.

В ходе разработки подсистемы охлаждения приточного воздуха необходимо выбрать теплообменник и источник охлажденного теплоносителя. На основе общения с экспертами в области автоматизации и вентиляции было принято решение об установке калорифера КСК 3-12-02-ХЛЗ в качестве теплообменника. Калорифер КСК 3-12-02-ХЛЗ водяной осуществляет нагрев или охлаждение рециркуляционного, внешнего или смешанного воздуха для отопления и кондиционирования помещений промышленного и сельскохозяйственного назначения.

Источником охлажденного хладагента будет служить чиллер марки Thermocold CWC Prozone (с/h 1120 z). Чиллеры и тепловые насосы Thermocold серии CWC PROZONE предназначены для охлаждения воды или гликолевых растворов в малых и средних системах центрального кондиционирования или промышленных системах охлаждения [4, 5].

Проведем сравнительный анализ функциональных схем системы вентиляции до и после модернизации (рис. 3, а, б).

Анализ системы показал, что основные принципы управления не нарушены, и система управления представляет собой линейную динамическую систему.

Изменение алгоритма работы контроллера привело к увеличению числа рабочих режимов двигателя вентилятора, что увеличило его ресурс и снизило энергопотребление. Ресурсосбережению будет способствовать расширение системы вентиляции за счет дополнительного контура охлаждения приточного воздуха, который включает в себя калорифер и чиллер.

Для оценки качественных показателей функционирования динамической системы были построены структурные схемы САУ вентилярованием производственного помещения (рис. 4, а, б).

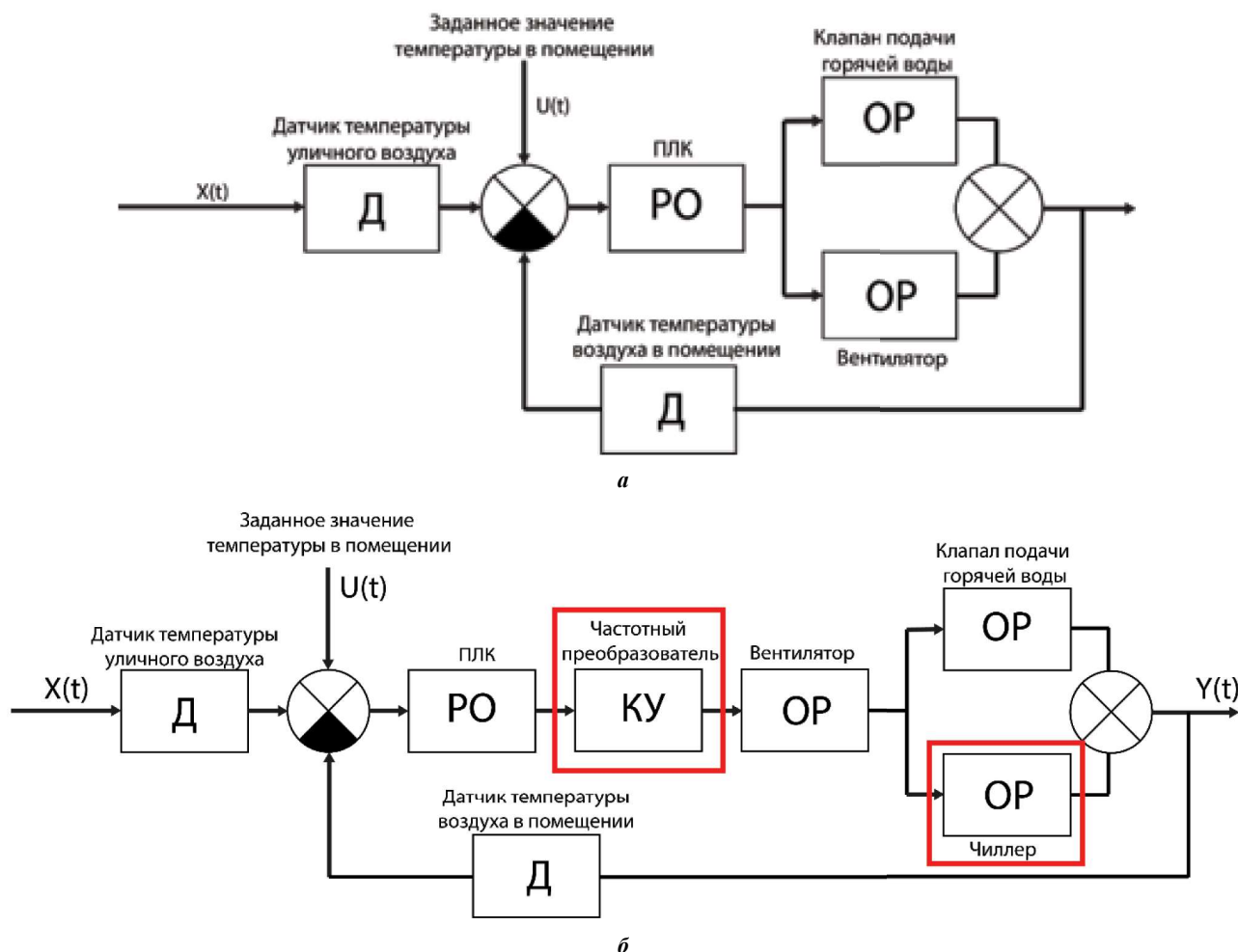


Рис. 3. Функциональная схема системы вентиляции производственного помещения:
а – до модернизации; б – после модернизации; Д – датчик температуры воздуха,
РО – регулирующий орган, ОР – объект регулирования, КУ – корректирующее устройство

Установим соответствие между функциональными элементами и типовыми динамическими звеньями САУ.

Датчик температуры воздуха моделировался апериодическим звеном 1-го порядка вследствие задержки и инерции его реакции на внешние возмущающие воздействия.

Программируемый логический контроллер (ПЛК) моделировался интегральным звеном вследствие его динамической способности к интегрированию и накоплению информации.

Характеристики и способ работы клапана регуляции подачи воды и вентилятора позволяют отнести их к пропорциональному звену. Коэффициент пропорциональности в данном случае будет определяться конструкцией и настройками этих структурных элементов.

Частотный преобразователь и чиллер можно отнести к пропорциональному звену. Сигнал управления на входе частотного преобразователя изменяет выходную частоту, которая контролирует скорость или частоту работы связанного устройства или системы. Сигнал управления на входе чиллера изменяет скорость и мощность его работы для изменения охлаждающего эффекта. Коэффициент пропорциональности так же определяется конструкцией и настройками этих структурных элементов [4–6].

Результаты исследований. Качественные показатели САУ представляют собой характеристики, отражающие качество выполнения системой управленческих функций. Они включают в себя точность управления, стабильность работы, скорость отклика, устойчивость, надежность, управляемость САУ [4–6]. Получим оценки качественных показателей исходной и модернизированной САУ на основании результатов исследования их передаточных функций в программной среде SimInTech (Simulation in Technology). Она разработана для моделирования и симуляции технических систем и процессов и предоставляет инструменты для создания и анализа динамических моделей различных объектов. Программная среда позволяет проводить различные эксперименты, исследования и оптимизацию процессов, а также оценивать эффективность и надежность систем до их реальной реализации. В программной среде SimInTech были построены структурные схемы САУ вентиляцией до и после модернизации (рис. 5, а, б).



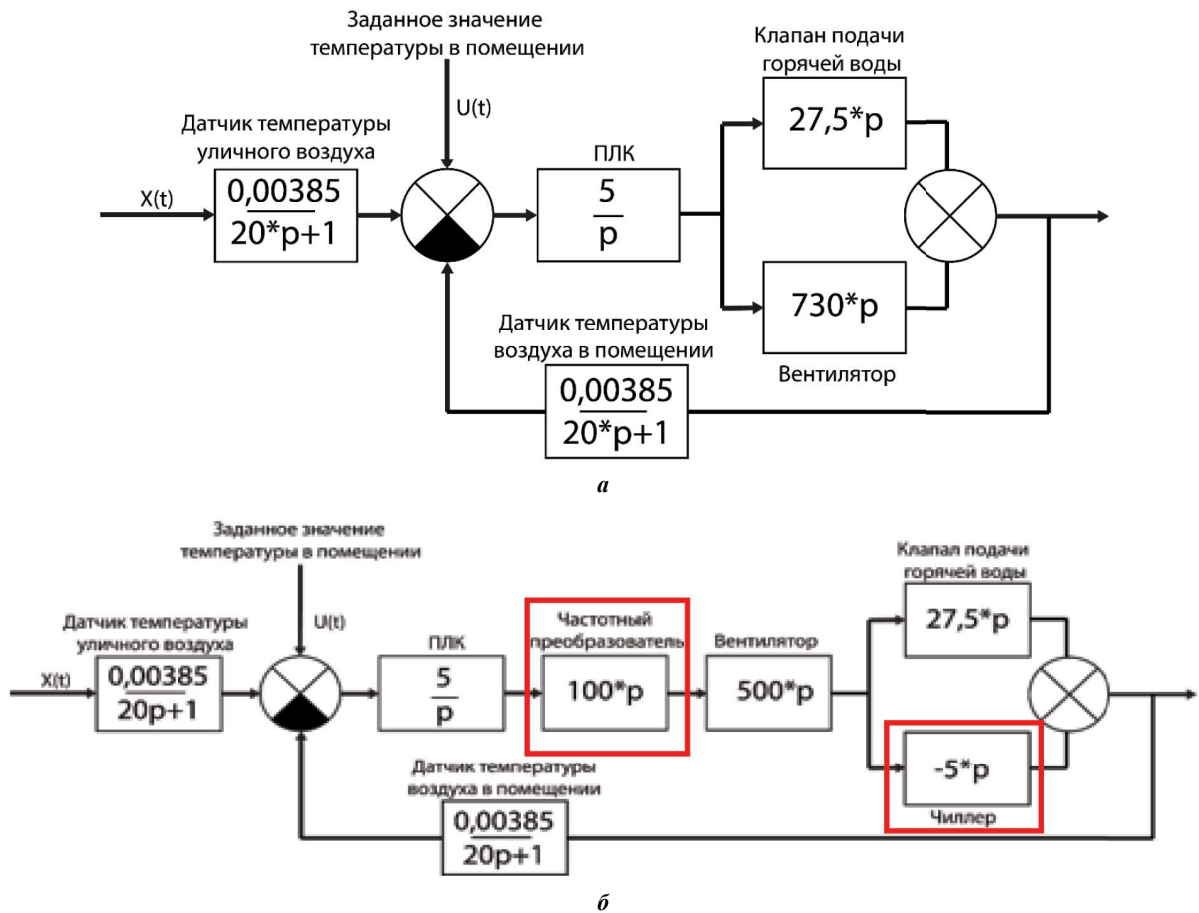


Рис. 4. Структурная схема САУ вентилированием производственного помещения: а – до модернизации; б – после модернизации

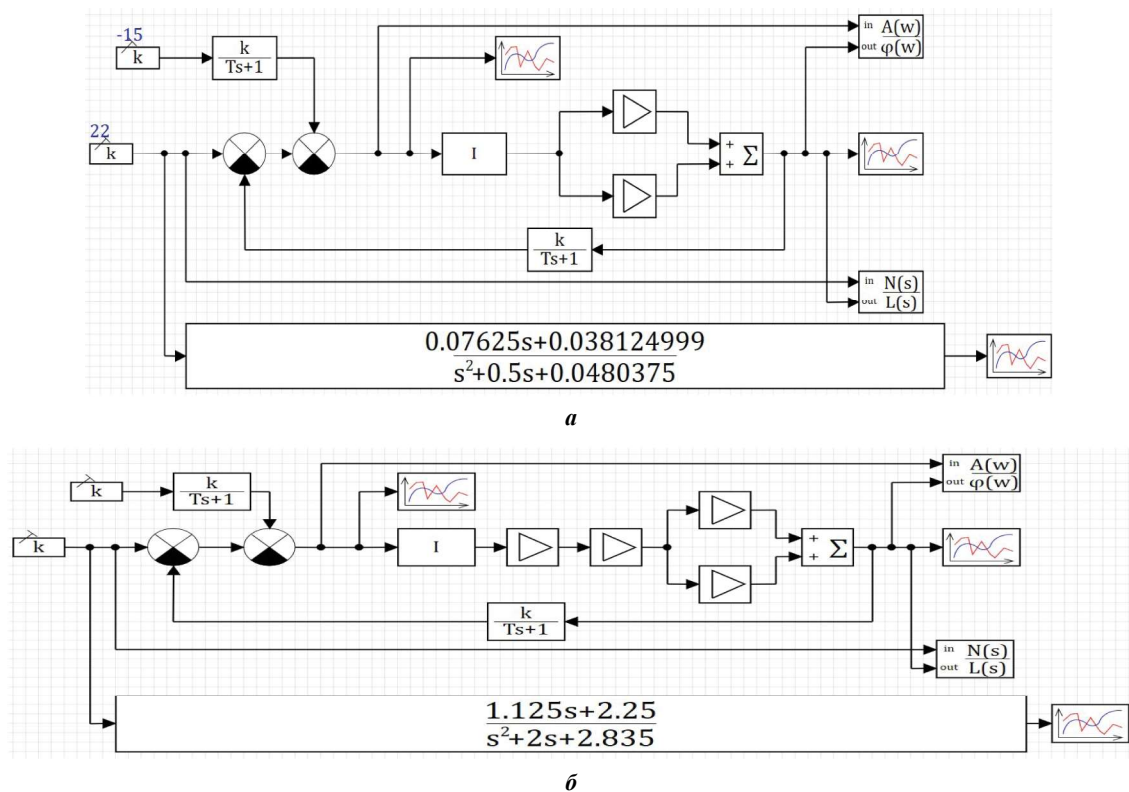


Рис. 5. Общий вид модели системы управления вентилированием: а – до модернизации, б – после модернизации

С помощью блока «Автоматическое построение передаточных функций» была получена обобщенная передаточная функция САУ до модернизации:

$$W(s) = \frac{0,07625s + 0,038124999}{s^2 + 0,5s + 0,0480375} \quad (1)$$

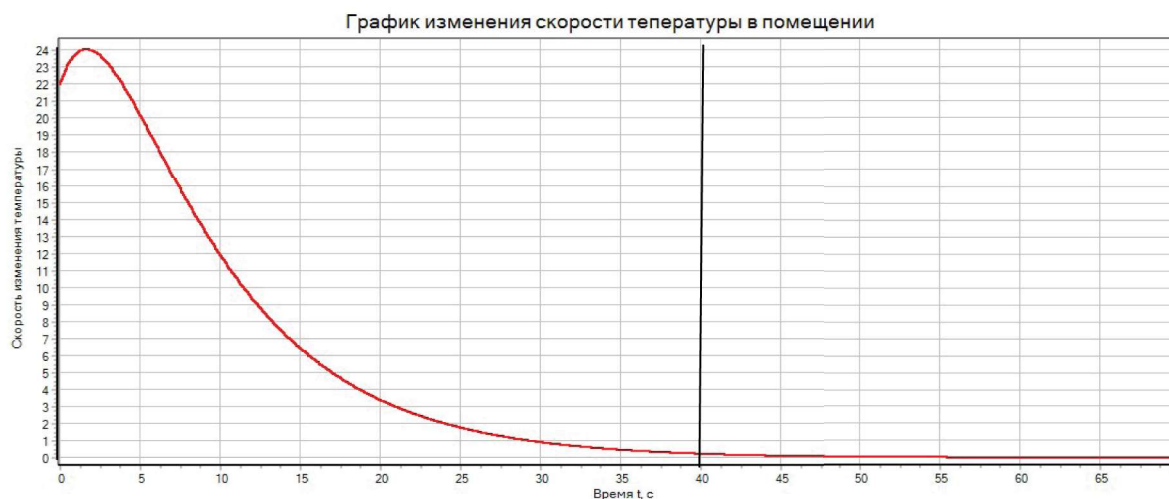
Корни соответствующего характеристического многочлена $L(s)$: $-0,37$; $-0,13$. Следовательно, по критерию Ляпунова система управления вентилированием до модернизации устойчива.

Аналогично была получена обобщенная передаточная функция САУ после модернизации:

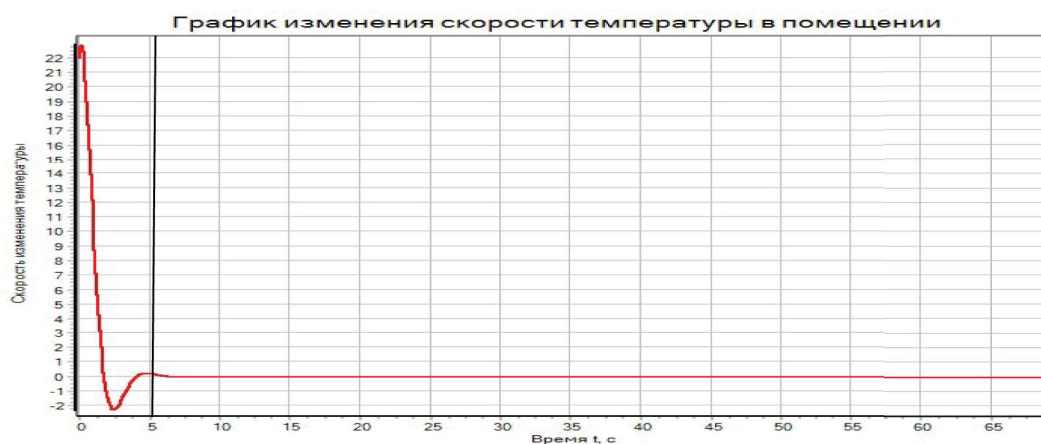
$$W(s) = \frac{1,125s + 2,25}{s^2 + 2s + 2,835} \quad (2)$$

Корни соответствующего характеристического многочлена $L(s)$: $-1 + 1,35i$; $-1 - 1,35i$. Следовательно, по критерию Ляпунова система управления вентилированием после модернизации сохранила устойчивость.

Для определения эффективности системы управления и ее способности быстро достигать требуемого состояния воспользуемся оценкой времени регулирования системы. Для построения оценки времени регулирования на основе ошибки регулирования можно использовать различные подходы. Один из распространенных методов – это измерение времени, за которое ошибка регулирования уменьшается до заданного допуска (рис. 6, а, б).



а



б

Рис. 6. Оценка времени регулирования системы управления вентилированием:
а – до модернизации, б – после модернизации

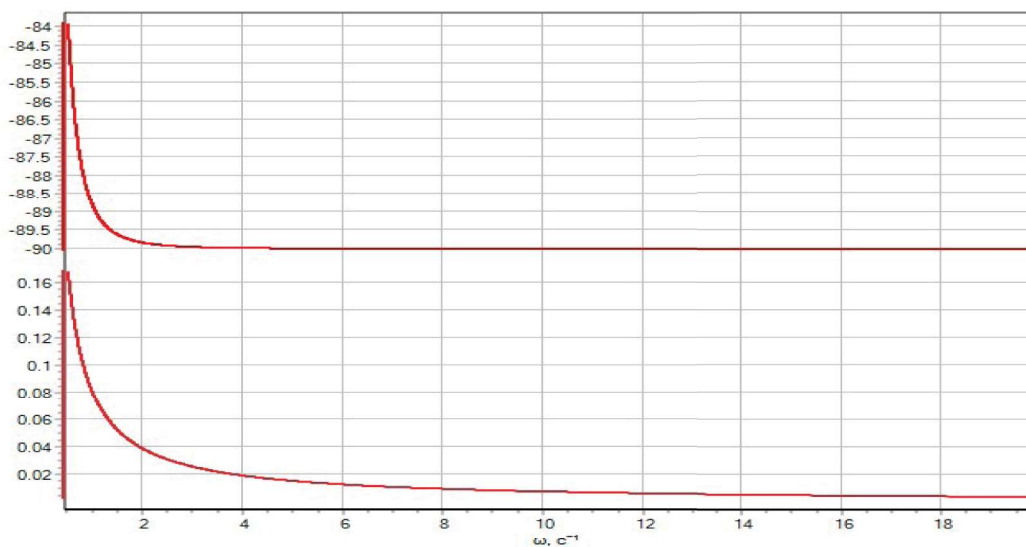
По графику можно сделать вывод о том, что до модернизации время регулирования составило 40 с, а после модернизации – 5 с. Модернизация повысила быстродействие системы управления вентилированием, что является положительным изменением.

Для того чтобы сделать выводы о запасах устойчивости системы управления на основе АЧХ (амплитудно-частотной характеристики) передаточной функции, следует проанализировать следующие аспекты.

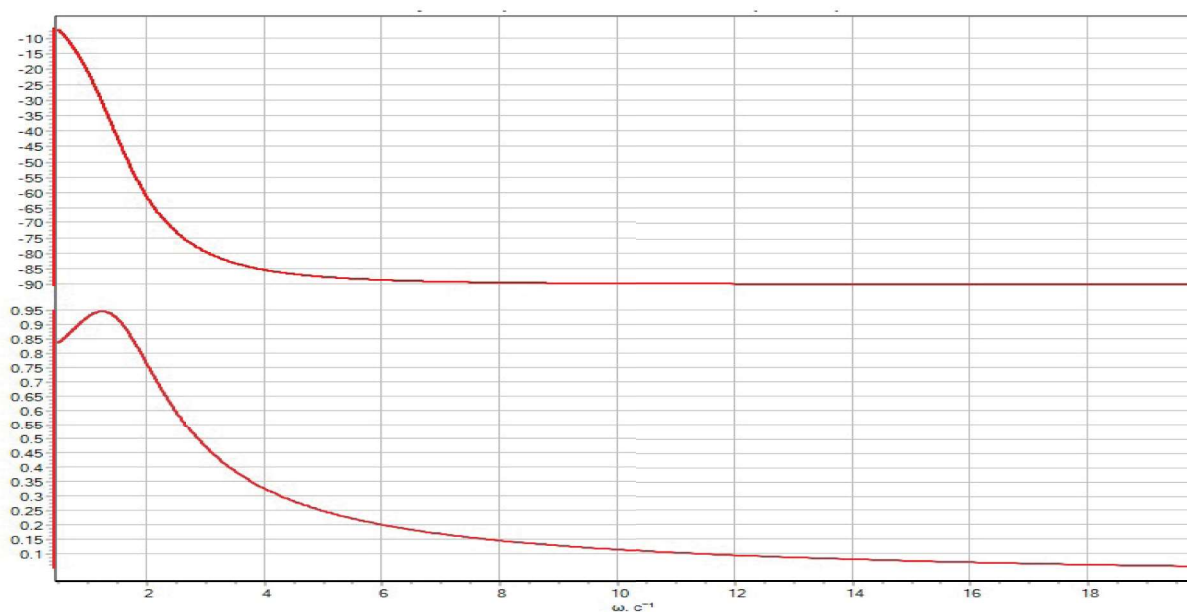
Амплитудный запас устойчивости: по АЧХ можно определить амплитудный запас устойчивости, который представляет собой отношение максимальной амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала на частоте, где фазовый сдвиг равен -180 град. Большой амплитудный запас устойчивости указывает на хороший запас стабильности системы.

Фазовый запас устойчивости: по АЧХ можно определить фазовый запас устойчивости, который представляет собой разность фаз между выходным и входным сигналами на частоте, где амплитуда передаточной функции равна 1 (0 дБ). Большой фазовый запас устойчивости указывает на хорошую устойчивость системы (рис. 7, а, б).





а



б

Рис. 7. График АФЧХ системы вентиляции производственного помещения:
а – до модернизации, б – после модернизации

До модернизации системы вентиляции запас устойчивости по фазе на частоте 2 с^{-1} равен $0,5^\circ$, а по амплитуде $0,04 \text{ дБ}$. Запасы устойчивости относительно малы, связано это с тем, что регулировка скорости вращения вентилятора отсутствует, а значит регулировка температуры воздуха, проходящего через систему вентиляции, осуществляется только с помощью мощности калорифера.

После модернизации системы вентиляции запас устойчивости по фазе на частоте 2 с^{-1} увеличился до 25° , а по амплитуде до $0,8 \text{ дБ}$. Запасы устойчивости увеличились после модернизации благодаря тому, что начала осуществляться регулировка скорости вращения вентилятора с помощью частотного преобразователя, что, в свою очередь, увеличило возможности по регулировке температуры приточного воздуха.

Для достижения наилучшей производительности и эффективности системы была определена область оптимума по трем параметрам (частота вращения вентилятора, мощность двигателя вентилятора, мощность калорифера). Расчет области оптимума позволяет определить значения трех параметров системы управления, для достижения желаемых характеристик системы (точность, стабильность, скорость отклика); провести оптимизацию системы управления для повышения эффективности, экономичности и производительности исходной технической системы в целом; оценить влияние каждого из трех параметров на характеристики системы управления. для обоснованного выбора характеристик регулирования системы управления [7, 8].

Для построения области оптимума технической системы по параметрам частоты вращения и мощности двигателя вентилятора воспользуемся техническими характеристиками вентилятора ВР 280-46.

Для получения интервала оптимальных значений мощности калорифера были проведены оценки этого показателя на основе статистической выборки за суточный временной промежуток из показателей температуры: наружного воздуха, обратной воды, приточного воздуха и приточной воды (рис. 8) [9].

Дата/время	Температура наружного воздуха (Temp1)	Температура обратной воды (ia_Tgw)	Температура приточного воздуха (Temp2)	Температура приточной воды
03 02 23 0:00	-8,6	51,70	54,9	84,8
03 02 23 1:00	-10,4	75,4	63,1	88,8
03 02 23 2:00	-10,5	59,8	58,9	88,8
03 02 23 3:00	-11,6	55,1	56,80	90,8
03 02 23 4:00	-11,1	54,8	56,7	90,8
03 02 23 5:00	-10,7	69,4	62,6	88,8
03 02 23 6:00	-11,1	78,4	63,7	90,8
03 02 23 7:00	-11,6	52,5	55,9	90,8
03 02 23 8:00	-12	53,9	56,3	92,9
03 02 23 9:00	-11,5	55	58,1	90,8
03 02 23 10:00	-12	54,3	58,5	92,9
03 02 23 11:00	-10,7	55,5	58,8	88,8
03 02 23 12:00	-9,2	58,2	61,6	86,8
03 02 23 13:00	-9,1	57,1	61	86,8
03 02 23 14:00	-7,6	55,2	60,3	82,7
03 02 23 15:00	-6,6	58,2	62,6	80,7
03 02 23 16:00	-6,3	58,9	62,9	80,7
03 02 23 17:00	-6,4	56,2	61,1	80,7
03 02 23 18:00	-6,8	56,5	60	80,7
03 02 23 19:00	-7,7	55,8	59,8	82,7
03 02 23 20:00	-7,6	55,4	59,6	82,7
03 02 23 21:00	-8,1	55,7	59,6	84,8
03 02 23 22:00	-8,5	53	58,4	84,8
03 02 23 23:00	-9	52,8	57,8	86,8

Рис. 8. Почасовая суточная выборка значений температур (фрагмент базы данных)

Границы доверительного интервала для мощности калорифера при условии нормального распределения (что подтверждается массивами опытных данных) на уровне надежности 0,95 вычислим по формуле

$$(\bar{X}_B - \frac{Stv}{\sqrt{n}}; \bar{X}_B + \frac{Stv}{\sqrt{n}}),$$

где $\bar{X}_B$ – среднее выборочное почасовых значений мощности калорифера, равное 346,24 кВт; D_B – дисперсия значений мощности, равная 120031 (кВт)²; S – исправленный выборочный стандарт значений мощности равный 353,91 кВт.

Результатом расчетов является доверительный интервал, интерпретируемый как область оптимума для мощности калорифера, который имеет вид (204,65; 478,83) кВт. Номинальный интервал показателя мощности калорифера - (0; 576) кВт.

Следующим этапом оптимизации является построение области оптимума на основе исследуемых параметров (рис. 9).

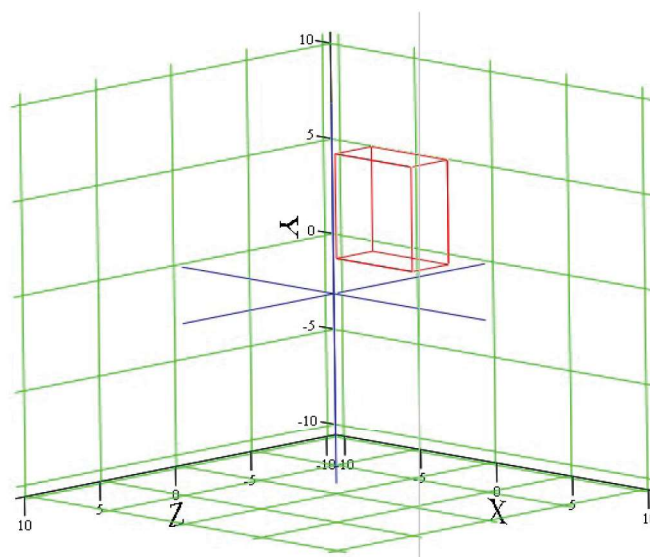


Рис. 9. Область оптимума функционирования системы вентиляции: до модернизации (синяя), после модернизации (красная)

Анализ области оптимума после модернизации технической системы показал ее увеличение по двум из трех параметров (см. таблицу).



Параметр оптимизации	Значения параметров оптимизации до модернизации	Интервалы значений параметров оптимизации после модернизации
Частота вращения вентилятора, об/мин	730	500–1000
Мощность двигателя вентилятора, кВт	11	3,3–8,8
Мощность калорифера, кВт	204–478	204–478

Работа системы в рамках оптимальных параметров гарантирует оптимальное потребление ресурсов. Уменьшение энергопотребления, как видно из таблицы 1, в результате модернизации составит 20 %, что обусловлено уменьшением рабочих и пусковых токов для двигателя вентилятора [9].

Заключение. Обосновано инженерно-техническое решение по добавлению частотного преобразователя и подсистемы охлаждения приточного воздуха с целью повышения энергоэффективности и увеличения ресурса оборудования системы вентилирования производственного помещения.

Построена модель системы управления в виде передаточной функции. Проведена верификация модели с целью получения оценок качественных показателей системы управления вентилированием производственного помещения, которая показала улучшение быстродействия за счет снижения времени регулирования от 40 до 5 с; увеличение надежности за счет повышения запасов устойчивости по фазе от 0,5° до 25°, и по амплитуде от 0,04 дБ до 0,8 дБ.

В ходе инженерно-математических расчетов были определены области оптимума для трех параметров, оказывающих наибольшее воздействие на энергопотребление. Расчеты показывали, что попадание параметров в зону оптимума в установившемся режиме работы системы вентилирования гарантированно снижает энергопотребление на 20%.

Полученные результаты дают основание полагать, что проведенная модернизация повысила эффективность системы вентилирования производственного помещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин М.С., Овчинников П.А. Вытяжные и воздухораспределительные устройства / под общ. ред. М.С. Кузьмина. М.: Стройиздат, 2018. 260 с.
2. Модернизация систем вентилирования лабораторных помещений / В. Д. Павлидис [и др.] // Аграрный научный журнал. 2022. № 12. С. 89-94.
3. Губернский Ю. Д., Гурина И. В., Шилькрот Е. О. Качество воздуха и энергоэффективность систем вентиляции общественных зданий // Экологические системы. 2011. № 5.
4. Чарушев А.В., Мартынов Ю.Л. Автоматизация процессов жизнеобеспечения производства. СПб.: Питер, 2010. 320 с.
5. Ромашенко А. С., Бойко Е. А., Ильин А. С. Повышение энергетической эффективности систем вентиляции и кондиционирования объектов ЖКХ // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность. 2015. Т. 2.
6. Володин П. М., Трошкина О. А., Лябина Ю. А. Особенности расчета вентиляционной системы новой конструкции // Вестник транспорта Поволжья. 2009. № 2(18). С. 61-62.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619716 Российская Федерация. Мобильное приложение для имитационного моделирования потоков в динамических системах : № 2022618319 : заявл. 05.05.2022 : опубл. 25.05.2022 / В. Д. Павлидис, В. Е. Медведев, К. В. Скопинцев, Д. Р. Хафизов.
8. Godo M., Takatsuka T., Shindo S. Study on Energy Saving Air-Conditioning Compact Desiccant Ventilation Units // International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology. 2010. P. 6.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023661064 Российская Федерация. Программа расчета инженерной эффективности модернизации автоматизированной системы управления технологическим процессом : № 2023660254 : заявл. 22.05.2023 : опубл. 29.05.2023 / В. Д. Павлидис, М. В. Чкалова, К. В. Скопинцев, А. А. Степанов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный аграрный университет».

REFERENCES

1. Kuzmin M.S., Ovchinnikov P.A. Exhaust and air distribution devices / for general use. ed. M.S. Kuzmina. Moscow, 2018. 260 p.
2. Modernization of ventilation systems for laboratory premises / V. D. Pavlidis et al. *The agrarian scientific journal*. 2022; 12: 89-94.
3. Gubernsky Yu. D., Gurina I. V., Shilkrot E. O. Air quality and energy efficiency of ventilation systems in public buildings. *Ecological systems*. 2011; 5.
4. Charushev A.V., Martynov Yu.L. Automation of production life support processes. St. Petersburg, 2010. 320 p.
5. Romashchenko A. S., Boyko E. A., Ilyin A. S. Increasing the energy efficiency of ventilation and air conditioning systems for housing and communal services. *Energy: efficiency, reliability, safety*. 2015: 2.
6. Volodin P. M., Troshkina O. A., Lyabina Yu. A. Features of calculation of a ventilation system of a new design. *Bulletin of Transport of the Volga Region*. 2009; 2(18): 61-62.
7. Certificate of state registration of a computer program No. 2022619716 Russian Federation. Mobile application for simulation modeling of flows in dynamic systems: No. 2022618319: application. 05/05/2022: publ. 05.25.2022 / V. D. Pavlidis, V. E. Medvedev, K. V. Skopintsev, D. R. Khafizov.
8. Godo M., Takatsuka T., Shindo S. Study on Energy Saving Air-Conditioning Compact Desiccant Ventilation Units // International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology. 2010. P. 6.
9. Certificate of state registration of a computer program No. 2023661064 Russian Federation. Program for calculating the engineering efficiency of modernizing an automated process control system: No. 2023660254: application. 05/22/2023: publ. 05.29.2023 / V. D. Pavlidis, M. V. Chkalova, K. V. Skopintsev, A. A. Stepanov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orenburg State Agrarian University».

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 11.08.2023; принята к публикации 17.08.2023.
The article was submitted 10.07.2023; approved after reviewing 11.08.2023; accepted for publication 17.08.2023.

