На правах рукописи

Ядарова Ольга Николаевна

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ НА ОСНОВЕ ДОПЛЕРОВСКОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ РАСХОДА ВОЗДУХА

Специальность 05.09.03
Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2018

Работа выполнена на кафедре автоматики и управления в технических системах федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Славутский Леонид Анатольевич

Официальные оппоненты: **Сычугов Николай Павлович**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», кафедра «Сельскохозяйственные машины», профессор;

Макаров Валерий Геннадьевич
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра «Электропривода и электротехники», заведующий кафедрой.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Марийский государственный университет»**

Защита состоится «06» апреля 2018 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 (учебный корпус № 3), зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «06» февраля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06 Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. Управление, контроль, испытания промышленных вентиляторных установок, систем вентиляции овощехранилищ и сушильных агрегатов на предприятиях аграрно-промышленного комплекса требуют создания систем диагностики и автоматического управления электроприводами вентиляторов. В теплоэнергетике использование регулируемого электропривода в механизмах сетевых насосов, насосов рециркуляции и дутьевых вентиляторов котлов при реализации новых комплексных автоматизированных систем управления тепловых станций становится обязательным. Экономия электроэнергии за счёт применения таких систем на сетевых насосах достигает 25-30% и более. Часто возникает необходимость контроля как режимов работы электропривода вентилятора, так и характеристик генерируемых им воздушных потоков, что не всегда учитывают представленные на сегодняшний день доступные регуляторы производительности вентиляторов.

Скорость потоков газов, в частности воздушных потоков, может измеряться различными аппаратными средствами при помощи разных методик, среди которых есть контактные, и дистанционные (бесконтактные) методы. Контактные методы позволяют измерить локальную скорость потока, но их использование приводит к искажению структуры потока и для осуществления контроля свободного (открытого) неоднородного потока с большими пространственными размерами требуется распределенная сеть датчиков. Традиционная оценка скорости потока (расхода) на основе разницы давлений в воздухопроводе неэффективна для открытых потоков на выходе вентиляторных установок. К дистанционным можно отнести оптические и ультразвуковые (УЗ) методы контроля воздушных потоков. УЗ методы позволяют обеспечить относительно высокую точность измерений и могут иметь конкурентные преимущества перед традиционными контактными датчиками и оптическими методами, поскольку позволяют измерять скорость оптически непрозрачных газовых потоков в условиях загрязненности и в широком диапазоне температур, давления, токсичности. Ультразвуковые измерения не вносят возмущения в структуру потока, могут быть дешевле и надежнее оптических, позволяют контролировать поток в значительном объеме без пространственного сканирования в силу широкой направленности ультразвукового излучения.

Современная теория расчета вентиляторных установок основывается на работах Н. Е.Жуковского, И. А. Ушакова, Л. Прандтля, О. Рейнольдса. Большой вклад в решение задач оптимизации режимов работы электроприводов внесли отечественные и зарубежные ученые: И. Я. Браславский, Н. В. Донской, Н. Ф. Ильинский, В. И. Ключев, И. П. Копылов, В. В. Панкратов, В. В. Рудаков, Р. Т. Шрейнер, F. Blaschke, J. Holtz, D. W. Novotny и другие. Методы и средства управления электроприводом продолжают интенсивно развиваться. При этом вопросы, связанные с управлением приводами вентиляторных и насосных систем в переходных режимах, для газовых (сжимаемых) сред остаются недостаточно изученными.

Предлагаемая система управления вентиляторной установкой на основе доплеровских ультразвуковых измерений предполагает одновременный контроль скорости вращения вентилятора и параметров генерируемого им потока воздуха (расхода), что позволяет учесть изменение аэродинамического сопротивления в системе, задержки между скоростью вращения вентилятора и воздушным потоком, в том числе в переходных режимах. Кроме того, с помощью ультразвукового доплеровского прибора возможно получение информации о степени турбулентности потока, наличии и концентрации фазовых включений (примеси). Перечисленные особенности позволяют строить систему управления приводами вентиляторов более оптимально, с учетом большего числа факторов. Это определяет актуальность работы.

Целью работы является разработка методики доплеровского ультразвукового контроля воздушного потока и синтез системы автоматического управления вентиляторной установкой на ее основе.

Объектом исследования являются электротехнические системы и комплексы, включающие в себя вентиляторные установки.

Предметом исследования является система управления вентиляторной установкой на основе дистанционного ультразвукового контроля воздушного потока.

Основные задачи:

1. Синтез системы управления приводом вентилятора на основе моделирования доплеровского ультразвукового рассеяния для контроля воздушного потока вентилятора.
2. Разработка методики контроля скорости воздушного потока вентилятора на основе доплеровского ультразвукового прибора и ее экспериментальная апробация в лабораторных условиях.
3. Теоретические и экспериментальные исследования переходных и установившихся режимов работы вентиляторной установки с доплеровским ультразвуковым контролем воздушного потока.
4. Идентификация звеньев системы управления вентиляторной установкой и их передаточных функций на основе экспериментальных данных.
5. Моделирование замкнутой системы автоматического управления (САУ) приводом вентилятора на основе доплеровского ультразвукового контроля генерируемого воздушного потока.

Область исследования: принципы и средства управления электротехническими комплексами и системами.

Методы и методология исследования. Использованы теоретические основы электротехники, методы теории автоматического управления, математической физики и теории измерений. Повышение точности и расширение функциональных возможностей ультразвуковых измерений достигнуто за счет детальной оцифровки и методов цифровой обработки сигналов с использованием микропроцессорных средств. Использованы приемы и подходы функционального программирования, аппарат искусственных нейронных сетей.

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием выбранных моделей и согласием результатов математического моделирования, имитационного моделирования и экспериментальных измерений.

Соответствие паспорту специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. Объект изучения: электротехнические комплексы и системы генерирования электрической энергии, электропривода, электроснабжения, электрооборудования. Область исследований: (п.3) разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления; (п.4) исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты математического моделирования и анализа доплеровского рассеяния ультразвука в открытом воздушном потоке вентилятора и синтез САУ приводом вентилятора.
2. Методика доплеровского ультразвукового контроля открытого воздушного потока вентилятора, включающая аппаратные средства и обработку сигналов.
3. Модель замкнутой системы управления вентиляторной установкой на основе экспериментальных данных доплеровского ультразвукового контроля воздушного потока.

Научная новизна работы:

1. Обоснована и экспериментально реализована новая методика контроля скорости генерируемого вентилятором потока воздуха на основе доплеровских ультразвуковых измерений.
2. На основе экспериментальных данных показана возможность синтеза замкнутой САУ приводом вентилятора на базе дистанционного ультразвукового контроля воздушного потока при возмущающем воздействии, меняющем аэродинамические характеристики системы.
3. Впервые для оценки зависимости между режимом работы привода вентилятора и параметрами генерируемого потока воздуха при обработке УЗ сигналов использована рекуррентная нейронная сеть на основе многослойного персептрона.

Теоретическая значимость диссертационной работы определяется доказанной возможностью использования доплеровских ультразвуковых измерений для систем управления приводами в электротехнических комплексах с вентиляторными установками.

Практическая ценность. Результаты могут использоваться для повышения эффективности работы вентиляторных установок в составе электротехнических комплексов за счет разработки систем автоматического управления приводом. Предлагаемый подход позволяет бесконтактно контролировать открытый воздушный поток на выходе системы, вне зависимости от типа привода и самого вентилятора, вносить соответствующие

поправки в традиционные алгоритмы автоматизированного управления приводом вентиляторов, штор, заслонок. Доплеровский ультразвуковой контроль может эффективно использоваться для оценки концентрации примесей в агенте сушки для управления приводами вентиляторов в сушильных агрегатах. Методика может использоваться как в составе АСУ, так и для разового контроля вентиляторных агрегатов, газовых выбросов и т.д. Тематика исследований соответствует приоритетным направлениям науки, технологии и техники в Российской Федерации: энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы представлены и обсуждались на Всероссийской 46-й научной студенческой конференции по техническим, гуманитарным и естественным наукам в секции «Автоматизация научных исследований, испытаний и эксперимента» (Чебоксары, 10-14 апреля 2012 г.), на XIV Межрегиональной конференции-фестиваля научного творчества учащейся молодежи «Юность Большой Волги» (Чебоксары, 5 мая 2012 г.), в программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (Чебоксары, 15-16 ноября 2012 г., 14-15 марта 2013 г.), на VIII, IX и X Всероссийских научно-технических конференциях «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 7-9 июня 2012 г., 5-7 июня 2014 г., 2-4 июня 2016 г.), на X, XI и XII Всероссийских научно-технических конференциях «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, 6-8 июня 2013 г., 4-6 июня 2015 г., 1-3 июня 2017 г.).

Внедрение результатов работы. Результаты внедрены в ФГБОУ ВО «Костромская ГСХА» при анализе работы аэрожелобной сушилки, в учебном процессе ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова».

Результаты использованы при выполнении гранта 14-08-31271 мол_а «Доплеровский ультразвуковой контроль открытых воздушных потоков» (2014-2015) при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и инновационного проекта «Система дистанционного ультразвукового контроля вентиляторных установок» (2013-2014) государственного контракта № 342ГУ1/2013 по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК) при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Личный вклад автора. Анализ и интерпретация экспериментальных данных, обработка сигналов и математическое моделирование проводились автором лично. В совместных работах автору принадлежит постановка и участие в экспериментальных исследованиях, разработка алгоритмов, синтез и анализ систем управления.

Публикации. Основные результаты отражены в 25 печатных работах, в том числе 10 работ опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы (101 наименований), приложений (13 страниц). Основной текст рукописи содержит 127 страниц, 76 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы, формулировку целей и задач, раскрывает структуру работы.

В первой главе обозначена необходимость создания энергоэффективных систем гибкого регулирования и автоматического управления вентиляторными установками при контроле не только режимов работы электропривода вентилятора, но и характеристик воздушных потоков. Приведен обзор существующих способов регулирования производительности вентиляторов, контактных и бесконтактных (дистанционных) методов измерения расхода и скорости газовых потоков, последних разработок в области доплеровских устройств контроля потока. Автоматическое поддержание заданной производительности вентилятора по потоку чаще всего осуществляется по данным контактных измерений градиента давления в воздуховодах. Показано, что дистанционные ультразвуковые методы контроля, в отличие от широко применяемых контактных, не вносят возмущения в структуру потока, применимы для измерения скоростей практически любых потоков в широком диапазоне температуры, давления, агрессивности, загрязненности и токсичности, в большем объеме из-за широкой направленности ультразвукового излучения.

Вторая глава посвящена математическому моделированию интегрального доплеровского ультразвукового рассеяния в генерируемом вентилятором воздушном потоке, приводятся оценки и идентификация звеньев системы управления электроприводом вентилятора по интегральной по сечению скорости (расходу) воздушного потока.

Геометрия расчетов показана на рисунке 1. Приемопередающие ультразвуковые преобразователи (УЗП) под углом к воздушному потоку вентилятора (В). Пространственно-временное распределение скорости потока в практических задачах описывается формулами, основанными на аэродинамической теории и эмпирических данных. В настоящей работе для оценок использовано следующее пространственное распределение скорости газа в открытом радиально-симметричном потоке:

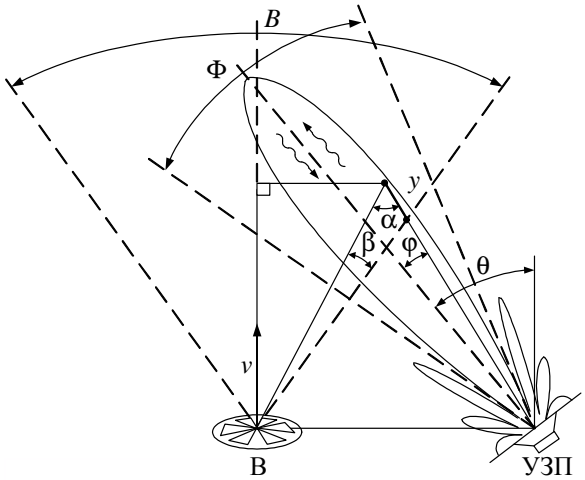

Рисунок 1 – Схема экспериментальных измерений и теоретических расчетов

$$v = v_z e^{-\frac{1}{2}(r/\xi z)^2}, \qquad (1)$$

где v – скорость движения воздуха в произвольной точке, заданной координатами z и r; v_z – скорость на оси потока, ξ – экспериментальная постоянная, вероятное значение которой равно $0{,}082$.

С другой стороны, в дальней зоне вентилятора, на расстояниях z, превышающих характерные размеры его выходного отверстия ($z > \sqrt{S}$, где S – площадь выходного сечения вентилятора), скорость потока может быть описана приближенной формулой:

$$v = \frac{v_0 \sqrt{S}}{z}, \qquad (2)$$

где v_0 – начальная скорость потока вентилятора. С учетом параметров вентилятора и геометрии измерений (рисунок 1), выражение (2) может использоваться для расчета v_z в формуле (1).

При допущении, что время измерения значительно превышает характерные времена флуктуаций потока, сигнал обратного рассеяния может быть, в простейшем случае, вычислен в виде пространственного интеграла

$$S(t) = \int_{-\frac{\Phi}{2}}^{\frac{\Phi}{2}} \int_{0}^{B} A(\varphi, \beta)\, e^{-\gamma y(\varphi, \beta)} \cos\left[2\pi\left(f_0 + \Delta f\right)t\right] d\beta\, d\varphi, \qquad (3)$$

где

$$\Delta f = f_0 \frac{\frac{v}{c}\left(\cos\theta_1 - \cos\theta_2\right)}{1 - \frac{v}{c}\cos\theta_2}$$

– доплеровский сдвиг частоты, зависящий от локальных углов $\theta_1(\varphi,\beta)$, $\theta_2(\varphi,\beta)$ между вектором скорости потока в каждой точке и направлением на излучатель и приемник, скорости потока v и скорости звука c. t – время, f_0 – несущая частота ультразвукового сигнала, $\gamma \sim f_0^{\,2}$ – коэффициент затухания ультразвуковой волны, $y(\varphi, \beta)$ – расстояние вдоль траектории распространения каждого из ультразвуковых лучей. $A(\varphi, \beta)$ – амплитудный коэффициент, включающий в себя угловую зависимость излучения в соответствии с диаграммой направленности ультразвуковых преобразователей. Этот коэффициент в общем случае представляет собой случайную величину, характеризующую турбулентную неоднородность потока. В самом грубом приближении он определяется пространственным распределением скорости (1). При совмещенном излучателе и приемнике $\theta_1(\varphi,\beta) = \theta_2(\varphi,\beta) + \pi = \alpha(\varphi,\beta)$ и $\Delta f = \frac{v}{c} 2 f_0 \cos\alpha$.

В зависимости от скорости потока, диаметра отверстия вентилятора, угла наклона преобразователей к потоку θ и др. смещается максимум спектра сигнала, а так же – изменяется его ширина. Для интегральной оценки этих параметров рассчитывалась средневзвешенная частота доплеровского спектра сигнала:

$$f_{\text{ср}} = \frac{\int f\,G(f)\,df}{\int G(f)\,df}. \qquad (4)$$

Полуширина спектра $G(f)$ оценивалась в виде нормированного момента второго порядка

$$\sigma(f) = \sqrt{\frac{\int (f - f_{\text{ср}})^2 G(f)\,df}{\int G(f)\,df}}.$$

Результаты моделирования воздушного потока и доплеровского рассеяния в нем ультразвукового сигнала позволяют осуществить оценку расхода воздуха на выходе вентилятора по средневзвешенному доплеровскому сдвигу сигнала. Они использованы при синтезе системы управления вентилятором по параметрам генерируемого им потока воздуха, в том числе – в переходных режимах (рисунок 2). Для этого доплеровский УЗ контроль должен осуществляться на расстояниях, сопоставимых с размерами выходного отверстия вентилятора, где параметры потока отражают изменение аэродинамических характеристик системы без значительной временной задержки.

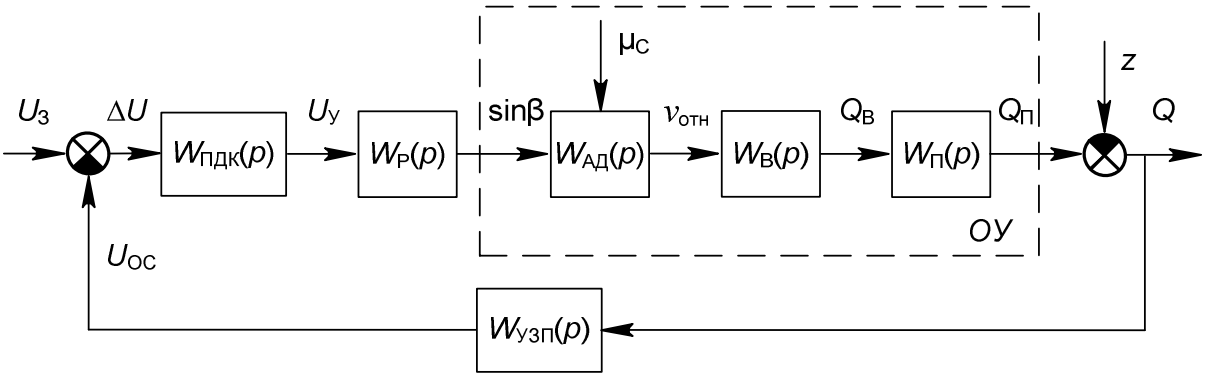

Рисунок 2 – Структурная схема САУ вентиляторной установкой, где $W_{\text{ПДК}}(p)$, $W_{\text{Р}}(p)$, $W_{\text{АД}}(p)$, $W_{\text{В}}(p)$, $W_{\text{П}}(p)$ и $W_{\text{УЗП}}(p)$ – передаточные функции прибора доплеровского контроля, регулятора мощности, асинхронного двигателя, вентилятора, воздушного потока и УЗП соответственно

Прибор доплеровского контроля (ПДК) сравнивает задающее напряжение $U_{\text{З}}$ с сигналом обратной связи $U_{\text{ОС}}$ с ультразвуковых преобразователей, которое соответствует расходу воздуха $Q_{\text{П}}$ (производительности вентилятора $Q_{\text{В}}$). Затем выдает сигнал управления $U_{\text{У}}$ и с помощью симисторного регулятора мощности (sinβ) воздействует на асинхронный двигатель ($\mu_{\text{С}}$ – момент нагрузки). Вал вентилятора вращается с угловой скоростью ω ($v_{\text{отн}}$ – относительная скорость вращения). В качестве возмущающего воздействия $z(t)$ использовалась заслонка на выходе канала вентилятора, положение которой менялось в процессе измерений. Приведены описание звеньев САУ рисунка 2 и количественные оценки, соответствующие условиям экспериментальных измерений.

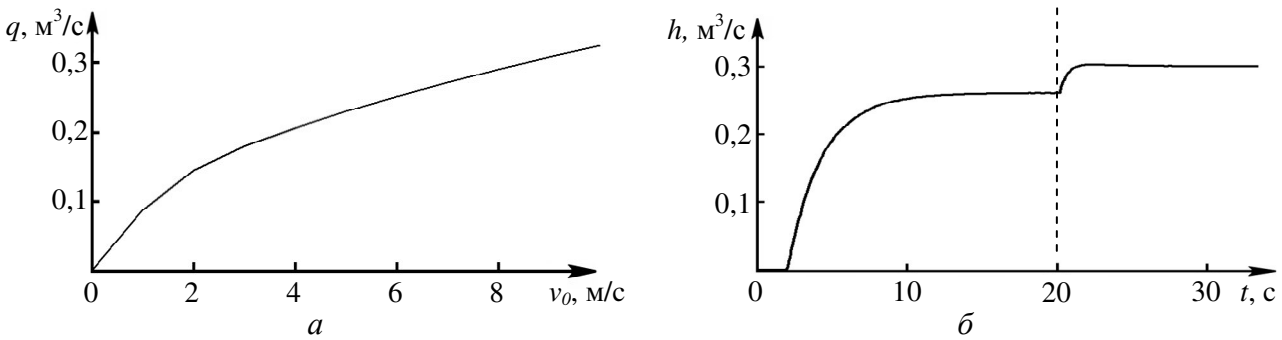

Рисунок 3 – Зависимость расхода от начальной скорости потока вентилятора (*а*), переходная характеристика разомкнутой системы с задержкой $\tau = 2$ с при возмущающем воздействии (*б*)

Изменение положения заслонок на выходе вентиляторной установки меняет интегральные характеристики воздушного потока и нагрузку на двигатель, что приводит к изменению скорости вращения вентилятора (рисунок 3, $t = 20$ с). Проведено имитационное моделирование системы управления электроприводом вентилятора при изменении аэродинамических характеристик. Получены оценки изменения потока и скорости вращения вентилятора при изменении площади сечения выходного отверстия вентилятора. Показано, что при малом (10-15%) уменьшении сечения нагрузка на двигатель увеличивается.

В третьей главе описана методика экспериментальных исследований и специально созданная лабораторная установка (рисунок 4). Источником воздушного потока является канальный центробежный вентилятор (В) с диаметром отверстия 0,2 м, мощностью 170 Вт, производительностью 1200 м^3/ч при номинальной частоте вращения 2430 об/мин, которая плавно регулировалась на основе фазового принципа (Р), контролировалась датчиком Холла (ДХ) и цифровым фототахометром (Т). В качестве возмущающего воздействия использовалась воздушная заслонка (З) на выходе канала вентилятора, положение которой менялось в процессе измерений. Скорость в разных точках потока измерялась анемометром (А) и дистанционно контролировалась прибором доплеровского контроля (ПДК) с несущей частотой ультразвуковых преобразователей (УЗП) 40 кГц.

Лабораторная установка позволяет одновременно контролировать скорость вращения вентилятора и параметры генерируемого им потока воздуха (расхода), что дает возможность учесть изменение аэродинамического сопротивления в системе, временные задержки между скоростью вращения вентилятора и воздушным потоком, в том числе – в переходных режимах. Кроме того, с помощью ультразвукового доплеровского прибора, блок-схема которого приведена справа на рисунке 4, возможно получение информации о степени турбулентности потока и наличии примеси, что актуально в системах управления вентиляторных установок с жалюзи, заслонками, в сушильных агрегатах и т.д.

Для экспериментальных измерений используется новый, созданный авторским коллективом опытный образец ультразвукового прибора для регистрации и цифровой обработки доплеровских ультразвуковых сигналов.

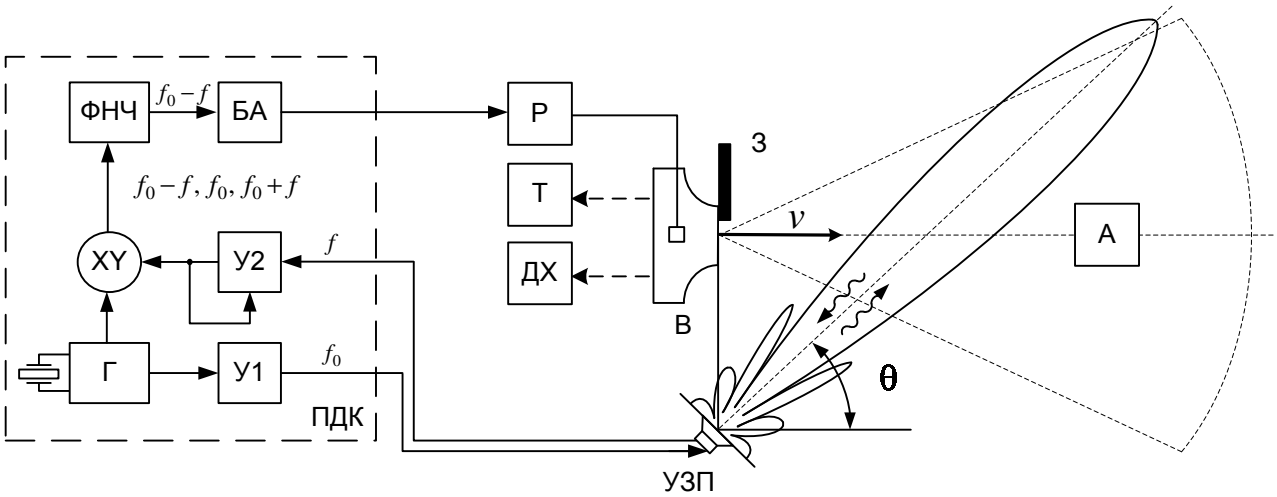

Рисунок 4 – Схема лабораторной установки и блок-схема прибора доплеровского контроля

Источником опорной частоты $f_0 = 40$ кГц служит кварцевый генератор (Г). Его сигнал после усилителя У1 поступает на ультразвуковой преобразователь. Обратное рассеяние УЗ сигнала на неоднородном воздушном потоке вентилятора происходит в области пересечения потока и диаграммы излучения ультразвуковых преобразователей (см. рисунок 4). Отраженный сигнал после входного каскада усиления У2, охваченного автоматической регулировкой усиления, поступает на вход смесителя ХУ. На его второй вход поступает сигнал с генератора. На выходе смесителя возникают сигналы комбинационных частот. Затем с помощью фильтра низкой частоты (ФНЧ), вырезающего высокие частоты, выделяется сигнал на разностной частоте (доплеровский сдвиг), позволяющий определить скорость воздушного потока. Предлагаемый доплеровский ультразвуковой прибор обладает достаточной чувствительностью для дистанционного контроля неоднородного воздушного потока в диапазоне скоростей от десятков сантиметров до десятков метров в секунду.

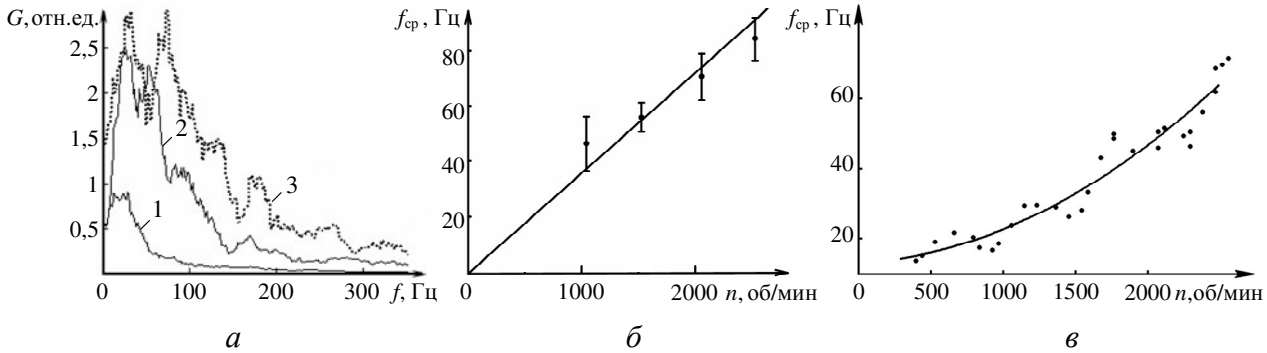

Рисунок 5 – Экспериментальные спектры при различных режимах работы вентилятора (*а*): $1 - n = 890$ об/мин, $d = 0{,}2$ м; $2 - n = 2560$ об/мин, $d = 0{,}2$ м; $3 - n = 2520$ об/мин, $d = 0{,}15$ м. Средний доплеровский сдвиг в установившемся (*б*) и разгонном (*в*) режимах

С помощью полученных данных с тахометра и прибора доплеровского контроля, строились зависимости скорости воздушного потока от частоты

вращения вентилятора. На рисунке 5, *а* приведены экспериментальные спектральные плотности $G(f)$ сигнала для разных режимов работы вентилятора при угле наклона УЗП $\theta = 50°$ (см. рисунок 4).

Как видно из рисунка 5 частота $f_{ср}$ смещается в зависимости от частоты вращения вентилятора n (кривые 1 и 2) и от диаметра выходного отверстия вентилятора d (кривые 2 и 3). Частота доплеровского сдвига $f_{ср}$ пропорциональна средней скорости потока воздуха. При увеличении площади выходного отверстия S вентилятора скорость потока пропорционально уменьшается (см. рисунок 5, *а* кривые 2 и 3). Экспериментальная зависимость $f_{ср}(n)$ показана на рисунке 5, *б*. С учетом случайной погрешности (относительная погрешность уменьшается с увеличением скорости потока) зависимость $f_{ср}(n)$ близка к линейной, что соответствует известным формулам для расчета производительности вентиляторных установок.

С помощью экспериментальных записей сигналов с датчика холла и прибора доплеровского контроля строились зависимости скорости воздушного потока от частоты вращения вентилятора в режимах разгона и выбега электропривода вентилятора. Длина осциллограмм составляла от 3 до 20 секунд с частотой оцифровки до 7 кГц. При характерных частотах доплеровского сдвига до 300 Гц, такая оцифровка позволяет с высокой степенью точности проводить цифровой анализ спектральной плотности сигналов обратного рассеяния УЗ сигнала. Характерная длительность разгонного режима и режима выбега вентилятора не превышала 20 секунд. Обнаружено, что зависимость частоты $f_{ср}$ от скорости вращения вентилятора в нестационарном режиме нелинейна. Это проявляется как в разгонных режимах, так и в режиме выбега вентилятора (см. рисунок 5, *в*).

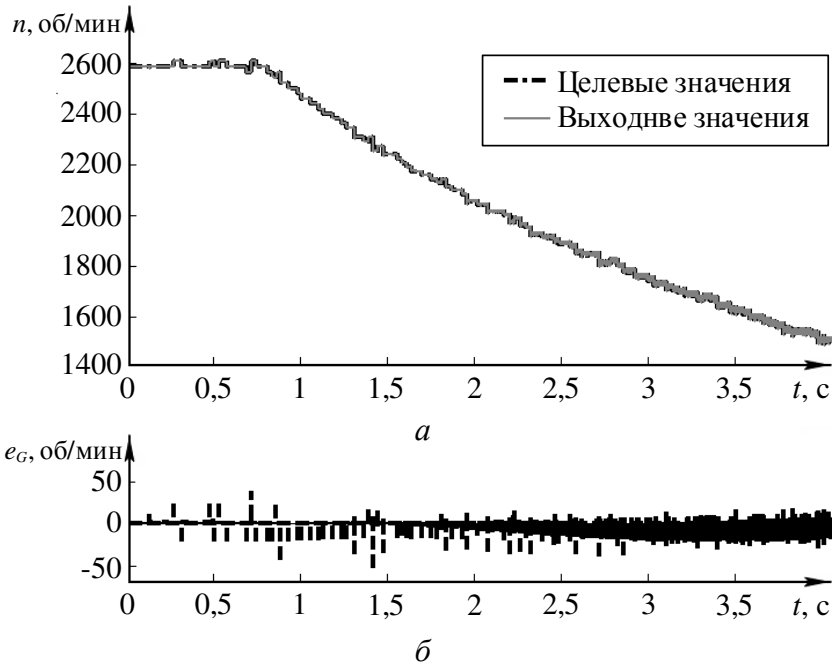

Рисунок 6 – Частота вращения вентилятора (*а*) и ошибка тестирования нейронной сети (*б*)

Для контроля воздушных потоков в разгонных режимах и режиме выбега вентилятора исследовалась возможность использования для обработки сигналов аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС). На вход сети подавались доплеровские сигналы обратного рассеяния, а на выходе фиксировалась частота вращения электропривода вентилятора, полученная при помощи датчика

Холла. ИНС обеспечивает восстановление частоты вращения электропривода вентилятора по доплеровским сигналам с точностью не ниже единиц процентов (см. рисунок 6).

Выполнено моделирование структуры потока на основе экспериментальных результатов измерения пространственной и временной изменчивости скорости потока с помощью анемометра. Использовалась программная среда Deductor (разработчик – ООО «Аналитические технологии» – BaseGroup Lab, г. Рязань, www.basegroup.ru). На рисунке 7, *а* приведено распределение средней скорости потока, полученное по измеренным значениям мгновенной скорости и рассчитанное с помощью ИНС-модели с целевой функцией в виде средней скорости. Вентилятор располагается в начале координат (0; 0). Из рисунка видно, что использование аппарата искусственных нейронных сетей позволяет достаточно успешно моделировать пространственную и временную структуру потока на основе экспериментальных данных. На рисунок 7, *б* показаны экспериментальные и расчетные зависимости интегральной скорости (расхода) от расстояния до выходного отверстия вентилятора.

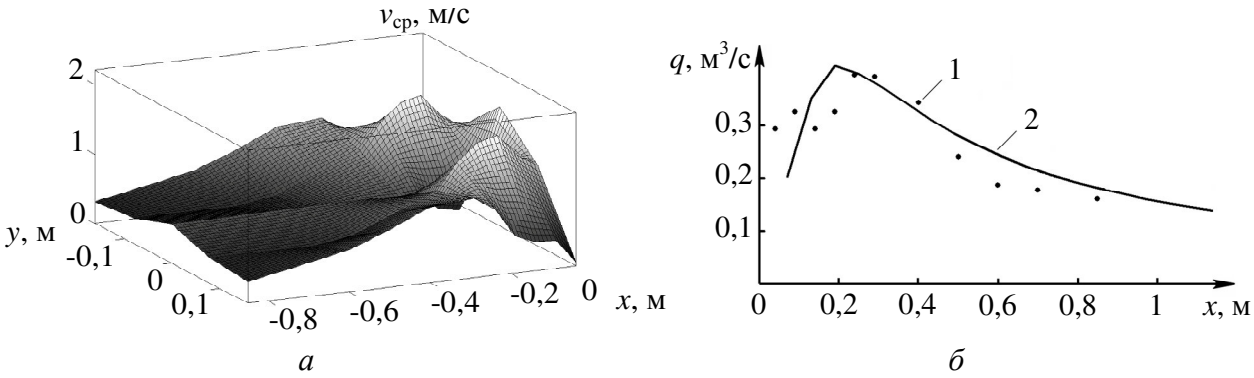

Рисунок 7 – Распределение средней скорости потока, полученное с помощью ИНС-модели (*а*). Экспериментальный (*1*) и расчетный (*2*) расход вентилятора (*б)*

Приводятся результаты экспериментальных измерений и обработки сигналов при доплеровском ультразвуковом контроле воздушного потока с фазовыми включениями.

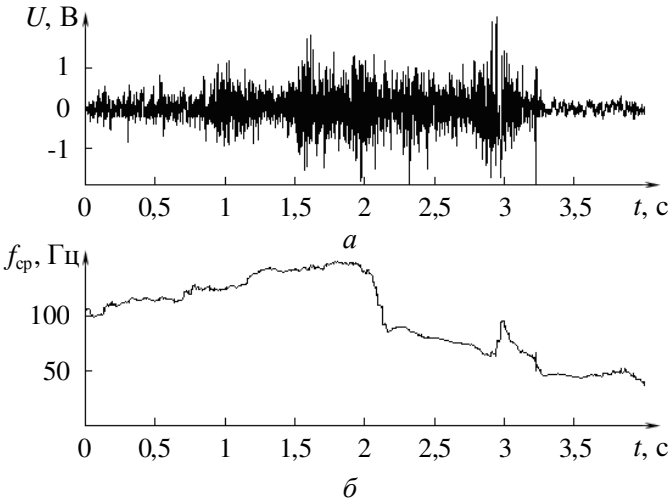

Рисунок 8 – Осциллограмма сигнала (*а*) и изменение среднего доплеровского сдвига (*б*)

На рисунке 8, *а* показана временная форма сигнала в разгоннном режиме вентилятора при наличии фазовых включений (мелкая древесная стружка).

Определенный объем стружки помещался выходной канал вентилятора и при выходе на стационарный режим работы вентилятора концентрация фазовых включений уменьшалась до нуля,

рассеяние звукового сигнала происходило на турбулентных пульсациях потока ($t > 3{,}5$ с). Как видно из рисунка, наличие примесей в потоке значительно повышает амплитуду рассеянного сигнала. Для оценки скорости потока на рисунке 8, *б* показано изменение средневзвешенной частоты доплеровского двига. В данном случае скорость на оси потока составляет порядка 1 м/с. Приведенные записи соответствуют открытому потоку со значительной турбулентностью по краям.

Четвертая глава диссертации посвящена синтезу и анализу системы автоматического управления электроприводом вентиляторов на основе экпериментальных данных. Показана возможность регулирования режимов вентиляторной установки с учетом скорости потока (расхода) воздуха.

На рисунке 9, *а* показана частота вращения вентилятора в разгонных режимах при открытой (сплошная) и закрытой (пунктир) заслонке. На рисунке 9, *б* показаны примеры соответствующих зависимостей скорости потока при разном пространственном расположении анемометра. Из сравнения экспериментальных и расчетных данных видно, что предлагаемые модели передаточных функций вполне адекватно описывают переходные процессы. На рисунке 10 показаны примеры переходных режимов при разгоне вентилятора и закрытии/открытии заслонки. Расход q_f оценивается по среднему доплеровскому сдвигу УЗ сигнала и согласуется с контактными измерениями анемометром. УЗ контроль позволяет синтезировать САУ при малом относительном изменении положения заслонки, как возмущающего воздействия $z(t)$ на систему.

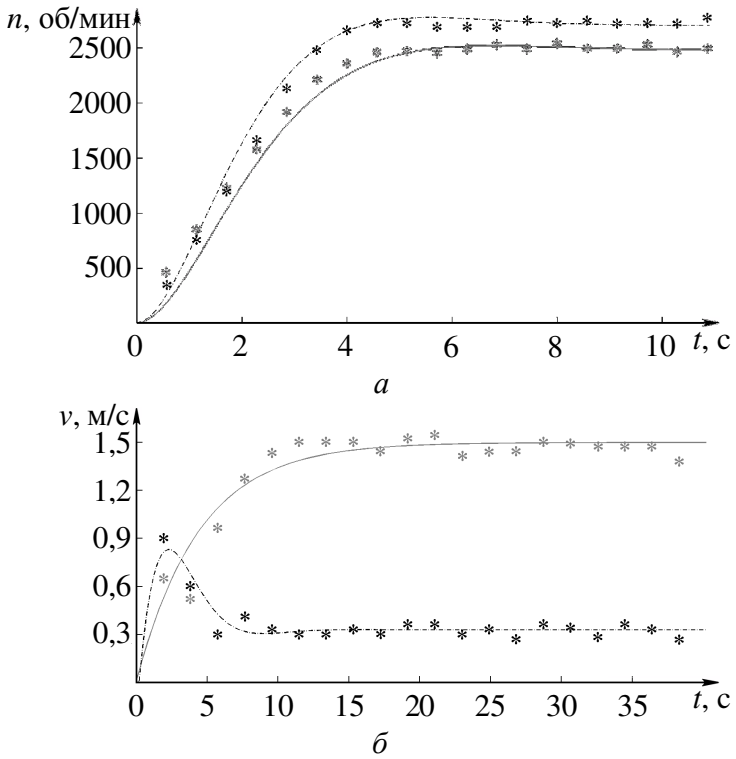

Рисунок 9 – Экспериментальные (точки) и расчетные переходные характеристики частоты вращения (*а*) и скорости потока (*б*)

Передаточная функция прибора доплеровского контроля имеет вид:

$$W_{\text{ПДК}}(p) = K_{\text{ПДК}} e^{-p\tau},$$

где $K_{\text{ПДК}}$ – коэффициент усиления, τ – задержка выходного сигнала.

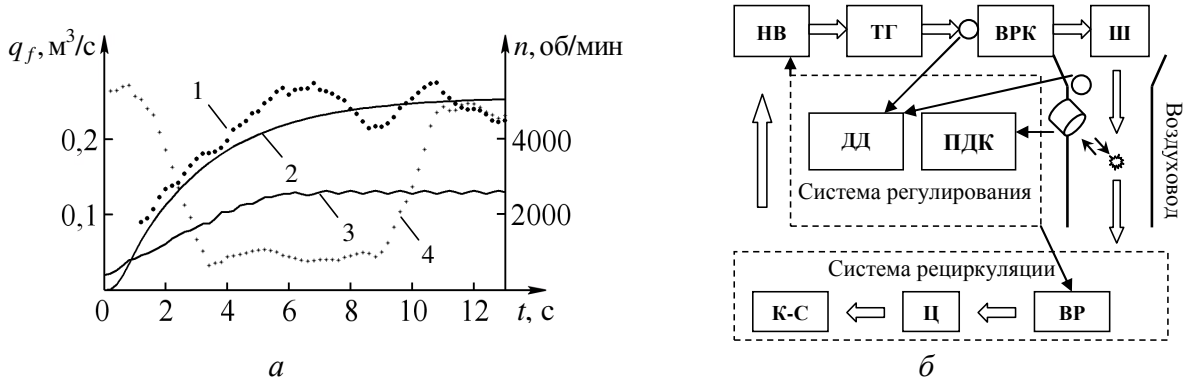

Рисунок 10 – Переходные режимы вентилятора (*а*): 1, 4 – экспериментальные временные зависимости расхода по доплеровскому сдвигу в разгонном режиме и при закрытии/открытии заслонки соответственно, 2 – аппроксимация расхода воздуха, 3 – частота вращения вентилятора. Блок-схема технологического процесса сушилки (*б*)

Параметры передаточной функции последовательно соединенных апериодических звеньев 1-ого порядка (регулятора и асинхронного двигателя)

$$W_1(p) = W_{\text{Р}}(p) W_{\text{АД}}(p) = \frac{K_{\text{Р}}}{(1 + T_{\text{Р}} p)(1 + T_{\text{м}} p)} \tag{5}$$

могут быть получены из экспериментальных данных, как и параметры передаточной функции

$$W_2(p) = W_{\text{В}}(p) W_{\Pi}(p) = \frac{K_{\text{В}} K_{\Pi}(x, r)}{T_{\Pi}{}^2 p^2 + 2 T_{\Pi} \xi p + 1}, \tag{6}$$

зависящей от координат области рассеяния ультразвука и связывающей скорость вращения $\omega(t)$ вентилятора с расходом q, где $T_{\text{Р}}$, $T_{\text{м}}$, T_{Π} – постоянные времени, $K_{\text{Р}}$, $K_{\text{В}}$, $K_{\Pi}(x, r)$ коэффициенты усиления, ξ – показатель колебательности. Ключевым параметром, влияющим на устойчивость синтезированной САУ, является задержка τ. Эта задержка составляла сотни мс при скоростях потока в единицы метров. Для получения монотонной зависимости $q_f(t)$ время получения скользящего значения доплеровского сдвига составляет от 0,2 до 1 с. При использовании аппарата искусственных нейронных сетей время обработки сигнала может быть уменьшено до единиц мс. Результаты соответствующего анализа устойчивости по критерию Найквиста приведены на рисунке 11, *а* для разомкнутой САУ с запаздыванием (кривая *1*) и без запаздывания (кривая *2*). По оценкам, задержка, при которой система устойчива, составляет $\tau \le 3\,c$. На рисунке 11, *б* приведены результаты моделирования замкнутой САУ при возмущающем воздействии (перекрытие заслонки в момент 30 с), меняющем сечение S выходного отверстия вентилятора на 15%. За счет уменьшения скорости вращения вентилятора интегральная скорость потока стабилизируется.

Таким образом, на основе экспериментальных данных показана возможность синтеза замкнутой САУ вентиляторной установкой на базе дистанционного доплеровского контроля воздушного потока при возмущающем воздействии, меняющем аэродинамические характеристики системы.

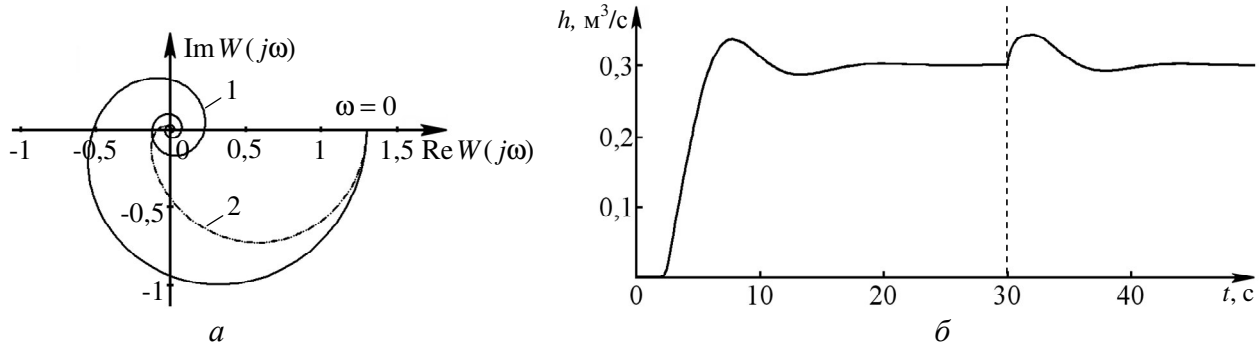

Рисунок 11 – АФХ разомкнутой САУ (*а*) и переходная характеристика замкнутой САУ (*б*)

Предлагается использование доплеровского ультразвукового контроля за расходом агента сушки при высушивании сыпучих материалов конвективным способом. На расход агента сушки влияют множество факторов: характеристики вентиляторов, тип (вид) высушиваемого материала, засоренность, толщина и порозность высушиваемого слоя, его влажность, наличие материала на аэрожелобах, скорость его движения; сопротивление системы рециркуляции, которое меняется при работе клапана-смесителя, при заполнении циклона примесями и др. Рабочая точка характеристики тепловентиляционной системы постоянно «плывет», поэтому поддержание градиента давления в системе недостаточно для обеспечения адекватного контроля за расходом агента сушки.

Для этих целей в воздуховоде предлагается устанавливать приемо-передающие ультразвуковые преобразователи ПДК. На рисунке 10, *б* приведена схема технологического процесса тепловентиляционной системы аэрожелобной сушилки. Стрелками показано направление движения агента сушки. В сушилке, состоящей из двух шахт (Ш), в которых происходит сушка сыпучего материала в псевдоожиженном слое за счет подогретого воздуха в смеси с топочными газами. Агент сушки вырабатывается теплогенератором прямого действия (ТГ) и нагнетается с помощью вентилятора (НВ) через воздухораспределительные короба (ВРК) в аэродинамические короба под грузонесущие перфорированные перегородки и далее выходит под острым углом из щелей в слой высушиваемого материала. В процессе перемещения материала по аэродинамическим коробам происходит постепенный съём влаги и разделение слоя материала на фракции, отличающиеся по аэродинамическим свойствам и размерным характеристикам. При этом мелкая тяжёлая фракция перемещается вдоль поверхности перфорированных решёток, основная масса материала занимает среднее положение в слое, а лёгкая взмывает в верхний слой и с отработанным агентом сушки выносится в циклон (Ц) для очистки его от легких примесей. Очищенный отработавший агент сушки всасывается вентилятором рециркуляции (ВР) и направляется на частичную или полную рециркуляцию при помощи клапана-смесителя (К-С) обратно в теплогенератор и далее в сушилку. Использование доплеровских ультразвуковых измерений для контроля расхода воздуха и концентрации примесей в агенте сушки может быть очень перспективным для оптимизации технологического процесса в сушильных агрегатах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Создана лабораторная экспериментальная установка, включающая в себя средства регулирования и контроля режимов работы привода промышленного вентилятора, средства контактного и дистанционного контроля генерируемого потока воздуха. Показано, что система измерений на основе доплеровского рассеяния ультразвукового сигнала позволяет осуществлять бесконтактный контроль открытых турбулентных потоков. Предлагаемые аппаратные средства регистрации и обработки сигналов обладают достаточной чувствительностью для дистанционного контроля потока в диапазоне скоростей от десятков сантиметров до десятков метров в секунду. Это позволяет учесть изменение аэродинамического сопротивления в системе, задержки между скоростью вращения вентилятора и воздушным потоком в переходных режимах. Кроме того, с помощью ультразвукового доплеровского контроля возможно получение информации о степени турбулентности потока и наличии фазовых включений (примеси), что актуально в системах управления вентиляторных установок с жалюзи, заслонками, в сушильных агрегатах и т.д.

2. Проведено математическое моделирование УЗ-рассеяния в потоке с учетом геометрии измерений и характеристик УЗ преобразователей. Для оценки характеристик воздушного потока показана необходимость регистрировать и анализировать не только средний частотный сдвиг ультразвукового доплеровского сигнала, характеризующий среднюю (интегральную) скорость потока, но и форму (ширину) доплеровского спектра, которая зависит от пространственно-временной неоднородности потока.

3. Экспериментально исследованы переходные и установившиеся режимы работы вентиляторной установки с доплеровским ультразвуковым контролем воздушного потока. Средняя частота доплеровского сдвига УЗ сигнала является параметром, линейно связанным с частотой вращения вентилятора только в стационарных режимах. В нестационарных режимах существует характерное запаздывание, зависимость средней скорости потока воздуха от частоты вращения вентилятора оказывается существенно нелинейной из-за изменения пространственно-временных характеристик турбулентного потока воздуха. Впервые для оценки зависимости между режимом работы привода вентилятора и параметрами генерируемого потока воздуха при обработке УЗ сигналов показана эффективность использования рекуррентной нейронной сети.

4. На основе теоретических и экспериментальных исследований проведена идентификация звеньев и их передаточных функций в системе управления приводом вентилятора с учетом изменения аэродинамических характеристик системы в переходных режимах. Показана возможность и проведена оценка условий использования доплеровского ультразвукового контроля воздушного потока в системе управления вентиляторной установкой.

5. Проведен синтез и анализ разомкнутой и замкнутой систем автоматического управления приводом вентилятора. На основе экспериментальных данных показана возможность синтеза замкнутой САУ вентиляторной установки на базе дистанционного доплеровского

ультразвукового контроля воздушного потока при возмущающем воздействии, меняющем аэродинамические характеристики системы. Регулируемой переменной выступает средняя скорость генерируемого открытого потока воздуха. Предлагаемый подход позволяет синтезировать САУ вне зависимости от типа привода и самого вентилятора, учитывать в контуре обратной связи скорость вращения вентилятора, вносить поправки в традиционные алгоритмы автоматизированного управления приводом вентиляторов, штор, заслонок.

Практические рекомендации и перспективы дальнейших исследований. Прибор доплеровского ультразвукового контроля имеет малые габариты и невысокую стоимость. Может использоваться при испытаниях и пуско-наладочных работах на вентиляторных установках для контроля параметров генерируемых воздушных потоков. Возможно применение параллельно с традиционными контактными методами измерений. В стационарном исполнении в составе САУ система дистанционного доплеровского контроля воздушных потоков позволяет оптимизировать управление не только нагнетающими вентиляторами, но и приводами заслонок, штор и т.д. Особое значение предлагаемая УЗ система может иметь для управления приводами сушильных агрегатов, поскольку кроме скорости воздушного потока позволяет оценить концентрацию примеси в агенте сушки.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией разработанных методик и аппаратных средств в промышленные электротехнические комплексы с вентиляторными установками, для чего необходимо развитие эффективных методов обработки сигналов и алгоритмов автоматического управления с учетом особенностей конкретных электроприводов.

Список научных трудов по теме диссертации:

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Ядарова, О. Н. Доплеровский ультразвуковой контроль открытого воздушного потока / О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2012. – №3. – С. 240-243.

2. Ядарова, О. Н. Контроль воздушного потока на основе доплеровского рассеяния ультразвука / О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – №3. – С. 55-59.

3. Алексеев, А. П. Доплеровский ультразвуковой контроль производительности вентиляторной установки / А. П. Алексеев, О. Н. Ядарова // Вестник Чувашского университета. – 2013. – №3. – С. 307-310.

4. Ядарова, О. Н. Контроль нестационарного воздушного потока вентиляторной установки / О. Н. Ядарова, А. П. Алексеев, Л. А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2014. – №2. – С. 148-153.

5. Бычкова, И. Ю. Флуктуации ультразвука в конвективном потоке над нагретой поверхностью / И. Ю. Бычкова, О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №1. – С. 29-34.

6. Сучков, В. О. Дистанционный ультразвуковой контроль воздушного потока на основе искусственной нейронной сети / В. О. Сучков, О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №1. – С. 207-212.

7. Ядарова, О. Н. Дистанционный ультразвуковой контроль воздушного потока с фазовыми включениями / О. Н. Ядарова, В. О. Сучков, Л. А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №3. – С. 129-134.

8. Ядарова, О. Н. Комплексный контроль параметров регулирования системы вентиляции с заслонками / О. Н. Ядарова, Е. О. Федоров, Б. М. Гильденберг, В. О. Сучков, Л. А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2016. – №3. – С. 149-154.

9. Ядарова, О. Н. Доплеровский ультразвуковой контроль в замкнутой системе управления вентиляторной установкой / О. Н. Ядарова // Вестник Чувашского университета. – 2017. – №1. – С. 298-304.

10. Ядарова, О. Н. Система управления приводом вентилятора на основе доплеровского ультразвукового контроля воздушного потока / О. Н. Ядарова, Г. П. Охоткин, Л. А. Славутский // Электротехника. – 2017. – №7. – С. 27-30.

Статьи и материалы в других изданиях:

11. Ядарова, О. Н. Использование доплеровских ультразвуковых измерений для расчета воздушных потоков / О. Н. Ядарова // Юность Большой Волги: сборник статей лауреатов XIV Межрегиональной конференции-фестиваля научного творчества учащейся молодежи «Юность Большой Волги». – Чебоксары, 2012. – С. 64-67.

12. Ядарова, О. Н. Оценка параметров неоднородного воздушного потока с помощью ультразвуковых измерений / О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 8-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2012. – С. 18-22.

13. Ядарова, О. Н. Доплеровский ультразвуковой контроль воздушных потоков / О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Россия. Наука. Университет: сб. тр. Всерос. 46-й науч. студ. конф. – Чебоксары, 2012. – С. 80-81.

14. Ядарова, О. Н. Система дистанционного ультразвукового контроля неоднородных воздушных потоков / О. Н. Ядарова // Материалы VII Республиканского конкурса инновационных проектов по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК-2012). – Чебоксары, 2012. – С. 94-95.

15. Ядарова, О. Н. Система дистанционного ультразвукового контроля вентиляторных установок / О. Н. Ядарова // Материалы VIII Республиканского конкурса инновационных проектов по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК-2013). – Чебоксары, 2013. – С. 93-94.

16. Ядарова, О. Н. Система ультразвукового контроля воздушного потока вентиляторной установки / О. Н. Ядарова, А. П. Алексеев, Л. А. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2013. – С. 95-98.

17. Ядарова, О. Н. Ультразвуковой контроль переходных режимов работы вентиляторной установки / О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 9-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2014. – С. 198-203.

18. Алексеев, В. Ю. Использование искусственной нейронной сети при доплеровском ультразвуковом контроле воздушного потока / В. Ю. Алексеев,

О. Н. Ядарова // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 9-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2014. – С. 203-207.

19. Ядарова, О. Н. Сигналы доплеровского ультразвукового рассеяния в воздушном потоке с фазовыми включениями / О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 139-141.

20. Бычкова, И. Ю. Обработка сигналов при ультразвуковом контроле конвективного потока воздуха / И. Ю. Бычкова, О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 142-144.

21. Сучков, О. В. Нейросетевой анализ пространственно-временной структуры турбулентного потока воздуха / О. В. Сучков, В. С. Абруков, О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 64-66.

22. Ядарова, О. Н. Ультразвуковой контроль переходных режимов системы вентиляции с заслонками / О. Н. Ядарова, Е. О. Федоров, Б. М. Гильденберг // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2016. – С. 135-137.

23. Волхонов, М. С. Доплеровский ультразвуковой контроль расхода агента сушки в системе регулирования аэрожелобной сушилки / М. С. Волхонов, С. Л. Габалов, О. Н. Ядарова, Л. А. Славутский // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2016. – С. 297-300.

24. Ядарова, О. Н. Экспериментальный анализ параметров регулирования вентиляторной установки / О. Н. Ядарова, Е. О. Федоров, В. О. Сучков, Б. М. Гильденберг // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2016. – С. 138-141.

25. Федоров, Е. О. Цифровая система управления переходными режимами вентиляторной установки / Е. О. Федоров, Б. М. Гильденберг, О. Н. Ядарова // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : материалы 12-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2017. – С. 142-144.

Подписано в печать 30.01.2018 г. Формат 60x84 1/16. Печ. л. 1,0. Бумага офсетная.
Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 453.
Отпечатано с готового оригинала-макета в типографии «Крона»
428024, г. Чебоксары, Эгерский бульвар, д. 5, корп. 1