

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 681.51

ПОДОБЕД
Михаил Юрьевич

**УПРАВЛЕНИЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЕМ ВОЗДУХА
С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ И
РАСПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 — автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

Минск 2020

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет».

Научный руководитель

Карпович Дмитрий Семенович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой "Автоматизации производственных процессов и электротехники" Белорусского государственного технологического университета

Официальные оппоненты

Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Информационные системы и технологии" Белорусского национального технического университета;

Кожевников Михаил Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой "Автоматизации технологических процессов и производств" Могилевского государственного университета продовольствия;

Оппонирующая организация:

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Защита состоится 28 мая 2020 в 14.00 ч на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.: (017) 293 89 89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «__» апреля 2020 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук,
доцент

Ревотюк М. П.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях организации производственного процесса, когда экономическая составляющая становится одним из определяющих факторов, требования по энергосбережению предъявляются не только к основным производствам, но и к вспомогательным, к которым, как правило, относятся системы кондиционирования и вентиляции воздуха в помещении.

В этих условиях степень эффективности работы системы кондиционирования воздуха (СКВ) напрямую зависит и системы автоматического управления (САУ). Пренебрегая индивидуальными особенностями элементов СКВ, производители контроллеров стремятся к упрощению пусконаладочных работ и унификации линеек выпускаемой продукции. Данные факты непосредственным образом отражаются на качестве управления и энергоэффективности работы СКВ. В работе разработана идентификационная адаптивная САУ кондиционированием воздуха, подстраивающаяся под изменяющиеся параметры калориферной установки и гидравлической обвязки.

Отдельным вопросом стоит задача управления микроклиматом в производственных и административных помещениях больших объемов с несколькими точками измерения температуры. Алгоритмы, заложенные в современные контроллеры, направлены на усреднение температуры в помещении и управление по этому показателю, но данный подход имеет ряд недостатков. В работе была предложена концепция селекции сигналов обратных связей, продемонстрировавшая лучшие качества в сравнении с классической системой с усреднением.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема работы соответствует научному направлению кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники УО «Белорусский государственный технологический университет». Работа проводилась в рамках научно-технической работы ГБ 39-16 «Математическое моделирование сложных объектов с распределенными параметрами в задачах автоматического управления».

Цель и задачи исследований

Целью работы является разработка методики и алгоритмов управления температурой в промышленных помещениях больших размеров с учетом распределенности параметров и динамически меняющихся характеристик калориферной

установки, позволяющие улучшить характеристики системы управления микроклиматом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ процессов теплообмена, происходящих в калориферной установке системы кондиционирования воздуха с дросселирующим контуром гидравлической обвязки.

2. Разработать методику идентификации динамических характеристик математической модели калориферной установки с дросселирующим контуром гидравлической обвязки.

3. Разработать адаптивный алгоритм управления калориферной установкой с дросселирующим контуром гидравлической обвязки, учитывающий динамически изменяющиеся параметры объекта управления по каналу «изменение расхода теплоносителя — изменение температуры воздуха после калориферной установки».

4. Разработать методику проведения эксперимента и определения разгонных характеристик температурного поля промышленного помещения в заданных точках пространства с учетом особенностей технологического процесса.

5. Разработать алгоритм управления температурой в промышленных помещениях больших размеров с несколькими каналами измерения температуры, на основе селекции сигналов рассогласований в каналах обратных связей.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель калориферной установки системы кондиционирования воздуха с дросселирующим контуром гидравлической обвязки, учитывающая динамически меняющиеся параметры калориферной установки.

2. Разработан алгоритм адаптивного управления калориферной установкой системы кондиционирования воздуха с дросселирующим контуром гидравлической обвязки по критерию температурного режима, функционирующий на основе информации об объекте управления и подстраивающий настройки регулятора.

3. Разработан алгоритм селекции сигналов рассогласований по каналам обратных связей от датчиков температуры воздуха в рабочих зонах промышленного помещения, основанный на использовании теории нечётких множеств и опыта эксперта, и позволяющий улучшить характеристики системы управления микроклиматом.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель калориферной установки системы кондиционирования воздуха с дросселирующим контуром гидравлической обвязки, отличающаяся учетом динамики изменения параметров установки и особенностей гидравлического контура обвязки.

2. Алгоритм адаптивного управления калориферной установкой системы кондиционирования воздуха на основе предлагаемого обобщающего критерия температурного режима.

3. Алгоритм селекции сигналов каналов обратных связей от датчиков температуры воздуха в рабочих зонах промышленного помещения, отличающиеся функционированием на основе теории нечётких множеств с учетом опыта эксперта, позволяющий улучшить качество управления микроклиматом в промышленных помещениях.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Научный руководитель принимал участие в постановке задач, определении возможных путей их решения, предварительном анализе, обсуждении результатов исследований, проведенных автором.

Апробация результатов диссертации

Основные вопросы, рассматриваемые в диссертации, подробно освещены в статьях научных журналов: «Вестник связи» (Минск, 2018 г.), «Труды БГТУ» (Минск, 2018 г.). Так же результаты диссертации неоднократно докладывались автором и обсуждались на международных конференциях: «Химическая технология и техника» (Минск, БГТУ, 2018 г.), «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (Вологда, ВГУ, 2018 г.), «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, БГТУ, 2018 г.), «НЕФТЕХИМИЯ-2018» (Минск, БГТУ, 2018 г.), «Химическая технология и техника» (Минск, БГТУ, 2018 г.), «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине» (Томск, ТПУ, 2018 г.), «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, МГУП, 2017 г.), «Энергосбережение – важнейшее условия инновационного развития АПК» (Минск, БГАТУ, 2017 г.), «Техника и технологии: инновации и качество» (Барановичи, БарГУ, 2017 г.), «LV Отчетная научная конференция преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2016 год» (Воронеж, ВГУИТ, 2016 г.), «Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления» (Минск, БГТУ, 2016 г.), «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине» (Томск, ТПУ, 2015 г.), «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, БГТУ, 2015 г.), «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Минск, БГТУ, 2014 г.), «Информационные технологии и системы» (Минск, БГУИР, 2014 г.), «Проблемы функционирования систем транспорта» (Тюмень, ТюмГНГУ, 2013 г.).

Отдельные теоретические выводы широко применялись в образовательном процессе в УО «Белорусский государственный технологический университет» при подготовке специалистов с высшим образованием по направлению «Автоматизация производства и автоматизация систем управления».

Получен положительный результат предварительной экспертизы национального центра интеллектуальной собственности по заявке № 20180153 от 11.07.2018 на выдачу патента на изобретение. Подана заявка на патенты № и 20170423 от 12.12.2017.

Результаты проведенного научного исследования внедрены на предприятиях ОАО «Агрокобинат «Дзержинский» и ООО «ХардМоторс» при создании программно-аппаратных комплексов управления кондиционированием воздуха.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликованы 3 научные статьи в рецензируемых журналах согласно перечню ВАК Республики Беларусь общим объемом 1,3 авторского листа, 15 статей в материалах научных конференций и семинаров, 6 тезисов докладов. Количество и объем публикаций по теме диссертации соответствует пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из следующих основных разделов: общей характеристики работы, трех глав с индивидуальными выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и восьми приложений.

Во введении демонстрируется актуальность диссертационного исследования. В первой главе приведена классификация современных СКВ, проанализированы алгоритмы управления СКВ, проведен анализ существующих систем автоматического управления температурой в помещениях большого объема с учетом пространственной распределенности и неоднородности температурного поля и определен информативный параметр, характеризующий температурный режим. Во второй главе проведено математическое описание и моделирование основных элементов контура управления, обоснована и разработана математическая модель калориферной установки СКВ с дросселирующим контуром гидравлической обвязки, учитывающая динамически меняющиеся параметры калориферной установки. В третьей главе разработана методика параметрической идентификации калориферной установки с дросселирующим контуром гидравлической обвязки по критерию температурного режима эксплуатации, функционирующая на основе информации об объекте управления. Разработан алгоритм адаптивного управления калориферной установкой СКВ по критерию температурного режима, функционирующий на основе информации об объекте управления и подстраивающийся

настройки регулятора. Разработан алгоритм селекции сигналов рассогласований по каналам обратных связей от датчиков температуры воздуха в рабочих зонах промышленного помещения, основанный на использовании теории нечётких множеств и учитывающий опыт эксперта, и позволяющий улучшить характеристики системы управления микроклиматом. В приложении приведены таблицы, уточняющие и поясняющие основные вопросы диссертации.

Общий объем диссертации 149 машинописных страниц, из них 129 страниц основного текста. Работа содержит 55 рисунков, расположенных в тексте работы, список использованных источников, насчитывающий 91 наименование и список из 24 публикаций автора, а также приложения на 20 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении показана актуальность выбранной темы, обоснована необходимость проведения работы по анализу и аналитическому синтезу построенных на новых принципах систем управления микроклиматом в промышленных помещениях больших объемов.

В **первой главе** приведены современные подходы к классификации СКВ, сформированы с учетом действующих нормативно-правовых актов требования, предъявляемые к системам и элементам управления микроклиматом.

В ходе анализа подходов к математическому описанию калориферной установки СКВ полученных Мухиным О. А., Калмановым А. А. и Сотниковым А. Г. в первом приближении было решено рассматривать калориферную установку в виде апериодического звена первого порядка с запаздыванием.

Показано, что тип гидравлического контура обвязки, непосредственно подсоединенного к калориферной установке СКВ, существенно влияет на динамические свойства объекта, на особенности эксплуатации и требования к элементам автоматики и системе управления в целом. По этой причине при математическом описании необходимо рассматривать калориферную установку и гидравлический контур совместно. Присущими нелинейностями характеристик гидравлического контура и нестационарностью процессов теплообмена в калориферной установке нельзя пренебрегать при анализе работы СКВ. Помимо теплофизических процессов, происходящих в теплообменном аппарате, имеют место процессы запаздывания, которые можно разделить на два класса: запаздывание воздушной среды и теплоносителя. Запаздывание воздушной среды при качественном регулировании носит постоянный характер, а запаздывание теплоносителя динамически меняется в зависимости от объемного расхода теплоносителя.

Задача поиска оптимального режима работы СКВ сводится к такому температурному режиму в помещении, при котором обеспечивалась бы минимальная разница между температурами на рабочих местах и заданной температурой:

$$|T_n - T_{\text{жел}}| = \varepsilon_n \rightarrow \min, \quad (1)$$

где T_n — температура на n -ном рабочем месте в помещении, °С;

$T_{\text{жел}}$ — желаемая температура в помещении, °С;

ε_n — значение сигнала рассогласования по n -ному каналу, °С.

Критический анализ алгоритмов управления температурой в помещении показал, что они не всегда могут адекватно оценивать распределенное температурное поле в помещении. Поэтому целесообразно предусмотреть селекцию сигналов рассогласований, которая могла бы решить следующий ряд задач:

- 1) непрерывный мониторинг температурного поля в помещении;
- 2) управление с учетом не только усредненного значения температуры в помещении, но и значений отклонений температур от среднего;
- 3) реализация гибких правил усреднения в зависимости от параметров объекта;
- 4) улучшение динамических характеристик СКВ;
- 5) практическая реализация и минимальная сложность.

Во **второй главе** обоснована и разработана математическая модель калориферной установки СКВ с дросселирующим контуром гидравлической обвязки. Модель калориферной установки по каналу «расход теплоносителя — температура воздуха после калориферной установки» рассматривается в виде апериодического звена первого порядка с динамически меняющимися коэффициентами и запаздыванием.

Коэффициент передачи модели K , °С/(кг/с), определяется из выражения

$$K = \frac{t_b}{G_w}, \quad (2)$$

где t_b — температура приточного воздуха, °С;

G_w — массовый расход теплоносителя, кг/с.

Постоянная времени T_k , с, определяется из выражения:

$$T_k = \frac{c_m m_m + c_w \frac{V_k}{1000} \cdot \rho_w}{c_w G_w + \left(\frac{2}{kF} + \frac{1}{c_w G_w} \right)^{-1}}, \quad (3)$$

где c_m — удельная теплоемкость калорифера при средней температуре материала, Дж/(кг · К);

m_m — масса калорифера, кг;

c_w — теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг · К);

V_k — объем теплоносителя в калорифере, м³;

ρ_w — плотность воды при средней температуре воздуха, кг/м³;

- G_w — массовый расход теплоносителя, кг/с;
 k — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К);
 F — площадь поверхности нагрева калорифера, м².

Графики изменения коэффициента передачи и постоянной времени калориферной установки в зависимости от расхода теплоносителя при температуре наружного воздуха - 15 °С приведены на рисунках 1 и 2.

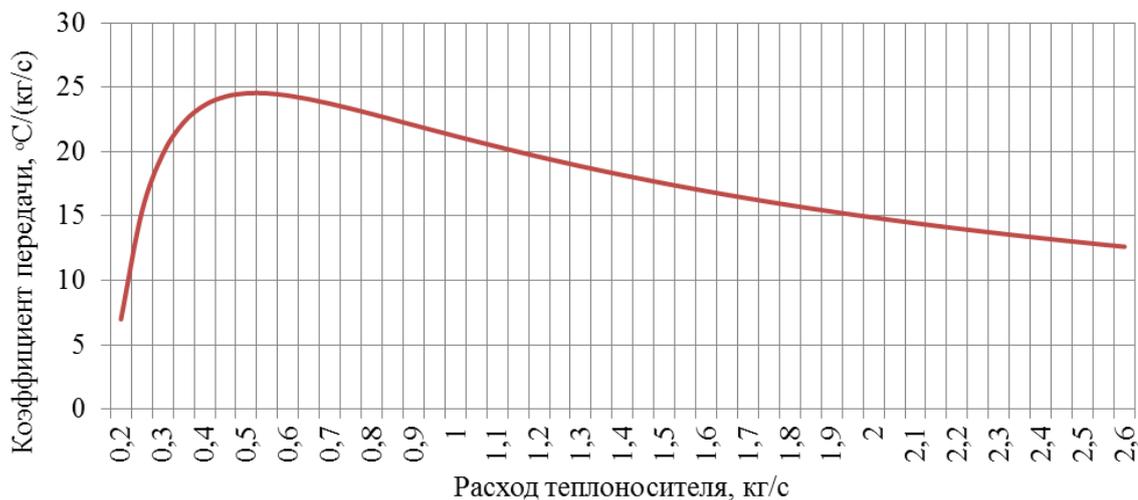


Рисунок 1. – График зависимости коэффициента передачи K от расхода теплоносителя

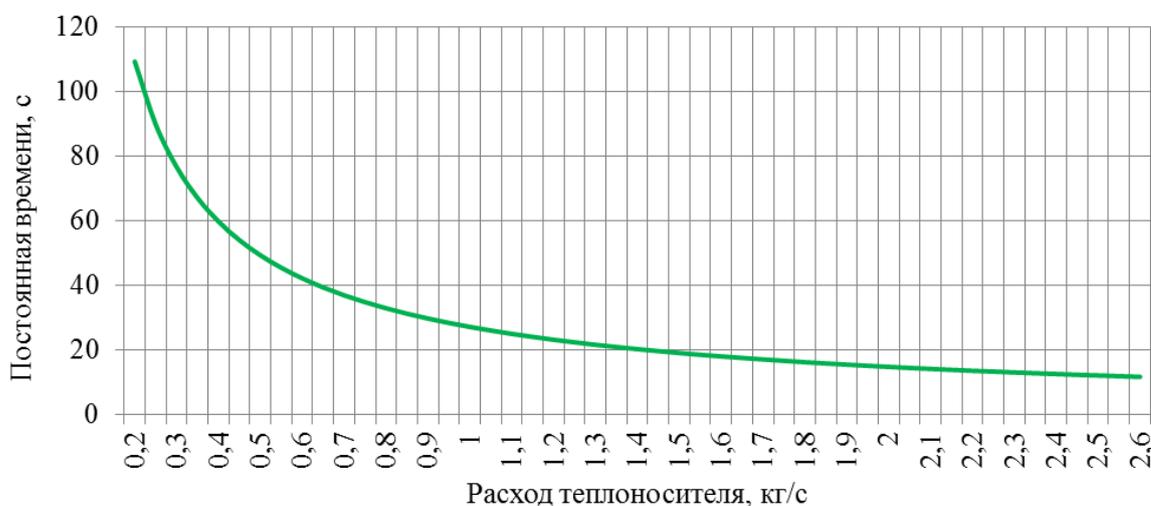


Рисунок 2. – График зависимости постоянной времени T_k от расхода теплоносителя

Зависимость коэффициента передачи клапана с линейно-равнопроцентной ($n_{gl} = 3$ в соответствии с VDI/VDE 2173) характеристикой от хода штока имеет нелинейный характер и приведена на рисунке 3.

В данной главе была разработана методика определения параметров передаточных функций помещения в различных точках пространства, разработана программа предстоящих работ, сформулирована методика по определению мест установки датчиков температуры и их количества, определены временные требо-

вания к эксперименту, требования к датчикам температуры и к организации эксперимента. С целью получения модели помещения, полученные экспериментальные данные были аппроксимированы передаточными функциями.

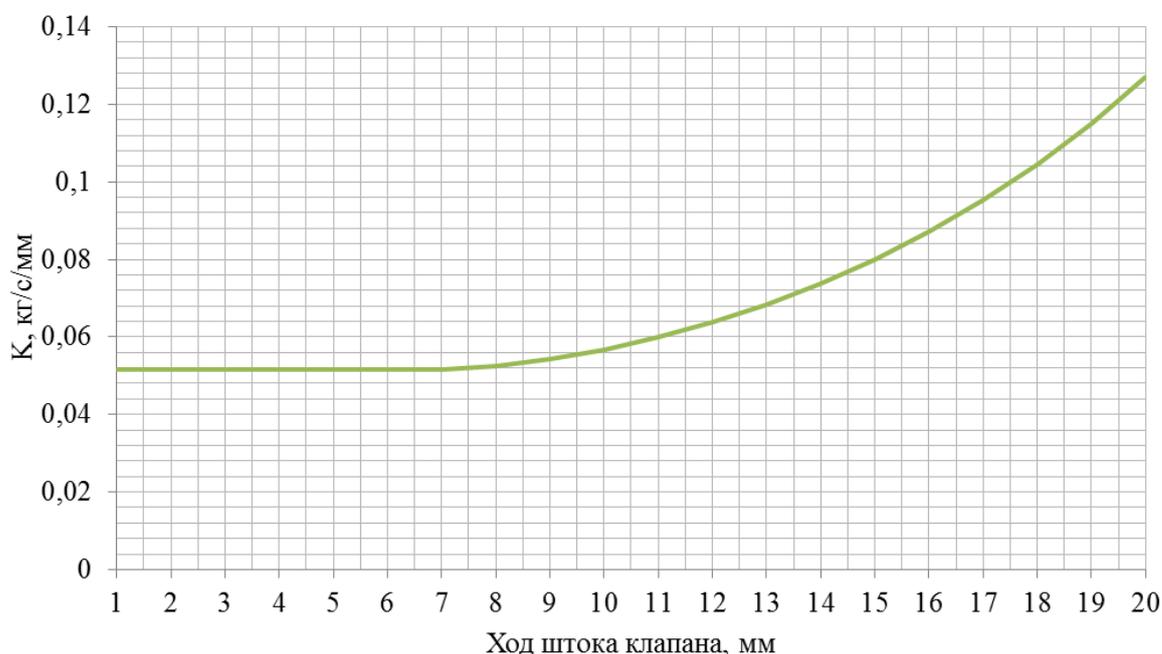


Рисунок 3. – Зависимость коэффициента передачи клапана от хода штока

В **третьей главе** разработана методика параметрической идентификации калориферной установки с дросселирующим контуром гидравлической обвязки по критерию температурного режима эксплуатации, функционирующая на основе информации об объекте управления.

Регулятор контура управления калориферной установкой, параметры которого определены при малых расходах теплоносителя, может некорректно работать в условиях больших расходов теплоносителя, и, наоборот, при малых расходах будет плохо отрабатывать регулятор, настройки которого определены при больших расходах теплоносителя. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность реализации регулятора в контуре управления температурой приточного воздуха, параметры которого изменялись бы в зависимости от критерия, характеризующего динамические характеристики калориферной установки в определенные моменты времени.

Для СКВ с дросселирующим контуром обвязки калорифера предложен коэффициент эффективности по воздуху K_B , °C/°C, в качестве обобщающего критерия температурного режима, который определяет динамические характеристики калориферной установки:

$$K_B = \frac{t_B - t_{BH}}{t_{BH}(k_{ог} - 1) + b}, \quad (4)$$

где t_B — температура воздуха после калорифера, °С;

t_{BH} — температура наружного воздуха, °С;

$k_{ог}$ — коэффициент наклона отопительного графика, °С/°С;

b — константа, °С.

В работе показано, что для СКВ с дросселирующим контуром обвязки калорифера справедливы выражения

$$G_w = f(K_B) = f(t_B, t_{BH}); \quad (5)$$

$$T_K \approx f(G_w) = f(K_B) = f(t_B, t_{BH}); \quad (6)$$

$$K \approx f(G_w, t_B) = f(t_B, t_{BH}). \quad (7)$$

Для любого значения температуры наружного воздуха динамические характеристики калориферной установки T_K и K определяются расходом теплоносителя, который связан с перепадом температур по воздуху t_B и t_{BH} . Поэтому целесообразно рассматривать коэффициент эффективности по воздуху K_B в качестве обобщающего критерия температурного режима, который определяет динамические характеристики калориферной установки.

В работе предложено синтезировать САУ с адаптивным алгоритмом управления, основанным на использовании процедуры идентификации объекта управления и реализованным в виде блока адаптации (БА). В систему управления встраивается БА, в котором происходит процедура идентификации параметров СКВ и расчет параметров регулятора. Структурная схема элементов САУ СКВ с БА приведена на рисунке 4.

В БА для различных режимов работы выполняется идентификация параметров СКВ и для каждого из них находятся значения параметров регулятора, которые записываются в таблицу параметров управления (таблица 1.). В процессе функционирования идентифицируются параметры СКВ и в зависимости от их значений из таблицы выбираются соответствующие значения коэффициентов настройки регулятора. За величину, однозначно характеризующую режим работы, целесообразно принять температуру наружного воздуха. А в качестве обобщающего критерия температурного режима, который определяет динамические характеристики калориферной установки, следует рассматривать коэффициент эффективности по воздуху K_B .

САУ с БА показывает лучшие результаты (время регулирования при смене режимов эксплуатации 18/24 °С уменьшилось до 7%) по сравнению с классическими САУ с ПИД-регуляторами со стационарными настройками.

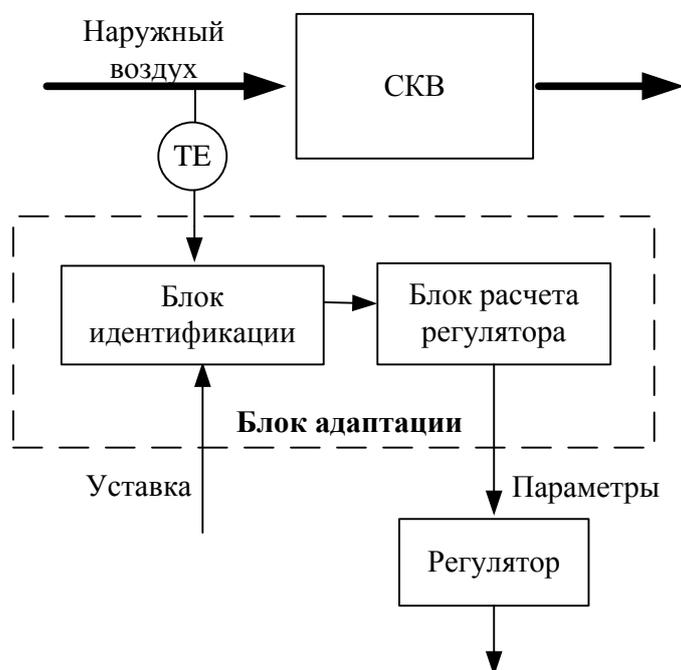


Рисунок 4. – Структурная схема элементов САУ СКВ с БА

Таблица 1. – Параметры управления

| K_B | Температура наружного воздуха $t_{вн}$ | | | |
|----------|--|---------------------------|-----|---------------------------|
| | $t_{вн1}$ | $t_{вн2}$ | ... | $t_{внn}$ |
| 0 | Рег ($t_{вн1}; 0$) | Рег ($t_{вн2}; 0$) | ... | Рег ($t_{внn}; 0$) |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| K_{BN} | Рег ($t_{вн1}; K_{BN}$) | Рег ($t_{вн2}; K_{BN}$) | ... | Рег ($t_{внn}; K_{BN}$) |

Так же предложен алгоритм селекции сигналов каналов обратных связей от датчиков температуры воздуха в рабочих зонах промышленного помещения, основанный на использовании теории нечетких множеств с учетом опыта эксперта, позволяющий улучшить качество управления микроклиматом в промышленных помещениях. Алгоритм нечеткой селекции сигналов рассогласований реализуется тем, что во внешний контур каскадной САУ температурой в помещении встраивается блок нечеткой селекции (БНС), на вход которого подаются сигналы от датчиков температур на рабочих местах в помещении. Обработывая входные сигналы по нечеткому алгоритму, БНС формирует эквивалентный выходной сигнал обратной связи, который подается на вход регулятора температуры. Структурная схема БНС приведена на рисунке 5.

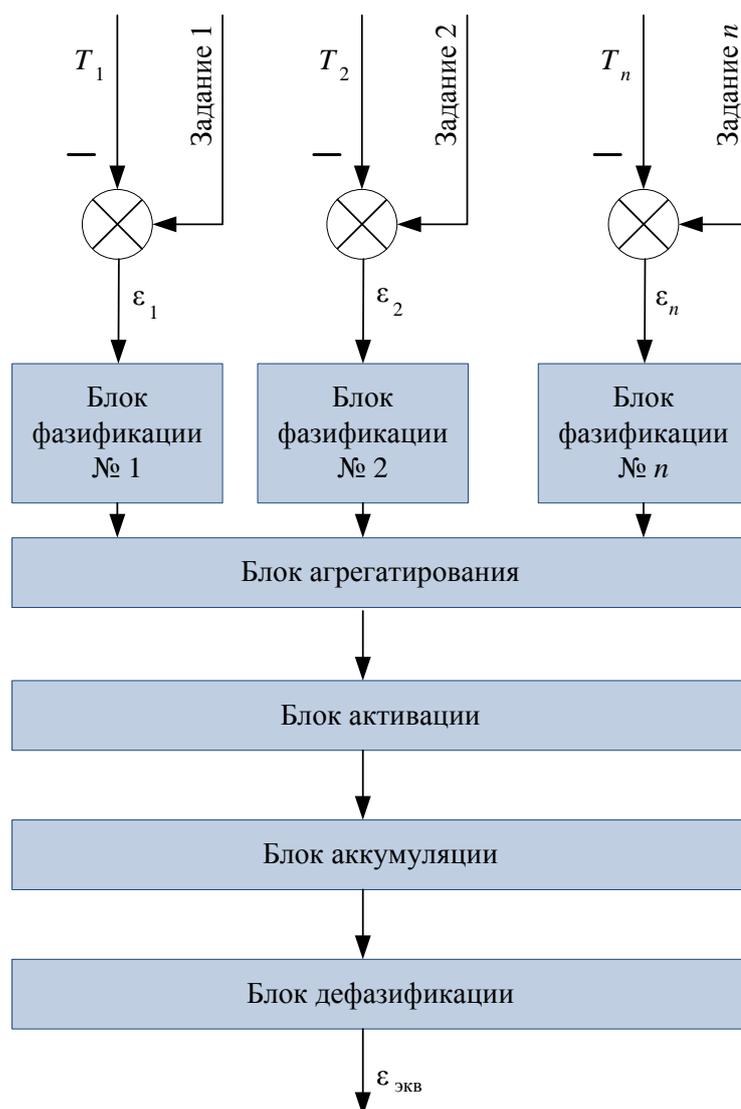


Рисунок 5. – Структурная схема БНС

В БНС вычисляются сигналы рассогласований ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$) между заданными (задание 1, задание 2, ..., задание n) и действительными значениями температур (T_1, T_2, \dots, T_n) на рабочих местах для каждого канала обратной связи.

Вычисленные сигналы рассогласования для всех каналов обратной связи подвергаются фазификации (вычислению соответствия между численными значениями сигналов рассогласования и значениями функций принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной). Далее по заранее определенным правилам в БНС происходит процедура определения истинности каждого из правил нечеткого вывода (агрегатирование) и нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечеткого вывода (активация). На стадии аккумуляции происходит нахождение функции принадлежности для выходной лингвистической переменной «эквивалентный сигнал рассогласования», которой преобразуется в четкий выходной сигнал (дефазификация) ($\varepsilon_{\text{экв}}$).

В зависимости от целей, преследуемых системой автоматического управления температурой в помещении, могут подвергаться изменению формы функций принадлежности входных сигналов рассогласований и выходного эквивалентного сигнала рассогласования численные диапазоны значений функций принадлежности, правила нечеткого вывода и дефазификации.

Базовое множество термов лингвистической переменной определим следующими лингвистическими переменными (рисунок 6): «отрицательный», «нормальный», «положительный».

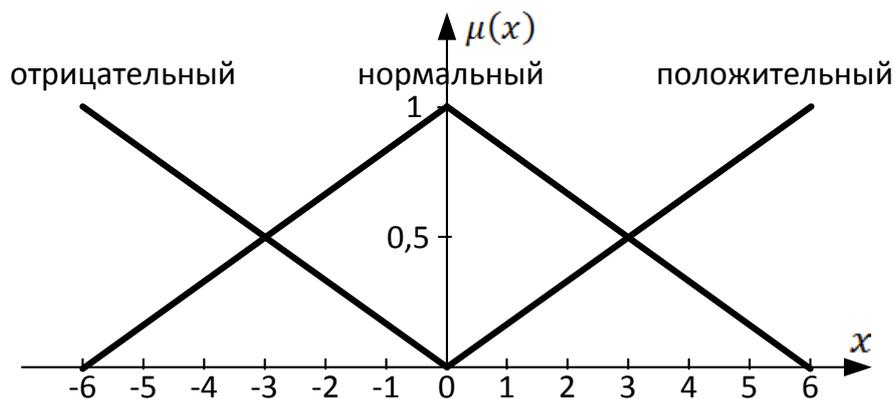


Рисунок 6. – Функция принадлежности сигнала рассогласования

При значениях входных сигналов рассогласований в БНС, для которых функция принадлежности $\mu = 1$, значение эквивалентного сигнала рассогласования описывается при помощи традиционной математики. После расчета всех возможных комбинаций входных значений сигналов рассогласований в БНС можно сформировать перечень возможных значений эквивалентного сигнала рассогласования и соответствующих ему термов. При наличии четырех входных в БНС сигналов рассогласования по каналам обратных связей, описываемых тремя термами, необходимо девять термов, чтобы описать всевозможные значения эквивалентного выходного сигнала рассогласования (рисунок 7).

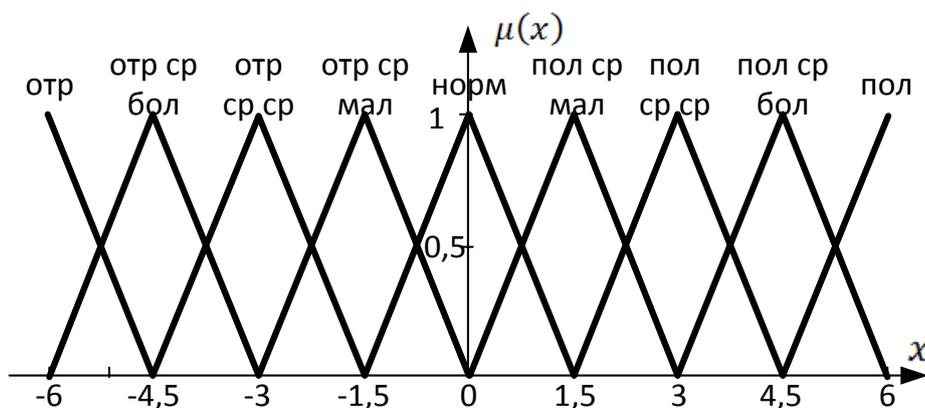


Рисунок 7. – Функция принадлежности эквивалентного выходного сигнала обратной связи

В качестве закона формирования правил нечеткого вывода эквивалентного рассогласования рассматривался принцип на основании «усреднения значений сигналов рассогласований в точках с $\mu = 1$ ». Такие САУ позволяют существенно ускорить время регулирования при смене температурных режимов в помещении с прекомфортный/нормальный (до 26%), в сравнении с классической системой с усреднением температуры.

При наличии жестких технологических требований к микроклимату на производстве САУ должна обеспечивать бесколебательный переход между температурными режимами в помещении. Любое необоснованное перерегулирование можно расценивать как перерасход энергии, что тоже не желательно. Был предложен алгоритм селекции сигналов (без колебаний) при смене режимов работы прекомфортный/нормальный, который позволяет избавиться от колебаний температуры, путем искусственного увеличения инерционности системы при помощи смещения эквивалентного сигнала рассогласования до ближайшего меньшего терма. Алгоритм селекции сигналов (без колебаний) позволяет снизить уровень перерегулирования до 0, при этом время регулирования при смене температурных режимов в помещении с прекомфортный/нормальный уменьшилось более чем на 16%, в сравнении с алгоритмом с усреднением температуры.

Варьируя правила нечеткого вывода и изменяя весовые коэффициенты для значений температуры в каждой точке помещения, можно уменьшить присущие алгоритму с усреднением недостатки и расширить функциональные возможности системы управления с большим количеством датчиков в канале обратной связи. Также применение алгоритма нечеткой селекции позволяет при помощи весовых коэффициентов увеличить или уменьшить значения сигналов обратных связей от некоторых обратных связей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Математическая модель калориферной установки СКВ по каналу «изменение расхода теплоносителя — изменение температуры воздуха после калориферной установки», учитывающая динамически меняющиеся параметры объекта и особенности гидравлического контура. Параметры модели представляются в виде динамически изменяющихся величин, зависящих от массовых расходов и теплофизических свойств сред, а также от теплофизических свойств материала калориферной установки и особенностей гидравлической обвязки. Постоянная времени калориферной установки зависит от расхода теплоносителя и практически не подвержена влиянию температур наружного воздуха и температуры теплоносителя на входе в калориферную установку. Статический коэффициент передачи

калориферной установки зависит не только от расхода теплоносителя, но и от температур сред на входе и способен меняться в диапазоне с максимальным разбросом до $\pm 18,41$ % от среднего значения для всех возможных режимов эксплуатации. [2, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 16, 22].

2. Алгоритм адаптивного управления калориферной установкой системы кондиционирования воздуха по критерию температурного режима, функционирующий на основе информации об объекте управления и подстраивающий настройки регулятора. Синтезированная САУ показывает лучшие результаты (время регулирования при смене режимов эксплуатации $18/24$ °С уменьшилось до 7%) по сравнению с классическими САУ с ПИД-регуляторами со стационарными настройками [3, 9].

3. Алгоритм селекции сигналов рассогласований по каналам обратных связей от датчиков температуры воздуха в рабочих зонах промышленного помещения, основанный на использовании теории нечетких множеств и учитывающий опыт эксперта, и позволяющий улучшить характеристики системы управления микроклиматом. Для помещений больших объемов с присущей им инерционностью и наличием запаздывания предложенный алгоритм селекции позволяет уменьшить время переходного процесса при каждодневной смене режимов работы СКВ без изменений качества микроклимата. Так же применение алгоритма позволяет при помощи весовых коэффициентов увеличить или уменьшить значимость значений сигналов рассогласований от некоторых каналов обратных связей. Путем вариаций правил нечеткого вывода и изменений весовых коэффициентов для значений температуры в каждой точке помещения можно уменьшить присущие системе с усреднением недостатки и расширить функциональные возможности системы управления с большим количеством датчиков в канале обратной связи. САУ с предложенным алгоритмом селекции сигналов рассогласований по каналам обратных позволяет уменьшить время регулирования при смене режимов эксплуатации $16/20$ °С до 26% [1, 8, 10, 11, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные в диссертационной работе результаты являются новым направлением в области задач управления параметрами распределенных объектов.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в организациях, занимающихся вопросами анализа и синтеза систем автоматического управления тепловыми объектами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1. Подобед, М. Ю. Особенности управления калориферными установками в системах кондиционирования воздуха / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. – 2018. – № 1. – С. 55–59.
2. Подобед, М. Ю. Адаптивное управление системой кондиционирования воздуха по обобщающему критерию температурного режима / М. Ю. Подобед, В. В. Сарока // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. – 2018. – № 1. – С. 67–71.
3. Подобед, М. Ю. Блок нечеткой селекции сигналов обратных связей / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович // Вестник связи. – 2018. – № 4 – С. 53–58.

Материалы конференций

4. Подобед, М. Ю. Особенности выбора регулирующего клапана / М. Ю. Подобед // Проблемы функционирования систем транспорта : материалы науч.-практ. конф., Тюмень, 20–22 нояб. 2013 г. / Тюмен. гос. нефтегазовый ун-т ; под ред.: В. И. Бауэра. – Тюмень, 2013. – С. 260–262.
5. Подобед, М. Ю. Особенности автоматического управления вентиляционными системами / М. Ю. Подобед // Информационные технологии и системы 2014 : материалы междунар. науч. конф., Минск, 29 окт. 2014 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2014. – С. 74-75.
6. Подобед, М. Ю. Моделирование работы вентиляционной системы / М. Ю. Подобед // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 нояб. 2014 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 256–258.
7. Подобед, М. Ю. Модель работы приточной вентиляционной системы / М. Ю. Подобед, О. Н. Суша // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сб. науч. трудов, Томск, 19–22 мая 2015 г. : в 2 ч. / Томский политехн. ун-т ; редкол.: О. Г. Берестнева [и др.]. – Томск, 2015. – Ч. 1. – С. 86–87.
8. Подобед, М. Ю. Гибридная система управления вентиляцией помещений с неоднородной тепловой нагрузкой / М. Ю. Подобед // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–24 окт. 2015 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. В. Войтов [и др.]. – Минск, 2015. – С. 110–112.

9. Подобед, М. Ю. Регулирование параметров вентиляционной системы на химических предприятиях с неоднородной тепловой нагрузкой / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович, С. Г. Тихомиров // Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 окт. 2016 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. В. Войтов [и др.]. – Минск, 2016. – С. 190–193.
10. Карпович, Д. С. Использование распределенной информации о тепловых объектах для управления с блоком нечеткой селекции / Д. С. Карпович, М. Ю. Подобед, С. Д. Латушкина // Материалы LV отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2016 год, Воронеж, 24–26 марта 2017 г. : в 3 ч. / Воронеж. гос. ун-т инж. технологий. – Воронеж, 2017. – Ч. 2. – С. 71–73.
11. Подобед, М. Ю. Блок нечеткой селекции сигналов обратных связей / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович // Энергосбережение – важнейшее условия инновационного развития АПК : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 нояб. 2017 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: Л. Ю. Прищепов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 355–357.
12. Подобед, М. Ю. Математическое моделирование системы кондиционирования воздуха / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович // Энергосбережение — важнейшее условия инновационного развития АПК : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 нояб. 2017 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: Л. Ю. Прищепов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 357–359.
13. Подобед, М. Ю. Особенности моделирования систем кондиционирования воздуха / М. Ю. Подобед // Техника и технологии: инновации и качество : материалы междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 19 дек. 2017 г. / Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук [и др.]. – Барановичи, 2017. – С. 26–27.
14. Подобед, М. Ю. Предпосылки к селекции сигналов обратных связей / М. Ю. Подобед // Техника и технологии: инновации и качество : материалы междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 19 дек. 2017 г. / Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук [и др.]. – Барановичи, 2017. – С. 28–29.
15. Подобед, М. Ю. Нечеткая селекция сигналов обратных связей / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович, Д. Е. Сидорчик // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования : материалы междунар. науч.-техн. конф., Вологда, 27 марта 2018 г. / Вологод. гос. ун-т – Вологда, 2018. – С. 208–211.
16. Подобед, М. Ю. Математическое моделирование системы кондиционирования воздуха / М. Ю. Подобед, Д. Е. Сидорчик // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов : материалы междунар. науч.-техн. конф.,

Минск, 3–6 окт. 2018 г. / Беларус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. В. Войтов [и др.]. – Минск, 2018. – С. 98–100.

17. Подобед, М. Ю. Исследование нечеткой логики для управления тепловыми процессами / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович, А. Рассылкин // НЕФТЕХИМИЯ-2018 : материалы междунар. науч.-техн. форума, Минск, 27–30 нояб. 2018 г. : в 2 ч. / Беларус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2018. – Ч. 1. – С. 270–274.

18. Подобед, М. Ю. Блок нечеткой селекции / Д. Е. Сидорчик, М. Ю. Подобед // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине : сб. науч. тр, 17–21 дек. 2018 г. : в 2 ч. / Томский политехн. ун-т ; редкол.: О. Г. Берестнева [и др.]. – Томск, 2018. – Ч. 1. – С. 137–138.

Тезисы докладов

19. Подобед, М. Ю. Способы управления распределенными тепловыми объектами / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович, Dainius Udriš // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апр. 2017 г. / Могилев. гос. ун-т продовольствия ; редкол.: А. В. Акулич [и др.]. МГУП, 2017. – С. 290.

20. Подобед, М. Ю. Синтез систем автоматического управления температурным режимом в помещениях больших объемов / М. Ю. Подобед // Химическая технология и техника : тез. докл. 81-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), г. Минск, 1–12 февр. 2017 г. / Беларус. гос. технол. ун-т.; гл. ред.: И. В. Войтов. – Минск, 2017. – С. 83.

21. Подобед, М. Ю. Блок нечеткой селекции сигналов обратных связей / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович // Химическая технология и техника : тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), г. Минск, 1–14 февр. 2018 г. / Беларус. гос. технол. ун-т ; гл. ред.: И. В. Войтов. – Минск, 2018. – С. 101.

22. Подобед, М. Ю. Математическое моделирование системы кондиционирования воздуха / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович // Химическая технология и техника : тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), г. Минск, 1–14 февр. 2018 г. / Беларус. гос. технол. ун-т ; гл. ред.: И. В. Войтов. – Минск, 2018. – С. 102.

23. Подобед, М. Ю. Предпосылки к селекции сигналов обратных связей по нескольким каналам / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович // Химическая технология и техника : тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), г. Минск, 1–14 февр. 2018 г. / Беларус. гос. технол. ун-т ; гл. ред.: И. В. Войтов. – Минск, 2018. – С. 103.

24. Подобед, М. Ю. Системы автоматического управления температурным режимом в помещениях больших объемов / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович // Химиче-

ская технология и техника : тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), г. Минск, 1–14 февр. 2018 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; гл. ред.: И. В. Войтов. – Минск, 2018. – С. 104.

Патент

1. Адаптивное управление системой кондиционирования воздуха по обещающему критерию температурного режима : положительное заключение предварительной экспертизы по заявке на выдачу патента на изобретение № а 20180153 / М. Ю. Подобед, Д. С. Карпович, Д. Е. Сидорчик. – Опубл. 19.07.2018.

РЭЗІЮМЭ

Падабед Міхаіл Юр'евіч

Аўтаматычнае кіраванне кандыцыянаваннем паветра ў прамысловых памяшканнях вялікіх памераў

Ключавыя словы: кандыцыянаванне паветра, адаптыўная сістэма кіравання, блок невыразнай селекцыі.

Мэта працы: распрацоўка алгарытму кіравання тэмпературай у памяшканнях вялікіх памераў з улікам размеркавання параметраў і пераменных характарыстык.

Аб'ект даследавання: аўтаматычныя сістэмы кіравання кандыцыянавання паветра.

Прадмет даследавання: характарыстыкі аб'ектаў кіравання, а гэтак жа спосабы і алгарытмы, якія дазваляюць палепшыць ўласцівасці сістэмы кіравання.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: прымяняліся метады эксперыментальнага даследавання, інжынерныя разлілу, аналіз, прыборы і абсталяванне для вывучэння тэмпературнага поля (тэрмометры супраціўлення, цеплавізар і інш.).

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацавана матэматычная мадэль каларыфернай устаноўкі, якая улічвае дынамічна пераменлівыя параметры і асаблівасці гідраўлічнага контуру; прапанавана ідэнтыфікацыйная адаптыўная сістэма кіравання каларыфернай устаноўкай па абагульняльнаму крытэрыю тэмпературнага рэжыму; прапанаваны блок невыразнай селекцыі (БНС), які прызначаны для апрацоўкі сігналаў разузгадненняў па каналах зваротных сувязяў і дазваляе павялічыць колькасць варыянтаў апрацоўкі сігналаў разузгадненняў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: сукупнасць атрыманых навуковых вынікаў з'яўляецца магчымым напрамкам у галіне задач кіравання сістэмамі кандыцыянавання паветра.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: сукупнасць атрыманых навуковых вынікаў з'яўляецца магчымым напрамкам у галіне задач кіравання сістэмамі кандыцыянавання паветра.

Галіна выкарыстання: сістэмы кандыцыянавання паветра.

РЕЗЮМЕ

Подобед Михаил Юрьевич

Автоматическое управление кондиционированием воздуха в промышленных помещениях больших размеров

Ключевые слова: кондиционирование воздуха, адаптивная система управления, блок нечеткой селекции.

Цель работы: разработка алгоритма управления температурой в помещениях больших размеров с учетом распределенности параметров и меняющихся характеристик.

Объект исследования: автоматические системы управления кондиционированием воздуха.

Предмет исследования: характеристики объектов управления, а также способы и алгоритмы, позволяющие улучшить свойства системы управления.

Методы исследования и аппаратура: применялись методы экспериментального исследования, инженерные расчеты, анализ, приборы и оборудование для изучения температурного поля (термометры сопротивления, тепловизор и др.).

Полученные результаты и их новизна: разработана математическая модель калориферной установки, учитывающая динамически меняющиеся параметры и особенности гидравлического контура; предложена идентификационная адаптивная система управления калориферной установкой по обобщающему критерию температурного режима; предложен блок нечеткой селекции (БНС), предназначенный для обработки сигналов рассогласований по каналам обратных связей и позволяющий увеличить количество вариантов обработки сигналов рассогласований.

Рекомендации по использованию: совокупность полученных научных результатов является возможным направлением в области задач управления системами кондиционирования воздуха.

Область применения: системы кондиционирования воздуха.

SUMMARY

Podobed Mikhail

Automatic control of air conditioning in large industrial premises

Key words: air conditioning, adaptive control system, fuzzy selection unit.

Purpose of the work: development of control algorithm temperature in the larger spaces taking into account distribution of gelendost settings and changing characteristics.

Object of research: automatic air conditioning control systems.

Subject of research: characteristics of control objects, as well as methods and algorithms to improve the properties of the control system.

Methods of research and equipment: experimental research methods, engineering calculations, analysis, instruments and equipment for studying the temperature field (resistance thermometers, thermal imager, etc.) were used.

Results and novelty: a mathematical model of the air heater, taking into account the dynamically changing parameters and features of the hydraulic circuit; proposed identification adaptive control system of the air heater according to the generalizing criterion of the temperature regime; proposed fuzzy selection unit (BNS), designed for processing signals of misalignments on the feedback channels and allows to increase the number of options for processing signals of misalignments.

Recommendations for use: the set of obtained scientific results is a possible direction in the field of control problems of air conditioning systems.

Field of application: air conditioning systems.

Научное издание

ПОДОБЕД
Михаил Юрьевич

УПРАВЛЕНИЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЕМ ВОЗДУХА
С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ И
РАСПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.06 – автоматизация и управление технологическими про-
цессами и производствами (промышленность)

Подписано в печать 14.04.2020. Формат 60x84 ¹/₁₆, Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60. Заказ 55.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,

Распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,

№ 2/113 от 07.04.2014.

ул. П. Бровка, 6, 220013, г. Минск