

УДК 681.51

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ В ПОМЕЩЕНИИ

К.т.н. А.В. Пономарева, к.т.н. И.О. Яшков, М. А. Волкова, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье проведен анализ существующей задачи проектирования автоматизированной системы управления тепловым режимом офисных помещений с учетом минимизации энергозатрат. Предложен новый подход для анализа температурных полей, который позволяет разработать систему управления температурным режимом помещения с учетом локализации зоны перегрева/охлаждения. Проведено экспериментальное обоснование теоретических предложений с использованием разработанного программно-аппаратного макета.

У статті проведений аналіз існуючої задачі проектування автоматизованої системи управління тепловим режимом офісних приміщень з урахуванням мінімізації енерговитрат. Запропонований новий підхід для аналізу температурних полів, який дозволяє розробити систему управління температурним режимом приміщення з урахуванням локалізації зони перегрівання/охолодження. Проведено експериментальне обґрунтування теоретичних пропозицій з використанням розробленого програмно-апаратного макету.

The article analyzes the existing task of designing an automated control system of a thermal mode of office space with taking into account the minimization of energy consumption. The new approach for the analysis of temperature fields which allows to develop a control system of a temperature mode of a premise taking into account localization of a zone of an overheat/cooling is offered. The experimental substantiation of theoretical offers with use of the developed hardware-software breadboard model is spent.

Ключевые слова: система управления, тепловой режим, датчик, локализация

Введение

На сегодняшний день важнейшим источником экономии энергоресурсов, затрачиваемых на теплоснабжение крупных промышленных и общественных помещений со значительным потреблением тепловой и электрической энергии, является повышение эффективности работы системы отопления и вентиляции на основе использования современных достижений вычислительной и управляющей техники. Обычно для управления системами отопления и вентиляции служат средства локальной автоматики. Основным недостатком такого регулирования является то, что оно не учитывает фактический воздушный и тепловой баланс здания и реальные погодные условия: температуру и влажность наружного воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление, солнечную радиацию. Кроме того, оно также не учитывает динамические особенности

самого объекта управления – функционирование, размещение и перемещение устройств и элементов, выделяющих тепло. Поэтому под воздействием средств локальной автоматики система теплоснабжения работает не в оптимальном режиме.

Эффективность работы системы отопления и вентиляции можно значительно увеличить, если, используя математическое моделирование теплового поведения поля в помещении, осуществить оптимальное управление системами, основанным на использовании ЭВМ и комплекса технических, математических, алгоритмических и программных средств.

В связи с тем, что сегодня экономия энергоресурсов для любого предприятия стоит на первом месте, а с другой стороны необходимо поддерживать обеспечение климатических норм в помещениях, возникла актуальная задача разработки нового подхода к автоматизированному управлению тепловым режимом офисных помещений, обеспечивающего оптимизацию по критериям максимума быстродействия и минимума энергозатрат на систему управления.

Цель данной работы – разработка алгоритмического, математического и информационного обеспечения автоматизированной системы управления температурным режимом (АСУТР) в помещении на основании предложенного подхода.

Анализ состояния вопроса

Система управления тепловым режимом помещения должна обеспечивать: требуемый температурный и воздушный режим, необходимый для нормального выполнения технологических процессов; заданные значения температуры и подвижности внутреннего воздуха в рабочей зоне, определенные санитарно-гигиеническими требованиями; экономию затрат энергоресурсов на эксплуатацию здания.

Температура t_v , относительная влажность j_v и скорость движения воздуха v в различных помещениях зданий должны соответствовать их допустимым значениям в зависимости от характеристики помещений, категорий работ, приведенных для холодного и переходного периода года в таблице 1, для теплого периода – в таблице 2.

В настоящее время для управления тепловым режимом офисного помещения активно используются системы кондиционирования. Так, при непрерывной работе кондиционера мощностью 8 кВт (потребляемая мощность $\approx 2,7$ кВт/ч) для охлаждения/нагрева офисного помещения площадью до 70 кв.м., при 8-ми часовом рабочем дне 600-700 кВт. При этом, в случае перегревания определенной локальной зоны помещения, кондиционер будет охлаждать весь объем циркулируемого воздуха.

Таблица 1

Допустимым значениям температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха для холодного и переходного периода года

Категория работы	Температура воздуха t_v , °C	Относительная влажность воздуха j_v , %, не более	Скорость движения воздуха v , м/с, не более
Легкая	17 - 22	75	0,3
Средней тяжести	15 - 20	75	0,5
Тяжелая	13 - 18	75	0,5

Таблица 2

Допустимым значениям температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха для теплого периода

Категория работы	Температура воздуха t_v , °C	Относительная влажность воздуха j_v , %, не более, при температуре воздуха t_v , °C					Скорость движения воздуха v , м/с
		28	27	26	25	24	
Легкая	Не более чем на 3 °C выше t_m , но не выше 28 °C	55	60	65	70	75	0,3 - 0,5
Средней тяжести	То же	55	60	65	70	75	0,3 - 0,7
Тяжелая	То же, но не выше 26 °C	-	-	65	70	75	0,5 - 1

Математическая модель формирования теплового режима помещения в классическом случае сводится к составлению уравнений теплового баланса, описывающих воздухообмен, технологические теплопоступления, наружные климатические воздействия, теплопотери через наружные ограждения за счет теплопроводности и фильтрации, теплосодержание технологического оборудования и внутренних ограждающих конструкций.

Формирование теплового режима можно представить как взаимодействие возмущающих и регулирующих факторов. К возмущающим факторам относятся теплопоступления через ограждающие конструкции (стены, перегородки), тепловая энергия, выделяющаяся при работе технологического оборудования, ПК, сотрудников. К регулирующим факторам относится тепловое воздействие отопительных и вентиляционных систем. Тогда система управления тепловым режимом помещения является многомерным объектом [3].

Построение оптимального регулятора для такой системы достаточно трудоемкая процедура, требующая знания многих параметров и учитывающая большое количество функциональных зависимостей. При этом усложнение модели приводит к усложнению определения целевой функции, оптимума и алгоритма регулирования, а незначительная ошибка может привести к значительным ошибкам.

Разработка функциональных, информационных и математических компонент АСУТР

Создание системы управления связано с проблемой решения определенных задач:

- системный анализ объекта управления с дальнейшим построением его математической модели;
- выделение основных функций и операций, выполняемых разрабатываемой системой;
- определение рационального и корректного количества уровней разрабатываемой системы [4];
- использование термодинамического подхода к созданию математической модели и ее идентификации по данным натурных исследований.

АСУТР должна выполнять функции управления температурным режимом на уровне системы и функции сбора информации о температурных параметрах.

На основе анализа температурных процессов можно выделить основные функции системы управления температурным режимом, условно разделив их на определенное количество уровней (три уровня).

I уровень включает в себя информационные функции, функции управления, регулирования и контроля температурных показателей, получаемых от объекта. В соответствии с этим все подсистемы можно разделить на подсистемы управления, регулирования и контроля. Подсистема управления выполняет функции управления всеми элементами системы. Подсистема контроля охватывают датчики, измеряющие температурные показатели. Подсистема регулирования служит для стабилизации показателей и поддержания оптимального температурного режима.

II уровень осуществляет координацию работы подсистем первого уровня. Второй уровень выполняет задачи:

- оптимизации работы всех подсистем первого уровня;
- обеспечения заданной последовательности выполнения операций и требуемой динамики процессов;

В БД происходит накопление информации необходимой, для ситуационного анализа, проводимого для определения тенденции изменения контролируемых параметров и предупреждение выхода параметров за определенные пороги.

III уровень – верхний уровень разрабатываемой системы. На этом уровне решаются задачи диагностики состояния объекта, ситуационного управления, визуализации и индикации.

Таким образом, систему управления также можно представить в виде трех уровней управления (рис. 1).

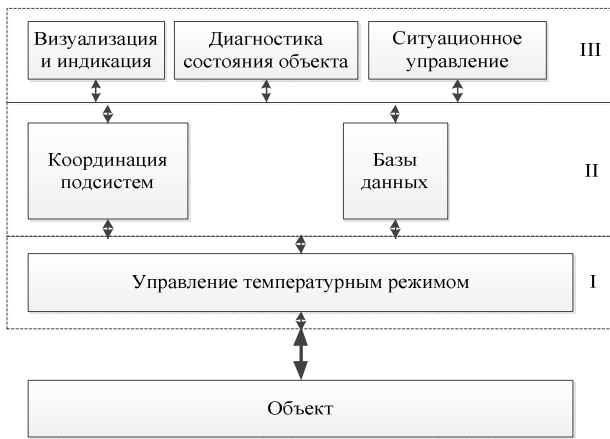


Рис. 1. Укрупненная структурная схема АСУТР

Структурная схема взаимодействия системы управления, ПК и объектом управления (лабораторным макетом) представлена на рис. 2.

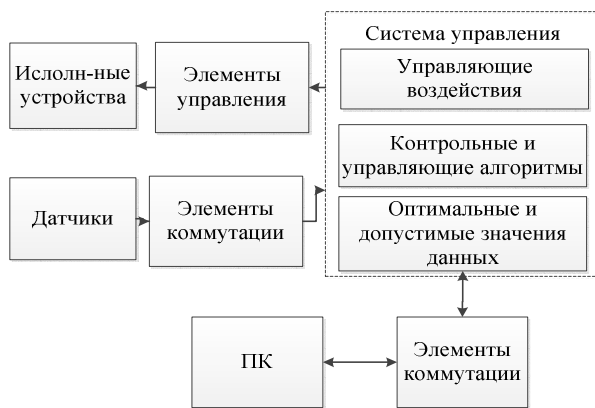


Рис. 2. Структурная схема взаимодействия

Система управления в своем составе содержит ряд функциональных блоков, каждый из которых выполняет определённые функции и операции.

Управляющие воздействия представляют собой ряд команд и сигналов, передаваемых посредством элементов управления на исполнительные механизмы (вентиляторы, радиаторы и т.п.).

Контрольные и управляющие алгоритмы – спектр различных алгоритмов, обеспечивающих корректное функционирование всех элементов системы управления.

Оптимальные и допустимые значения данных – заданные температурные показатели во всех точках системы.

Датчики передают данные по средствам элементов коммутации системе управления, находящейся в активном «диалоге» с ПК.

В условиях непрерывной работы, алгоритм функционирования системы управления температурным режимом состоит в ряде периодически повторяющихся последовательностей действий:

- ввод данных о начале работы объекта (априорные сведения об объекте, параметры датчиков и исполнительных устройств);

- опрос датчиков о температурных показателях внутри объекта и контроль показаний датчиков;
- расчет возможного температурного поведения с использованием математического представления;
- оперативная оценка состояния объекта;
- адаптация всех параметров для алгоритма управления;
- расчет в соответствии с алгоритмом управления установок для регулирования температуры во всех локальных зонах (управление системой охлаждения/нагрева);
- поддержание заданного температурного режима, вплоть до конца работы объекта.

Целью математического моделирования процесса нагрева и охлаждения является обеспечение АСУТР информацией о температурном состоянии объекта управления. Математическая модель позволяет в оперативном режиме получать информацию, необходимую для работы алгоритма управления, а также снабжать систему информацией о работе объекта управления.

При этом необходимо учитывать конструктивные особенности и условия нагрева воздуха в каждой зоне. Входной информацией для расчета математической модели являются данные:

- конструктивные характеристики объекта: геометрические размеры зон, расположение датчиков, расположение элементов охлаждающей системы;
- характеристики элементов нагрева (размеры, коэффициент теплопроводности, начальная температура) и элементов охлаждения (количество, мощность, производительность, размеры);
- характеристики проводящей среды (теплофизические характеристики воздуха (теплопроводность, теплоемкость, плотность));
- математическое описание физических закономерностей нагрева и охлаждения.

Выходной информацией математической модели является температура каждой зоны в любой момент времени.

Разрабатываемая АСУТР представляет собой нелинейную СУ релейного типа. Релейная система представляет собой систему с обратной связью, в которой управляющий сигнал рассогласования подается на исполнительную часть системы прерывно, причем возможны только два значения управляющего сигнала: максимальное положительное, максимальное отрицательное [5].

Структурный вид системы управления представлен на рис. 3.

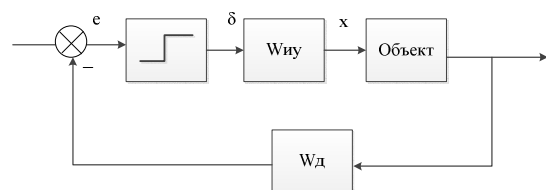


Рис. 3. Структурная схема разрабатываемой СУ

СУ содержит в своем составе:

- а) релейный элемент;
- б) звено вентилятора;
- в) звено датчика;
- г) объект управления.

Данные получаемые от датчиков (температурные показатели), передаются к релейному элементу. При достижении определенного значения температурного показателя, по средствам релейного элемента в локальной зоне производится включения вентилятора. Работа вентиляторов влияет непосредственно на объект. Для построения СУ необходимо произвести ее анализ и расчет.

Анализ и расчет СУ с обратной связью связан непосредственно с динамикой. Каждый элемент системы представляется в виде динамического, с учетом того, что все его характеристики задаются численно, графически или в форме конкретного уравнения [5].

Реле представляет собой определенное устройство для прерывного управления потоком энергии, направляемой к исполнительному механизму; вид характеристики реле имеет большое значение для устойчивости и точности системы, а также в значительной степени определяет характеристики необходимых корректирующих устройств. Поведение релейного элемента описывается уравнением:

$$\delta(e) = \begin{cases} 1, e > \Delta X_{кр} \\ 0, e \leq \Delta X_{кр} \end{cases}, \quad (1)$$

где δ – выходное воздействие релейного элемента;

e – входное воздействие релейного элемента;

$\Delta X_{кр}$ – значение температурных показателей, при которых активизируется охлаждающая система ($\Delta X_{кр} = 0,8 \cdot X_{кр}$).

Система нагрева/охлаждения представляет собой комплекс из n исполнительных устройств (нагревательные элементы, вентиляторы и т.п.). Математическое описание работы исполнительного механизма в общем случае можно описать передаточной функцией системы первого порядка

$$W_{ИУ}(p) = \frac{K_{ИУ}}{T_{ИУ} \cdot p + 1}, \quad (2)$$

где $K_{ИУ}$ – коэффициента усиления;

$T_{ИУ}$ – постоянная времени.

Коэффициент усиления и постоянная времени зависят от характеристик конкретного технического элемента.

В датчиках температуры переходная характеристика также представляет собой аperiodическое звено 1-го порядка:

$$W_{\delta am}(p) = \frac{K_{\delta am}}{T_{\delta am} \cdot p + 1}, \quad (3)$$

где $K_{\delta am}$ – температурный коэффициент (также выбирается с учетом характеристик конкретного датчика, например для датчика температуры РТ106051 – 3850 (ppm/°C));

$T_{\delta am}$ – постоянная времени (представляет собой время обработки входного сигнала и составляет 0,017 (с/°C)).

Суть подхода

Предложено площадь (а можно и объем) помещения разделить на зоны, каждую зону необходимо оснастить датчиком температуры и исполнительным механизмом (радиатор, вентилятор и т.п.). Тогда измеряемая температура будет иметь формат двумерной матрицы (в случае разделения объема помещения на зоны в трехмерном пространстве – имеет многомерную матрицу)

$$T_{\delta am}(t) = \begin{bmatrix} T_1 & \dots & \dots & \dots \\ T_2 & \dots & \dots & \dots \\ T_3 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & T_m \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где T_m - температура, измеренная m -м датчиком.

Представив таким образом информацию о температурном поле помещения можно локализовать зону перегрева и разработать алгоритм управления с учетом пространственной локализации перегрева так, чтоб максимально эффективно устранить

Пространственная локализация представляет собой обнаружение источника нагрева (нагревателя) по показаниям всех m датчиков.

Изменение температуры в локальной зоне, обслуживаемой конкретным датчиком, обратно пропорционально зависит от расстояния между датчиком и нагревателем (чем данное расстояние больше, тем меньше изменение температуры и наоборот).

Для корректной локализации источника нагрева необходимо по переходным процессам каждого из датчиков определить данное расстояние.

Изменение температуры в каждой локальной зоне описывается уравнением:

$$\Theta = \Theta_0 + \frac{\Theta_n}{D(l)}, \quad (5)$$

где Θ – изменение температуры, считываемое датчиком; Θ_0 – начальное значение температуры в локальной зоне; Θ_n – рассчитываемое изменение температуры (рассчитывается согласно теории нагревания идеального однородного твердого тела);

$D(l)$ – функциональный делитель, зависящий от расстояния l .

Важным шагом на начальном этапе идентифицировать функциональную зависимость $D(l)$. Предложено идентификацию производить с использованием методов непараметрической идентификации [5].

Экспериментальные исследования

Для экспериментальной апробации предложенного способа разработан макет (рис. 4). Корпус макета разделен на 6 температурных зон, каждая зона оснащена резистивным датчиком температуры и отдельным вентилятором.

Алгоритм функционирования макета: данные с резистивных датчиков передаются на узел регистрации информации, затем логическая схема обработки (на основе PIC16F887) интерпретирует данные в понятный машине код, передаваемый по средствам элементов коммутации с ПК (RS-232) с использованием усилителей. Полученные температурные показатели записываются в БД.

Для имитации процесса нагревания используется внешний, вносимый нагревательный элемент.

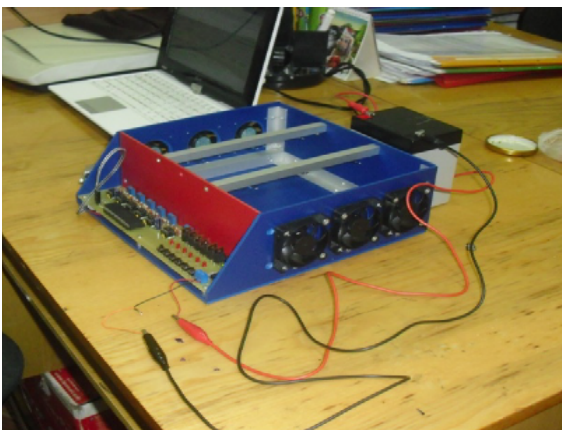


Рис. 4. Внешний вид экспериментального макета

Входной информацией для проведения эксперимента являются данные:

- характеристика элемента нагрева (размеры, коэффициент теплопроводности, начальная температура) и элементов охлаждения (количество, мощность, производительность, размеры);
- характеристики проводящей среды (теплофизические характеристики воздуха (теплопроводность, теплоемкость, плотность));
- геометрическое расположение нагревателя (конкретный сектор);
- время протекания процессов нагрева и охлаждения.

Выходной информацией эксперимента является температура каждой зоны в любой момент времени.

Формирование плана эксперимента

Для получения информационноёмких данных необходимо проведения ряда экспериментов:

а) расположение нагревательного элемента в центре рабочего поля макета, вектор расстояний [6; 3; 7,5; 5,5; 2; 6] ($[l_1; l_2; l_3; l_4; l_5; l_6]$) (рис. 5, а.);

б) расположение нагревательного элемента во второй локальной зоне, вектор расстояний [5; 1; 6,7; 6,4; 6; 7] (рис. 5, б.);

в) расположение нагревательного элемента в пятой локальной зоне, вектор расстояний [6,72; 5; 8,2; 4,5; 0,5; 5,5] (рис. 5, в.);

г) расположение нагревательного элемента в третьей локальной зоне, вектор расстояний [11; 4,5; 0,75; 12; 6,5; 4] (рис. 5, г.).

Начальным этапом проведения активного эксперимента является проведение калибровки показаний датчиков. Для этого было приведено два контрольных изменения (данные со всех 6-ти датчиков и данные полученные от эталонного термометра).

На втором этапе произведено непосредственное измерение температурных показателей (в соответствии с планом эксперимента, 10000 измерений, общей продолжительностью времени около 290 с.).

На третьем этапе проведена непараметрическая идентификация математической модели объекта, а именно нахождение функционального делителя, для каждого из датчиков, в каждом из экспериментов.

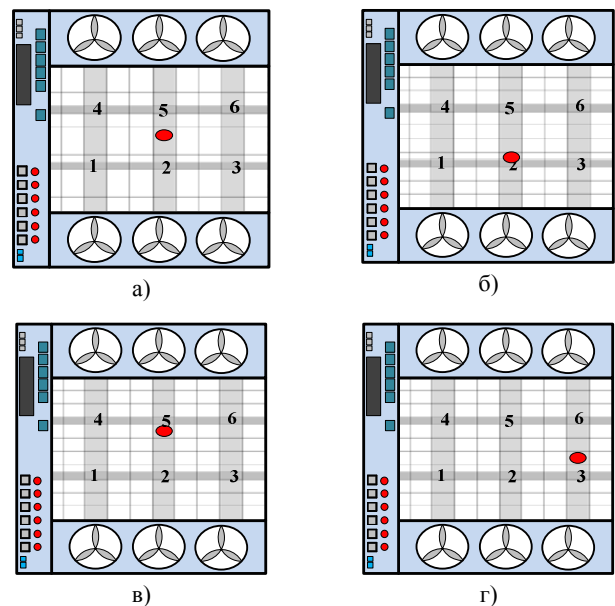


Рис. 5. Эксперимент с центральным расположением нагревательного элемента (а), нагревательный элемент во второй локальной зоне (б), нагревательный элемент в пятой локальной зоне (в), нагревательный элемент в третьей локальной зоне (г)

Анализ результатов

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде временных диаграмм температур, регистрируемых датчиками, отображенных с использованием разработанного программного средства (рис. 6, 7).

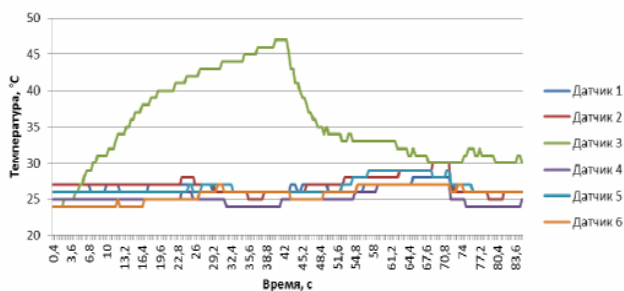


Рис. 6. Временная диаграмма эксперимента 3

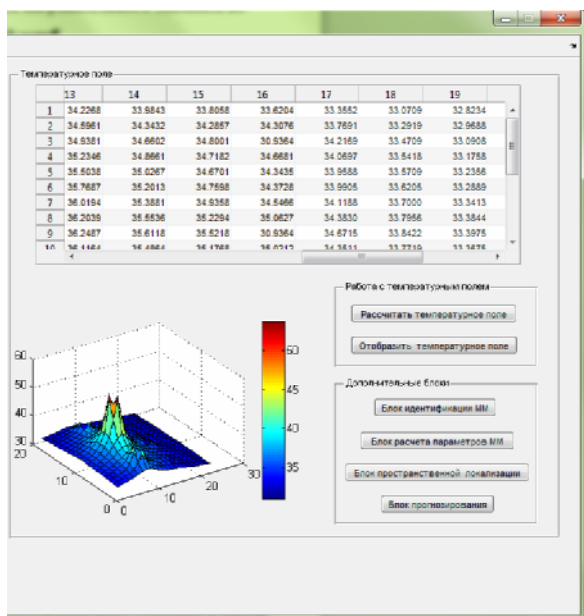


Рис. 7. Графический интерфейс с результатами эксперимента

Проведенные исследования температурных процессов выявили четкую взаимосвязь изменения температуры от пространственной локализации нагревательного элемента. При одинаковых расстояниях температурное поведение во всех локальных зонах имеет симметричный характер. При локальном расположении нагревательного элемента температурное поведение в локальной зоне интенсивно возрастает, в соседних зонах – изменения средней интенсивности, в дальних зонах – мало интенсивно.

Для проверки адекватности математической модели была проведена оценка значимости. Оценка охватывала все результаты проведенных экспериментов и математического моделирования.

Анализ экспериментальных данных представим в виде таблицы 3.

Результаты анализа эксперимента

№ эксперимента	Выявлена зона перегрева	Реакция системы охлаждения (номер зоны включенного вентилятора)	Время охлаждения до норм. темп. (30 °C)	Δ темп-ры
1 (рис.5, а)	Нет	зона 2 и 5	23 с	12°С
2 (рис.5,б)	Да - зона 2 (+47°С)	зона 2	30 с	17°С
3 (рис.5,в)	Да - зона 5 (+45°С)	зона 5	33 с	15°С
4 (рис.5, г)	Да - зона 3 (+47°С)	зона 3	12 с	17°С
Ручное управление				
5 (рис.5,в)	Да - зона 5 (+85°С)	зона 3	63 с	45°С

После проведения расчетов для проверки адекватности полученных моделей выполнена оценка результатов экспериментов и получены следующие оценки: коэффициенты детерминации находятся в пределах – [0,7569; 0,8649], корреляции – [0,87;0,93] средняя ошибка аппроксимации 4 – 7 (%).

Выводы

По полученным данным можно сделать вывод об эффективности предложенного способа анализа и управления температурным режимом в помещении в сравнении с существующим подходом по параметрам быстродействия и энергоемкости.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические предположения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Волкова М.А. Макет для исследования температурного поля в корпусе/ М.А.Волкова//18-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума.Т.1. – Харьков: ХНУРЭ.2014. – 121 с.
2. Три способа для расчета мощности кондиционера [Электронный ресурс]: / <http://freecond.com.ua/index.php/raschet-moshchnosti-konditsionera>.
3. Пособие к СНиП 2.04.05-86 Пособие по проектированию автоматизированных систем управления микроклиматом производственных зданий [Электронный ресурс]: / <http://www.gosthelp.ru/text/PosobieSNiP2040586Posobi.html>.
4. Зыков В. В., Ткаченко В. Н. Синтез иерархической системы оптимального управления сложным технологическим комплексом. Математическое моделирование задач оптимального планирования и управления. [Текст]: / В. В.Зыков, В. Н. Ткаченко. – Тюмень: ТГУ, 2007, 103 с.
5. Дилигенская, А.Н. Идентификация объектов управления [Текст]: учебное пособие / А.Н. Дилигенская. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2009. – 136 с.