

УДК 681.51

# Блок нечеткой селекции сигналов обратных связей

**М.Ю. ПОДОБЕД**, ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники

**Д.С. КАРПОВИЧ**, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники, доцент, к. т. н.

УО «Белорусский государственный технологический университет»

В силу дешевизны и простоты реализации наиболее распространенными системами управления кондиционированием воздуха являются схемы с расположением нескольких датчиков температуры в контрольных точках помещения. При такой схеме управления контроллер высчитывает и обрабатывает усредненное значение температуры. Подобные схемы обладают следующими существенными недостатками:

- 1) возможны такие режимы работы системы управления, при которых в одной части помещения наблюдается локальный недогрев воздуха, а в другой части – перегрев, в то время как усредненное значение температуры останется в допустимом диапазоне;
- 2) с увеличением количества точек измерения температуры воздуха в помещении происходит нивелирование частных значений сигналов обратных связей и снижение чувствительности системы управления в целом. Целесообразно предусмотреть селекцию сигналов обратных связей, которая могла бы решить следующие задачи:
  - обеспечение непрерывного мониторинга температурного поля в помещении;
  - осуществление управления с учетом не только усредненного значения температуры в помещении, но и значений отклонений температур от среднего;
  - реализация гибких правил усреднения в зависимости от параметров объекта;
  - улучшение динамических характеристик системы кондиционирования воздуха;
  - практическая реализация и простота.

**Введение.** При решении задач управления параметрами микроклимата на рабочих местах в помещении рассматривать объект в виде системы с сосредоточенными параметрами не всегда корректно [1]. Параметры объекта (температура, влажность, концентрация вредных веществ и др.) под влиянием внешних и внутренних факторов характеризуются пространственной протяженностью как по площади, так и по высоте помещения, а управляемая величина зависит не только от времени, но и от распределенности по пространственной области.

Рассмотрим задачу автоматического управления температурой на рабочих местах в производственном помещении. Пространственное и временное распределение температурного поля в помещении  $\theta(x, t)$  зависит от времени  $t$  и вектора пространственных координат  $x$ . В силу простоты реализации и большой распространенности рассмотрим вариант сосредоточенного управления путем граничного управления плотностью внешнего теплового потока.

Цель системы автоматического управления процессом кондиционирования воздуха в помещении – получить с определенной точностью в некоторый конечный момент времени  $\tau$  заданное распределение температурного поля  $\theta(x, t)$  в контрольных

точках пространства помещения после воздействия внешнего возмущения или смены температурного режима.

Ограничения, накладываемые на процесс управления температурой воздуха на рабочих местах, можно записать в следующем виде [2]:

$$\max |\theta(x, t)| \leq \theta_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где  $\theta_{\text{доп}}$  – допустимые значения температур на рабочих местах, которые для каждой категории работ определяются СанПиН-2013 «Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях».

**Основная часть.** Главными трудностями, с которыми сталкиваются при управлении микроклиматом в помещении с учетом пространственной распределенности температурного поля, являются:

- 1) проблема наблюдаемости – невозможность получить полную информацию о распределении температурного поля в помещении;
- 2) интеграция информации с  $n$  точек измерения в систему каскадного сосредоточенного управления.

*Проблема наблюдаемости.* На практике полную информацию о распределении температурного поля в помещении получить невозможно из-за использования бесконечно большого количества средств измерения температуры во всех точках помещения, как по площади, так и по высоте. Существуют методы приближенного определения распределения температурного поля в помещении по известным входным воздействиям и результатам измерения температуры в контрольных точках. Но они требуют измерений дополнительных входных воздействий, наличия распределенной модели помещения, что усложняет систему управления и мало востребовано при практической реализации. К тому же для некоторых классов помещений нет необходимости в определении распределения температурного поля по всему пространству, а лишь в определенных точках. Так, в соответствии с СанПиН измерения температуры в производственных помещениях в целях контроля их соответствия гигиеническим требованиям должны проводиться на рабочих местах. Если рабочим местом являются несколько участков производственного помещения, то измерения осуществляются на каждом из них.

*Интеграция информации с  $n$  точек измерения в систему каскадного сосредоточенного управления.* В теории управления распределенными системами для этой цели предлагают использовать переходные  $\xi$ -блоки, преобразующие значения функции  $\theta(x, t)$  в одной или  $n$  фиксированных точках и формирующие соответствующий сосредоточенный сигнал обратной связи. При нескольких точках измерения в качестве сосредоточенного выхода могут рассматриваться интегральные оценки функции состояния распределенной системы, например среднее ее значение или соотношения, характеризующие реальный результат измерения функции состояния в окрестности точки расположения соответствующих датчиков.

На данный момент в системах управления микроклиматом применяется метод обработки сигналов обратных связей по нескольким каналам путем усреднения значений. Системы с усреднением температуры имеют следующие преимущества по отношению к САУ с контролем температуры в одной точке помещения или вытяжного воздуха (представление помещения в качестве объекта с сосредоточенными параметрами):

- 1) способны контролировать локальные изменения температур на конкретных рабочих местах в помещении;
- 2) уменьшено влияние на показания температуры в помещении различных видов нагрузки (в сравнении с системами контроля температуры по вытяжному воздуху);

- 3) частичная компенсация влияния запаздывания для помещений больших размеров;

Недостатки подобных систем:

- 1) возможны такие режимы работы, при которых на одних рабочих местах в помещении возможен локальный недогрев воздуха, а на других – перегрев, в то время как усредненное значение температуры останется в допустимом диапазоне;
- 2) при большом количестве установленных в помещении датчиков температуры воздуха чувствительность системы управления снижается [3].

Проанализируем характер изменения среднего значения температуры в помещении с  $n$  точками измерения при отрицательном отклонении температуры в одной из точек на  $2^\circ\text{C}$ . Значения температур в остальных  $n - 1$  точках будем считать равными желаемой температуре  $\theta_{\text{жел}}$ .

Под отклонением температуры в точке  $n$  понимается значение отклонения реальной температуры  $\theta_{\text{реал}}$  в одной из  $n$  точек измерения температуры в помещении от значения средней желаемой температуры  $\theta_{\text{жел}}$ :

$$\Delta\theta_{\text{откл}(n)} = \theta_{\text{жел}} - \theta_{\text{реал}(n)}. \quad (2)$$

Значение средней температуры определяется как среднее арифметическое значение температур во всех точках помещения при условии отсутствия ранжирования:

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{\sum \theta_n}{n}. \quad (3)$$

Относительное отклонение средней температуры от желаемого значения  $\Delta\theta_{\text{откл}}$

$$\Delta\theta_{\text{откл}, \%} = \frac{\theta_{\text{жел}} - \theta_{\text{ср}}}{\theta_{\text{жел}}}, \%. \quad (4)$$

Из зависимости отклонения средней температуры от желаемого значения ( $20^\circ\text{C}$ ) от количества точек измерения (при уменьшении температуры в одной из точек на  $2^\circ\text{C}$ ) (рис. 1) можно заметить, что при увеличении количества точек измерения значение средней температуры стремится к  $\theta_{\text{жел}}$  и становится менее чувствительным к локальным, даже существенным, отклонениям температуры на отдельных рабочих местах. Причем среднее значение температуры зависит от количества точек измерения нелинейно: при малом количестве точек измерения влияние локального отклонения на значение средней температуры более существенно, чем при схемах с большим количеством точек измерения.

Рассмотрим в качестве примера два возможных варианта функционирования систем кондиционирования воздуха с усреднением температуры

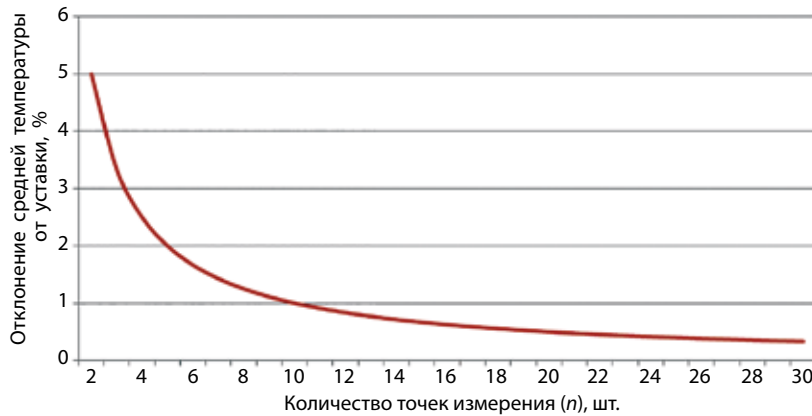


Рисунок 1 – Зависимость средней температуры (при изменении температуры в точке на 2 °С) от количества точек измерения

Таблица – Расчет среднего значения температуры в помещении в зависимости от количества точек измерения

Количество точек измерения (n)	Желаемая температура (θ <sub>жел</sub> )	Отклонение температуры в точке (Δθ <sub>откл</sub> )	Среднее значение температуры (θ <sub>ср</sub> )	Отклонение температуры от желаемого значения (Δθ <sub>откл</sub> )	
				°С	%
Шт.					
2	20	2	19,00	1,00	5,00
10	20	10	19,00	1,00	5,00

в помещении при θ<sub>жел</sub> = 20 °С. Из таблицы видно, что при количестве точек измерения температуры в помещении n = 2 отклонение в одной из точек температуры на 2 °С вызовет отклонение результирующего значения температуры на 1 °С, или 5 %. В то же время в системе измерения температуры в помещении с количеством точек измерения n = 10 такое же отклонение результирующей температуры произойдет при локальном отклонении температуры в одной из точек измерения на 10 °С, т. е. реальная температура в этой точке должна достигнуть значения:

$$\theta_{\text{реал}} = \theta_{\text{жел}} - \Delta\theta_{\text{откл}} = 20 - 10 = 10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

В соответствии с СанПиН такое значение температуры на рабочем месте ниже минимально допустимого значения температуры в холодный период года для любого класса работ по энергозатратам. Например, для помещений с категорией работ Па температура воздуха в 10 °С ниже минимально допустимого значения на 7 °С, а оптимального значения – на 9 °С. В таких условиях время пребывания работника на рабочем месте не может превышать 1 часа.

Вышеизложенные особенности применения систем управления кондиционированием воздуха в помещениях подтверждают необходимость применения в ряде случаев селекции сигналов обратных связей.

Критический анализ систем управления с усреднением значений температур по нескольким каналам показал, что, несмотря на простоту, данным методом не всегда возможно адекватно оценивать распределенное температурное поле в помещении.

Поэтому имеет смысл предусмотреть селекцию сигналов обратных связей, которая могла бы решить следующие задачи:

- 1) обеспечение непрерывного мониторинга температурного поля в помещении;
- 2) осуществление управления 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 системы кондиционирования воздуха;
- 5) практическая реализация и простота.

В связи с большим количеством каналов измерения температуры и неопределенностью правил селекции результирующего сигнала обратной связи целесообразным видится синтез блока селекции, функционирующего по гибким правилам нечеткой логики.

*Реализация блока нечеткой селекции (БНС).* В контур системы автоматического управления температурой в помещении встраивается 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 системы кондиционирования воздуха (СКВ) в помещении с БНС сигналов от четырех каналов обратных связей приведена на рис. 2, где U – выходной сигнал из регулятора; U<sub>КАН</sub> – выходной сигнал от датчика температуры (канального); U<sub>ЖЕЛ</sub> – желаемое значение температуры приточного воздуха; ε, ε<sub>11</sub>, ε<sub>22</sub>, ε<sub>31</sub>, ε<sub>33</sub>, ε<sub>ЭКВ</sub> – сигналы рассогласований; t<sub>В</sub> – температура приточного воздуха.

БНС состоит из следующих основных элементов: блоков вычисления сигналов рассогласований по каждому каналу обратной связи, а также фазификации, агрегатирования, активации, аккумуляции и дефазификации. Структурная схема БНС приведена на рис. 3.

В БНС вычисляются сигналы рассогласований (ε<sub>1</sub>, ε<sub>2</sub>, ..., ε<sub>n</sub>) между заданными (задание 1, задание 2, ..., задание n) и действительными значениями температур (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, ..., T<sub>n</sub>) на рабочих местах для каждого канала обратной связи. Если рабочие места,

в которых происходит измерение температур, находятся в одном помещении, а категории выполняемых работ по уровню энергозатрат относятся к одной и той же категории, то желаемое значение температур для всех рабочих мест может иметь одинаковое значение.

Вычисленные сигналы рассогласования для всех каналов обратных связей подвергаются фаззификации (вычислению соответствия между численными значениями сигналов рассогласования и значением функций принадлежности соответствующего ей

терма входной лингвистической переменной). Далее, по заранее определенным правилам нечеткого вывода в БНС определяется истинность каждого из правил нечеткого вывода (агрегатирование) и находится степень истинности каждого из подзаклучений правил нечеткого вывода (активация). На стадии аккумуляции устанавливается функция принадлежности для выходной лингвистической переменной «эквивалентный сигнал рассогласования», которая преобразуется в четкий выходной сигнал (дефаззификация) ( $\epsilon_{\text{ЭКВ}}$ ).

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 дефаззификации.

Рассмотрим помещение с четырьмя распределенными по площади рабочими местами с одинаковой категорией выполняемых работ по уровню энергозатрат (рис. 4). На каждом рабочем месте установлено по одному датчику измерения температуры, которые формируют четыре выходных значения ( $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ ).

При первом приближении передаточную функцию в рассматриваемом помещении по каналу «температура приточного воздуха – температура воздуха в помещении» можно аппроксимировать в виде аperiodического звена первого порядка с запаздыванием. Для системы управления с усреднением значения температуры общий выходной сигнал запишется:

$$Y = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \tag{6}$$

или в общем виде

$$Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \tag{7}$$

Эквивалентная передаточная функция для системы с усреднением в общем виде запишется:

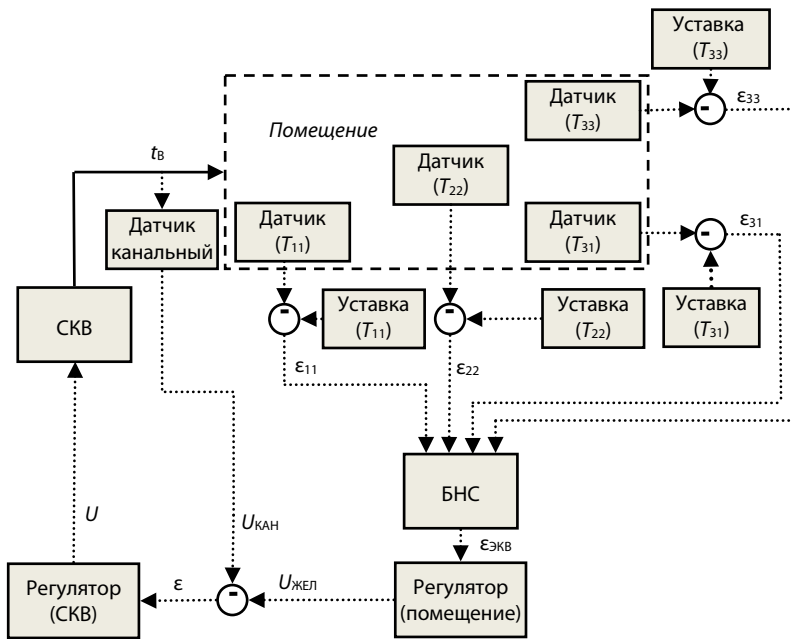


Рисунок 2 – Структурная схема системы с БНС

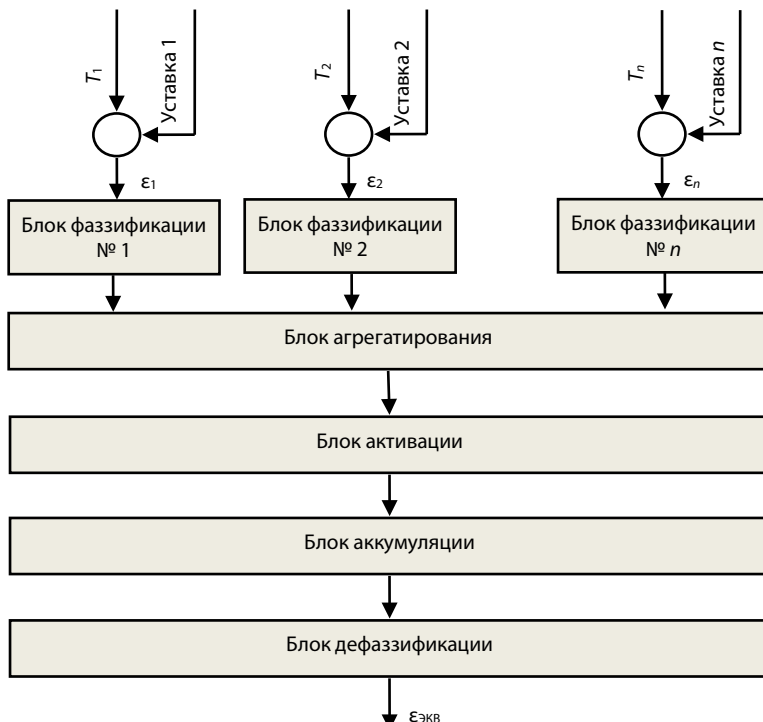


Рисунок 3 – Структурная схема БНС

$$W_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_n. \tag{8}$$

Для системы управления с БНС выходной сигнал в общем виде запишется:

$$Y = \frac{h_1 \cdot Y_1 + h_2 \cdot Y_2 + h_3 \cdot Y_3 + h_4 \cdot Y_4}{4}, \tag{9}$$

где  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – весовые коэффициенты, формируемые БНС индивидуально для каждого сигнала обратной связи.

Эквивалентная передаточная функция для системы с БНС в общем виде запишется:

$$W_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_n W_n. \tag{10}$$

В последней формуле весовой коэффициент  $h_n$  представляет собой числовой коэффициент, отображающий важность (значимость)  $n$  сигнала обратной связи в формировании эквивалентного сигнала  $\epsilon_{\text{ЭКВ}}$ .

*Примеры реализации БНС для производственного помещения с четырьмя рабочими местами категории работ Па.*

В соответствии с СанПиН-2013 «Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях» допустимые значения параметров микроклимата на рабочих местах производственных и офисных помещений для холодного периода года при категории работ уровня энергозатрат Па находятся в диапазоне температур от 17 до 23 °С [4]. Разница между максимальным и минимальным значением температур составляет 6 °С. Таким образом, целесообразно определить область изменения базовой переменной (значение сигнала рассогласования) в диапазоне от –6 до 6 °С. Минимальное значение –6 °С будет достигаться, когда температура в точке измерения составит 23 °С, а желаемое значение – 17 °С, значение 6 °С сигнал рассогласования принимает в противоположном случае.

Базовое множество термов лингвистической переменной определим следующими лингвистическими переменными:

$$T = \{\text{«отрицательный»}, \text{«нормальный»}, \text{«положительный»}\}.$$

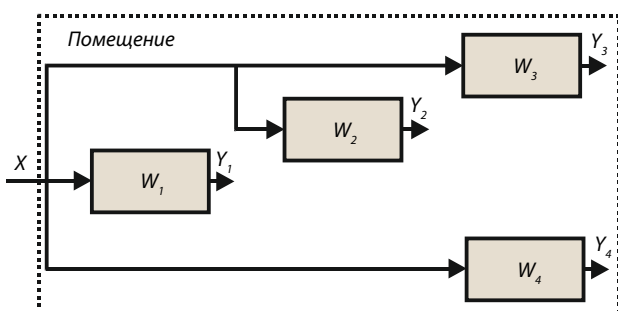


Рисунок 4 – Структурная схема помещения с четырьмя рабочими местами

Выберем термы треугольной формы [5], которые:

- характеризуются простотой;
- содержат точки, позволяющие задать области, где понятие является истинным или ложным, упрощая таким образом описание системы.

Функции принадлежности сигнала рассогласования приведены на рис. 5.

Учитывая, что в рассматриваемом помещении значения измеренной температуры на всех рабочих местах одинаково важны и имеют одинаковый вес, базовые множества лингвистических переменных, формы термов и их области изменения целесообразно принять одинаковыми.

Выходной сигнал БНС является обобщенной характеристикой, усреднением значений температуры по рабочим местам в помещении.

При значениях входных сигналов рассогласования в БНС, для которых функция принадлежности  $\mu = 1$ , значение эквивалентного сигнала рассогласования можно описать при помощи традиционной математики. После расчета всех возможных комбинаций входных значений сигналов рассогласования в БНС можно сформировать перечень возможных значений эквивалентного сигнала рассогласования и соответствующих им термов. При наличии четырех значений входных в БНС сигналов рассогласования по каналам обратных связей, описываемых термами «отрицательный», «нормальный», «положительный», необходимо девять термов, чтобы описать всевозможные значения эквивалентного выходного сигнала рассогласования. По аналогии с входными сигналами рассогласования целесообразно применить термы треугольной формы и схожие области изменения (рис. 6).

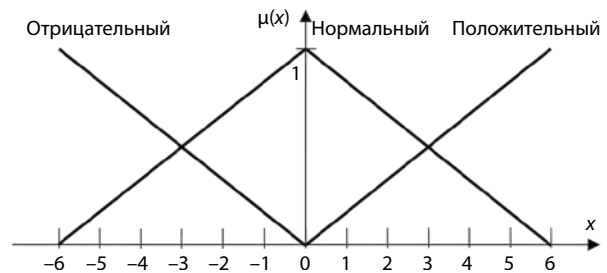


Рисунок 5 – Функция принадлежности сигнала рассогласования

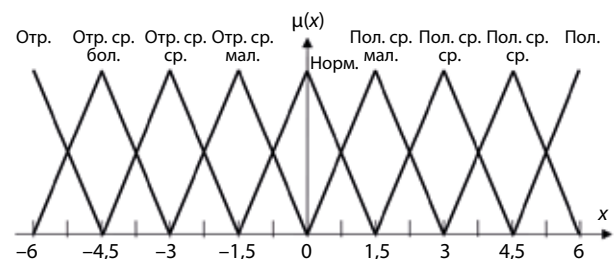


Рисунок 6 – Функция принадлежности эквивалентного сигнала рассогласования

(Отр. – отрицательный, ср. – средний, бол. – большой, мал. – малый, норм. – нормальный, пол. – положительный)

Самым простым принципом формирования правил нечеткого вывода эквивалентного сигнала рассогласования является правило на основании усреднения значений сигналов рассогласований в точках с  $\mu = 1$ . Такие системы автоматического управления позволяют существенно ускорить процесс перехода при смене температурных режимов в помещении с прекомфортного на нормальный в сравнении с классическими системами с усреднением температуры.

Проанализируем поведение температур в точках измерения при смене вышеупомянутых режимов работы. В данном случае начинают экспоненциально увеличиваться температуры во всех точках помещения, спустя какое-то время в одной или нескольких точках значение функции принадлежности сигнала рассогласования к терму «нормальный» будет близко к 1. Для того чтобы избавиться от колебаний температуры в данный момент, необходимо искусственно увеличить инерционность системы путем смещения эквивалентного сигнала рассогласования до ближайшего меньшего терма. Для этого необходимо модифицировать правила нечеткого вывода, в которых один из сигналов рассогласования достигает нормального значения, а все остальные – отрицательного или положительного. Система автоматического управления с БНС (без колебаний) позволяет снизить уровень перерегулирования практически до 0, сохранив при этом время переходного процесса на среднем уровне между системой с усреднением и системой с БНС ( $\mu = 1$ ).

При приближении значения функции принадлежности одного сигнала рассогласования к терму «отрицательный» или «положительный», в то время как значения функций принадлежности других сигналов рассогласований соответствуют терму «нормальный», целесообразно сместить эквивалентный сигнал рассогласования до ближайшего большего или соответственно меньшего терма.

Также применение БНС позволяет при помощи весовых коэффициентов увеличить или уменьшить значимость значений сигналов обратных связей.

**Заключение.** В данной статье были проанализированы существующие методики управления температурой в производственных помещениях больших объемов с пространственной распределенностью и неоднородностью температурного поля. Критический анализ систем управления с усреднением значений температур по нескольким каналам показал, что, несмотря на простоту, данный метод не всегда позволяет адекватно оценивать распределенное температурное поле в помещении. Поэтому целесообразно предусмотреть селекцию сигналов обратных связей.

Предложен блок нечеткой селекции (БНС), предназначенный для обработки сигналов обратных связей от датчиков температуры воздуха в рабочих зонах помещения и позволяющий увеличить количество вариантов обработки сигналов обратных связей. Для больших помещений с присущей им инерционностью и наличием запаздывания БНС позволяет уменьшить время переходного процесса при каждодневной смене режимов работы СКВ без изменений качества. 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.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е.С. Бондарь [и др.]; под ред. Е.С. Бондаря. – К.: Аванпост-Прим, 2003. – 562 с.
2. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами / Э.Я. Рапапорт. – М.: Высш. школа, 2003. – 299 с.
3. **Karpovich, D.S.** Management of distributed object using the criterion of generalized error / D.S. Karpovich, S.D. Latushkina // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), 2016.
4. СанПиН. Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях. – Минск, 2013. – 16 с.
5. **Шеври, Ф.** Нечеткая логика / Ф. Шеври // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2009. – № 31. – С. – 32.

*Due to the cheapness and simplicity of implementation, the most common airconditioning management systems are schemes with the arrangement of several temperature sensors in the control points of the room. With this control scheme, the controller calculates and processes the average value of the room temperature. Such schemes have the following significant drawbacks:*

- 1) *There are possible modes of operation of the control system, in which in one part of the room there is a local underheating of the air, and in the other part – overheating, while the average value of the temperature will remain within the permissible range;*
- 2) *With the increase in the number of points of measurement of the air temperature in the room, the leveling of particular values of the feedback signals and the decrease in the sensitivity of the control system as a whole.*

*It is advisable to provide for the selection of feedback signals, which could solve the following series of problems: ensuring continuous monitoring of the temperature field in the room; implementation of control taking into account not only the average value of the room temperature, but also taking into account the values of the deviations of temperatures from the mean; implementation of flexible averaging rules depending on the parameters of the object; improvement of the dynamic characteristics of the air conditioning system; practical implementation and simplicity.*

Получено 02.03.2018.