

УДК 681.5.015.8:519

доцент **Чередниченко П. П.**,

petro\_che@ukr.net, ORCID 0000-0001-7161X,

*Київський національний університет будівництва та архітектури,*к.т.н., доцент **Човнюк Ю. В.**,

ychovnyuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-0608-0203,

*Національний університет біоресурсів і природопольовання України*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
МИКРОКЛИМАТОМ ПОМЕЩЕНИЙ МУЗЕЕВ: ПРИМЕНЕНИЕ FUZZY-  
КОНТРОЛЛЕРОВ, ПОДДЕРЖАНИЕ ЖЕЛАЕМОГО ИНДЕКСА  
ДИСКОМФОРТА (ПОСЕТИТЕЛЕЙ, ЭКСПОНАТОВ, САМОГО  
ПОМЕЩЕНИЯ)**

Аннотация: для систем управления микроклиматом в музейных помещениях рассмотрен алгоритм управления на основе поддержки желаемого индекса дискомфорта с использованием нечёткого логического регулятора. Для оценки влияния среды на человека (посетителя музея), представленные в помещении экспонаты необходимо определить не только количественную величину отдельных параметров микроклимата, а и результат их общего влияния на человеческий организм, на представленные в помещениях музея экспонаты. Исследованы существующие методы комплексного управления микроклиматом музейных помещений с позиции методов регулирования. Проанализирован подход относительно определения индекса дискомфорта. Значения индекса дискомфорта (для человека/посетителя, экспонатов и самого помещения музея) разбиты на диапазоны в зависимости от усреднённых восприятий комфортности условий в помещении музея для человека, экспоната и самого помещения. Рассмотрены основы теории нечётких множеств. Проведен синтез нечёткого логического регулятора. Разработана база данных правил на основе рассчитанных значений индекса дискомфорта (для каждого компонента системы, т.е. для человека, экспоната и самого помещения). Теоретически спроектирована интеллектуальная система автоматической поддержки комфортных микроклиматических условий в помещении музея для всех составляющих системы «музейное помещение – экспонаты – посетители». На основе рассчитанных значений индекса дискомфорта для всех возможных вариантов значений температур сухого и увлажнённого термометров (гигрометра) построена база правил для fuzzy-контроллера. Компьютерное моделирование полученной системы управления микроклиматом в музейном помещении возможно на основе функций передачи температур сухого и увлажнённого термометров. Результаты математического моделирования

показывают эффективность использования предложенного алгоритма управления. Управляющее действие вырабатывается после обработки агрегированной информации сразу со всех (обычно двух) датчиков, тем самым, уменьшая количество ненужных включений при незначительных колебаниях каждого отдельно взятого параметра. По результатам моделирования можно отметить соответствие требованиям полученной системы управления относительно поддержания желаемого уровня индекса дискомфорта в помещении музея, минимальное число включений исполнительного механизма, отсутствие перерегулирования и экономии электроэнергии.

Ключевые слова: нечёткая логика, нечёткий логический регулятор, помещение музея, индекс дискомфорта, посетители, экспонаты, микроклимат, кондиционирование, температура, влажность.

### Постановка проблемы

Развитие технологий способствует повышению уровня жизни людей, в том числе трансформирует урбанистическую среду в сторону увеличения комфорта пребывания в помещениях, вместе с тем решая оптимизационные задачи потребления энергоресурсов и энергосбережения. В полной мере это относится и к музейным помещениям, призванным сохранять длительное время в комфортном состоянии экспонированные в них произведения искусства.

Для управления современными системами кондиционирования воздуха музейных помещений активно применяются, в особенности за рубежом, принципиально новые законы регулирования, которые получили название «нейротехнология и нечёткая логика» (Neuro&Fuzzy logic) [1]. Критерием функционирования и целью управления в них является совокупность параметров, которые определяют комфорт окружающей среды для человека (посетителя музея), экспонатов, выставленных в нём, и собственно помещения, в котором посетители и экспонаты находятся, по величине индексов дискомфорта  $D_n$  [1].

Система оценивает параметры микроклимата в музейном помещении и автоматически выбирает режим работы. Выбор основывается на практическом анализе – за эталон берутся усреднённые пожелания людей (посетителей музеев), которые пользуются этой системой, условия (комфортные) для хранения экспонатов и нормы эксплуатации самих музейных помещений. Величины  $D_{ni}$  ( $i=1,2,3$ ), где номер  $i$  означает соответственно, экспонат музея (картина, скульптура, гобелен и пр.) ( $i=1$ ), человеческое тело (посетителя музея) ( $i=2$ ), собственно самоё помещение музея, эксплуатируемое в соответствии с санитарными и др. нормами ( $i=3$ ), в дальнейшем будем располагать по уровню значимости (от наивысшего до низжайшего). Величины  $D_{ni}$  отображают уровни

различных факторов, от значения которых зависят: 1) комфорт посетителя музея (человека); 2) надёжная сохранность экспонируемых произведений искусства; 3) различные нормы эксплуатации музейного помещения – это, в первую очередь, температура, влажность, интенсивность воздушных потоков и др.

Конечно, необходимым условием, которое следует соблюдать для поддержания в норме всех, названных выше параметров, является существование надёжной системы управления (регулирования) воздушных потоков, температуры и влажности в помещениях музея, где расположены экспонаты и могут находиться группы людей (посетителей), вносящих свой влажностно-температурный дисбаланс. Разработке основ управления микроклиматом музейных помещений на основе алгоритмов, позволяющих поддерживать желаемый индекс дискомфорта с использованием нечёткого логического регулятора (контроллера), и посвящено данное исследование.

#### **Анализ последних исследований и публикаций**

Остановимся вначале вкратце на существующих методах комплексного управления микроклиматом (в т.ч. музейных помещений) с позиций методов регулирования.

В последнее время к традиционным методам управления параметрами микроклимата в помещении, таких как двухпозиционное управление или управление на основе ПИД алгоритма [1, 2], добавились более современные и достаточно сложные алгоритмы, такие как управление на основе нечёткой логики [1-3] и управление с помощью многомерного линейно-квадратичного цифрового регулятора в пространстве состояния [7, 8].

Основным преимуществом нечётких логических контроллеров по сравнению с традиционными подходами управления является то, что для проектирования контроллера не нужна математическая модель объекта управления [2]. Результаты исследований подобных систем изложены в работах учёных Siham A.M. Almasani, Wadea A.A. Qaid, Ahmed Khalid, Ibrahim A.A. Alqubati, Vova S., Codara P., Maccari D., Marra V.A. Нечёткие контроллеры разработаны на основе человеческих знаний о поведении системы. Кроме того, контроллеры, которые непосредственно регулируют микроклиматические параметры, имеют преимущества над традиционными термостатическими системами. Основными преимуществами являются повышение комфорта и экономии энергии, что достигается благодаря учёту большого количества параметров и факторов, которые традиционными методами обрабатывать намного сложнее, в отличие от нечётких регуляторов или нейронных сетей [1]. Ещё одним преимуществом нечётких логических регуляторов является их

устойчивость к изменениям параметров объекта управления, что объясняется нелинейной природой подобных регуляторов [3].

Другой подход предложен в работах В.Г. Трегуба, И.М. Голинко, И.Е. Галицкой [7,8]. В них предложена методика разработки комплексной математической модели промышленного кондиционера в пространстве состояния. Методика позволяет получить комплексную модель промышленного кондиционера как единого многомерного объекта управления. На основе данной модели предложена методика синтеза линейно-квадратичного цифрового регулятора, которая учитывает логические переключения в работе климатического оборудования для модифицированных алгоритмов управления по методам «точки росы». В отличие от существующих систем, которые стабилизируют температуру и относительную влажность воздуха, предложена методика регулирования температуры и влажности воздуха, позволяющая уменьшить, а в некоторых режимах выключить взаимосвязь между параметрами температуры и влажности.

В данной работе частично использованы результаты исследований авторов [9].

Основным заданием современной климатологической техники является создание комфортных условий для жизнедеятельности человека, а в данном случае – для долговременного сохранения шедевров искусства, созданных мастерами прошлых веков. Для оценки влияния среды на человека, музейный экспонат и самоё помещение музея, где хранятся шедевры искусства, необходимо определить не только количественную величину отдельных параметров микроклимата, а и результат их общего влияния на человеческий организм, на музейный экспонат и на помещение музея, в котором этот экспонат находится. Некоторые значения температуры, влажности и скорости ветра (воздушных потоков, циркулирующих в помещении) создают условия, которые являются раздражающими и даже неприемлемыми как для людей (посетителей музея), так и для экспонатов музея, и для самого помещения музея, где эти экспонаты размещены. Рассчитать влияние одного фактора на отдельно взятого человека нетрудно, намного сложнее рассчитать влияние объединения нескольких факторов (на посетителя музея, на выставленные в нём экспонаты, на самоё помещение, где они размещены). Для формулирования качественного индекса комфорта были ранее введены такие системы оценки, как тепловая нагрузка среды (WBGT) [5] и индекс дискомфорта (DI) [4]. В соответствии с индексом дискомфорта условия меняются от комфортных до немного раздражающих, а потом и до нетерпимых. Именно такой подход будет использован в данном исследовании применительно к трём основным компонентам системы, микроклимат которой следует регулировать, а именно:

1) к экспонатам, выставленным в помещении музея; 2) к посетителям музейного помещения, находящимся в нём в данный момент времени; 3) собственно к самому помещению музея, где размещены экспонаты (шедевры искусства). При этом управление системой, обеспечивающей нормальные показатели микроклимата (температуру и относительную влажность), осуществляется по определённым правилам, в соответствии с назначенными приоритетами (наибольшую относительную ценность представляют шедевры искусства, затем, по значимости, стоят посетители музея, а на последнем месте – нормы эксплуатации собственно помещения музея).

#### **Формулирование цели исследования**

Цель работы – создание и обоснование научной концепции мониторинга и поддержания микроклимата помещения музея, в котором размещены экспонаты и одновременно присутствуют посетители музея, При этом для управления микроклиматом используются нечёткие логические регуляторы (fuzzy-контроллеры), которые отслеживают обобщённое значение индекса дискомфорта, определяемое по совокупности комфортных условий пребывания в помещении музея экспонатов, посетителей музея и нормативов эксплуатации самого помещения. Условия комфортного пребывания определяются как пересечение условий (по температуре и влажности) для отдельных составляющих системы: а) экспонатов; б) посетителей музея; в) нормативов эксплуатации музейного помещения. Формирование обобщённого значения индекса дискомфорта производится с учётом приоритетов отдельных компонентов системы «экспонаты – посетители – помещение музея».

#### **Изложение основного материала исследования**

Приведём простой пример учёта влияния влажности на состояние человека (в данном случае - посетителя музея). Восприятие тепла или прохлады является следствием не только температуры воздуха, но и его влажности. Температура воздуха 26<sup>0</sup>С и влажность 50...60% считаются комфортными летом, в то время как температура 22<sup>0</sup>С будет комфортной зимой. Однако даже температура 29<sup>0</sup>С будет находиться в зоне комфорта, если влажность будет составлять 50%, тогда как та же температура при влажности 70% будет человеком восприниматься как высокая и будет у него вызывать ощущение «парной бани». Для оценки совместного влияния температуры и влажности на ощущение дискомфорта был введён индекс [1]:

$$D_n = 0,72 \cdot (t_{сух} + t_{вл}) + 40,6, \quad (1)$$

где  $t_{\text{сух}}$  – температура сухого термометра;  $t_{\text{вл}}$  – температура увлажнённого термометра (оба термометра входят в состав классического гигрометра, присутствующего в большинстве музеев Украины).

Такой подход хорошо согласуется с логической системой обработки информации «нечёткая логика» (fuzzy logic), которая применяется в нечётких логических регуляторах (НЛР). Нечёткая логика имеет свои преимущества по сравнению с использованием ПИД- регуляторов при обработке очень сложных процессов, нелинейных процессов, при обработке экспертных данных [1]. Таким образом, актуальной является задача разработки системы управления микроклиматом в помещении музея с помощью НЛР на основе поддержки желаемой степени дискомфорта обобщённого индекса дискомфорта, который учитывал бы комфортные условия пребывания в помещении музея одновременно его экспонатов (шедевров искусства), посетителей музея и при этом соблюдались бы все нормативные правила относительно эксплуатации самого музейного помещения.

Ниже, в таблице 1 представлены степени дискомфорта для человека (посетителя музея), определённые по формуле (1), учитывающей совместное влияние на организм человека двух ведущих факторов, определяющих комфортность пребывания в данном помещении – его температуры и относительной влажности.

Таблица 1.

Степени дискомфорта для человека (посетителя музея)

Индекс дискомфорта $D_n$	Степень дискомфорта
$\leq 70$	Комфортно
70...75	Некоторые посетители чувствуют себя некомфортно
75...80	50% людей чувствуют себя некомфортно
80...85	Все люди чувствуют себя некомфортно
$\geq 85$	Нетерпимый дискомфорт

Подобные таблицы степени дискомфорта можно составить для экспонатов музея и нормативных правил эксплуатации помещений музея (в соответствии с двумя ведущими показателями – температурой и относительной влажностью). В дальнейшем будем считать, что формулы типа (1) известны (как и таблицы типа табл. 1) для музейных экспонатов (картин, скульптур, фресок, икон, гобеленов, мебели и пр.) и как нормы эксплуатации по указанным

параметрам музейних помещений. Будем в дальнейшем обозначать: 1) индексом  $i = 1$  - индекс дискомфорта для экспонатов музея; 2) индексом  $i = 2$  - индекс дискомфорта для посетителей музея; 3) индексом  $i = 3$  - индекс дискомфорта для эксплуатации помещения музея по существующим нормам и правилам. Следует отметить, что индексация произведена не случайно, а в порядке приоритетности индекса дискомфорта для всех трёх компонент системы «экспонаты – посетители – помещение музея». Обобщённый индекс дискомфорта такой сложной системы, сформированный на основании всего лишь двух показателей (температура и относительная влажность), как показано ниже, также учитывает и вес («влияние») каждого из отдельных индексов. Вес конкретного индекса дискомфорта определяется экспертными оценками, которые формируются специалистами музейного дела, а также зависит от конкретного помещения музея и тех экспонатов, которые в нём размещены.

Остановимся далее вкратце на основных положениях теории нечётких множеств, которые здесь приведены исключительно для того, чтобы существовало понимание дальнейших рассуждений, изложенных ниже.

Учитывая сложность однозначного определения оптимальной совокупности параметров микроклимата в реальном времени для системы «экспонаты – посетители музея – помещение», что усложняет процедуру постановки задач автоматическим регуляторам, перспективным можно считать подход к управлению с использованием аппарата нечёткой логики. Использование теории нечётких множеств позволяет описывать нечёткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и делать нечёткие выводы.

Нечёткое множество представляет собой совокупность элементов произвольной природы, относительно которых нельзя в полной мере и с полной уверенностью утверждать, что тот или иной элемент рассматриваемой совокупности принадлежит ей. Формально нечёткое множество  $A$  определяется как бесконечное число упорядоченных пар или кортежей вида  $\langle x, \mu_A(x) \rangle$ , где  $x$  является элементом некоторого универсального множества, или универсума,  $E$ , а  $\mu_A(x)$  – функция принадлежности, которая ставит каждому из элементов  $x$  универсального множества некоторое действительное число из интервала  $[0,1]$ . При этом  $\mu_A(x) = 1$  означает, что элемент  $x$  из  $E$  безусловно принадлежит нечёткому множеству  $A$ , а значение  $\mu_A(x) = 0$  означает, что элемент  $x$  из  $E$  безусловно не принадлежит нечёткому множеству  $A$ .

Разработка и использование систем нечёткого вывода включают в себя следующую последовательность этапов [6]:

1) формирование базы правил (БП) систем нечёткого вывода, предназначенной для формальной подачи эмпирических знаний или знаний

экспертов в проблемной области. В системах нечёткого вывода используются правила, в которых условия сформулированы в терминах нечётких лингвистических высказываний;

2) фазификация (Ф) входных переменных, что представляет собой процедуру нахождения значений функций принадлежности нечётких множеств (термов) на основе обычных (чётко определённых) выходных данных. Целью этапа фазификации является установление соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной системы нечёткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей значения входной лингвистической переменной;

3) операции блока логического вывода (ЛВ), который выполняет функции, аналогичные функциям вычислительного устройства в классической системе регулирования, и определение степени истинности условий по каждому из правил, которые сохраняются в БП;

4) дефазификация (ДФ) выходных переменных в системах нечёткого вывода, что представляет собой процедуру или процесс нахождения обычного (чётко определённого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель дефазификации состоит в том, чтобы, используя результаты логического вывода, получить значения каждой из выходных переменных, которое может быть использовано специальными устройствами, не принадлежащими системе нечёткого вывода.

Структура системы нечёткого вывода состоит в следующем: 1) на вход системы подаются входные переменные (аналоговые сигналы – температуры и относительной влажности); 2) производится фазификация входных переменных в блоке фазификации; 3) на выходе блока фазификации возникают входные нечёткие переменные (их, в данном случае, две); 4) входные нечёткие переменные поступают в блок логического вывода, где с помощью базы правил формируется выходная нечёткая переменная (индекс дискомфорта, степень дискомфорта); 5) выходная нечёткая переменная поступает в блок дефазификации, на выходе которого появляется выходная переменная (конкретный аналоговый сигнал, поступающий в исполнительный механизм системы кондиционирования, предназначенный для регулирования микроклимата помещения).

Рассмотрим далее процедуру синтеза НЛР для системы кондиционирования помещений музея. Для этого вначале рассмотрим принцип управления кондиционером для поддержания индекса дискомфорта  $D_{ni}$ ,  $i = (1,3)$  в допустимых пределах (безусловно, для каждого компонента исследуемой системы эти пределы/границы – «свои» и отличаются между собой).

Во-первых, мощность, с которой должен работать кондиционер для охлаждения воздуха в помещении музея, определяется желаемой температурой, которую мы хотели бы иметь в этом помещении (естественно, что следует учесть все «интересы», всех сторон, всех компонентов системы). Температура в помещении является первой лингвистической переменной НЛР и может принимать значения «малая», «средняя», «большая». Эти значения присваиваются температуре на основе пересечения границ малых, средних и больших температур всех компонентов системы, и лишь потом возникает обобщённая «малая», «средняя» и «большая» температура, которая уже как понятие применяется для всех в совокупности компонентов системы. Примем условно диапазон изменений показаний сухого термометра для помещения музея от  $16^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ .

Во-вторых, как уже было указано ранее, комфортные климатические условия в помещении музея определяются не только лишь температурой воздуха, а и его (относительной/абсолютной) влажностью. Поэтому второй лингвистической переменной НЛР может быть влажность, или температура увлажнённого термометра гигрометра, которая фигурирует в формуле (1) и вместе с показаниями сухого термометра однозначно определяет влажность в помещении музея. Диапазон изменений увлажнённого термометра будем рассматривать от  $6^{\circ}\text{C}$  до  $29^{\circ}\text{C}$ . Возможный диапазон изменений температуры увлажнённого термометра является большим, чем диапазон изменений сухого термометра, поэтому лингвистических переменных будет больше: «очень низкая», «низкая», «удовлетворительно низкая», «удовлетворительно высокая», «высокая», «очень высокая». (Здесь уместны те же рассуждения, что и изложенные выше, относительно обобщения понятий лингвистической переменной для всех компонентов системы).

Введём понятия веса и приоритетности в оценке обобщённого индекса дискомфорта системы, используя подходы и результаты работы [10], в которой предложен способ задания приоритета локальных критериев. При этом будем руководствоваться существующими экспертными оценками характеристик приоритета для случая, исследуемого в данной работе (система «экспонаты – посетители – помещение музея»).

К основным характеристикам приоритета относятся следующие три:

1) ряд приоритета -  $I$ ; 2) вектор приоритета -  $V$ ; 3) вектор весовых коэффициентов -  $\Lambda$ .

Ряд приоритета.  $I$  – упорядоченное множество индексов локальных критериев:  $I = \{ 1, 2, \dots, k \}$ . Он отображает чисто качественные отношения доминирования критериев: критерий  $e_1$  важнее критерия  $e_2$ , критерий  $e_2$  важнее критерия  $e_3$  и т.д. Количественная сторона доминирования при этом не

указывается. При наличии равнозначных критериев их выделяют в ряде внутренними скобками, например:  $I = \{ 1, 2, [3, 4], 5, \dots, k \}$ .

Вектор приоритета.  $V = (v_1, v_2, \dots, v_k)$  –  $k$  – мерный вектор, компонентами которого являются бинарные отношения приоритета, определяющие степень превосходства по важности двух соседних критериев  $v_q$  и  $v_{q+1}$  из ряда приоритета  $I$ , то есть величина  $v_q$  определяет, во сколько раз критерий  $e_q$  важнее критерия  $e_{q+1}$ . Если критерии  $e_q$  и  $e_{q+1}$  равнозначны, тогда соответствующий компонент  $v_q = 1$ . Для удобства расчётов считаем  $v_k = 1$ . Любая компонента  $v_q$  вектора приоритета  $V$  совокупности локальных приоритетов, которая упорядочена в смысле ряда приоритета  $I$ , удовлетворяет соотношению  $v_q \geq 1, q \in \overline{(1, k)}$ .

Весовой вектор  $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$  –  $k$  – мерный вектор, компоненты которого связаны соотношениями:

$$\begin{cases} 0 \leq \lambda_q \leq 1, & q \in \overline{(1, k)}, \\ \sum_{q=1}^k \lambda_q = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Компонента  $\lambda_q$  вектора  $\Lambda$  – весовой коэффициент, который определяет относительное превосходство  $q$  – го критерия над другими.

Практическая целесообразность задания указанных характеристик приоритета следующая: 1) сначала следует задать ряд приоритета  $I$ ; 2) задать вектор приоритета  $V$ ; 3) на основе значений  $I$  и  $V$  задать весовой вектор  $\Lambda$ . Чтобы найти  $\lambda_q$  необходимо:

$$\lambda_q = \left( \prod_{i=q}^k v_i \right) / \left( \sum_{q=li=q}^k \prod v_i \right) \quad (3)$$

Для рассматриваемого в данной работе случая имеем:

$$\lambda_1 = \left( \prod_{i=1}^{k=3} v_i \right) / \left( \sum_{q=li=q}^k \prod v_i \right) = \frac{v_1 v_2 v_3}{v_1 v_2 v_3 + v_2 v_3 + v_3}. \quad (4)$$

$$\lambda_2 = \left( \prod_{i=2}^{k=3} v_i \right) / (v_1 v_2 v_3 + v_2 v_3 + v_3) = \frac{v_2 v_3}{v_1 v_2 v_3 + v_2 v_3 + v_3}. \quad (5)$$

$$\lambda_3 = \left( \prod_{i=3}^{k=3} v_i \right) / (v_1 v_2 v_3 + v_2 v_3 + v_3) = \frac{v_3}{v_1 v_2 v_3 + v_2 v_3 + v_3}. \quad (6)$$

По экспертным оценкам, в исследуемом случае имеем:  $I = (1, 2, 3)$ , а  $V = (4, 2, 1)$ . Поэтому весовой вектор  $\lambda$  имеет следующие значения компонент:  $\lambda_1 = 0,7272$ ;  $\lambda_2 = 0,1818$ ;  $\lambda_3 = 0,0909$ .

Далее определим формулу для подсчёта обобщённого индекса дискомфорта системы «экспонаты музея – посетители музея – помещение музея»  $D_n^{(обобщ)}$  :

$$D_n^{(обобщ)} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \cdot D_{ni}. \quad (7)$$

Здесь  $D_{ni}$ ,  $i = \overline{(1,3)}$ , обозначены индексы дискомфорта, соответственно для экспонатов музея, посетителей музея, помещения музея. Каждый из них определяется по формуле, аналогичной (1), а именно:

$$D_{ni} = A_i \cdot (t_{сух} + t_{вл}) + B_i, \quad i = \overline{(1,3)}, \quad (8)$$

где эмпирические коэффициенты  $A_i$ ,  $B_i$  определены для каждой составляющей рассматриваемой системы отдельно и интегрируют в себе многие иные зависимости, которые, в конечном счёте, определяют индекс дискомфорта конкретного компонента системы. Определение указанных эмпирических коэффициентов представляет собой отдельную задачу, которая будет рассмотрена в отдельном исследовании. Здесь представлены лишь концептуальные основы разработки алгоритмов функционирования НЛР.

На основании формулы (7) и диапазонов изменений сухого и увлажнённого термометров формируется таблица индексов дискомфорта для каждого значения температуры. В этой таблице помещаются рассчитанные значения обобщённого индекса дискомфорта всей системы  $D_n^{(обобщ)}$ . По горизонтали таблицы размещаются значения температуры увлажнённого термометра с шагом в  $1^\circ\text{C}$  из диапазона температур  $t_{вл} \in [6^\circ\text{C}, 29^\circ\text{C}]$ . По вертикали – значения температуры сухого термометра с шагом в  $1^\circ\text{C}$  из диапазона температур  $t_{сух} \in [16^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}]$ . (Здесь, ввиду громоздкости, данная таблица не приведена). Следует отметить, что все значения индекса дискомфорта сгруппированы в блоки. Каждый из блоков относится к

определённой степени дискомфорта в соответствии с таблицей, аналогичной табл. 1, но составленной для обобщённого индекса дискомфорта системы «экспонат музея – посетитель музея – помещение музея».

Например, блок со «средней температурой сухого термометра» и «удовлетворительно малой» температурой увлажнённого термометра можно считать таким, в котором обеспечены комфортные микроклиматические параметры исследуемой системы, тогда как блок, который соответствует «большой температуре» сухого термометра и «большой» температуре увлажнённого термометра по значениям индексов дискомфорта соответствует некомфортным микроклиматическим условиям. В то же время блок с «малой» температурой сухого термометра и «очень малой» температурой увлажнённого термометра, хотя и соответствует (по таблице обобщённого индекса дискомфорта, отражающей степени дискомфорта) комфортным микроклиматическим условиям, но всё же характеризуется слишком низкой относительной влажностью, в пределах 18%, что является весьма малым значением, поэтому данный блок можно охарактеризовать как таковой, который не соответствует комфортным условиям в помещении музея. На основе приведенных рассуждений можно построить базу правил для нечёткого регулятора. В таблице 2 приведена база правил НЛР поддержания микроклимата в помещении музея.

Таблица 2.

База правил НЛР

$t_{\text{сух}}, ^\circ\text{C}$	Температура увлажнённого термометра, $^\circ\text{C}$					
	Очень малая (6-11)	Малая (12-14)	Удовлетворительно малая (15-18)	Удовлетворительно большая (19-21)	Большая (22-25)	Очень большая (26-29)
Малая (16-21)	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>ZE</b>	<b>ZE</b>	-	-
Средняя (22-25)	<b>N</b>	<b>ZE</b>	<b>ZE</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	-
Большая (26-30)	<b>ZE</b>	<b>ZE</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>PB</b>

Исходной величиной НЛР является управляющее действие на компрессор хладагента, которой присваиваются следующие термы: «большая отрицательная» (NB), «отрицательная» (N), «нулевая» (ZE), «положительная» (P), «большая положительная» (PB). То есть, при комфортных условиях управляющее действие отсутствует, и компрессор работает с заданной мощностью. При наличии отклонений от комфортных условий НЛР

вырабатывает управляющее действие в сторону увеличения или уменьшения мощности компрессора до тех пор, пока не будет скомпенсировано (негативное) возмущение микроклимата помещения музея и всей системы в целом.

Наиболее простыми и распространёнными в практике функциями принадлежности (ФП) лингвистических переменных являются треугольные ФП, математическое описание которых задаётся в виде [2]:

$$\mu_1(u) = (1 - u), \quad \mu_2(u) = u, \quad 0 \leq u \leq 1. \quad (9)$$

В данной статье как алгоритм нечёткого вывода используется алгоритм Мамдани, или как ещё его называют, алгоритм «минимаксного вывода». Для расчёта результирующего нечёткого множества выходной переменной в этом алгоритме используются операции логического минимума (min) на этапе нечёткого вывода и операции логического максимума (max) на этапе композиции.

В блоке дефазификации полученная результирующая функция принадлежности для управляющего действия (влияния) на объект управления преобразуется в числовую величину. В данной работе для получения чёткого вывода используется метод определения «центра тяготения», в котором чёткое числовое значение определяется в соответствии с формулой:

$$u_c = \frac{\int_{u_1}^{u_2} u \cdot \mu_c(u) du}{\int_{u_1}^{u_2} \mu_c(u) du}, \quad (10)$$

где  $u_c$  – результат дефазификации,  $u_1, u_2$  – границы изменений лингвистической переменной  $u$ ,  $\mu_c(u)$  – результирующая ФП.

Структурная схема регулирования микроклимата в помещении музея на основе НЛР подобна той, что изображена на рис. 2 [9].

Моделирование работы системы управления микроклиматом в помещении музея сводится к следующему. Вначале, для оценки качества работы синтезированной системы регулирования следует уточнить модели объектов управления [3]. Обе модели температур, которые являются входными параметрами НЛР, описываются дифференциальными уравнениями 1-го порядка с запаздыванием (11), (12), сходными с приведенными в [9].

Так, температура сухого термометра:

$$186 \cdot t_{\text{сух}}(t) + t_{\text{сух}}(t) = 0,1 \cdot u(t - 160). \quad (11)$$

Температура увлажнённого термометра:

$$405 \cdot t_{\text{вл}}(t) + t_{\text{вл}}(t) = 0,28 \cdot u(t - 184). \quad (12)$$

Функция передачи температуры сухого термометра:

$$W_{\text{сух}}(s) = \frac{0,11}{186 \cdot s + 1} \cdot \exp(-160s). \quad (13)$$

Функция передачи температуры увлажнённого термометра:

$$W_{\text{вл}}(s) = \frac{0,28}{405 \cdot s + 1} \cdot \exp(-184s). \quad (14)$$

В (13) и (14)  $s$  – символьная переменная, связанная со временем  $t$  посредством преобразования Лапласа.

Моделирование системы регулирования микроклимата в помещении музея можно провести, например, в среде Simulink MATLAB с использованием блока Fuzzy Logic Controller with Rule Viewer для реализации спроектированного здесь НЛР.

### Выводы

1. В системе с НЛР температура уставки постоянно корректируется, исходя из текущих значений температуры сухого и увлажнённого термометров. Поддержание минимально допустимого обобщённого индекса дискомфорта в музейном помещении обеспечивает снижение энергозатрат и устраняет ненужные регулирующие действия при малых отклонениях измеряемых параметров, коими являются температура и (относительная) влажность в помещении музея.

2. Рассмотренная система регулирования микроклимата в помещении музея на основе определения обобщённого индекса дискомфорта обеспечивает комфортные условия пребывания в данном помещении не только выставленных здесь экспонатов, но и потока возможных посетителей, пребывающих в данном месте и в данный момент времени, одновременно удовлетворяя всем нормам эксплуатации музейных помещений, изложенным в специальных инструкциях для музеев Украины.

3. Хотя указанная система и обеспечивает более грубое регулирование (т.н. робастное) по отношению к прямым измерениям параметров, тем не менее, она способна обеспечить комфортные микроклиматические условия в музейном помещении, благодаря заложенной в НЛР базе правил.

4. При эксплуатации данной системы регулирования микроклимата музейных помещений неминуемо возникают переходные процессы, и поэтому параметры не возвращаются к тем значениям, которые были перед нанесением возмущения, как это можно наблюдать в классических системах с ПИ- и ПИД-регуляторами. Но, с другой стороны, в данной системе и нет конкретной уставки температуры сухого и увлажнённого термометров (музейного гигрометра), а параметром, который регулируется, по сути, является обобщённый индекс дискомфорта  $D_n^{(обобщ)}$ , который есть непрямым показателем, и рассчитывается на основе обеих температур.

5. Полученные в данной работе результаты могут быть в дальнейшем использованы для уточнения и совершенствования инженерных методов расчёта параметров систем управления микроклиматом помещений музеев с помощью НЛР как на стадиях их проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации с обеспечением минимальных энергозатрат.

#### Список использованной литературы

1. Бондарь Е. С. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е. С. Бондарь, А. С. Гордиенко, В. А. Михайлов, Г. В. Нимич. Под общ. ред. Е. С. Бондаря. – К.: ТОВ «Видавничий будинок «Аванпост – Прим», 2005. – 560 с.
2. Bova S. Logical analysis of Mamdani-type fuzzy inference, I theoretical bases / S. Bova, P. Codara, D. Maccari, V. A. Marra // IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona. – 2010. – P. 1-8.
3. Siham A. M. Almasani. Fuzzy Expert Systems to Control the Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems / Siham A. M. Almasani, Wadea A. A. Qaid, Ahmed Khalid, Ibrahim A. A. Alqubati // International Journal of Engineering Research Technology (IJERT). – 2015. – Vol. 4. – P. 808-815.
4. Thom E. C. The discomfort index / E. C. Thom // Weather wise. – 1959. – Vol. 12. – P. 57-60.
5. Grahame M. Budd. Wet-bulb globe temperature (WBGT) – its history and its limitations/M. Budd Grahame//Journal of Science and Medicine in Sport. – 2008. – P. 20 - 32.
6. Новиков С. И. Методы нечёткой логики в задачах автоматизации тепловых процессов электростанций / С. И. Новиков, В. Р. Шахнович, А. В. Сафронов // Вестник ИГЭУ. – ГОУВПО «Ивановский государственный

энергетический университет имени В. И. Ленина». - 2010. - № 4. – С. 72 - 75.

7. Голінко І. М. Оптимізація багатовимірних систем керування для комплексів штучного мікроклімату / І. М. Голінко, І. Є. Галицька // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2016. - № 1. – С. 61 - 73.
8. Голінко І. М. Аналіз системи керування для штучного мікроклімату за методом «точки роси» / І. М. Голінко, В. Г. Трегуб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. - № 2. – С. 53 - 55.
9. Новіков П. В. Fuzzy-контроллер підтримання мікроклімату в приміщенні за значеннями індексу дискомфорту / П. В. Новіков, О. В. Степанець, Р. П. Саков // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2017. – Т. 9. - Вип. 4. – С. 76- 83.
10. Щепотьєв О. І. Теорія оптимізації / О. І. Щепотьєв, А. В. Жильців. – К.: ТОВ ЦП «Компрінт», 2017. – 242 с.

#### References

1. Bondar E. S. Avtomatyzatsiya system ventilyatsyy u kondytsyonyrovanyia vozdukhа / E. S. Bondar, A. S. Hordyenko, V. A. Mykhailov, H. V. Nymych. Pod obshch. red. E. S. Bondaria. – K.: TOV «Vydavnychi budynok «Avanpost – Prym», 2005. – 560s.
2. Bova S. Logical analysis of Mamdani-type fuzzy inference, I theoretical bases / S. Bova, P. Codara, D. Maccari, V. A. Marra // IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona. – 2010. – P. 1 - 8.
3. Siham A. M. Almasani. Fuzzy Expert Systems to Control the Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems / Siham A. M. Almasani, Wadea A. A. Qaid, Ahmed Khalid, Ibrahim A. A. Alqubati // International Journal of Engineering Research Technology (IJERT). – 2015. – Vol. 4. – P. 808-815.
4. Thom E.C. The discomfort index/E.C. Thom//Weather wise. – 1959. – Vol. 12. – P. 57-60.
5. Grahame M. Budd. Wet-bulb globe temperature (WBGT) – its history and its limitations/M. Budd Grahame//Journal of Science and Medicine in Sport. – 2008. – P. 20-32.
6. Novykov S. Y. Metody nechëtкои lohyky v zadachakh avtomatyzatsyy teplovыkh protsessov elektrostantsyi / S. Y. Novykov, V. R. Shakhnovych, A. V. Safronov//Vestnyk YHЭU. – HOUVPO «Yvanovskiy hosudarstvennyy enerhetycheskyi unyversytet ymeny V. Y. Lenyna». -2010. - № 4. – S. 72-75.
7. Holinko I. M. Optymizatsiia bahatovymirnykh system keruvannia dlia kompleksiv shtuchnoho mikroklimatu / I. M. Holinko, I. Ie. Halytska // Prykarpatskyi visnyk NTSh. Chyslo. – 2016. - № 1. – S. 61-73.

8. Holinko I.M. Analiz systemy keruvannya dlia shtuchnoho mikroklimatu za metodom «tochky rosy»/I.M. Holinko, V.H. Tre hub//Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohiyi. – 2011. - №2. – S. 53-55.
9. Novikov P. V. Fuzzy-kontroller pidtrymannia mikroklimatu v prymishchenni za znachenniamy indeksu dyskomfortu / P. V. Novikov, O. V. Stepanets, R.P. Sakov//Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv. – 2017. – Т. 9. - Вуп. 4. – S. 76 - 83.
10. Shchepotiev O. I. Teoriia optymizatsii / O. I. Shchepotiev, A. V. Zhylytsiv. – К.: TOV TsP «Komprint», 2017. – 242 s.

#### Анотація

Доцент Чередніченко П. П., Київський національний університет будівництва і архітектури; к.т.н., доцент Човнюк Ю. В., Національний університет біоресурсів і природокористування України.

**Моделювання та аналіз систем управління мікрокліматом приміщень музеїв: застосування fuzzy-контролерів, підтримка бажаного індексу дискомфорту (відвідувачів, експонатів. Самого приміщення).**

Для систем керування мікрокліматом у приміщеннях музеїв розглянутий алгоритм керування на основі підтримки бажаного індексу дискомфорту з використанням нечіткого логічного регулятора. Для оцінки впливу середовища на людину (відвідувача музею), представлені у приміщенні музею експонати необхідно визначити не тільки кількісну величину окремих параметрів мікроклімату, а й результат їх загального впливу на людський організм, на представлені у приміщеннях музею експонати. Досліджені існуючі методи комплексного керування мікрокліматом музейних приміщень з позиції методів регулювання. Проаналізований підхід відносно визначення індексу дискомфорту. Значення індексу дискомфорту (для людини/відвідувача, експонатів і самого приміщення музею) розбиті на діапазони у залежності від усереднених відчуттів комфортності умов у приміщенні музею для людини, експонату і самого приміщення. Розглянуті основи теорії нечітких множин. Проведений синтез нечіткого логічного регулятора. Розроблена база даних правил на основі розрахованих значень індексу дискомфорту (для кожного компонента системи, тобто для людини, експоната і самого приміщення). Теоретично спроектована інтелектуальна система автоматичної підтримки комфортних мікрокліматичних умов у приміщенні музею для всіх складових системи «музейне приміщення – експонати – відвідувачі». На основі розрахованих значень індексу дискомфорту для всіх можливих варіантів значень температур сухого й вологого термометрів (гігрометра) побудована база правил для fuzzy-контролера. Комп'ютерне моделювання отриманої системи керування мікрокліматом у музейному приміщенні можливе на основі функцій передачі температур сухого і зволоженого термометрів. Результати математичного моделювання показують ефективність використання запропонованого алгоритму керування. Керуюча дія виробляється після обробки агрегованої інформації одразу з усіх (зазвичай двох) датчиків, тим самим, зменшуючи кількість

непотрібних включень при незначних коливаннях кожного, окремо узятого параметра. За результатами моделювання можна помітити відповідність вимогам отриманої системи керування відносно підтримки бажаного рівня індексу дискомфорту у приміщенні музею, мінімальну кількість включень виконавчого механізму, відсутність перерегулювання й економію електроенергії.

Ключові слова: нечітка логіка, нечіткий логічний регулятор, приміщення музею, індекс дискомфорту, відвідувачі, експонати, мікроклімат, кондиціонування, температура, вологість.

#### Annotation

Associate Professor Cherednichenko P.P., Kyiv National University of Construction and Architecture; Ph.D., associated Professor Chovnyuk Y.V., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

**The modelling and microclimate control systems analysis of the museums' space: application of fuzzy controllers, maintenance of the desired discomfort index (for visitors, exhibits and space itself).**

For microclimate control systems for museum's rooms is proposed a control algorithm based on maintaining the desired discomfort index using a fuzzy logic controller. To assess the influence of the environment on humans, exhibits and museum's rooms, it is necessary to determine not only the quantitative value of individual microclimate parameters, but also the result of their overall impact on the human body, exhibits and museum's rooms. The existing complex methods of microclimate control are investigated. An approach to determine the index of discomfort has been analyzed. The values of the discomfort index are divided into ranges, depending on the average comfort sensations in the museum's rooms for a person and exhibits. The fundamentals of the theory of fuzzy sets are considered. The fuzzy logic controller is synthesized. A database of rules has been developed based on calculated values of the discomfort index. The intelligent system of automatic maintenance of comfortable microclimate conditions in the museum's rooms for human body and for exhibits is designed. Based on the calculated values of discomfort index for all possible variants of the temperature values of dry and wet thermometers (of hygrometer), a rule base for the fuzzy controller is built. The computer simulation of the obtained microclimate control system in the museum's rooms is carried out based on the transfer functions of dry and wet thermometers. The results of mathematical modeling showed the effectiveness of using the proposed control algorithm. The control effect is made after processing the aggregated information directly from two sensors, thereby reducing the number of unnecessary inclusions for small fluctuations of each individual parameter (of the museum's room, visitors and exhibits as well). According to the results of modeling it can be noted compliance with the requirements of the received control system to maintain the desired level of discomfort index in the museum's rooms, for their exhibits and for human body, as well, the minimum number of actuator inclusions, no overshoot and energy savings.

Key words: fuzzy logic, fuzzy logic controller, museum's room, discomfort index, visitors, exhibits, microclimate, HVAC, temperature, humidity.