

УДК 658.589:681.533.5

А.С. КУЛИК, В.В. НАРОЖНЫЙ, А.Н. ТАРАН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ДАТЧИКОВ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

*В статье представлен подход к диагностированию технического состояния датчиков температуры и влажности в климатической камере, основанный на использовании зависимости относительной влажности воздуха от его температуры. Рассмотрены такие виды отказов, как дрейф и изменение коэффициента передачи датчиков. Предложено использование классификатора, реализованного через систему нечеткого вывода Мамдани, для распознавания видов отказов по разностному сигналу датчика между нечеткого вывода Мамдани, для распознавания видов отказов по разностному сигналу датчика и модели номинального функционирования системы. Представлены зависимости для определения величин отклонения параметров системы от номинальных, на основании выхода которых с учетом данных с нечеткого классификатора вводится коррекция в алгоритмы работы системы управления камерой в случае возникновения отказа.*

**Ключевые слова:** *диагностирование, математическая модель, температура, влажность, нечеткая логика, классификатор, отказ.*

### Введение

Климатические камеры (КК) находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Температурно-влажностным испытаниям подвергаются железобетонные конструкции, строительные материалы для возведения автодорог, продукция кабельных заводов и предприятий-изготовителей электроники, узлы и детали авиа, авто и космической техники, диагностическая аппаратура в метеорологии и геологии. Длительность испытаний при этом составляет для большинства изделий в среднем 180-480 часов. Важной характеристикой систем управления (СУ) такими объектами наряду с точностью и быстротой является возможность самодиагностирования, так как неконтролируемый выход из строя датчика обратной связи или другого важного элемента системы может привести к дорогостоящему простоя в технологическом процессе, а также потере партии изделий.

**Анализ публикаций.** Некоторые методы диагностирования технических систем [1, 2] основываются на использовании аналитической избыточности, предполагающей существование двух или более способов определения значений переменных системы, один из которых использует ее математическую модель (ММ), заданную аналитически.

В работе [3] для диагностирования технического состояния систем предлагается применение сигнально-параметрического подхода, который основывается на использовании в качестве диагностических признаков системы отклонений выходных сиг-

налов и их характеристик, а также отклонений параметров отказов от номинальных. Для этого изучаются состояния системы при возможных отказах в целях построения математических моделей, отражающих аварийные и номинальные режимы функционирования. Исследование структурных и сигнальных свойств полученных моделей позволяет обоснованно произвести декомпозицию исходного математического описания, сформировать множество контрольных точек, выбрать требуемую структуру и характер управляющих сигналов, обеспечивающих полную диагностируемость системы в отношении множества возможных отказов.

В [4] предлагается для улучшения качества диагностирования модифицировать бортовое измерительное устройство путем дублирования измерительных преобразователей и введения элемента внутреннего воздействия. В процессе работы устройства на измерительные преобразователи подается эталонное тестовое воздействие, полученные показания сравниваются с математической моделью номинального функционирования и на основании полученных отклонений производится диагноз о наличии или отсутствии отказа в системе, а также его виде и месте возникновения.

В [5] для уменьшения количества ошибок вывода предлагается использование аппарата нечеткой логики на этапе формирования заключения о состоянии системы. При этом разности показаний датчиков и ММ номинального функционирования фазифицируются, и дальнейший вывод осуществляется по правилам нечеткой базы знаний. Выходной величиной такого устройства диагностирования яв-

ляется некоторый уровень тревоги относительно наличия отказа в системе.

В [6] рассматриваются вопросы моделирования постепенных отказов сложных технических систем методами нечеткой логики. Вывод о состоянии конкретного элемента и системы в целом строится на основании измерения косвенных признаков отказов, а также вероятностной оценки безотказной работы на заданном интервале времени. Система диагностирования при этом оперативно определяет наиболее вероятное состояние, в которое объект может попасть в ближайшее время. В блоке нечеткого вывода используется коррекция функций принадлежности выходных лингвистических переменных для отображения различных режимов работы объекта диагностирования.

**Цель и постановка задачи.** Целью данной статьи является разработка подхода к диагностированию некоторых отказов датчиков температуры и влажности климатической камеры, основанного на использовании имеющихся в системе избыточностей, без внесения в нее каких-либо существенных изменений и добавления дополнительных контрольных точек.

## Материалы исследований

Рассмотрим в качестве объекта управления КК типа тепло-холод-влажа, наиболее часто применяемую в промышленности для проведения температурно-влажностных испытаний объектов различной природы. Структурная схема данной КК представлена на рис. 1.

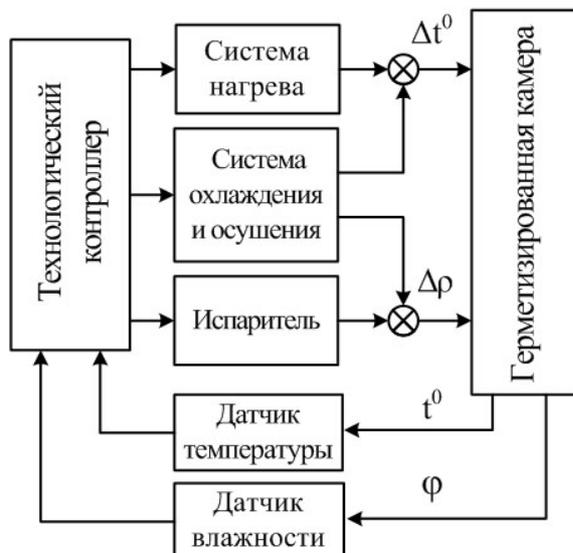


Рис. 1. Структурная схема климатической камеры типа тепло-холод-влажа

Для задания температуры внутри теплоизолированной камеры обычно применяются термоэлек-

трические нагреватели и одно или двухкаскадная компрессорная система охлаждения. Для регулирования влажности используют электрический испаритель и конденсационный способ осушения с отбором влаги от одного из змеевиков системы охлаждения. Измерения температуры в большинстве климатических камер производится при помощи термопар или платиновых датчиков температуры. При измерения влажности в пределах от 10 до 98% при температуре воздуха от +5 до +90°C наиболее часто используется психрометрический способ измерения, а также датчики влажности емкостного типа.

Опыт эксплуатации климатических систем показал, что значительный процент отказов приходится на датчики обратной связи. При этом интенсивность отказов датчиков влажности значительно выше, чем у датчиков температуры ввиду их конструктивных особенностей. При психрометрическом измерении влажности воздуха низкий уровень или полное отсутствие смачивающей влажный термометр воды приводит к получению контроллером недостоверных данных о текущей влажности в камере. Для датчиков влажности емкостного типа характерны следующие отказы: значительное увеличение времени переходного процесса при образовании налета на чувствительной поверхности, дрейф или резкое изменение коэффициента передачи при воздействии паров химически активных веществ, переход в зону насыщения при образовании конденсата на чувствительной поверхности. Для датчиков температуры возможны ошибки начальной установки коэффициентов, а также изменение параметров усилительно преобразовательных блоков канала измерения, что приводит к таким типичным отказам как дрейф и изменение коэффициента передачи.

Для диагностирования технического состояния датчиков предлагается использовать информационную избыточность, связанную с влиянием температуры воздуха внутри климатической камеры на его относительную влажность.

Относительная влажность воздуха определяется следующей зависимостью [7]:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_1(t^0)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха;  $\rho$  – текущая абсолютная влажность воздуха;  $\rho_1(t^0)$  – абсолютная влажность насыщенного воздуха при текущей температуре;  $t^0$  – температура воздуха в камере.

Математическую зависимость абсолютной влажности насыщенного воздуха при температурах от 0 до +100°C можно получить, аппроксимируя справочные данные полиномом (2) или экспоненциальной функцией (3) [8]:

$$\rho_i(t^0) = 2,9735 \cdot 10^{-6} t^{0^4} + 1,7644 \cdot 10^{-4} t^{0^3} + 0,0071 t^{0^2} + 0,3520 t^0 + 5,8064; \quad (2)$$

$$\rho_i(t^0) = 12,437 e^{0,0389 t^0} \quad (3)$$

Среднеквадратичная ошибка RMSE составляет 0,8101 для (2) и 8,6 для (3). Графики зависимостей (2) и (3) представлены на рис. 2.

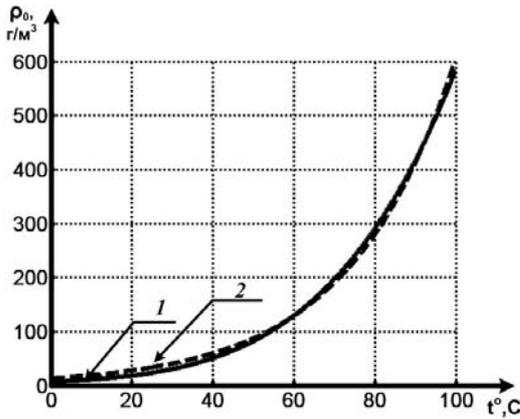


Рис. 2. Зависимость абсолютной влажности насыщенного воздуха от температуры:

- 1 – аппроксимация полиномом;
- 2 – аппроксимация экспоненциальной функцией

Получаем, что подав тестовое воздействие в виде изменения температуры воздуха в КК на некоторую величину, мы должны получить соответствующее изменение его относительной влажности. Следует отметить, что в качестве тестового лучше использовать изменение температуры воздуха за счет включения нагревательных элементов или теплопередачи через стенки КК, так как при включении системы охлаждения вместе с понижением температуры воздуха происходит уменьшение его абсолютной влажности из-за конденсации влаги на холодной поверхности змеевиков охлаждения [8].

Исходя из вышперечисленного, в режиме нормального функционирования КК на участках программы испытаний, соответствующих повышению температуры воздуха, а также при работе оборудования в специальном диагностическом режиме по разности показаний ММ номинального функционирования и текущих данных с датчиков температуры и влажности можно определить наличие в них некоторых видов отказов.

Рассмотрим два распространенных вида отказа датчиков обратной связи КК:

- 1) дрейф датчика влажности;
- 2) изменение коэффициента передачи датчика температуры.

В случае первого отказа показания датчика относительной влажности  $\tilde{\varphi}_{\varphi_{a\delta}}$  в тестовом установленном режиме можно описать выражением:

$$\tilde{\varphi}_{\varphi_{a\delta}} = \frac{(\varphi_0 - \Delta\varphi_{a\delta})\rho_i(t_0^0)}{\rho_i(t_0^0 + \Delta t^0)} + \Delta\varphi_{a\delta}, \quad (4)$$

где  $\varphi_0$  – начальная относительная влажность;

$t_0^0$  – начальная температура;

$\Delta t^0$  – изменение температуры;

$\Delta\varphi_{a\delta}$  – величина дрейфа датчика влажности.

Зависимость показаний датчика влажности от изменения коэффициента передачи датчика температуры в тестовом установленном режиме описывается следующим выражением:

$$\tilde{\varphi}_{kt^0} = \varphi_0 \frac{\rho_i\left(\frac{t_0^0}{1 + \Delta kt^0}\right)}{\rho_i\left(\frac{t_0^0 + \Delta t^0}{1 + \Delta kt^0}\right)}, \quad (5)$$

где  $\Delta kt^0$  – приращение коэффициента передачи датчика температуры.

Расчетное значение относительной влажности воздуха в номинальном режиме  $\hat{\varphi}$  равняется:

$$\hat{\varphi} = \frac{\varphi_0 \rho_i(t_0^0)}{\rho_i(t_0^0 + \Delta t^0)}. \quad (6)$$

Разность показаний датчика относительной влажности и расчетного значения при отказе датчика влажности  $\Delta\varphi_{\varphi_{a\delta}}$  определяется выражением:

$$\Delta\varphi_{\varphi_{a\delta}} = \tilde{\varphi}_{\varphi_{a\delta}} - \hat{\varphi} = \Delta\varphi_{a\delta} \left(1 - \frac{\rho_i(t_0^0)}{\rho_i(t_0^0 + \Delta t^0)}\right). \quad (7)$$

В случае отказа датчика температуры разность показаний датчика влажности и расчетного значения  $\Delta\varphi_{kt^0}$  определяется выражением:

$$\Delta\varphi_{kt^0} = \tilde{\varphi}_{kt^0} - \hat{\varphi} = \varphi_0 \left( \frac{\rho_i\left(\frac{t_0^0}{1 + \Delta kt^0}\right)}{\rho_i\left(\frac{t_0^0 + \Delta t^0}{1 + \Delta kt^0}\right)} - \frac{\rho_i(t_0^0)}{\rho_i(t_0^0 + \Delta t^0)} \right). \quad (8)$$

На рис. 3 – 4 отображены зависимости (7) – (8) для тестовых воздействий со следующими параметрами:

$$t_0^0 = 20^\circ \text{C};$$

$$\varphi_0 = 80\%;$$

$$\Delta t^0 = [0 \dots 30]^\circ \text{C}.$$

Из выражений (7) и (8) можно вывести обратные зависимости для определения дрейфа датчика влажности (9) и изменения коэффициента передачи датчика температуры (10) по разности показаний расчетного и реального значения датчика влажности

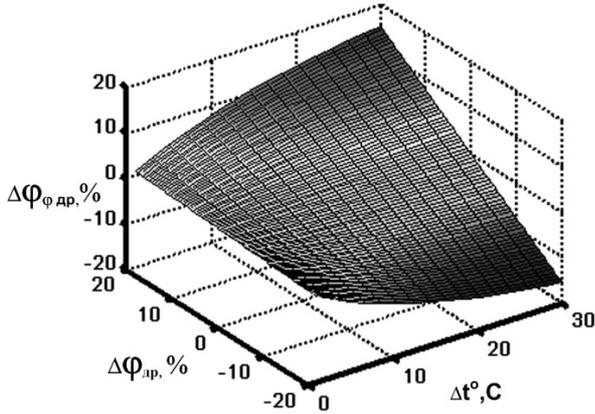


Рис. 3. Разность показаний датчика влажности и расчетного значения при отказе датчика влажности

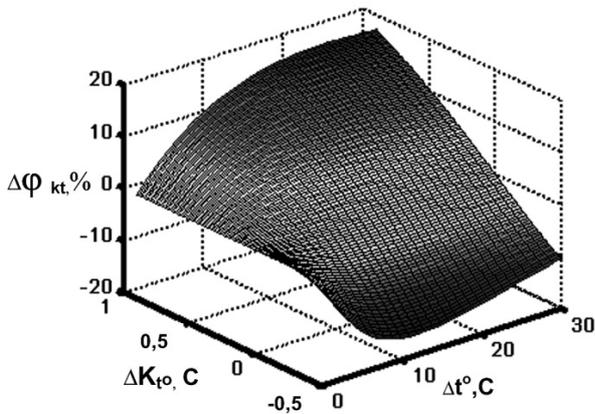


Рис. 4. Разность показаний датчика влажности и расчетного значения при отказе датчика температуры

в установившемся тестовом режиме при известных начальных условиях  $\varphi_0$ ,  $t_0$  и величине изменения температуры  $\Delta t^\circ$ .

$$\Delta\varphi_{\text{ад}} = \frac{\Delta\varphi_{\text{ад}}(t_0^\circ + \Delta t^\circ)}{\left(1 - \frac{\rho_i(t_0^\circ)}{\rho_i(t_0^\circ + \Delta t^\circ)}\right)}, \quad (9)$$

$$\Delta kt^\circ = \frac{a_2 \Delta t^\circ}{a_2 \Delta t^\circ - \ln\left(1 + \frac{\Delta\varphi_{\text{кт}}^\circ}{\varphi_0 e^{-a_2 \Delta t^\circ}}\right)}. \quad (10)$$

Для вывода (10) была использована экспоненциальная аппроксимация (3) зависимости абсолютной влажности насыщенного воздуха от его температуры.

Для окончательной диагностики необходимо определить, какой из датчиков вышел из строя, так как одним и тем же величинам  $\Delta\varphi$  и  $\Delta t^\circ$  в выражениях (9) – (10) соответствуют определенные вели-

чины  $\Delta\varphi_{\text{ад}}$  и  $\Delta kt^\circ$ .

Предположим, что оба рассматриваемых отказа не могут произойти одновременно на интервале диагностирования, а задачу распознавания вида отказа решим путем построения нечеткого классификатора.

Определим классы решения:  $d_1$  – отказы отсутствуют;  $d_2$  – дрейф датчика влажности;  $d_3$  – изменение коэффициента передачи датчика температуры.

Реализация нечеткого классификатора произведем через систему нечеткого вывода Мамдани с тремя входами и одним выходом.

Определим входной вектор  $X=(x_1, x_2, x_3)$ , по которому будет производиться классификация отказов:

$$x_1 = \Delta t^\circ; \quad x_2 = \Delta\varphi(\Delta t_0^\circ + \Delta t^\circ);$$

$$x_3 = \frac{\Delta\varphi(\Delta t_0^\circ + \Delta t^\circ)}{\Delta\varphi(\Delta t_0^\circ + \frac{\Delta t^\circ}{2})} 100\%.$$

Начальные функции принадлежности входных и выходных переменных нечеткого классификатора представлены на рис. 5.

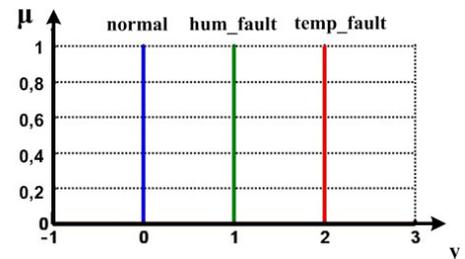
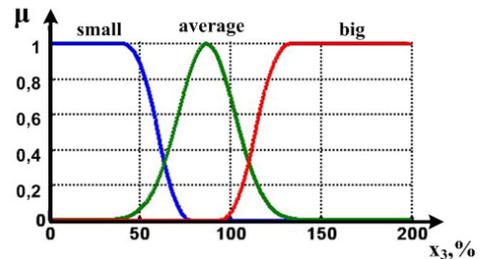
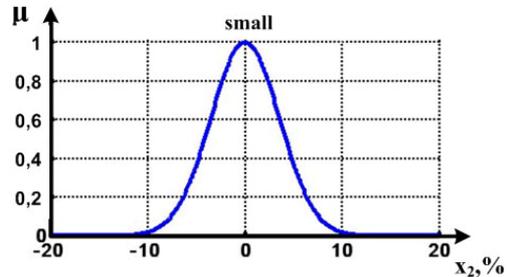
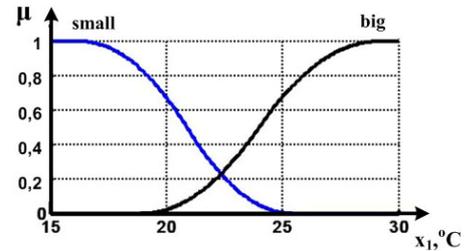


Рис. 5. Функции принадлежности входных и выходных переменных нечеткого классификатора

Каждому классу решения  $d_j$  в нечетком классификаторе Мамдани поставлен в соответствие терм выходной переменной с синглтонной функцией принадлежности (рис. 5) [9].

В базе знаний классификатора зададим 6 правил нечеткого вывода:

- 1) if  $x_2$ ="small" then  $y=d_1$ ;
- 2) if  $x_1$ ="small" and  $x_2$ =not("small") and  $x_3$ ="small" then  $y=d_2$ ;
- 3) if  $x_1$ ="big" and  $x_2$ =not("small") and  $x_3$ ="average" then  $y=d_2$ ;
- 4) if  $x_1$ ="small" and  $x_2$ =not("small") and  $x_3$ ="average" then  $y=d_3$ ;
- 5) if  $x_1$ ="small" and  $x_2$ =not("small") and  $x_3$ ="big" then  $y=d_3$ ;
- 6) if  $x_1$ ="big" and  $x_2$ =not("small") and  $x_3$ ="big" then  $y=d_3$ .

Степени принадлежности  $\mu_{d_j}(X)$  входного вектора  $X=(x_1, x_2, x_3)$  классам  $d_j$  рассчитываются следующим образом [10]:

$$\mu_{d_j}(X) = \max_{p=\overline{1, k_j}} (\omega_{jp} \min_{i=\overline{1, 3}} (\mu_{jp}(x_i))), j = \overline{1, 3}, \quad (11)$$

где  $k_j$  – количество правил, описывающих класс  $d_j$ ;

$\mu_{jp}(x_i)$  – функция принадлежности входа  $x_i$  нечеткому терму  $a_{i, jp}$ ;

$\omega_{jp}$  – весовой коэффициент  $p$ -го правила, описывающего класс  $d_j$ .

В качестве решения выбирается класс с максимальной степенью принадлежности [10]:

$$y = \arg \max_{\{d_1, d_2, d_3\}} (\mu_{d_1}(X), \mu_{d_2}(X), \mu_{d_3}(X)). \quad (12)$$

На тестовой выборке спроектированная ненастроенная система нечеткого вывода ошибочно классифицирует 80 из 300 вариантов состояний системы. Такой результат объясняется «плохими» функциями принадлежности входных переменных системы.

Для настройки классификатора необходимо найти такие параметры функций принадлежности термов входных переменных и весовые коэффициенты правил, которые минимизируют отклонения между действительным и желаемым поведением нечеткого классификатора на обучающей выборке. Задача настройки сводится к задаче оптимизации.

В качестве целевой выбрана следующая функция [10]:

$$\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1}^M (\Delta_r \cdot \text{penalty} + 1) \times \sum_{j=1}^m (\mu_{d_j}(y_r) - \mu_{d_j}(X_r, P))^2} \rightarrow \min, \quad (13)$$

где  $\Delta_r = \begin{cases} 0, & \text{àñè} y_r = F(X_r, P); \\ 1, & \text{àñè} y_r \neq F(X_r, P). \end{cases}$

$\mu_{d_j}(y_r)$  – степень принадлежности значения выходной переменной в  $r$ -й паре обучающей выборке к решению  $d_j$ ;

$\mu_{d_j}(X_r, P)$  – степень принадлежности решения системы нечеткого вывода с параметрами  $X_r$  и  $P$  к решению  $d_j$ ;

Penalty >0 – штрафной коэффициент.

Задача (13) не имеет протяженных плато и может быть решена различными технологиями оптимизации.

Для настройки системы нечеткого вывода были выбраны 7 параметров функций принадлежности второго и третьего входов классификатора: коэффициент центрации терма «small» для  $x_2$ , центр максимума и коэффициент центраций терма «average» для  $x_3$ ; максимальные и минимальные значения термов «small» и «big» для  $x_3$ . Для решения задачи (13) была использована функция поиска минимума скалярной функции многих переменных `fmincon` пакета Optimization Toolbox системы Matlab [9].

В результате выполнения 20 итерация были получены скорректированные функции принадлежности для входных переменных  $x_1$  и  $x_2$  (рис. 6).

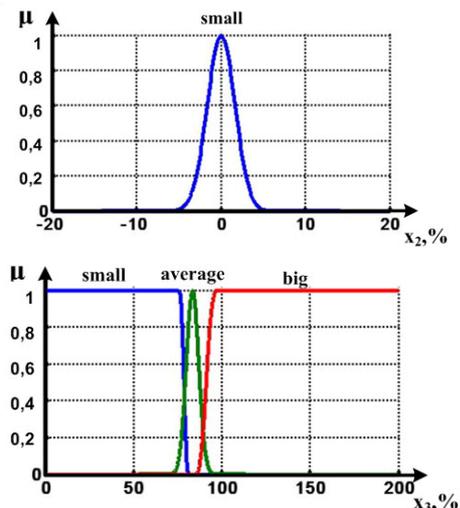


Рис. 6. Скорректированные функции принадлежности входных переменных

На обучающей выборке настроенная система нечеткого вывода безошибочно классифицировала все состояния. На тестовой выборке из 400 элементов было сделано 2 ошибки. Неточности классифи-

кации соответствуют состояниям системы с небольшими отклонениями  $\Delta\varphi$  и не являются критическими.

Структурная схема диагностирования состояний датчиков температуры и влажности представлена на рис. 7.

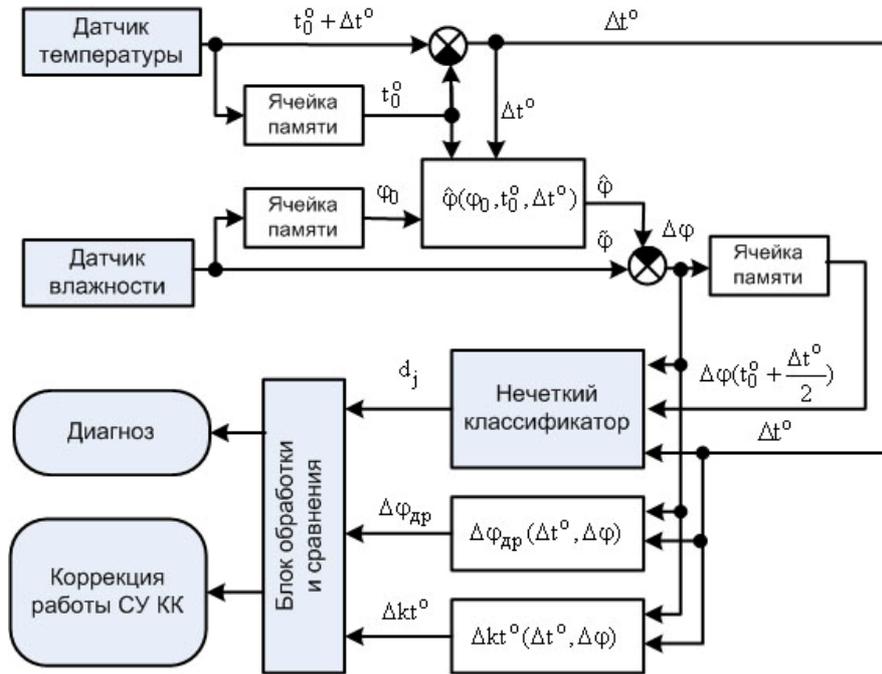


Рис. 7. Структурная схема диагностирования технического состояния датчиков обратной связи в КК

В процессе работы камеры в режиме повышения температуры воздуха блок управления отключает испаритель и осушитель и фиксирует начальные параметры системы  $\varphi_0$ ,  $t_0$ . По разности показаний датчика влажности и расчетного значения (6), соответствующих изменению температуры на величины  $\Delta t^o / 2$  и  $\Delta t^o$ , система нечеткого вывода классифицирует текущее состояние датчиков влажности. Одновременно с использованием выражений (9) – (10) рассчитываются величины возможных отказов. Анализируя выход нечеткого классификатора, блок обработки и сравнения выдает оператору информацию о текущем состоянии датчиков и в случае наличия отказов вводит соответствующую коррекцию в алгоритмы работы СУ КК.

### Заклучение

Предложенный подход к диагностированию датчиков температуры и влажности в КК позволяет определять отклонения параметров от номинальных при естественном или вынужденном изменении температуры воздуха внутри камеры, не приводящему к существенному изменению абсолютной влажности.

Использование нечеткого классификатора, реализованного через систему Мамдани, после на-

стройки на тестовой выборке позволяет с хорошей точностью различать рассмотренные виды отказов. При этом используется информация о величине тестового воздействия и результаты измерения в двух точках разности выходов реального датчика и ММ номинального функционирования.

Полученные в процессе диагностирования данные о величинах отклонений параметров в совокупности с показаниями нечеткого классификатора могут быть использованы системой управления для автоматической коррекции алгоритмов работы оборудования в случае возникновения отказа.

### Литература

1. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем / Л.А. Мироновский. – М.: МГУ-ГРИФ, 1998. – 256 с.
2. Жирабок А.Н. Диагностирование датчиков технических систем / А.Н. Жирабок, А.М. Писарец, А.С. Якишин // Датчики и системы. – 2007. – №6. – С. 12-17.
3. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления: монография / А.С. Кулик. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
4. Нарожный В.В. Малогабаритный отказоустойчивый анализатор-измеритель качества

внешней жидкой среды / В.В. Нарожный, Т.В. Кулик, А.Н. Таран // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х.: ХАИ, 2002. – Вип. 34. – С. 193-197.

5. Жирабок А.Н. Нечеткие множества и их использование для принятия решений / А.Н. Жирабок // *Соросовский образовательный журнал*. – 2001. – №2. – С. 109-115.

6. Яшин Е.Н. Нечеткое моделирование отказов нагревательных элементов электрических печей / Е.Н. Яшин, Х.Х. Хоруб // *Информационные процессы и управление*. – 2006. – № 1. – С. 56-64.

7. *Теплотехника: учебник для вузов / Под ред. А.П. Баскакова*. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.

8. Кулик А.С. Диагностирование технического состояния датчика влажности в климатической камере / А.С. Кулик, В.В. Нарожный, А.Н. Таран // *Автомобильный транспорт*. – 2008. – Вип. 22. – С. 137-141.

9. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

10. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2007. – 288 с.

Поступила в редакцию 2.10.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Компьютерные системы и сети» В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ДІАГНОСТУВАННЯ ВІДМОВ ДАТЧИКІВ ЗВОРОТНОМУ ЗВ'ЯЗКУ КЛІМАТИЧНОЇ КАМЕРИ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*А.С. Кулік, В.В. Нарожний, О.М. Таран*

У статті представлено підхід до діагностування технічного стану датчиків температури і вологості в кліматичній камері, що базується на використанні залежності відносної вологості повітря від його температури. Розглянуто такі види відмов, як дрейф і зміна коефіцієнта передачі датчиків. Запропоновано використання класифікатора, реалізованого через систему нечіткого виводу Мамдані, що дозволяє розрізнити види відмов за різницею сигналів з датчика вологості і моделі номінального функціонування датчиків. Представлено залежності для визначення відхилення параметрів системи від номінальних, на підставі виходу яких з урахуванням даних з нечіткого класифікатора вводиться корекція в алгоритми роботи системи управління камерою в разі виникнення відмови.

**Ключові слова:** діагностування, математична модель, температура, вологість, нечітка логіка, класифікатор, відмова.

### DIAGNOSING OF FEEDBACK SENSOR FAULTS IN CLIMATIC CHAMBER WITH THE USE OF FUZZY LOGIC

*A.S. Kulik, V.V. Naroznyy, A.N. Taran*

The approach to diagnosing of the temperature and humidity sensors technical state in climatic chamber that used the dependence between air relative humidity and temperature is represented in the article. Such types of sensor faults as drift and transmission coefficient change are considered. The use of classifier that realized through the fuzzy system Mamdani allowed to distinguish the temperature and humidity sensors faults on the difference signal from humidity sensor and sensor's nominal state model. Dependences for the definition of system parameters divergence are represented. On the basis of dependences output and information from fuzzy classifier a correction is entered in the algorithms of climatic chamber control system in the case of sensor fault.

**Key words:** diagnosing, mathematical model, temperature, humidity, fuzzy logic, classifier, fault.

**Кулик Анатолий Степанович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kulik@d3.khai.edu.

**Нарожный Виталий Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kub@babylon.kharkov.com.

**Таран Александр Николаевич** – аспирант кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: taran\_a\_n@mail.ru.