

УДК 658.589:681.533.5

А.С. КУЛИК, В.В. НАРОЖНЫЙ, А.Н. ТАРАН

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

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ ТИПА ТЕПЛО-ХОЛОД-ВЛАГА

В статье представлены математические модели температурного и влажностного каналов испытательной климатической камеры типа тепло-холод-влага. Данные модели описывают работу камеры в номинальном режиме функционирования и аварийном режиме при отказе элементов системы. В процессе моделирования было учтено взаимное влияние температурного и влажностного канала, что позволило более адекватно отразить происходящие в камере процессы и получить дополнительную информационную избыточность, используемую в задачах диагностирования состояния объекта. Представленные модели могут быть использованы как для синтеза системы управления, так и для диагностирования технического состояния климатической камеры, а также сходных систем создания искусственного микроклимата.

Ключевые слова: диагностирование, математическая модель, температура, влажность, теплообмен, номинальный режим, отказ.

Введение

Испытательные камеры создания искусственно-го микроклимата широко используются в промышленности при изготовлении узлов и деталей авиа, авто и космической техники на этапах калибровки, выявления производственных дефектов и проверки на стойкость к воздействиям внешней среды. При этом практически все агрегаты аэрокосмической техники проходят испытания на влияние температуры и влажности воздуха. Для этих целей на предприятиях используют температурные камеры и комбинированные климатические камеры типа тепло-холод-влага. Важной характеристикой систем автоматического управления (САУ) данными объектами наряду с точностью и быстродействием является возможность самодиагностирования, так как длительность испытаний составляет в среднем 180-480 часов и неконтролируемый выход из строя элемента системы может привести к дорогостоящему простоям в технологическом процессе, а также потере партии изделий.

Анализ публикаций. Большинство существующих методов диагностирования состояния технических систем используют математические модели (ММ), описывающие различные режимы функционирования системы. При этом на вход устройства диагностирования поступают управляющие сигналы и сигналы датчиков обратной связи. Устройство диагностирования непрерывно обрабатывает информацию, сравнивает расчетные значения величин с реальными значениями сигна-

лов датчиков и формирует заключение о текущем состоянии системы [1, 2].

Одним из наиболее перспективных подходов к диагностированию технического состояния САУ является сигнально-параметрический подход, который основывается на использовании в качестве диагностических признаков отклонений выходных сигналов системы, а также отклонений параметров отказов от номинальных. Для этого изучаются различные состояния объекта диагностирования при возможных отказах с целью построения ММ, 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 [3].

Результаты диагностирования в большинстве случаев зависят от точности и адекватности ММ, описывающих различные режимы функционирования объекта. Следовательно, на начальном этапе задача диагностики сводится к построению соответствующих ММ объекта и их исследованию.

ММ объекта может быть получена аналитически, когда закономерности протекающих в объекте процессов полностью известны, а также по результатам экспериментального исследования входных и выходных переменных объекта без изучения его физической сущности. Последний подход особенно

широко используется на практике, так как позволяет обойтись минимумом априорных сведений об объекте при построении его модели [4].

При решении задач управления и диагностирования сложных объектов часто не удается получить единственное их математическое описание, имеющее приемлемую точность. В этом случае используется ансамбль моделей, в котором каждая описывает отдельные стороны процесса. Зачастую такие модели реализуются как совокупность программ, имитирующих работу объекта и ориентированных на использование ЭВМ.

При получении ММ системы аналитическим путем необходимо располагать всесторонними сведениями об объекте: конструкции, законах, описывающих протекающие в нем процессы, условиях функционирования и взаимодействия со средой. Однако часто из-за отсутствия достаточных данных получить решение задачи таким путем не удастся. Трудности применения аналитических методов возникают и при описании реальных объектов, процессы в которых имеют сложный характер. Поэтому в подобных случаях эти методы дополняются экспериментальными исследованиями. Преимуществом моделей, полученных аналитическим путем, как правило, является их общий вид, позволяющий рассматривать поведение объектов в различных режимах функционирования [4].

При моделировании сложных многоканальных динамических систем с несколькими входами и выходами и наличием перекрестных связей между каналами, наиболее удобной является векторно-матричная ММ в пространстве состояния. Такую ММ можно получить исходя из дифференциальных уравнений элементов системы и проанализировать средствами матричной алгебры и современных пакетов численного моделирования.

Материалы исследований

Рассмотрим в качестве объекта управления климатическую камеру типа тепло-холод-влага, наиболее часто применяемую в промышленности для проведения температурно-влажностных испытаний объектов различной природы. Обобщенная структурная схема камеры представлена на рис. 1.

Для задания температуры внутри теплоизолированной камеры обычно применяются термоэлектрические нагреватели (ТЭН) и одно или двухкаскадная компрессорная система охлаждения. Регулирование влажности осуществляется при помощи электрического испарителя и конденсационного способа осушения с отбором влаги от одного из змеевиков системы охлаждения.

Циркулирующий воздух отдает тепло змееви-

кам охлаждения, находящимся в потоке, а также изделиям и стенкам камеры. Одновременно часть энергии тратится за счет теплопередачи через стенки камеры. Измерения температуры в большинстве климатических камер производятся при помощи термопар или платиновых датчиков температуры. Для измерения относительной влажности воздуха в камере наиболее часто используется психрометрический способ измерения, а также электронные датчики влажности емкостного типа.

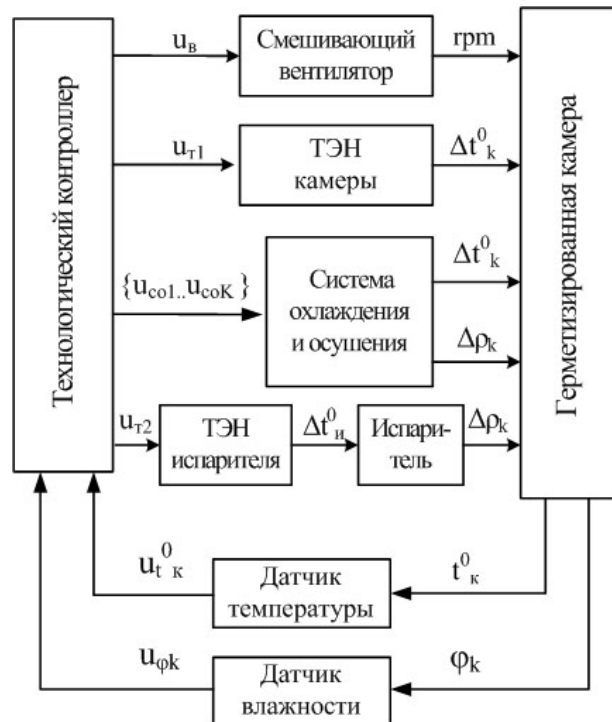


Рис. 1. Структурная схема климатической камеры типа тепло-холод-влага

Исходя из конструкции рассматриваемого объекта, можно записать уравнение теплового баланса камеры без загрузки:

$$Q_B = Q_{\text{ТЭН}} - Q_{\text{охл}} - Q_{\text{осуш}} - Q_{\text{ст}}, \quad (1)$$

где Q_B – теплота, затрачиваемая на прогрев воздуха;

$Q_{\text{ТЭН}}$ – тепловой поток с поверхности ТЭНов;

$Q_{\text{охл}}$ – количество теплоты, отдаваемое змеевикам охлаждения;

$Q_{\text{осуш}}$ – количество теплоты, отдаваемое змеевику осушителя;

$Q_{\text{ст}}$ – потеря тепла через стенки.

Используя уравнение теплового баланса климатической камеры (1) и зависимости, описывающие передачу теплоты теплопроводностью и конвекцией [5 – 7] для элементов системы, получаем систему дифференциальных уравнений (2), описывающую работу температурного канала климатической камеры без загрузки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_{ТЭН}^0}{dt} = \frac{P_{ТЭН} - \alpha_{ТЭН} S_{ТЭН} (T_{ТЭН}^0 - T_{В}^0)}{c_{ТЭН} m_{ТЭН}}; \\ \frac{dT_{ОХЛ}^0}{dt} = \frac{\alpha_{ОХЛ}^{внеш} S_{ОХЛ}^{внеш} (T_{В}^0 - T_{ОХЛ}^0) - \alpha_{ОХЛ}^{внутр} S_{ОХЛ}^{внутр} (T_{ОХЛ}^0 - T_{хлад1}^0)}{c_{ОХЛ} m_{ОХЛ}}; \\ \frac{dT_{ОСУШ}^0}{dt} = \frac{\alpha_{ОСУШ}^{внеш} S_{ОСУШ}^{внеш} (T_{В}^0 - T_{ОСУШ}^0) - \alpha_{ОСУШ}^{внутр} S_{ОСУШ}^{внутр} (T_{ОСУШ}^0 - T_{хлад2}^0)}{c_{ОСУШ} m_{ОСУШ}}; \\ \frac{dT_{В}^0}{dt} = \frac{\alpha_{ТЭН} S_{ТЭН} (T_{ТЭН}^0 - T_{В}^0) - \alpha_{ОХЛ} S_{ОХЛ} (T_{В}^0 - T_{ОХЛ}^0) - \alpha_{ОСУШ} S_{ОСУШ} (T_{В}^0 - T_{ОСУШ}^0) - K_{СТ} \cdot (T_{В}^0 - T_{ОС}^0)}{c_{В} \cdot m_{В}} \end{array} \right. \quad (2)$$

где $T_{В}^0$, $T_{ТЭН}^0$, $T_{ОХЛ}^0$, $T_{ОСУШ}^0$ – температуры циркулирующего воздуха, ТЭНа, змеевиков охлаждающего и осушительного каскадов;

$c_{В}$, $c_{ТЭН}$, $c_{ОХЛ}$, $c_{ОСУШ}$ – теплоемкости воздуха а также материалов ТЭНа, змеевиков охлаждающего и осушительного каскадов;

$m_{В}$, $m_{ТЭН}$, $m_{ОХЛ}$, $m_{ОСУШ}$ – масса воздуха в камере, ТЭНа, змеевиков охлаждающего и осушительного каскадов;

$S_{ТЭН}$, $S_{ОХЛ}^{внеш}$, $S_{ОХЛ}^{внутр}$, $S_{ОСУШ}^{внеш}$, $S_{ОСУШ}^{внутр}$ – площадь поверхности ТЭНа, а также внутренних и внешних поверхностей змеевиков охлаждающего и осушительного каскадов;

$\alpha_{ТЭН}$, $\alpha_{ОХЛ}^{внеш}$, $\alpha_{ОХЛ}^{внутр}$, $\alpha_{ОСУШ}^{внеш}$, $\alpha_{ОСУШ}^{внутр}$ – коэффициенты теплоотдачи поверхности ТЭНа а также внутренних и внешних поверхностей змеевиков охлаждающего и осушительного каскадов;

$P_{ТЭН}$ – мощность ТЭНа;

$T_{хлад1}^0$, $T_{хлад2}^0$ – температуры испарения хладогена в охладителе и осушителе;

$T_{ОС}^0$ – температура окружающей среды;

$K_{СТ}$ – коэффициент теплопередачи через стенки.

$K_{СТ}$ в свою очередь определяется следующим образом:

$$K_{СТ} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{СТ}^{внеш}} + \frac{2 \cdot \delta_{СТ}}{\lambda_{СТ}} + \frac{\delta_{утепл}}{\lambda_{утепл}} + \frac{1}{\alpha_{СТ}^{внутр}}}, \quad (3)$$

где $\delta_{СТ}$, $\delta_{утепл}$ – толщины стенок камеры и утеплителя;

$\lambda_{СТ}$, $\lambda_{утепл}$ – коэффициенты теплопроводности стенок камеры и утеплителя;

$\alpha_{СТ}^{внеш}$, $\alpha_{СТ}^{внутр}$ – коэффициенты теплоотдачи внешней и внутренней поверхностей стенок камеры.

В качестве переменных состояния камеры выберем температуры воздуха, ТЭНа, змеевиков:

$$x_1 = T_{ТЭН}^0, \quad x_2 = T_{ОХЛ}^0, \quad x_3 = T_{ОСУШ}^0, \quad x_4 = T_{В}^0.$$

Для упрощения записи уравнения введем следующие замены:

$$A_1 = \alpha_{ТЭН} S_{ТЭН}, \quad A_2 = \alpha_{ОХЛ}^{внеш} S_{ОХЛ}^{внеш},$$

$$A_3 = \alpha_{ОХЛ}^{внутр} S_{ОХЛ}^{внутр}, \quad A_4 = \alpha_{ОСУШ}^{внеш} S_{ОСУШ}^{внеш},$$

$$A_5 = \alpha_{ОСУШ}^{внутр} S_{ОСУШ}^{внутр}, \quad A_6 = K_{СТ},$$

$$K_A = A_1 + A_2 + A_4 + A_6, \quad B_1 = c_{ТЭН} m_{ТЭН},$$

$$B_2 = c_{ОХЛ} m_{ОХЛ}, \quad B_3 = c_{ОСУШ} m_{ОСУШ}, \quad B_4 = c_{В} m_{В}.$$

После введенных обозначений и преобразований системы (2) получаем систему уравнений в пространстве состояний, описывающую номинальный режим работы температурного канала камеры:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = -\frac{A_1}{B_1} x_1 + \frac{A_1}{B_1} x_4 + \frac{P_{ТЭН}}{B_1}; \\ \dot{x}_2 = -\frac{A_2 + A_3}{B_2} x_2 + \frac{A_2}{B_2} x_4 + \frac{A_3}{B_2} T_{хлад1}^0; \\ \dot{x}_3 = -\frac{A_4 + A_5}{B_3} x_3 + \frac{A_4}{B_3} x_4 + \frac{A_5}{B_3} T_{хлад2}^0; \\ \dot{x}_4 = \frac{A_1}{B_4} x_1 + \frac{A_2}{B_4} x_2 + \frac{A_4}{B_4} x_3 - \frac{K_A}{B_4} x_4 + \frac{A_6}{B_4} T_{ОС}^0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Во время включения ТЭНа мощность нагревателей считаем равной номинальной $P_{ТЭН} = P_{ТЭН \text{ ном}}$, а при подаче сигнала на его отключение $P_{ТЭН} = 0$.

При закрытых управляющих клапанах в охладителе и осушителе считаем, что изменение температур змеевиков происходит только за счет теплообмена с циркулирующим воздухом. Чтобы отразить это в ММ, выражения соответствующие теплоотдаче от змеевиков к хладогену во втором и третьем уравнении системы (4) должны быть равны нулю. Этого можно достичь за счет приравнивания соответствующих коэффициентов к нулю $A_3 = 0$, $A_5 = 0$.

Предварительную оценку коэффициентов ММ (4) можно произвести расчетным путем, исходя из геометрических параметров камеры и элементов, справочных данных, критериальных зависимостей, типа используемых материалов и технической документации на оборудование.

Номинальная мощность нагревательных элементов $P_{\text{тэн ном}}$, а также температуры испарения хладогенов в системах охлаждения и осушения $T_{\text{хлад1}}^{\circ}$ и $T_{\text{хлад2}}^{\circ}$ определяются из справочной литературы и технической документации на конкретную климатическую камеру.

Коэффициенты уравнений V_i можно рассчитать, исходя из геометрических размеров камеры, нагревательных элементов, змеевиков охлаждения и осушения, а также справочных данных по теплоемкости и плотности воздуха и материалов исполнительных элементов (ИЭ):

$$V_i = c_i \rho_i V_i, \quad (5)$$

где c_i – теплоемкость воздуха или материала ИЭ;

ρ_i – плотность воздуха или материала ИЭ;

V_i – объем воздуха или ИЭ.

При использовании ряда упрощений для предварительной оценки коэффициентов теплоотдачи α_i используются критерии теплового подобия Нуссельта (Nu), Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr) и Грасгофа (Gr) для передачи тепла в движущейся среде конвекцией [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}; \\ Re = \frac{v l}{\nu}; \\ Pr = c_p \frac{v}{\lambda}; \\ Gr = \beta g l^3 \frac{\Delta t}{\nu^2}. \end{array} \right. \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

l – определяющий размер;

v – скорость потока;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

c – теплоемкость среды;

ρ – плотность среды;

λ – коэффициент теплопроводности среды;

g – ускорение свободного падения;

Δt – температурный перепад между средой и омываемой ею поверхностью;

β – функция, связывающая изменение плотности среды с температурой.

Критериальное уравнение теплопередачи конвекцией строится по типу:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr). \quad (7)$$

Здесь Nu содержит в себе искомую величину α и является неопределяющим критерием, тогда как критерии Re , Gr , Pr – определяющими.

Для газов одинаковой атомности и, в частности, для воздуха, когда $Pr = \text{const}$, будем иметь:

$$Nu = f(Re, Gr). \quad (8)$$

Так как движение воздуха в камере вынужденное, естественной конвекцией можно пренебречь, следовательно выпадает число Грасгофа:

$$Nu = f(Re). \quad (9)$$

Выражения (6) – (9) позволяют произвести оценочный расчет коэффициентов теплоотдачи от циркулирующего воздуха к поверхностям нагревательных элементов, а также змеевикам охлаждения и осушения и определить значения искомых коэффициентов A_i .

Относительная влажность воздуха в климатической камере находится по следующему уравнению [8]:

$$\phi_{\text{возд}} = \frac{p_k}{\rho_0(T_B^{\circ})}, \quad (10)$$

где $\rho_0(T_B^{\circ})$ – абсолютная влажность насыщенного воздуха при текущей температуре;

p_k – действительная абсолютная влажность воздуха в камере.

Зависимость абсолютной влажности насыщенного воздуха от температуры можно получить, аппроксимировав соответствующие справочные данные при температурах от минус 50 °С до +100 °С:

$$\rho_0(T_B^{\circ}) = 2,973 \cdot 10^{-6} T_B^{\circ 4} + 1,764 \cdot 10^{-4} T_B^{\circ 3} + 0,0071 T_B^{\circ 2} + 0,3520 T_B^{\circ} + 5,8064. \quad (11)$$

Скорость изменения абсолютной влажности в камере $\frac{dp_k}{dt}$ определяется следующим образом:

$$\frac{dp_k}{dt} = \frac{G_{\text{пара}} - G_{\text{кон}}}{V_B}, \quad (12)$$

где V_B – объем циркулирующего в камере воздуха;

$G_{\text{пара}}$ – расход пара из испарителя;

$G_{\text{кон}}$ – расход пара на конденсацию на змеевиках охлаждения, осушения, а также стенках камеры.

Расход пара из испарителя можно описать следующим выражением [8]:

$$G_{\text{пара}} = \frac{Q_{\text{воды}}}{r}, \quad (13)$$

где r – теплота парообразования воды;

$Q_{\text{воды}}$ – количества теплоты, подводимое к воде в испарителе.

Следует учитывать, что выражение (13) справедливо при температуре воды, равной температуре кипения (в случае нормального атмосферного давления 100 °С).

При температурах воды ниже температуры кипения испарение с поверхности воды происходит, однако энергии паров недостаточно для преодоления высоты между испарителем и камерой. Данный режим работы влажностного канала климатической камеры можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dT_{ти}^0}{dt} = \frac{P_{ти} - \alpha_{ти} S_{ти} (T_{ти}^0 - T_{ж}^0)}{c_{ти} m_{ти}}, \\ \frac{dT_{ж}^0}{dt} = \frac{\alpha_{ти} S_{ти} (T_{ти}^0 - T_{ж}^0) - K_{си} (T_{ж}^0 - T_{ос}^0)}{c_{ж} m_{ж}}, \\ \frac{d\rho_k}{dt} = -\frac{G_{кон}}{V_B}, \end{cases} \quad (14)$$

где $T_{ти}^0$ – температура ТЭНа испарителя;

$T_{ж}^0$ – температура жидкости (воды);

$P_{ти}$ – мощность ТЭНа испарителя;

$c_{ж}$, $c_{ти}$ – теплоемкости жидкости и материала

ТЭНа испарителя;

$m_{ж}$, $m_{ти}$ – масса жидкости и ТЭНа испарителя;

$\alpha_{ти}$ – коэффициент теплоотдачи поверхности

ТЭНа испарителя;

$S_{ти}$ – площадь поверхности ТЭНа испарителя;

$K_{си}$ – коэффициент теплопередачи через стенки

испарителя.

При достижении температуры кипения, подводимая к воде энергия тратится уже не на увеличение ее температуры, а на парообразование, т.е. $T_{ж}^0 = \text{const}$ и $G_{пара} > 0$, что отражается в следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dT_{ти}^0}{dt} = \frac{P_{ти} - \alpha_{ти}^k S_{ти} (T_{ти}^0 - T_{ж}^0)}{c_{ти} m_{ти}}, \\ \frac{d\rho_k}{dt} = \frac{\alpha_{ти}^k S_{ти} (T_{ти}^0 - T_{ж}^0) - K_{си} (T_{ж}^0 - T_{ос}^0) - G_{кон}}{\Gamma V_B}, \end{cases} \quad (15)$$

где $\alpha_{ти}^k$ – коэффициент теплоотдачи поверхности ТЭНа испарителя в режиме кипения.

Предварительная оценка коэффициентов в системах (14) – (15) производится аналогично оценке коэффициентов в системе, описывающей температурный канал камеры (2). При этом используются справочные данные и техническая документация на конкретную камеру, а также зависимости (3), (5) – (9).

Расход пара на конденсацию $G_{кон}$ зависит от скорости движения воздуха в камере, площади, материала и температур поверхностей ИЭ и стенок внутри камеры, а также многих других факторов. Эту зависимость довольно сложно описать исходя из теоретических предпосылок, однако можно получить опытным путем, аппроксимировав экспериментальные данные функцией, зависящей только от разности между текущими температурами поверхностей и температурой росы, соответствующей текущей абсолютной влажности в камере, так как другие параметры можно считать неизменными в процессе работы:

$$G_{кон} = f(\Delta t_1^0, \Delta t_2^0, \dots, \Delta t_n^0), \quad (16)$$

где $\Delta t_i^0 = t_i^0 - t_p^0(\rho_k)$ – разность между температурой i -й поверхности внутри камеры и температурой росы, соответствующей текущей абсолютной влажности в камере.

В качестве переменных состояния выберем температуры ТЭНа и воды в испарителе, а также абсолютную влажность воздуха в камере: $x_1^И = T_{ти}^0$, $x_2^И = T_{ж}^0$, $x_3^И = \rho_k$. Для упрощения выражений (14) – (15) введем следующие замены:

$$A_1^И = \alpha_{ти} S_{ти}, \quad A_1^{Ик} = \alpha_{ти}^k S_{ти}, \quad A_2^И = K_{си},$$

$$B_1^И = c_{ти} m_{ти}, \quad B_2^И = c_{ж} m_{ж}, \quad B_3^И = V_B.$$

После введенных замен и преобразований систем (14) – (15) получаем следующие системы уравнений в пространстве состояний, описывающие номинальную работу влажностного канала в различных режимах работы испарителя:

$$\begin{cases} \dot{x}_1^И = -\frac{A_1^И}{B_1^И} x_1^И + \frac{A_1^И}{B_1^И} x_2^И + \frac{P_{ти}}{B_1^И}; \\ \dot{x}_2^И = \frac{A_1^И}{B_2^И} x_1^И - \frac{A_1^И + A_2^И}{B_2^И} x_2^И + \frac{A_2^И}{B_2^И} T_{ос}^0; \\ \dot{x}_3^И = -\frac{G_{кон}}{B_3^И}, \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1^И = -\frac{A_1^{Ик}}{B_1^И} x_1^И + \frac{A_1^{Ик}}{B_1^И} x_2^И + \frac{P_{ти}}{B_1^И}; \\ \dot{x}_3^И = \frac{A_1^{Ик}}{rB_3^И} x_1^И - \frac{A_1^{Ик} + A_2^И}{rB_3^И} x_2^И + \frac{A_2^И}{rB_3^И} T_{ос}^0 - \frac{G_{кон}}{B_3^И}. \end{cases} \quad (18)$$

Для построения ММ функционирования климатической камеры в неработоспособном состоянии, необходимо исходя из опыта эксплуатации подобных функциональных элементов, мнений экспертов и натурных испытаний сформировать множество физических видов отказов $D_{кк} = \{d_i\}$ для системы [3]. Например, для рассматриваемой кли-

матической камеры такими отказами могут быть: d_1 – изменение скорости вращения смешивающего вентилятора; d_2 – разгерметизация камеры; d_3 – перегорание нагревательного элемента; d_4 – отсутствие силового напряжения питания; d_5 – выход из строя управляющих клапанов системы охлаждения; d_6 – выход из строя компрессора; d_7 – отсутствие воды в испарителе; d_8 – изменение параметров датчика температуры; d_9 – отказ датчика влажности и т.д. [9].

Далее производится параметризация видов отказов и формируется множество классов отказов $A_{\text{кк}} = \{a_i\}$ по признаку наличия общих свойств [3]. Например: a_1 – изменение коэффициента теплоотдачи ТЕНа $\alpha_{\text{ТЭН}}$, соответствует вышеперечисленным видам отказов d_1 и d_3 ; a_2 – отсутствие хладогена в змеевиках охладителя ($\alpha_{\text{охл}}^{\text{внутр}} = 0$) может быть вызвано отказами d_4 , d_5 и d_6 и т.д.

Сформировав классы отказов, можно введя в системах (4), (17) и (18) соответствующие изменения коэффициентов, вызванные отказами элементов, перейти к описанию работы климатической камеры в неработоспособном состоянии:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = -\frac{\tilde{A}_1}{B_1} \tilde{x}_1 + \frac{\tilde{A}_1}{B_1} \tilde{x}_4 + \frac{\tilde{P}_{\text{ТЭН}}}{B_1}; \\ \dot{\tilde{x}}_2 = -\frac{\tilde{A}_2 + \tilde{A}_3}{B_2} \tilde{x}_2 + \frac{\tilde{A}_2}{B_2} \tilde{x}_4 + \frac{\tilde{A}_3}{B_2} T_{\text{хлад1}}^0; \\ \dot{\tilde{x}}_3 = -\frac{\tilde{A}_4 + \tilde{A}_5}{B_3} \tilde{x}_3 + \frac{\tilde{A}_4}{B_3} \tilde{x}_4 + \frac{\tilde{A}_5}{B_3} T_{\text{хлад2}}^0; \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \frac{\tilde{A}_1}{B_4} \tilde{x}_1 + \frac{\tilde{A}_2}{B_4} \tilde{x}_2 + \frac{\tilde{A}_4}{B_4} \tilde{x}_3 - \frac{\tilde{K}_A}{B_4} \tilde{x}_4 + \frac{\tilde{A}_6}{B_4} T_{\text{ос}}^0, \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1^{\text{и}} = -\frac{\tilde{A}_1^{\text{и}}}{B_1^{\text{и}}} x_1^{\text{и}} + \frac{\tilde{A}_1^{\text{и}}}{B_1^{\text{и}}} x_2^{\text{и}} + \frac{\tilde{P}_{\text{ТИ}}}{B_1^{\text{и}}}; \\ \dot{\tilde{x}}_2^{\text{и}} = \frac{\tilde{A}_1^{\text{и}}}{B_2^{\text{и}}} x_1^{\text{и}} - \frac{\tilde{A}_1^{\text{и}} + A_2^{\text{и}}}{B_2^{\text{и}}} x_2^{\text{и}} + \frac{A_2^{\text{и}}}{B_2^{\text{и}}} T_{\text{ос}}^0; \\ \dot{\tilde{x}}_3^{\text{и}} = -\frac{\tilde{G}_{\text{кон}}}{B_3^{\text{и}}}, \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1^{\text{и}} = -\frac{\tilde{A}_1^{\text{ки}}}{B_1^{\text{и}}} x_1^{\text{и}} + \frac{\tilde{A}_1^{\text{ки}}}{B_1^{\text{и}}} x_2^{\text{и}} + \frac{\tilde{P}_{\text{ТИ}}}{B_1^{\text{и}}}; \\ \dot{\tilde{x}}_3^{\text{и}} = \frac{\tilde{A}_1^{\text{ки}}}{rB_3^{\text{и}}} x_1^{\text{и}} - \frac{\tilde{A}_1^{\text{ки}} + A_2^{\text{и}}}{rB_3^{\text{и}}} x_2^{\text{и}} + \frac{A_2^{\text{и}}}{rB_3^{\text{и}}} T_{\text{ос}}^0 - \frac{\tilde{G}_{\text{кон}}}{B_3^{\text{и}}}, \end{cases} \quad (21)$$

где $\tilde{A}_i = A_i + \Delta A_i$ – значения коэффициентов при различных отказах;

$\tilde{P}_{\text{ТЭН}} = P_{\text{ТЭН}} + \Delta P_{\text{ТЭН}}$, $\tilde{P}_{\text{ТИ}} = 0$ – значения мощностей нагревателей при отказах d_3 и d_4 ;

\tilde{x}_i , $\tilde{x}_i^{\text{и}}$ – переменные состояния, характеризующие работу каналов температуры и влажности при наличии отказов.

Последовательно вводя в модели (19) – (21) изменения коэффициентов ΔA_i и $\Delta P_{\text{ТЭН}}$, соответствующие отказам из множества $D_{\text{кк}} = \{d_i\}$, определяется их влияние на поведения объекта, а также отклонения от номинального режима функционирования, а затем на основании полученных данных синтезируются или корректируются алгоритмы диагностирования.

Заключение

Представленные в статье модели функционирования климатической камеры для каналов температуры (4), (19) и влажности (10), (11), (17), (18), (20), (21) позволяют исследовать поведение объекта в номинальном режиме функционирования, а также в аварийных режимах, вызванных отказами функциональных элементов. В выражениях (11) и (16) учтено влияние температуры воздуха и исполнительных элементов на относительную влажность в камере, что более реально отражает происходящие в системе процессы и позволяет получить дополнительную информационную избыточность, используемую в системах диагностирования технического состояния объекта.

Полученные модели номинального функционирования могут быть использованы для синтеза систем управления и диагностирования подобных объектов, а их представление в пространстве состояний позволяет проанализировать их современными компьютерными пакетами численного моделирования.

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. Кулик А.С. Основы моделирования систем: учеб. пособие / А.С. Кулик – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1998. – 90 с.
5. Моисеев А.А. Имитационные модели некоторых термодинамических процессов / А.А. Моисеев

ев // Приборы и системы. Управление, контроль и диагностика. – 2005. – №11. – С. 20-24.

6. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: пер. с англ. / Х. Уонг. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

7. Кулік А.С. Математична модель номінального режиму функціонування температурної камери / А.С. Кулік, В.В. Нарожний, О.М. Таран // Вісник Харківського національного технічного університе-

ту сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2007. – Вип. 57, т. 2. – С. 252-256.

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

9. Кулік А.С. Побудова моделі неработоспособного состояния температурной камеры с использованием сигнально-параметрического подхода / А.С. Кулік, В.В. Нарожний, А.Н. Таран // Системы обработки информации. – 2007. – Вып. 9(67). – С. 55-58.

Поступила в редакцию 21.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИПРОБУВАЛЬНОЇ КЛІМАТИЧНОЇ КАМЕРИ ТИПУ ТЕПЛО-ХОЛОД-ВОЛОГА

А.С. Кулік, В.В. Нарожний, О.М. Таран

У статті представлено математичні моделі каналів температури та вологості випробувальної кліматичної камери типу тепло-холод-волога. Дані моделі описують роботу камери в номінальному режимі функціонування і аварійному режимі при відмові елементів системи. В процесі моделювання було враховано взаємний вплив каналів температури та вологості, що дозволило більш адекватно відобразити процеси, що відбуваються в камері, і отримати додаткову інформаційну надмірність, використовувану в задачах діагностування технічного стану об'єкту. Представлені моделі можуть бути використані як для синтезу системи управління, так і для діагностування технічного стану кліматичної камери, а також схожих систем створення штучного мікроклімату.

Ключові слова: діагностування, математична модель, температура, вологість, теплообмін, номінальний режим, відмова.

CONSTRUCTION OF CLIMATIC CHAMBER MATHEMATICAL MODELS FOR TEMPERATURE-HUMIDITY TEST

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

The mathematical models of temperature and humidity channels for test climatic chamber of heat-cold-humidity type are represented in the article. These models describe work of chamber in the nominal operation mode and emergency state at the system elements fault. In the process of design the interference between temperature and humidity channel was taken into account, that allowed more adequately reflect processes what is going on in a chamber and to receives the additional information redundancy used in the tasks of the object technical state diagnosing. The represented models can be used both for the synthesis of the control system and for diagnosing of the technical state of climatic chamber and also similar systems of artificial microclimate creation.

Key words: diagnosing, mathematical model, temperature, humidity, heat exchange, nominal rating,

Кулік Анатолій Степанович – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрою «Системи управління летальними апаратами» Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: kulik@d3.khai.edu.

Нарожний Віталій Васильєвич – канд. техн. наук, доцент кафедри «Системи управління летальними апаратами» Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: kub@babylon.kharkov.com.

Таран Александр Николаевич – аспірант кафедри «Системи управління летальними апаратами» Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна. e-mail: taran_a_n@mail.ru.