

Дискретная модель кондиционируемого помещения как объекта САУ по интегральному показателю комфортности

Канд. техн. наук В.В. ВЫЧУЖАНИН
Одесский национальный морской университет

Comfort microclimate of residential and service facilities of vessels is determined by the integral index – the resulting temperature (RT). The existing systems of management of the systems of comfort air conditioning don't control all the parameters, entering the RT, therefore, the microclimate in the conditioned facilities is not sufficiently comfort. A mathematical model of the conditioned facilities as a multiparametric object of regulation by the RT is offered. The obtained model can be realized in a numerical system of the automatic control of an air conditioning system.

Согласно действующим нормативным положениям [11] параметры микроклимата в жилых и служебных помещениях судов определяются для летнего и зимнего периодов года интегральным показателем комфортности – обоснованным значением результирующей температуры (РТ). Известно, что РТ комплексно сочетает четыре параметра, обуславливающих влияние воздушной среды в помещении на теплообменные процессы человека. К этим параметрам относятся: температура воздуха T_y ; средняя радиационная температура окружающих человека поверхностей (стены, оборудование и т.д.) T_p ; относительная влажность воздуха ϕ_y ; скорость движения воздуха ω_y .

Комплексный учет названных параметров воздушной среды в работе системы комфортного кондиционирования воздуха (СККВ) позволяет расширить диапазон допустимой температуры воздуха в помещении. Это, в свою очередь, может принципиально изменить условия функционирования СККВ. Так как в помещении постоянно совершается переход воздуха из одного состояния в другое, для поддержания заданных значений РТ в обслуживаемое помещение должен подаваться приточный воздух с параметрами, отличными от параметров воздуха внутри помещения. Перемешиваясь с внутренним воздухом и вытесняя его, приточный воздух ассимилирует избыточное тепло и влагу или подогревает и увлажняет воздух помещения. Оптимальная норма РТ в соответствии с [11] находится в пределах 15,9 – 25,7 РТ для зимнего периода и 17,8 – 25,7 РТ для летнего. В целом оптимальная норма РТ определяет уровень комфорта для морских судов при плавании в различных географических условиях с учетом категории кают.

Проведенные рейсовые исследования по субъективной оценке комфортности микроклимата на су-

дах [3, 4, 7] показывают, что, несмотря на повсеместное повышение комфортности воздушной сферы, общее число неудовлетворенных температурой, относительной влажностью, а также подвижностью воздуха в каютах летом составляет 57,3 %, а зимой 53,5 %. Такие результаты объясняются необеспеченностью в кондиционируемых помещениях РТ в соответствии с ее нормируемыми значениями. Одно из направлений по улучшению показателей микроклимата в помещениях заключается в использовании современных систем автоматического управления (САУ) СККВ. Однако в эксплуатируемых в настоящее время САУ оценка климатических условий в помещениях некорректна, так как учитывают только два контролируемых параметра воздуха в помещении: температуру и относительную влажность. Этой информации недостаточно для управления СККВ по РТ воздуха. В результате из-за невозможности оценить комплексный показатель комфортности воздушной среды в помещении с помощью существующих САУ СККВ обеспечивается не только идея использования управления, но и сам метод и нормы оценки воздушной среды в обитаемых кондиционируемых помещениях судов по РТ. Таким образом, актуальным становится решение задачи по созданию САУ СККВ для поддержания комфортных условий микроклимата воздушной среды в помещениях по нормируемым значениям РТ воздуха. При этом проектируемая САУ должна целенаправленно изменять параметры микроклимата, приводя весь комплекс контролируемых параметров (T_y , T_p , ω_y и ϕ_y) к сочетанию значений, обеспечивающему комфортность воздушной сферы в помещении.

Решая задачу, связанную с разработкой САУ СККВ по РТ воздуха, необходимо предварительно получить динамическую модель помещения (ста-

тические и динамические характеристики) как многопараметрического объекта регулирования по РТ. Модель необходима при выполнении анализа САУ, а также для выявления максимального числа внутренних связей объекта между контролируемыми параметрами T_y , T_p , ω_y и ϕ_y , но не предназначена для исследования, например, воздушного режима помещения.

Для описания статических и динамических характеристик кондиционируемого помещения обычно используют уравнения тепловлажностного баланса средних значений используемых входных и выходных параметров помещения [1, 9, 10, 12, 13]. Динамические характеристики кондиционируемого помещения описываются с помощью дифференциальных уравнений с допущением, что по всему объему помещения происходит достаточно хорошее перемешивание воздуха, а само помещение рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами. Подобный подход оправдан стремлением привести математическую модель рассматриваемого звена САУ к виду, пригодному для дальнейших исследований СККВ в целом. Однако известные динамические модели обладают рядом исходных упрощений. В частности, они не учитывают влияния на РТ радиационной составляющей теплопритоков, подвижности воздуха и способа воздушораспределения. То есть комплексное математическое описание кондиционируемого помещения как многопараметрического объекта регулирования по РТ отсутствует.

Для решения задачи по созданию динамической модели помещения как объекта САУ по РТ были проведены исследования [2], в результате которых установлено, что аналоговая динамическая модель кондиционируемого помещения судна с сосредоточенными параметрами описывается совокупностью линейных дифференциальных уравнений в приращениях параметров, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta T_{огр.н}(P) &= W_{01}[W_{011}(P)\Delta T_n(P) + \\ &+ W_{012}(P)\Delta q_n(P) + W_{013}(P)\Delta T_y(P)]; \\ \Delta T_{огр.в}(P) &= W_{02}([W_{021}(P)\Delta T_k(P) + W_{022}(P)\Delta T_y(P)]); \\ \Delta T_y(P) &= W_{T_1}(P)\{\Delta T_{\Pi}(P) - [W_{T_2}(P) + W_{T_3}(P) - \\ &- W_{T_4}(P) \mp W_{T_5}(P)]\Delta T_y(P) + [W_{T_6}(P) + W_{T_7}(P)] \times \\ &\times \Delta q_n(P) + W_{T_8}(P)\Delta T_n(P) + W_{T_9}(P)\Delta q_{ял}(P) + \\ &+ W_{T_{10}}(P)\Delta N_{осв}(P) + W_{T_{11}}(P)\Delta Q_{обор}(P) + \\ &+ W_{T_{12}}(P)\Delta g_{л}(P) + W_{T_{13}}(P)\Delta \varphi_y(P) - \\ &- W_{T_{14}}(P)\Delta \varphi_k(P) \pm W_{T_{15}}(P)\Delta T_k(P) - \\ &- W_{T_{16}}(P)\Delta G_{\Pi}(P) + W_{T_{17}}(P)\Delta T_{огр.н}(P) + \\ &+ W_{T_{18}}(P)\Delta T_{огр.в}(P)\}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_y(P) &= W_{B_1}(P)[\Delta \varphi_{\Pi} W_{B_2}(P) + \\ &+ \Delta g_{л}(P) W_{B_3}(P) + \Delta G_{\Pi}(P) W_{B_4}(P) \mp \\ &\mp \Delta \varphi_k(P) W_{B_5}(P) \pm \\ &\pm \Delta \varphi_y(P) W_{B_6}(P) - \Delta T_y(P) W_{B_7}(P)], \end{aligned}$$

где $\Delta T_n(P)$, $\Delta T_{\Pi}(P)$, $\Delta T_k(P)$ — приращения температуры наружного, приточного воздуха и воздуха в коридоре;

$\Delta T_{огр.н}(P)$, $\Delta T_{огр.в}(P)$ — приращения температуры в ограждающих поверхностях со стороны борта и со стороны переборок;

$\Delta \varphi_{\Pi}(P)$, $\Delta \varphi_k(P)$ — приращения относительной влажности приточного воздуха и воздуха в коридоре;

$\Delta q_n(P)$ — приращения напряжения солнечной радиации;

$\Delta q_{ял}(P)$, $\Delta g_{л}(P)$ — приращения удельных тепловыделений и влаговыделений одним человеком;

$\Delta N_{осв}(P)$, $\Delta Q_{обор}(P)$ — приращения теплопритоков от освещения и оборудования;

$\Delta G_{\Pi}(P)$ — приращение расхода приточного воздуха;

$W(P)$ — непрерывные передаточные функции звеньев прямых каналов и перекрестных связей управляемых и наблюдаемых частей объекта, параметры которых приведены в [2].

При построении модели (1) помещения использовался математический язык классической теории линейных систем, а именно аппарат передаточных функций, а также аппарат преобразования Лапласа. Следует отметить, что описание динамических свойств объектов в передаточных функциях определяет управляемую и наблюдаемую части объекта, причем входные и выходные координаты объекта — конкретные физические величины. Структурная схема динамической модели кондиционируемого помещения судна как многосвязного объекта регулирования по РТ, соответствующая системе уравнений (1), приведена на рис. 1.

В соответствии с динамической моделью помещения (1) ее выходными переменными в приращениях являются четыре параметра, определяющих РТ: $T_{огр.н}(P)$; $T_{огр.в}(P)$; $T_y(P)$; $\phi_y(P)$. Входные параметры модели в приращениях: $\Delta T_n(P)$, $\Delta T_k(P)$, $\Delta T_{\Pi}(P)$, $\Delta q_n(P)$, $\Delta q_{ял}(P)$, $\Delta g_{л}(P)$, $\Delta N_{осв}(P)$, $\Delta Q_{обор}(P)$, $\Delta G_{\Pi}(P)$, $\Delta \varphi_k(P)$, $\Delta \varphi_{\Pi}(P)$. Входные и выходные параметры модели связаны прямыми (сепаратными) каналами передачи возмущающих входных воздействий на выходные параметры модели. Структурная схема модели вследствие ее физических особенностей содержит (кроме прямых каналов передачи входных воздействий на объект САУ) естественные перекрестные связи (прямые и обратные) между отдельными каналами объекта.

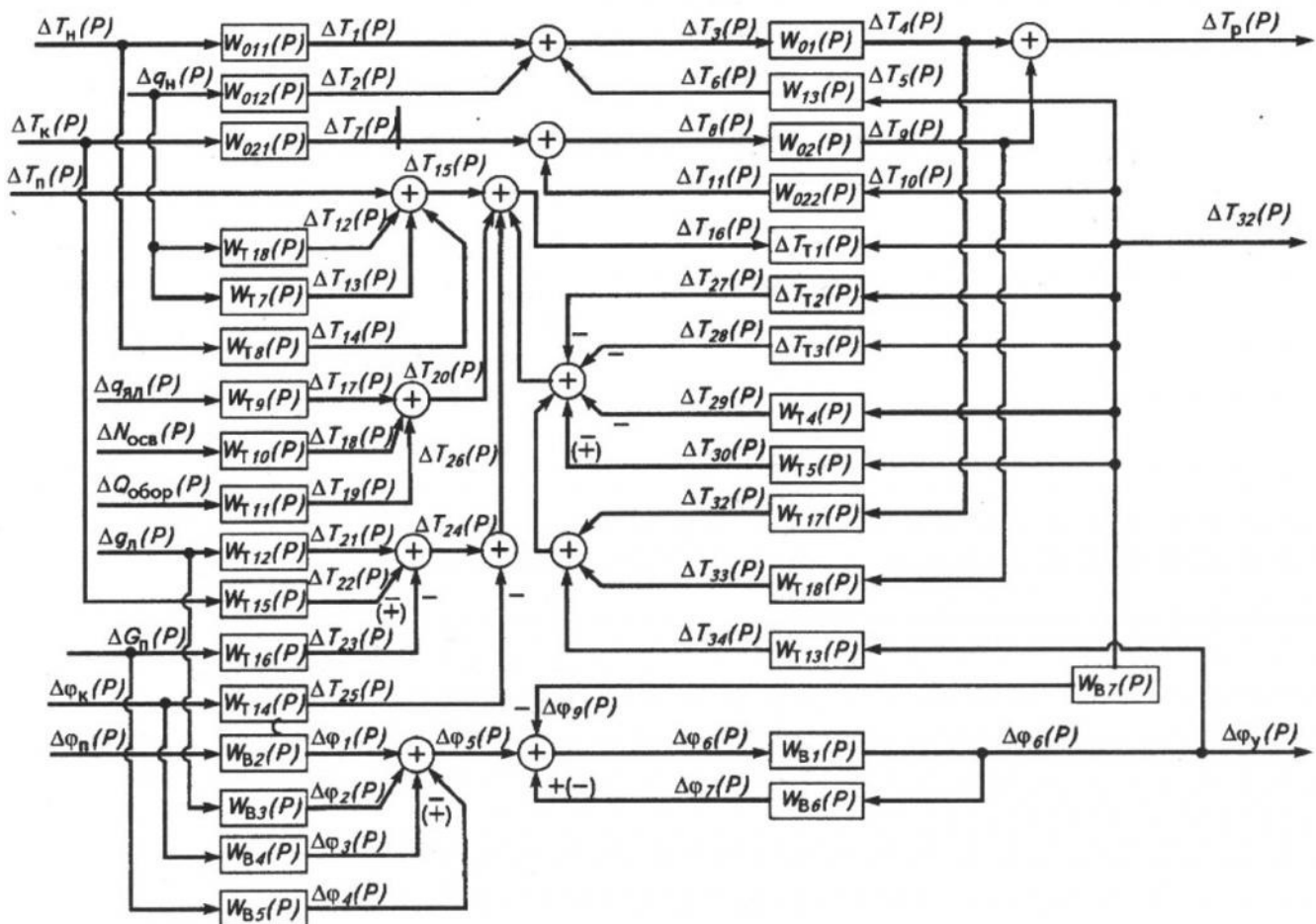


Рис. 1. Структурная схема динамической модели помещения

Как следует из структурной схемы (см. рис. 1), прямые перекрестные связи осуществляются через передаточные функции $W_{T6}(P)$, $W_{T7}(P)$, $W_{T8}(P)$, $W_{T15}(P)$, $W_{B3}(P)$, $W_{B4}(P)$, $W_{B5}(P)$. Обратные перекрестные связи осуществляются через передаточные функции $W_{013}(P)$, $W_{022}(P)$, $W_{T13}(P)$, $W_{T17}(P)$, $W_{T18}(P)$, $W_{B7}(P)$. Пренебрежение выявленными перекрестными связями взаимного влияния прямых каналов может значительно ухудшить функционирование разрабатываемой САУ и даже привести к потере ее работоспособности. Следовательно, кондиционируемое помещение как объект САУ по РТ можно отнести к классу линейных многосвязных систем. Теория подобных систем получила развитие в работах [8, 14, 15]. Однако до настоящего времени данные исследования ограниченно использовались при описаниях динамических моделей кондиционируемых помещений.

Полученная динамическая модель помещения как многосвязного объекта (1) может быть реализована в аналоговой или цифровой САУ. При разработке электронных, пневматических или гидравлических аналоговых САУ проектировщики по техническим или экономическим соображениям вынуждены пользоваться достаточно узким набором элементов, функционирующих как генераторы, дифференциаторы или пропорциональные усилители. В силу этого при синтезе аналоговых САУ при-

ходится сталкиваться с весьма серьезными ограничениями по точности и надежности таких систем управления. Иначе обстоит дело при разработке цифровой САУ. Гибкость программируемых средств САУ существенно расширяет возможности реализации достаточно сложных моделей объектов. Это создает предпосылки для практического применения новейших методов современной теории управления, но одновременно ставит перед проектировщиками вопрос: какой управляющий алгоритм наиболее эффективен при решении конкретной прикладной задачи? Ответ на этот вопрос возможен лишь в том случае, когда имеется достаточно полное описание объекта в форме его дискретной математической модели, учитывающее его линейность или нелинейность, а также структуру связей в многосвязном объекте. Теории цифровых многосвязных систем посвящены работы [5, 6], однако при анализе и синтезе САУ установками кондиционирования воздуха соответствующие методы проектирования цифровых САУ еще не нашли широкого применения.

Приступая к описанию объекта в форме его дискретной математической модели, необходимо учитывать, что в противоположность непрерывным сигналам, которые описываются непрерывными функциями времени, дискретные сигналы принимают определенные значения в дис-

кретные моменты времени. Кроме того, рассматривая помещение как многосвязный объект САУ по РТ, полезно переходить от обычной развернутой структурной схемы (см. рис.1) к более компактной матричной форме ее представления. Матричное звено такой схемы характеризует передачу воздействий в линейной многосвязной динамической системе и отражает зависимость каждого выхода системы от каждого из ее входов. Дискретная модель кондиционируемого помещения в матричной Z -форме в общем виде может быть представлена как

$$\bar{Y}A(Z) = \bar{X}, \quad (2)$$

где $\bar{X}$ — матрица-столбец совокупности входных величин, обозначенных через x ;

$\bar{Y}$ — матрица-столбец выходных величин, обозначенных через y ($y_1 = \Delta T_{\text{огр.н}}; y_2 = \Delta T_{\text{огр.в}}; y_3 = \Delta T_y; y_4 = \Delta \phi_y$).

Матрицы-столбцы $\bar{X}$ и $\bar{Y}$ имеют вид

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}, \quad \bar{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матричное звено $A(Z)$, входящее в (2), состоит из элементов, каждый из которых определяется передаточными функциями объекта по каналам его прямых и перекрестных связей. В общем виде это матричное звено можно представить в следующем виде:

$$A(Z) = \|a_{ij}\|. \quad (4)$$

Для описания матричного звена $A(Z)$ использовалась система уравнений (1) аналоговой модели помещения, разрешенных относительно выходных его координат. Каждое уравнение устанавливает зависимость одной координаты от входных и перекрестных воздействий и не содержит иных переменных. В результате число полученных уравнений равно числу выходных переменных. Исходная динамическая модель объекта (1), представляющая линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами, после приведения к системе уравнений, описывающих динамику многосвязного объекта, имеет вид

$$\begin{aligned} y_1 + a_{13}y_3 &= x_1; \\ y_2 + a_{23}y_3 &= x_2; \\ a_{31}y_1 + a_{32}y_2 + a_{33}y_3 + a_{34}y_4 &= x_3; \\ a_{43}y_3 + a_{44}y_4 &= x_4. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом системы уравнений (5) для рассматриваемого объекта САУ в матрице $A(Z)$ элементы a_{ij}

принимают следующие значения:

$$A(Z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_{13} & 0 \\ 0 & 1 & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Передаточные функции $W(Z)$ дискретной модели объекта были получены на основе использования Z -преобразования передаточных функций в исходной аналоговой модели (1). При этом предполагалось, что входные и выходные сигналы квантуются синхронно с тактом квантования T_0 , выбор величины которого ограничен требованиями [5], исходя из соотношения

$$T_0/T_{\max} = 0,02,$$

где $T_{\max}$ — наибольшая постоянная времени объекта управления ($T_{\max}$ определено экспериментально и равно 3081,66 с).

Используемый метод Z -преобразования основывается на тех же предположениях, что и преобразование Лапласа. При этом учитывается, что преобразуемые непрерывные передаточные функции $W_{01}(P), W_{02}(P), W_{T1}(P), W_{B1}(P)$ согласно результатам исследований [2] представляют собой апериодические звенья первого порядка. Остальные передаточные функции модели (1) — усилительные звенья. Дискретные передаточные функции апериодических звеньев первого порядка определяются по известной формуле

$$W(Z) = \frac{b_0}{1 + a_1 Z^{-1}}, \quad (7)$$

где $b_0 = K/T$;

$$a_1 = -e^{-aT_0};$$

$$a = 1/T;$$

K, T — соответственно коэффициент усиления и постоянная времени непрерывной передаточной функции.

В соответствии с системой уравнений (5) выходные величины матрицы $\bar{Y}$ определяются как

$$y_1 = x_1 - a_{13}y_3;$$

$$y_2 = x_2 - a_{23}y_3;$$

$$y_3 = \frac{x_3 - a_{31}x_1 - a_{32}x_2 - \frac{a_{34}}{a_{44}}x_4}{a_{33} - a_{13}a_{31} - a_{23}a_{32} - \frac{a_{34}a_{43}}{a_{44}}}; \quad (8)$$

$$y_4 = \frac{1}{a_{44}}(x_4 - a_{43}y_3).$$

Совокупности входных величин $x_1 \dots x_4$ матрицы X определяются с учетом возмущающих

входных параметров и соответствующих передаточных функций, воздействующих на объект

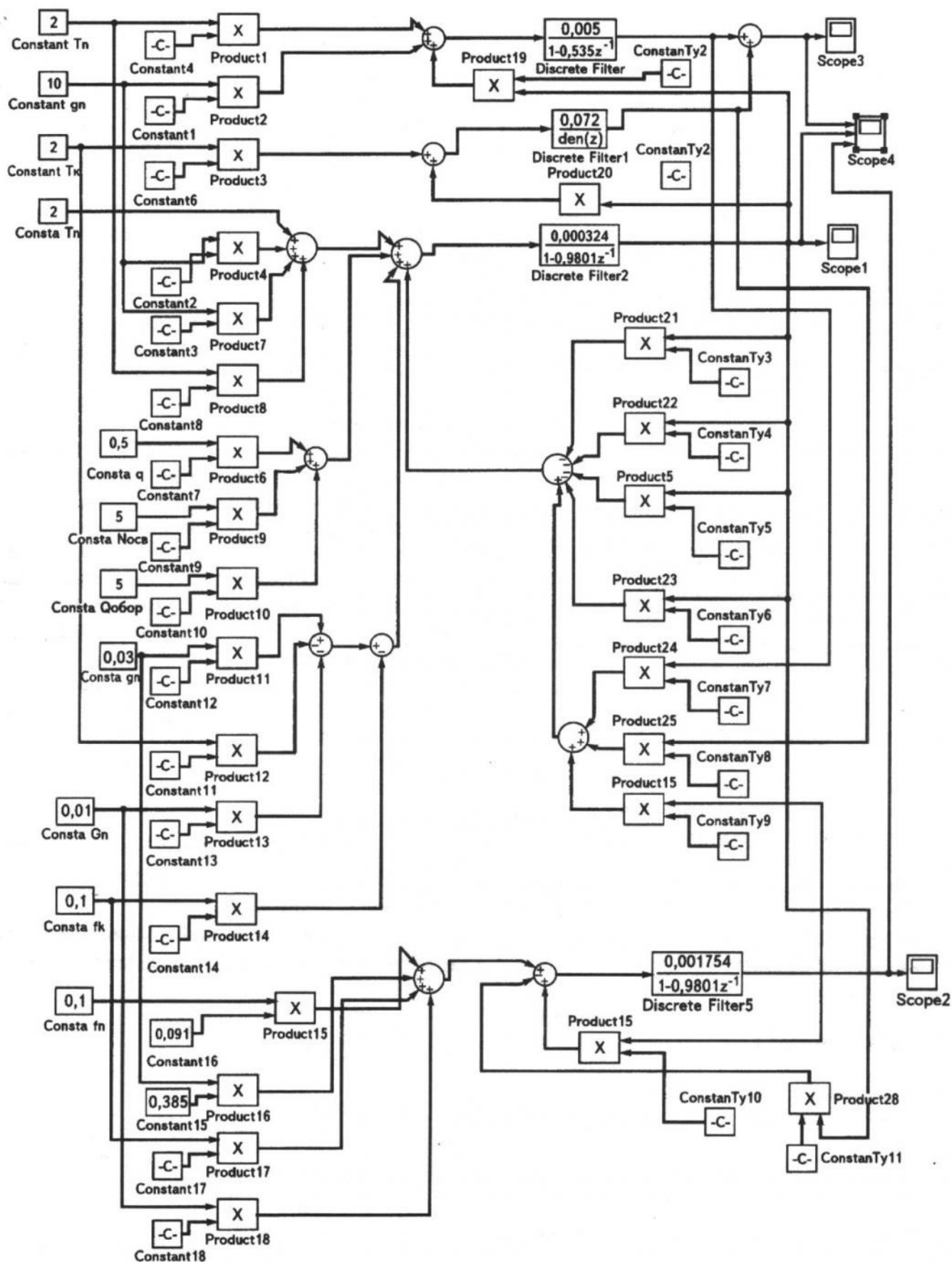
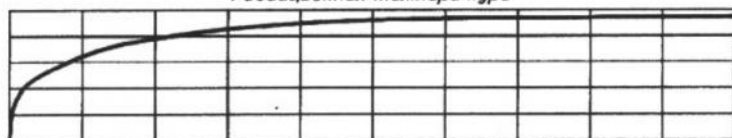
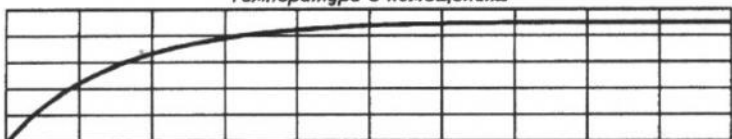


Рис.2. Структурная дискретная схема модели помещения, исследуемая в MATLAB 6.5- Simulink

Радиационная температура



Температура в помещениях



Относительная влажность в помещении

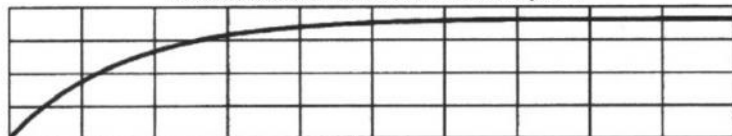


Рис.3. Результаты исследований дискретной модели помещения в MATLAB 6.5- Simulink

управления, по формулам:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= W_{01}(Z)[W_{011}(Z)\Delta T_H(Z) + W_{012}(Z)\Delta q_H(Z)]; \\
 x_2 &= W_{02}(Z)W_{021}(Z)\Delta T_K(Z); \\
 x_3 &= W_{T1}(Z)\{\Delta T_{\Pi}(Z) + [W_{T6}(Z) + \\
 &+ W_{T7}(Z)]\Delta q_H(Z) + W_{T8}(Z)\Delta T_H(Z) + \\
 &+ W_{T9}(Z)\Delta q_{ЯЛ}(Z) + W_{T10}(Z)\Delta N_{ОСВ}(Z) + \\
 &+ W_{T11}(Z)\Delta Q_{ОБОР}(Z) + W_{T12}(Z)\Delta q_{Л}(Z) - \\
 &- W_{T14}(Z)\Delta \varphi_K(Z) \pm W_{T15}(Z)\Delta T_K(Z) - \\
 &- W_{T16}(Z)\Delta G_{\Pi}(Z)\}; \\
 x_4 &= W_{B1}(Z)[W_{B2}(Z)\Delta \varphi_{\Pi}(Z) + \\
 &+ W_{B3}(Z)\Delta q_{Л}(Z) + W_{B4}(Z)\Delta G_{\Pi}(Z) \mp \\
 &\mp W_{B5}(Z)\Delta \varphi_K(Z)].
 \end{aligned} \quad (9)$$

Элементы a_{ij} матричного звена $A(Z)$ определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 a_{13} &= -W_{01}(Z)W_{013}(Z); \\
 a_{23} &= -W_{02}(Z)W_{022}(Z); \\
 a_{31} &= -W_{T1}(Z)W_{T17}(Z); \\
 a_{32} &= -W_{T1}(Z)W_{T18}(Z); \\
 a_{33} &= 1 + W_{T1}(Z)[W_{T2}(Z) + \\
 &+ W_{T3}(Z) - W_{T4}(Z) \mp W_{T5}(Z)]; \\
 a_{34} &= -W_{T1}(Z)W_{T13}(Z); \\
 a_{43} &= W_{B1}(Z)W_{B7}(Z); \\
 a_{44} &= 1 \mp W_{B1}(Z)W_{B6}(Z).
 \end{aligned} \quad (10)$$

Совокупность уравнений (2) – (10) определяет дискретную модель кондиционируемого помещения судна как объекта регулирования по РТ. На

основе полученных результатов была разработана приведенная на рис.2 структурная дискретная схема модели помещения, предназначенная для исследования в MATLAB 6.5- Simulink.

Результаты исследований дискретной модели помещения в MATLAB 6.5-Simulink представлены на рис.3 и отражают (соответственно сверху вниз) характер динамики средней радиационной температуры, температуры и относительной влажности воздуха в помещении при ступенчатом характере возмущающих входных воздействий. В процессе моделирования учитывалось, что скорость движения воздуха в помещении равна 0,2 м/с и он поступает в помещение из воздухораспределителя отрывными струями.

Полученная дискретная многосвязная динамическая модель кондиционируемого помещения может быть использована при разработке цифровой САУ с различным числом координат. Она легко встраивается в структуру цифровой САУ, реализуемой на основе широко доступной микроконтроллерной элементной базы.

Список литературы

1. Архипов Г.В., Архипов В.Г. Автоматизированные установки кондиционирования воздуха. – М.: Энергия, 1975.
2. Вычужанин В.В. Математическая модель кондиционируемого помещения как объекта САУ по РТ // Вісник Одеського національного морського університету. Збірник наукових прац. Випуск 19, 2006
3. Демидова Т.В., Пейadlo Э.М., Антошина Е.В. Факторы условий труда и их влияние на заболеваемость моряков // Вісник морської медицини. 2001. № 1 (13).
4. Жиакко М. Сравнительный анализ двух методик оценки климатического комфорта на примере систем климатизации морского круизного лайнера // АВОК. 2005. № 1.
5. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984
6. Катковник В.Я., Полуэктов Р.А. Многомерные дискретные системы управления. – М.: Наука, 1966
7. Крицкий И.И., Вычужанин В.В. Исследование эффективности работы центрального кондиционера типа «СФ ДУОВЕНТ» на теплоходе «Казахстан» // Морской транспорт, Техническая эксплуатация флота. 1982.
8. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. – М.: Энергия, 1974.
9. Нефелов С.В. Техника автоматического регулирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1984
10. Рымкевич А.А., Халамейзер М.Б. Управление системами кондиционирования воздуха. – М.: Машиностроение, 1977
11. СНиП 47.029.90. Судовые системы вентиляции и кондиционирования воздуха.
12. Сотников А.Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции. – Л.: Машиностроение, 1984.
13. Четверухин Б.М. Контроль и управление искусственным микроклиматом. – М.: Стройиздат, 1984.
14. Чинаев П.И. Методы анализа и синтеза многомерных автоматических систем. – Киев: Техніка, 1969
15. Янушевский Р.Т. Теория линейных оптимальных многосвязных систем управления. – М.: Наука, 1973.