

УДК 697.911.001.5

СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

© 2003 Ю. Н. Золотарёв

Воронежская государственная технологическая академия

Предложена системная модель предэскизного проектирования технологии кондиционирования воздуха. Рассмотрены процедуры системного описания, синтеза и анализа при поиске эффективного алгоритма, структуры и параметров процесса кондиционирования.

Рассмотрим с системных позиций предмет исследования — математическое обеспечение предэскизного проектирования технологии кондиционирования воздуха (ТКВ). Понятие ТКВ определяется следующими системообразующими элементами — целевым назначением (ЦН); системой кондиционирования воздуха (СКВ), реализующей ЦН; воздушной средой (ВС), обрабатываемой в СКВ. В задачи моделирования входит выделение этапов и процедур процесса проектирования, определение их взаимосвязи и плана применения.

Системная модель процесса проектирования ТКВ (далее просто системная модель)

имеет вид таблицы. Она отражает результаты декомпозиции задачи большой размерности на простые задачи меньшей размерности, допускающие последовательное решение.

В таблице применена идентификация столбцов «Описание» — Э1, «Синтез» — Э2, «Анализ» — Э3. При чтении таблицы идентификаторы Э1, Э2 и Э3 следует заменять на слова «описание», «синтез» и «анализ» соответственно. Процедуры каждого столбца пронумерованы в порядке выполнения, что определяет алгоритм применения элементов системной модели. Последовательность поэтапного проектирования ТКВ — от Э1, через Э2 к Э3,

Таблица

Системная модель математического обеспечения проектирования ТКВ

Процедура	Этап		
	Описание (Э1)	Синтез (Э2)	Анализ (Э3)
Обоснование целевого назначения	1-Э1 ограничений множества допустимых состояний воздуха в помещении	1-Э2 вероятной $I-d$ -кривой годового изменения состояния наружного воздуха	1-Э3 сезонного распределения параметров воздуха в помещении
Моделирование алгоритма функционирования	5-Э1 формали базовой СКВ и соответствующей проверочной матрицы	3-Э2 кодированного образа ТКВ и формали проектируемой СКВ	4-Э3 траектории управляемого процесса в отдельном агрегате
Моделирование функциональных воздействий на воздух	3-Э1 границ состояний воздуха, разделяющих области применения типовых СКВ	2-Э2 состояний воздуха и управлений при изовлажностном теплообмене, обеспечивающих работоспособность СКВ	2-Э3 распределенных моделей процессов функционирования отдельных агрегатов СКВ
Моделирование структуры	4-Э1 топологии базовой СКВ (объединения графов типовых СКВ) и соответствующего формера	4-Э2 графа проектируемой СКВ	3-Э3 параметров структуры отдельных агрегатов СКВ
Оценка эффективности	2-Э1 распределения капиталовложений в агрегаты СКВ и поиск их прототипов	5-Э2 параметров годового энергопотребления и базового значения эксплуатационных затрат	5-Э3 и минимизация относительного изменения приведенных затрат
Оценка проектного решения	Базовое значение капитальных затрат и средняя производительность СКВ	Базовое значение приведенных затрат	Относительное изменение приведенных затрат

попроцедурного — 1-Э1, 2-Э1, ..., 5-Э1; 1-Э2, 2-Э2, ..., 5-Э2; 1-Э3, 2-Э3, ..., 5-Э3.

В пределах каждой процедуры имеется модель соответствующего элемента ТКВ. Модельные представления о нем поэтапно усовершенствуются так, что каждый последующий этап содержит более детальное описание объекта по сравнению с предыдущим. Кроме того, к последующему этапу не приступают до полного завершения всех процедур предыдущего этапа.

Этап «Описание (Э1)» начинается согласно 1-Э1 с выбора целей. Формулируются ограничения на множество допустимых состояний воздушной среды (ВС) и ее подвижность в обслуживаемом помещении (ОП). Задаются следующие параметры

$$1\text{-Э1: } L_E = [t_{E<}, t_{E>}] \times [\varphi_{E<}, \varphi_{E>}], \quad (1)$$

$$G_{a<} = \inf\{G_{mn} \mid m = \overline{0, M}; n = \overline{0, N}\}, \quad (2)$$

$$b^{(E)} = \{W_E^{(q)}, G_E^{(L)}\}, \quad (3)$$

где L_E — множество допустимых состояний ВС в ОП; $b^{(E)}$ — множество тепло- и влагоизбытков в ОП; $W_E^{(q)}$ — избыточная мощность источников тепла в ОП; $G_E^{(L)}$ — массовый расход источников избыточной влаги в ОП; $G_{a<}$ — минимальная производительность СКВ; символ « \times » означает декартово произведение; t, φ — температура и относительная влажность соответственно; индексы: E — относится к параметрам ОП; $<, >$ — меньшее и большее значение соответственно; q, L — относится к параметру, связанному с тепловой энергией и с расходом жидкости соответственно.

Для большинства современных разработчиков ТКВ исходные данные (1)—(3) дополняются заданием

$$G_{a>} = \sup\{G_{mn} \mid m = \overline{0, M}; n = \overline{0, N}\}, \quad (4)$$

$$b_0 = \{(t_{0m}, \varphi_{0m}) \mid m = \overline{1, M}\}, \quad (5)$$

$$t_{c<} = \inf\{t_m^{(c)} \mid m = \overline{1, M}\} \quad (6)$$

где $G_{a>}$ — максимально целесообразная производительность СКВ; b_0 — множество состояний наружного воздуха; $t_{c<}$ — наименьшая температура хладоносителя в воздухоохладителе; индекс «с» относится к воздухоохладителю.

Специфика этапа «Описание (Э1)» связана с неизбежной неопределенностью ряда исходных данных. При проектировании СКВ для

серийного производства в наибольшей мере это касается (2)—(4), (6). Предлагаемая процедура 2-Э1 обеспечивает выбор указанных параметров основываясь на том, что расчётные затраты на воздухоохладители, воздухонагреватели и нагнетатели проектируемой СКВ не превышают капиталовложений в их найденные прототипы. Исходными являются выборочные статистические данные, представленные как множество пар

$$B_\Sigma^* = \bigcup_{k=c,q,b} \{(U_{km}, G_{km}) \mid m = \overline{0, M}\}, \quad (7)$$

где G_{cm}, G_{qm}, G_{bm} — производительность воздухоохладителя, воздухонагревателя и нагнетателя соответственно; U_{km} — капиталовложения в m -ый агрегат k -го назначения.

Суть процедуры выражают отображения

$$2\text{-Э1: } B_\Sigma^* \rightarrow \bigcup_{k=c,q,b} (U_k^*, G_k^*) \rightarrow \{b^{(k)} \mid k = c, q, b\};$$

$$\sum_{k=c,q,b} U_k^* \leq S_E^*; \quad (8)$$

$$G_b^* = G_{a>}; G_{a<} = \inf\{G_c^*, G_q^*\}; b^{(c)} \rightarrow t_{c<},$$

где символ «*» означает найденный из множества (7) прототип; S_E^* — известная денежная сумма; $b^{(k)}$ — множество параметров агрегата k -го назначения; индексы q и b относятся к воздухонагревателю и нагнетателю СКВ соответственно.

Результат (8) позволяет установить элементы множества (3)

$$b^{(h)} \times L_E \rightarrow b^{(E)}, \quad (9)$$

где $b^{(h)} = [G_{a<}, G_{a>}]$.

Следующая процедура 3-Э1 описывает области применения множества графов типовых СКВ. Объединение графов названного множества соответствует базовой СКВ как носителю проектных решений по структуре и алгоритму функционирования. При известных (1)—(6) суть процедур

$$3\text{-Э1: } C_1 \left\langle \bigcup_{m=E,c,h} b^{(m)}, L_E \right\rangle \rightarrow \{\Gamma_j \mid j \in J\}; \quad (10)$$

$$\{\Gamma_j \mid j \in J\} \rightarrow \bigcup_{j \in J} \Gamma_j \rightarrow \tilde{\Gamma},$$

$$4\text{-Э1: } \tilde{\Gamma} = \|(1_K) \mid (\tilde{\Gamma}_\beta)\| = \left\| \begin{array}{c} \tilde{B}_1 \\ \vdots \\ \tilde{B}_K \end{array} \right\|, \quad (11)$$

где C_1 — наименование кортежа признаков базовой СКВ; J — множество номеров графов, предоставленных информационным обеспечением; $\tilde{\Gamma}$ — порождающая матрица, кодирующая базовую СКВ и состоящая из единичной подматрицы (1_K) порядка K и подматрицы проверочных символов $(\tilde{\Gamma}_\beta)$; \tilde{B}_j — кодовая комбинация соответствующая j -му графу Γ_j .

Отображение (10) обеспечивает термодинамическая модель СКВ [1, 2].

Подход к процессу кондиционирования воздуха, как к преобразованию информационного потока позволяет рассматривать агрегаты СКВ в виде множества логических элементов, должным образом упорядоченных и соединенных друг с другом [3]. Такое упорядочивание и соединение подготавливается процедурой (10), которая усекает исходное множество графов. Она снабжает (11) графом базовой СКВ, являющимся прообразом формера — устройства, содержащего только те элементы, которые влияют на логику [4].

Формаль [4], как набор логических выражений описывает алгоритм функционирования. Содержание 5-Э1 заключается в получении формали базовой СКВ $\tilde{\Lambda}$. Имеем

$$5-Э1: \{P_j | j \in J\} \rightarrow \tilde{\Lambda} \rightarrow \tilde{H}, \tilde{H} = \left\| \begin{matrix} (\tilde{\Gamma}_\beta) \\ (1_M) \end{matrix} \right\|, \quad (12)$$

где \tilde{H} — проверочная матрица; $(1_M) = \tilde{\Lambda}$ — единичная подматрица порядка M проверочной матрицы, элементам главной диагонали которой поставлены в соответствие некоторые логические функции, содержащие условия применения P_j объединения j -х графов в (11).

Суть проектного решения завершающего этап «Описание (Э1)» — граф базовой СКВ, порождающая и проверочная матрицы из (11), (12), а также множество прототипов агрегатов СКВ по (8). К его итоговым оценкам относятся базовое значение капитальных затрат

$$S_0^* = U_q^* + U_c^* + U_b^*; S_0^* \leq S_E^* \quad (13)$$

и средняя производительность проектируемой СКВ

$$G_a^* = \frac{1}{S_0^*} \sum_{k=q,c,b} G_k^* U_k^*. \quad (14)$$

Этап «Синтез (Э2)» направлен на преобразование базовой СКВ.

Формаль (в т.ч. и базовой СКВ) строится на фундаменте некоторого описания расчетного режима функционирования ТКВ. В качестве образа этого описания выступает определенная область I - d -диаграммы состояний влажного воздуха (с энтальпией I и влагосодержанием d), а с ней связаны представления большинства разработчиков о структуре и алгоритме функционирования СКВ. Полагаем и мы, что существенная информация о ТКВ содержится в геометрических построениях на I - d -диаграмме состояний ВС независимо от того, как они получены, т.е. не конкретизируя ЦН.

Процедуры 1-Э2, 2-Э2 и 3-Э2 предоставляют образ ТКВ в виде множества кодов I - d -кривых естественного и искусственного изменения состояния ВС [5]

$$\{\tilde{B}_j | j \in Q; Q \subset J\} \subset \tilde{\Gamma}, \quad (15)$$

которые по мнению разработчика позволят улучшить или обосновать граф базовой СКВ.

Моделирование естественного изменения состояний наружного воздуха служит выбором такого множества $D \subset b_0$,

$$\{(I_m, d_k) | m = \overline{1, M}; k = 1, K\} \equiv b_0, \quad (16)$$

при котором максимальна вероятность по

$$1-Э2: J = \max_{D \subset b_0} \Phi, \quad (17)$$

где

$$D = D_\Sigma = \left(\bigcup_{n=1}^K \Theta \right) \cup \left(\bigcup_{n=K+1}^N D_n \right) \quad (18)$$

$$\Theta_n = \{(i_m, d_n^*) | m = \overline{0, M}; d_n^* = const\} \quad n = \overline{1, K} \quad (19)$$

— множества состояний ВС отображаемые в системе координат «энтальпия (I) — влагосодержание (d) воздуха» политропами и кривыми постоянных влагосодержаний [6] соответственно.

Анализ (19) позволяет определить множество параметров процессов функционирования агрегатов, обеспечивающих работоспособность СКВ, что является содержанием повторяемой K раз процедуры

$$2-Э2: Z(n) = \max_{D_n \supset \Theta_n} \sum_{m=1}^M f_m^{(T)}(U(D_n, L_E)) \quad n = \overline{1, K}, \quad (20)$$

где U — определяемое множество параметров источников тепла, холода и импульса ВС;

$f_m^{(T)}$ — m -я составляющая характеристики эксплуатационных затрат на изовлажностный теплообмен.

Моделирование искусственного изменения состояний ВС при политропном тепло- и влагообмене осуществляется в рамках процедуры

$$3-Э2: \Psi(n) = \max_{E_n \cap D_n \neq \emptyset} \sum_{m=1}^M (-1)^S \Psi_m(E_n) \quad (21)$$

$$n = \overline{1, N} \quad S = 1, 2;$$

$$E_n \cap D_n \rightarrow \tilde{B}_{j(n)} \quad j(n) \in J \quad n = \overline{1, N}; \quad (22)$$

$$\{\tilde{B}_{j(n)} \mid j(n) = \bigvee_{k=1}^K k; n = \overline{1, N}\} \rightarrow P_\Sigma; \quad (23)$$

$$P_j(n^*) \bigcup \tilde{\Lambda} \rightarrow \Lambda, \quad (24)$$

где $P_\Sigma = \{P_j(n) \mid j = \bigvee_{k=1}^K k; n = \overline{1, N}\}$ — множество условий применения кодов (22) выбранных в качестве прообразов ТКВ; $P_j(n)$ — логическое условие применения j -го кода \tilde{B}_j (и графа Γ_j); Ψ, Ψ_m — эксплуатационные затраты на СКВ и их m -е слагаемое соответственно; Λ — формаль проектируемой СКВ; $S=1$ — при моделировании наиболее экономичного варианта; $S=2$ — при моделировании наиболее надежного варианта.

Множества $D_1, D_2, \dots, D_N; E_1, E_2, \dots, E_N$, получаемые по (17), (20), (21) являются материалом, из которого синтезируется образ ТКВ. Согласно (24) он имеет основу, выбираемую по условию с номером n^* .

Процедура 4-Э2 использует формаль проектируемой СКВ для объединения графов, т.е.

$$4-Э2: \Lambda \bigcup_{j=j(n)} P_\Sigma \rightarrow \bigcup \Gamma_j. \quad (25)$$

Полученные результаты позволяют оценить базовое значение эксплуатационных затрат, связанных с потреблением в течение года электроэнергии на нагревание, охлаждение и нагнетание воздуха

$$Z_\Sigma^* = \sum_{m=1}^M Z_m^*; Z_m^* = C^* G_a^* \tau_\Sigma^* \Psi_m^*; \quad (26)$$

$$\Psi_m^* = |i_m v_0(i_{m-1}, i_m) - v_1(i_{m-1}, i_m)|,$$

где Z_m^* — составляющая базового значения эксплуатационных затрат, $p./год$;

$$i_M = i_E^*; v_N(i_0, i_1) = \int_{i_0}^{i_1} i^N \varphi_i(i) di \quad N = 0, 1; \quad (27)$$

φ_i — плотность распределения вероятности энтальпии воздуха i ; i_m — энтальпия воздуха в m -ом состоянии, $Дж/кг$; i_E^* — номинальное значение энтальпии воздуха в ОП, $Дж/кг$; τ_Σ^* — годовая продолжительность работы СКВ, $с/год$; C^* — удельная стоимость электроэнергии, $p./Дж$.

Суть проектного решения завершающего этапа «Синтез (Э-2)» — это граф проектируемой СКВ (см. объединение графов в (25)), параметры ТКВ определяющие базовое значение эксплуатационных затрат (26), а также базовое значение приведенных затрат на проектируемую СКВ. Последние находятся в зависимости от капиталовложений в прототипы агрегатов, которые установлены по (8). Краткое изложение сказанного содержит запись

$$5-Э2: C_2 \left\langle \varphi_i, G_a^*, i_E^*, \bigcup_{j \in Q} \Gamma_j, \bigcup_{n(j \in Q)} D_{n(j)} \right\rangle \rightarrow S_\Sigma^*, \quad (28)$$

где C_2 — наименование кортежа признаков проектируемой СКВ; $S_\Sigma^* = Z_\Sigma^* + S_0^* \tau_\infty^{-1}$ — базовое значение приведенных затрат; τ_∞ — установленный срок окупаемости капитальных затрат, $год$; τ_∞^{-1} — коэффициент приведения затрат, $год^{-1}$.

Этап «Анализ (Э3)» заключается в исследовании характеристик СКВ при распределенных и нестационарных состояниях ВС. Они наблюдаются в окрестности расчетного режима функционирования определенного состояниями ВС по предыдущим этапам. Применение термодинамического подхода и гипотезы сплошности ВС открывает возможность построения моделей анализа как граничных нестационарных задач для системы уравнений неразрывности, переноса количества движения, внутренней энергии и влаги.

Процедуры анализа (Э3) характеризует следующий конспективный обзор.

На определение сезонных распределений параметров воздуха ОП направлена процедура

$$1-Э3: (\theta_M(0, 0, 0, t_0), \theta_M(L_{\theta M}, D_{\theta M}, h_{\theta M}, t_0)) \rightarrow \theta_M(x, y, z, t) \quad \theta = T, P, v, \quad (29)$$

где $(x, y, z) \in V_{\theta M}; V_{\theta M} = [0, L_{\theta M}] \times [0, D_{\theta M}] \times [0, h_{\theta M}]$; $t_0 \leq t \leq t_1$ — температура наружного воздуха; $L_{\theta M}, D_{\theta M}, h_{\theta M}$ — геометрические параметры ОП; T, P, v — температура, давление и скорость воздуха соответственно.

Моделирование распределений параметров ВС в m -ом агрегате — есть суть процедуры

$$2\text{-ЭЗ: } (\theta_m(0, 0, 0, 0), \theta_m(L_{\theta m}, D_{\theta m}, h_{\theta m}, \tau_{\theta m})) \rightarrow \theta_m(x, y, z, \tau) \quad \theta = T, P, v, \quad (30)$$

где $m = \overline{1, M-1}$; $(x, y, z, \tau) \in V_{\theta m} \times [0, \tau_{\theta m}]$; $0 \leq \tau \leq \tau_{\theta m}$ — время.

Анализ параметров структуры m -го агрегата осуществляется по процедуре

$$3\text{-ЭЗ: } W_m^{(\theta)} \rightarrow (L_{\theta m}, D_{\theta m}, h_{\theta m}) \quad \theta = T, P, v, \quad (31)$$

где

$$W_m^{(\theta)} = \frac{G_{\theta m}}{V_{\theta m}} \iiint_{(V_{\theta m})} C_{\theta m} [\theta_m(x, y, z, \tau_{\theta m}) - \theta_m(x, y, z, 0)] dx dy dz$$

$$m = \overline{1, M-1}$$

— мощность m -го агрегата, затрачиваемая при квазистационарном изменении параметра θ , Вт; $G_{\theta m}$ — массовый расход воздуха в m -м агрегате, преобразующем его параметр θ , кг/с; $C_{Tm} = c_g^{(P)}$, $C_{Pm} = 1/\rho_a$, $C_{vm} = v^{(v)}/D_{\theta m}$ — коэффициенты, определяемые термодинамическими константами $c_g^{(P)}$, ρ_a , $v^{(v)}$; $D_{\theta m}$ — характерный геометрический размер m -го агрегата.

Для анализа параметров траектории управляемого процесса в m -ом агрегате имеем

$$4\text{-ЭЗ: } \bar{W}_m^{(\theta)} \rightarrow (L_{\theta m}, D_{\theta m}, h_{\theta m}, \tau_{\theta m}) \quad \theta = T, P, v, \quad (32)$$

где

$$\bar{W}_m^{(\theta)} = \frac{1}{\tau_{\theta m}} \int_0^{\tau_{\theta m}} \iint_{(F_{\theta m}^*)} C_{\theta m} \left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{h_m} dx dy d\tau \quad m = \overline{1, M-1};$$

$F_{\theta m}^* = [0, L_{\theta m}] \times [0, D_{\theta m}]$; $\bar{C}_{Tm} = \lambda_a$; $\bar{C}_{Pm} = C_{Pm} G_a^* / D_m$; $\bar{C}_{vm} = C_{vm} G_a^* / D_m$; $\bar{W}_m^{(\theta)}$ — мощность m -го агрегата, связанная с нестационарным преобразованием параметра θ , Вт.

Относительное изменение приведенных затрат анализируется по

5-ЭЗ:

$$\min_{\Xi} \frac{S_{\Sigma} - S_{\Sigma}^*}{S_{\Sigma}^*} \rightarrow \bigcup_{\theta=T, P, v} \{(\bar{W}_m^{(\theta)}, G_{\theta m}) | (\bar{W}_m^{(\theta)}, G_{\theta m}) \in \Xi \quad m = \overline{1, M}\}, \quad (33)$$

где $\Xi = [W_{<}^{(\theta)}, W_{>}^{(\theta)}] \times [G_{a<}, G_{a>}]$; $S_{\Sigma} = \sum_{\theta=T, P, v} \sum_{m=1}^M [Z_{\theta m}(\bar{W}_m^{(\theta)}) + U_{\theta m}]$ — приведенные затраты, как сумма эксплуатационной Z и капитальной U составляющей, р./год.

Рассмотренная системная модель позволяет разрабатывать связанные математические описания отдельных элементов СКВ и ТКВ в целом [7]. Она инвариантна к процессам, алгоритмам и структурам, подвергаемым описанию. Модульный принцип построения модели упрощает организацию взаимодействия с информационным и программным обеспечением, создаёт предпосылки совершенствования, а также открывает возможности гибкого использования результатов анализа перспективных технических решений и сокращает сроки проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рымкевич А.А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Стройиздат, 1990. — 300 с.
2. Рымкевич А.А., Халамейзер М.Б. Управление системами кондиционирования воздуха. — М.: Машиностроение, 1977. — 274 с.
3. Золотарёв Ю.Н. Логический анализ систем кондиционирования воздуха // Вестник Международной академии холода. — 2002. — Вып. 4. — С. 4, 5.
4. Логическое проектирование дискретных устройств / Глушков В.М., Капитонова Ю.В. Мищенко А.Т. — Киев: Наукова думка, 1987. — 264 с.
5. Золотарёв Ю.Н. Динамическое программирование и логическое проектирование систем кондиционирования воздуха // Вестник Международной академии холода. — 2003. — Вып. 1. — С. 38—40.
6. Золотарёв Ю.Н. Математическая модель для оптимизации распределения искусственных источников тепла и холода в системе кондиционирования воздуха // Вестник международной академии холода. — 2001. — Вып. 3. — С. 21—23.
7. Моделирование технологии кондиционирования воздуха / В. К. Битюков, Ю. Н. Золотарёв; Воронеж: ВГТА, 2003. 272 с.