



УДК 004.942

© 2016 г. **В.М. Дмитриев**, д-р техн. наук,

Т.В. Ганджа, канд. техн. наук,

Т.Н. Зайченко, д-р техн. наук

(Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники)

МЕТОДИКА СТРАТИФИКАЦИИ И ИНТЕГРАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ

Описывается методика построения многоуровневой компьютерной модели сложной технической управляемой системы, основанная на принципах ее стратификации и интеграции. В качестве критерия стратификации модели выбран принцип наиболее оптимального описания компьютерных моделей составных функциональных частей системы: объекта управления, устройства управления и панели визуализации и интерактивного управления. Интеграция обусловлена передачей между уровнями модели различной информации, представленной как в числовой, так и не в числовой форме.

Ключевые слова: сложная техническая управляемая система, многоуровневая компьютерная модель, управляемый технический объект, математическое моделирование, имитационное моделирование.

DOI: 10.22250/isu.2016.50.11-22

Введение

В различных отраслях промышленности и сферах человеческой деятельности находят широкое применение сложные технические (технологические) управляемые системы (СТУС). Управляемые ими технические объекты (УТО) допускают декомпозицию на взаимосвязанные элементы, между которыми протекают информационные, мультифизические энергетические и многокомпонентные вещественные потоки, а алгоритм функционирования устройства управления (УУ) может быть разложен на совокупность элементарных математико-алгоритмических действий.

Проводимый над моделями СТУС компьютерный (вычислительный) эксперимент может быть направлен на изучение свойств и характеристик протекающих в них процессов. С помощью компьютерных моделей он позволяет также определять значения параметров управляемого технического (технологического) объекта и управляющих воздействий, направленных на установление и поддержание в УТО требуемых режимов функционирования. Помимо этого, на основе вычислительного эксперимента можно эффективно и безопасно сформировать алгоритм

функционирования УУ, который может быть представлен в виде программы и зашит в управляющий контроллер.

Для реализации представленных задач применяемый для исследования СТУС комплекс программ должен инкапсулировать в себе средства математического моделирования (для обработки непрерывных процессов, протекающих в УТО и описываемых системами алгебро-дифференциальных уравнений) и имитационного моделирования, позволяющих описывать дискретно-событийную работу УУ на уровне алгоритмов его функционирования. Современные средства компьютерного моделирования, такие как Simulink [1], Multisim [2], HYSYS [3], направлены на исследование объектов конкретной физической природы и не допускают интеграции с системами имитационного моделирования, позволяющими описывать алгоритмы функционирования УУ.

Таким образом, актуальной является задача реализации комплекса программ компьютерного моделирования СТУС, позволяющего на основе единого формализма в единой модели совмещать непрерывные математические модели УТО и взаимосвязанные с ними дискретно-событийные модели УУ. К тому же сформированная в формализме данного комплекса программ компьютерная модель должна обладать широкими средствами визуализации результатов моделирования и органами воздействия на исследуемую модель. Наиболее подходящим для построения такой многоаспектной модели в настоящее время является метод компонентных цепей [4], в формате которого могут быть построены модели с непрерывным и дискретно-событийным поведением.

Формализованное представление сложной технической управляемой системы для построения компьютерной модели в формате метода компонентных цепей

Для описания процессов, протекающих в УТО и УУ, и для адекватного проведения автоматизированных экспериментов используемая в них компьютерная модель СТУС должна соответствовать реальной системе управления. Кроме того, используемая в ней КМ УТО, с помощью которой автоматизируется виртуальный эксперимент, будет применяться как для проектирования алгоритмов функционирования УУ, так и для реализации интеллектуальных систем управления объектами и программных модулей обучения и переподготовки управляющего персонала промышленных предприятий. Представленная на рис. 1 структурно-функциональная схема СТУС, полученная на основе ее формализованного представления [5], допускает декомпозицию на взаимосвязанные элементы. УТО может быть декомпозирован на *элементы и функциональные блоки*, каждому из которых ставится в соответствие *компонент структуры*, реализующий его математическую модель (ММ). Работа УУ может быть описана алгоритмом информационных преобразований данных измерения наблюдаемых характеристик УТО (или результатов моделирования ее ММ) в управляющие воздействия на реальные исполнительные устройства (ИспУ) либо их модели. Он может быть декомпозирован на отдельные *компоненты алгоритма*, каждый из которых с помощью имитационной модели (ИМ) описывает определенное действие с информационными потоками данных, получаемыми с измерительных устройств (ИзмУ).

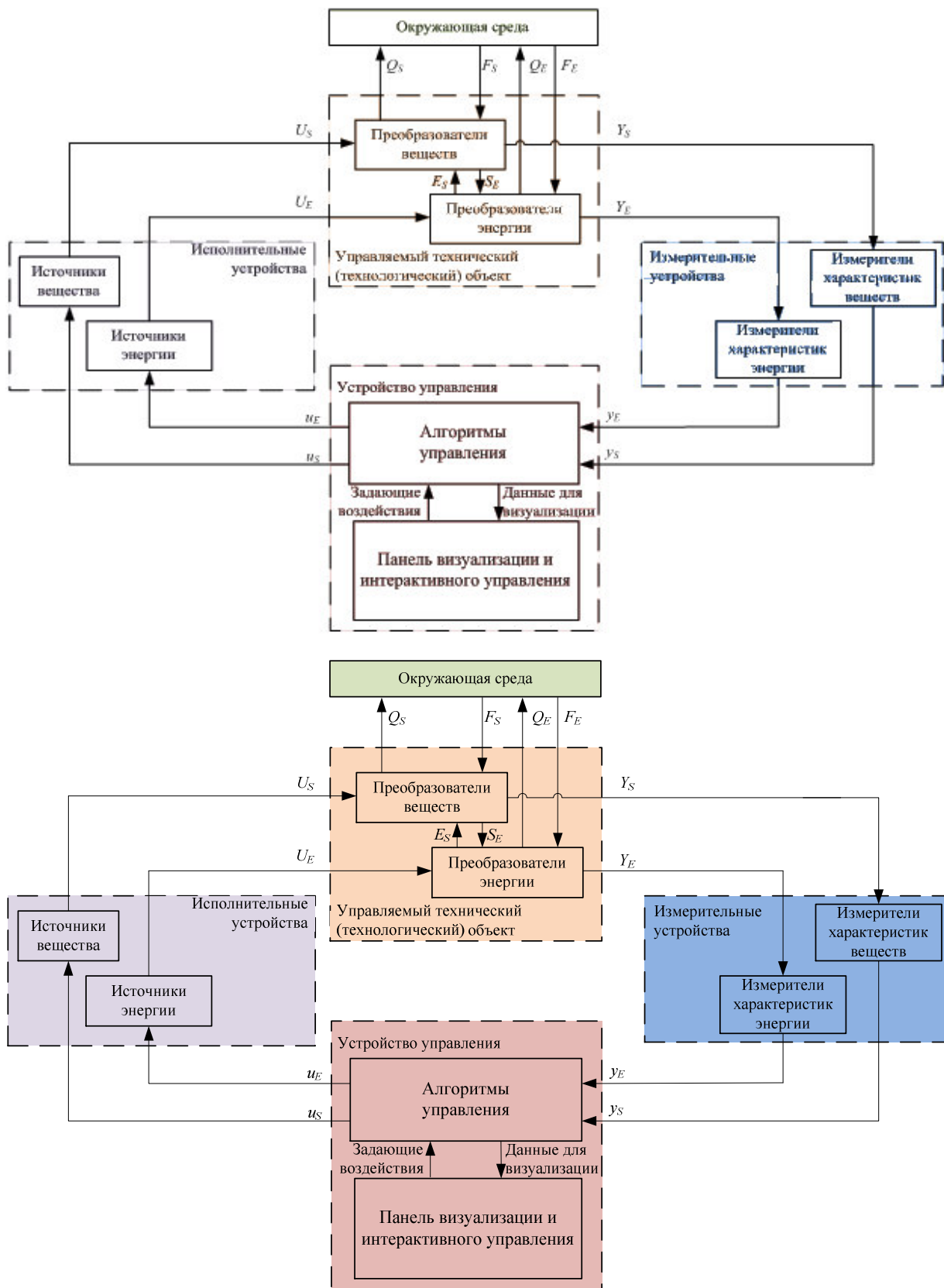


Рис. 1. Структурно-функциональная схема сложной технической управляемой системы.

Структурно-функциональная схема содержит следующие классы компьютерных моделей элементов и функциональных блоков:

1) класс моделей исполнительных устройств, оказывающих непосредственные энергетические и вещественные воздействия на УТО $U=[U_E, U_S]$, пропорцио-

нальные информационным сигналам УУ. К их числу относятся:

источники энергии, представляющие собой компоненты, каждый из которых позволяет описать в модели подведение к определенным элементам УТО энергии различной физической природы U_E , пропорциональной управляющим воздействиям УУ u_E ;

источники вещества – компоненты, описывающие в модели УТО подачу к его элементам многокомпонентных смесей веществ, каждое вещество которых называется *компонентом потока*, определяющимся вектором характеристик U_S и предназначенных для преобразования и использования их физических свойств и компонентного состава с поглощением или генерацией энергии различной физической природы. Управления их процессами осуществляется УУ с помощью информационных сигналов u_S ;

2) класс моделей элементов УТО, описывающих протекающие в нем процессы преобразования входящих в него энергетических и (или) вещественных потоков U в соответствующие выходные потоки $Y = [Y_E, Y_S]$. Процессы, протекающие в этих элементах, могут оказывать техногенные воздействия на объекты ОС $Q = [Q_E, Q_S]$, а также могут быть подвержены ее возмущающему воздействию $F = [F_E, F_S]$. К числу элементов объекта управления, для которых должны быть построены соответствующие модели, относятся:

преобразователи энергии, отражающие в модели УТО протекание процессов накопления входных энергетических потоков U_E , их преобразование в выходные потоки энергии Y_E , в том числе отличной от входного потока природы. Так, например, электрическая энергия может быть преобразована в механическую, гидравлическую или тепловую. Протекающие в преобразователях энергии процессы могут оказывать техногенные воздействия на объекты окружающей среды (ОС) Q_E в виде выбросов энергии различного вида (пара, создания электрических или магнитных полей и т.п.). Характеристики этих процессов зависят от значений параметров и характеристик окружающей среды F_E . Выходная энергия может подаваться к различным преобразователям веществ E_S и быть направленной на изменение скорости протекания процессов преобразования веществ, а также быть выделенной из них;

преобразователи вещества (многокомпонентных вещественных потоков), выражающие изменение физических характеристик и компонентных составов входных вещественных потоков U_S с целью получения совокупности выходных потоков многокомпонентных вещественных потоков Y . Описываемые ими процессы подлежат управлению подводимой к ним энергии E_S . Процессы, направленные на преобразование многокомпонентных вещественных потоков, зачастую оказывают высокие техногенные воздействия на объекты ОС Q_S , выраженные выбросами загрязняющих, сильнодействующих и ядовитых веществ в различных фазах (газообразной, жидкой, твердой). В свою очередь, значения переменных Y_S , характеризующие выходные вещественные потоки, могут зависеть от возмущающих воздействий окружающей среды F_S , которыми являются изменение атмосферного давления, температуры воздуха, концентраций различных веществ в объектах ОС и т.п.;

3) класс моделей измерительных устройств, осуществляющих выборку значений соответствующих переменных модели УТО и их передачу в модель УУ, реализующую алгоритмы его работы. К числу моделей ИзМУ, называемых далее *измерительными компонентами*, относятся:

измерители энергии, измеряющие в определенные моменты времени и передающие УУ временные характеристики потенциальных и потоковых переменных, характеризующих энергетический поток определенной физической природы Y_E , проходящий по связи между некоторыми компонентами УТО;

измерители характеристик веществ (вещественных потоков), осуществляющие измерение характеристик многокомпонентных вещественных потоков Y_S и их передачу УУ. Первичными характеристиками вещественных потоков являются мгновенные значения потенциальных и потоковых переменных, характеризующих запасенную энергию потока, и характеристики его компонентного состава, представленные концентрациями входящих в него веществ;

4) класс моделей объектов окружающей среды, подверженных многофакторному техногенному воздействию $Q = [Q_E, Q_S]$ со стороны функционирующего УТО, а также оказывающих на него возмущающие воздействия $F = [F_E, F_S]$;

5) устройство управления, представленного совокупностью алгоритмов управления, лежащих в основе его работы и направленных на выработку управляющих воздействий на ИспУ. Оно включает в себя панель визуализации результатов экспериментов и средства интерактивного управления параметрами модели УТО и управляющих воздействий на реальные ИспУ. Наиболее приемлемым методом их описания и анализа является имитационное моделирование. При таком подходе модели компонентов описываются математико-алгоритмическими моделями, представленными в явном виде относительно входных переменных и направленными на вычисление значений выходных характеристик.

Для адекватного анализа сложных технических управляемых систем их компьютерные модели должны отражать структуру УТО с подключенными к нему исполнительными и измерительными устройствами, включать в себя детализированный на отдельные математические и алгоритмические операции алгоритм функционирования УУ, а также иметь развитую систему визуализации, включающую органы формирования задающих воздействий.

Модель сложных технических управляемых систем в формате компонентных цепей

Для построения компьютерной модели исследуемой системы в формате метода компонентных цепей (МКЦ) [4] требуется каждому ее объекту, устройству и функциональному узлу поставить в соответствие компонент или компонентную цепь. Компьютерная модель СТУС в формате МКЦ может быть представлена компонентной цепью вида

$$C_{STUS} = \{C_{UTO} \cup C_{IZ} \cup C_{IS} \cup C_V\}, \quad (1)$$

где C_{UTO} КЦ УТО, в которой предусмотрены его взаимодействия с ИспУ и ИзМУ, имеет вид:

$$C_{UTO} = \left\{ \begin{array}{l} K_{UTO}, B_{UTO} \cup B_{UTO \cup IS} \cup B_{UTO \cup IZ} \\ N_{UTO} \cup N_{UTO \cup IS} \cup N_{UTO \cup IZ} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где K_{UTO} – множество компонентов, входящих в компонентную цепь УТО; B_{UTO} – совокупность связей между компонентами множества K_{UTO} , по которым осуществляется обмен информационными, энергетическими и вещественными потоками; $B_{UTO \cup IS}$ – совокупность связей между компонентами УТО и моделями ИспУ, оказывающих воздействия на них; $B_{UTO \cup IZ}$ – совокупность связей между компонентами УТО и моделями ИзмУ, осуществляющими выборку значений определенных переменных из общего вектора решения цепи и передачу их в модель устройства управления; N_{UTO} – множество узлов, образованных соединениями компонентов модели УТО; $N_{UTO \cup IS}$ – множество узлов, образованных соединениями компонентов модели УТО с моделями ИспУ; $N_{UTO \cup IZ}$ – множество узлов, образованных соединениями компонентов УТО с моделями ИзмУ.

КЦ измерительных устройств имеет вид

$$C_{IZ} = \{K_{IZ}, B_{IZ}, N_{IZ}\}, \quad (3)$$

где K_{IZ} – множество компонентов измерительных устройств, называемых далее измерительными компонентами; B_{IZ} – множество связей между компонентами измерительных устройств; N_{IZ} – множество узлов, образованных соединениями связей компонентов множества K_{IZ} .

КЦ исполнительных устройств может быть представлена как

$$C_{IS} = \{K_{IS}, B_{IS}, N_{IS}\}, \quad (4)$$

где K_{IS} – совокупность компонентов ИспУ, оказывающий на УТО энергетические воздействия, пропорциональные информационным сигналам УУ; B_{IS} – множество связей между компонентами ИспУ множества K_{IS} ; N_{IS} – множество узлов, образованных соединениями связей множества B_{IS} .

КЦ устройства управления – управляющего контроллера, в котором физические процессы не рассматриваются, а рассмотрение ограничено только логическими функциями направленного на автоматизированное решение задач исследования процессов функционирования СТУС

$$C_C = \{K_C, B_C \cup B_{C \cup IZ} \cup B_{C \cup IS}, N_C \cup N_{C \cup IZ} \cup N_{C \cup IS}\}, \quad (5)$$

где K_C – множество компонентов модели УУ, отображающие в ней основные операции над данными различных типов, направленные на определение удовлетворяющих требованиям управляющих воздействий; B_C – множество связей между компонентами множества K_C , по которым осуществляется обмен данными различных типов; $B_{C \cup IZ}$ – совокупность связей компонентов множества K_C с компонентами измерительных устройств множества K_{IZ} (3), по которым в модель УУ поступают значения наблюдаемых характеристик модели УТО (2); $B_{C \cup IS}$ – совокупность связей компонентов множества K_C с моделями исполнительных устройств множества K_{IS} (4), осуществляющих энергетические воздействия на УТО, пропорциональные сигналам УУ; N_C – множество узлов, образованных связями множества B_C ; $N_{C \cup IZ}$ – множество узлов, образованных соединениями компонен-

тов модели УУ K_C с компонентами ИзмУ K_{IZ} ; N_{CUIIS} – множество узлов, образованных соединениями компонентов модели УУ K_C с компонентами ИспУ K_{IS} .

КЦ средств визуализации и интерактивного управления, которые позволяют, образуя множество визуальных компонентов K_V , формировать панель визуализации и управления СТУС (рис. 1)

$$C_V = \{K_V, B_V = \emptyset, N_V = \emptyset\}, \quad (6)$$

которая называется *визуальной компонентной цепью (ВКЦ)*.

Для построения компонентной цепи (1) необходимо сформировать каждую из представленных подцепей, предусмотрев при этом связи между ними $S_{UTOUIZ}, S_{UTOUIS}, S_{CUIZ}, S_{CUIIS}$. Подлежащий управлению УТО, между элементами которого протекают мультифизические энергетические и многокомпонентные вещественные потоки, может быть представлен КЦ виде (2).

Для измерения значений наблюдаемых переменных $Y = [Y_S, Y_E]$, носящих информационный, энергетический и вещественный характер, с последующим их преобразованием в информационные сигналы $y = [y_S, y_E]$, в КЦ СТУС входят измерительные компоненты множества K_{IZ} . Каждый из них (из вектора переменных цепи) позволяет измерять значения либо одной потенциальной $V_{Ni} \subset V_N$, либо одной потоковой переменной $V_{Bi} \subset V_B$. Обобщенная модель каждого измерительного компонента множества K_Z может быть представлена в виде

$$f_Z(V_i) - V_Z = 0, \quad (7)$$

где V_i – потенциальная или потоковая переменная, принадлежащая компоненту $K_Z \subset C_{UTO}$.

Переменная V_i КЦ входит в вектор измеряемых в ИСУ СТО переменных Y : $V_i \in Y$; $V_Z \in Y$ – вектор результатов функции измерения, причем $V_Z \notin V_{UTO}$; f_Z – функция измерения, реализуемая в компоненте K_Z , которая в общем случае может иметь сложный нелинейный характер, предполагающий как непосредственное измерение текущих значений, так и их обработку, основанную на численных методах анализа данных и записанную либо в аналитической, либо в алгоритмической форме.

Измеренные в модели текущие значения наблюдаемых переменных управляемого СТО V_Z используются моделью УУ, которая представлена совокупностью компонентов-контроллеров $K_C \notin K_{UTO}$, предназначенных для построения компьютерной модели устройства управления C_C в формате МКЦ. Эти компоненты могут быть описаны ММ вида

$$f_u(V_Z) - V_u = 0, \quad (8)$$

где $V_u \notin V_{UTO}$ – вектор информационных сигналов, отображающих в КЦ ИСУ информационные сигналы u ; f_u – в общем случае нелинейная функция преобразования результатов измерений V_Z в информационные сигналы управления V_u , вырабатываемые УУ и посылаемые им на ИспУ.

Исполнительным устройствам в модели ИСУ (1) ставятся компоненты множества K_{IS} , каждый из которых описывается обобщенной математической моделью

$$f_{IS}(V_u) - V_U = 0, \quad (9)$$

где V_U – вектор управляющих воздействий на УТО, в который могут входить управляющие воздействия, направленные на прямые изменения значений его параметров; $f_{IS}(V_u)$ – функция преобразования управляющих информационных сигналов V_u в энергетические воздействия на управляемый УТО V_U .

Вычислительная модель СТУС

Математическая модель СТУС, сформированная на основе ее КЦ (1), может быть представлена в виде

$$M_{STUS} = \left[\bigcup_i M_{UTOi} \cup \bigcup_j M_{IZj} \cup \bigcup_k M_{ISk} \cup \bigcup_l M_{Cl} \right], \quad (10)$$

где M_{UTOi} – математическая модель компонентов множества K_{UTO} в совокупности с математическими моделями узлов $N_{UTO} \cup N_{UTO \cup IS} \cup N_{UTO \cup IZ}$, уравнения которых составлены на основе основного узлового топологического закона; M_{IZj} – математическая модель компонентов множества K_{IZ} ; M_{ISk} – математическая модель компонентов из множества K_{IS} ; M_{Cl} – математическая модель компонентов множества K_C , представляющая собой модель УУ.

Математической модели СТУС (10) будет соответствовать векторно-матричная модель вида

$$\begin{bmatrix} \Phi_{KN}^{UTO} & \Phi_{KB}^{UTO} & 0 & 0 & \Phi_{S2}^{IS} \\ 0 & \Phi_T^{UTO} & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{ZN}^{UTO} & \Phi_{ZB}^{UTO} & \Phi_{Z1}^{IZ} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_{Z2}^{IZ} & \Phi_{U1}^C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_{U2}^C & \Phi_{S1}^{IS} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_N^{UTO} \\ V_B^{UTO} \\ V_Z^{IZ} \\ V_u^C \\ V_U^{IS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_K^{UTO} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $\Phi_{KN}^{UTO}, \Phi_{KB}^{UTO}$ – матрицы коэффициентов при потенциальных и потоковых переменных в уравнениях компонентов множества K_{UTO} ; Φ_{S2}^{IS} – коэффициенты компонентов исполнительных устройств множества K_{IS} в уравнениях компонентов множества K_{UTO} ; Φ_T^{UTO} – матрица компонентов топологических уравнений, составленных для узлов множества N_{UTO} ; $\Phi_{ZN}^{UTO}, \Phi_{ZB}^{UTO}$ – матрица коэффициентов в математических моделях компонентов множества K_{IZ} при потенциальных V_N^{UTO} и потоковых переменных V_B^{UTO} измерительных компонентов множества; Φ_{Z1}^{IZ} – матрица коэффициентов в моделях (7) при измерительных переменных V_Z^{IZ} ; Φ_{Z2}^{IZ} – матрица коэффициентов в уравнениях компонентов УУ множества C_C при измерительных переменных V_Z^{IZ} ; Φ_{U1}^C – матрица коэффициентов в уравнениях (8) компонентов множества C_C при переменных V_u^C , характеризующих подаваемые на ИсполУ информационные сигналы; Φ_{U2}^C – матрица коэффициентов в математических моделях исполнительных устройств вида (9) при информационных переменных

V_u^C ; Φ_{S1}^{IS} – матрица коэффициентов в моделях исполнительных устройств (9) при переменных V_U^{IS} , выражающих непосредственные энергетические воздействия ИспУ на управляемый УТО.

Построенная в формате МКЦ компьютерная модель СТУС (1) с несколькими наблюдаемыми переменными СТО $V_Z^{IZ} = y$, выраженными потенциальными и потоковыми переменными его модели, и управление им с помощью нескольких управляющих воздействий $V_U^{IS} = U$ описывается в общем случае системой нелинейных алгебро-дифференциальных уравнений. В случае, если УТО удастся описать моделью линейных алгебро-дифференциальных уравнений, то в общую модель СТУС (1) нелинейность будут вносить модели других ее блоков: измерительных и исполнительных устройств, а также устройства управления.

Для повышения эффективности процесса автоматизированного исследования процессов функционирования СТУС требуется упростить представленную модель СТУС (10) – (11).

Для этого необходимо выделить из нее блоки, допускающие свое представление в явной форме, и реализовать аппарат обмена информацией между блоками, не прибегая к построению и решению единой системы уравнений.

Принцип стратификации уравнений в модели сложной технической управляемой системы. В силу явного вида уравнений (7) – (9) матрицы Φ_{Z1}^{IZ} , Φ_{U1}^C , Φ_{S1}^{IS} векторно-матричной модели (11) будут иметь вид отрицательной диагональной единичной матрицы

$$-I = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Из полученного на основе такой матрицы матричного уравнения

$$\Phi \cdot V_1 - I \cdot V_2 = 0 \quad (13)$$

элементы вектора V_2 могут быть выражены в явном виде

$$V_2 = \Phi \cdot V_1 \cdot (-I)^{-1}. \quad (14)$$

Матричное уравнение (14) может быть представлено совокупностью независимых друг от друга нелинейных алгебраических уравнений. Каждое из них позволит определять конкретный элемент вектора V_2 . В этом случае более эффективным является представление уравнений (7) – (9) в явном виде (14) и реализация математических выражений для вычислений значений элементов векторов V_Z^{IZ} , V_u^C , V_U^{IS} непосредственно в компонентах множеств K_{IZ} , K_C , K_{IS} (3) – (5). Для обмена информацией между компонентами этих множеств и множества $K_{УТО}$, анализ которых производится универсальным вычислительным ядром на основе алгоритма вычислительного эксперимента, может быть применен способ обмена информацией, основанный на формировании, пересылке и обработке сообщений с данными различных типов. Такой способ относится к классу методов имитационного моделирования [6] и реализуется в виде алгоритма передачи сообщений

[7], аналогичного интерфейсу передачи сообщений между компьютерами, образующими один кластер при решении задач параллельного программирования [8]. Математические модели УТО, представленные в виде КЦ (2), взаимосвязанные с ними имитационные модели измерительных (3) и исполнительных устройств (4), устройства управления (5), а также компоненты визуализации и интерактивного изменения значений параметров компонентов множества K_V , входящих в общую модель СТУС (1), образуют ее многоуровневую компьютерную модель.

Структура интегрированной многоуровневой компонентной цепи СТУС

Такая модель может быть построена и проанализирована в рамках метода многоуровневого компьютерного моделирования (рис. 2), допускающего стратификацию компьютерной модели СТУС, представленной в формате метода компонентных цепей, на три взаимосвязанных уровня [9].

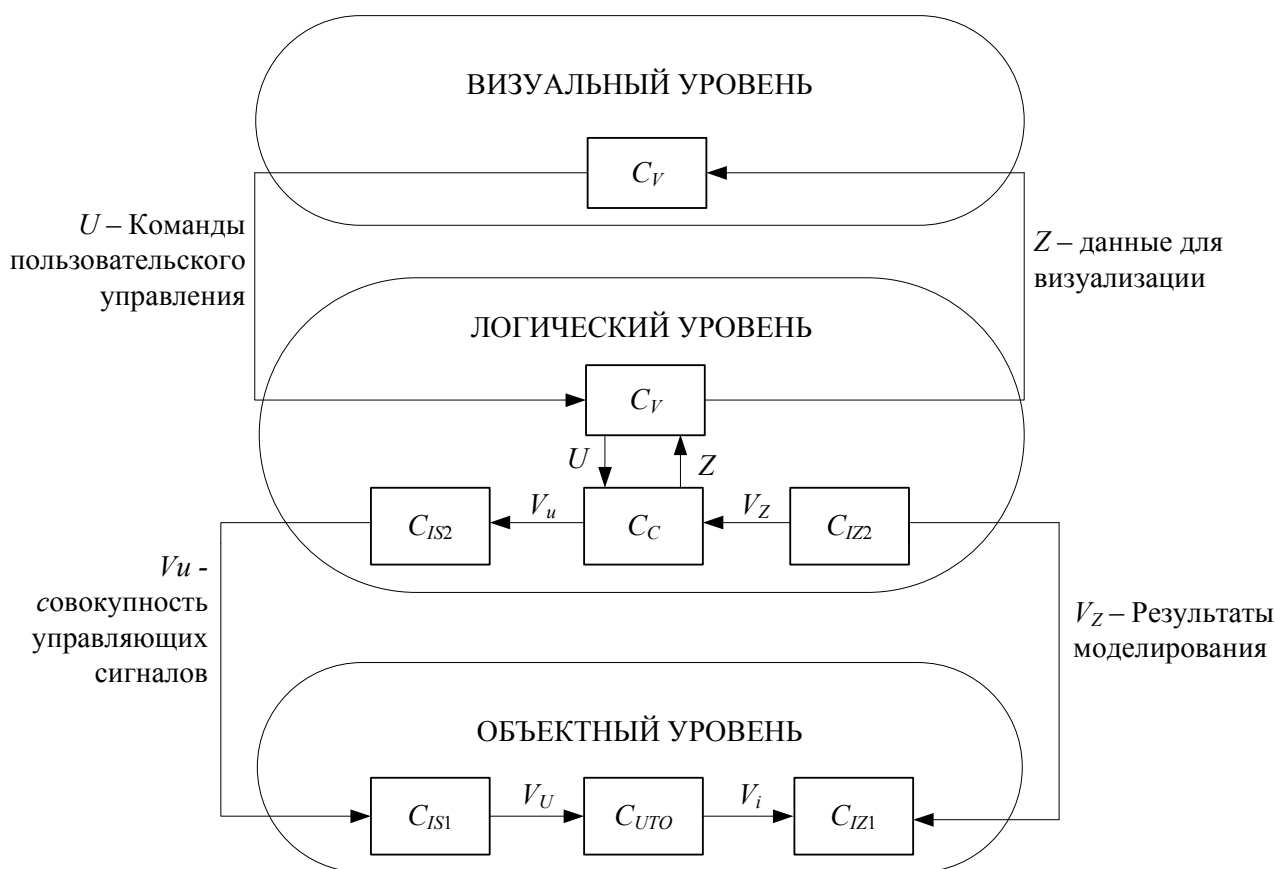


Рис. 2. Интеграция многоуровневой компонентной цепи сложных технических управляемых систем.

На рис. 2 изображены уровни:

объектный, содержащий в себе компьютерную модель управляемого технического объекта $C_{УТО}$ с подключенными к ней моделями исполнительных C_{IS1} и измерительных устройств C_{IZ1} , описывающую с помощью систем алгебро-дифференциальных уравнений протекающие в нем непрерывные процессы преобразования информационных, энергетических и вещественных потоков. Модели исполнительных устройств C_{IS1} осуществляют энергетические воздействия на УТО

V_U , пропорциональные управляющим информационным сигналам V_u , которые поступают на них с их логического уровня C_{IS2} . Модели измерительных устройств C_{IZ1} производят выборку значений соответствующих переменных V_Z из общего вектора решения V_R и их передачу на логический уровень с помощью своих отображений на нем C_{IZ2} ;

логический, на котором располагается (представленная в явном виде) имитационная модель алгоритма функционирования устройства управления C_C , на основе данных V_Z , поступающих с моделей измерительных устройств C_{IZ2} , и команд пользователя U , передаваемых визуальными компонентами C_V ; она подготавливает данные для визуализации Z , передаваемые визуальным компонентам множества C_V , а также вычисляет управляющие воздействия V_U , передаваемые на модели исполнительных устройства C_{IS2} ;

визуальный, на котором с помощью визуальных компонентов множества K_V осуществляется визуализация данных различных типов Z , а также формирование задающих воздействий U , представляющих собой команды пользовательского управления. Пройдя предварительную математико-алгоритмическую обработку, они передаются в качестве управляющих сигналов V_u исполнительным устройствам, представленным на объектном уровне совокупностью компонентов C_{IS1} , а на логическом уровне – компонентами C_{IS2} .

На объектном уровне многоуровневой компонентной цепи с помощью универсального вычислительного ядра [10] реализуются принципы математического моделирования процессов, протекающих в УТО C_{UTO} с взаимодействующими с ним исполнительными C_{IS1} и измерительными C_{IZ1} устройствами. Обработка полученных результатов V_Z , их подготовка к визуализации Z , а также выработка управляющих сигналов V_u на их основе с использованием команд пользовательского управления U осуществляются на логическом уровне средствами имитационного моделирования, в основе которых лежит алгоритм передачи сообщений [7] с данными различных типов между компонентами данного уровня. Визуализация результатов работы модели Z производится визуальными компонентами множества C_V на визуальном уровне. На этом же уровне многоуровневой КЦ представлены управляющие компоненты, с помощью которых формируются команды пользовательского управления U .

Заключение

Представленная интегрированная многоуровневая компонентная цепь СТУС развивает общую теорию компьютерного моделирования управляемых технических объектов и позволяет в едином формализме инкапсулировать свойства и методы математического, имитационного и визуального видов моделирования.

С помощью предложенной модели может производиться деление любой модели на явную и неявную составляющие в зависимости от более приемлемого способа описания той или иной части модели. Такая стратификация модели СТУС позволяет отделить нелинейные части обработки результатов от более линейной модели УТО и интегрировать их с математико-алгоритмическими блока-

ми расчета значений управляющих воздействий, оказываемых на УТО. Помимо повышения точности полученных результатов, такое построение модели позволяет повысить быстродействие анализа и оперативность выработки и принятия управленческих решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Черных И.В.* Simulink: среда создания инженерных приложений / под общ. ред. В.Н. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.
2. Введение в Multisim. Трехчасовой курс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/software/multisim_gettingstarted.pdf, свободный. Дата обращения 27.06.2016.
3. *Michael E. Henyak, Jr.* Chemical Process Simulation and the Aspen HYSYS Software. // Department of Chemical Engineering. Bucknell University. Lewisburg, PA, 17837. – 1998. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.departments.bucknell.edu/chem_eng/cheg200/HYSYS_Manual/a_BlueHYSYS.pdf, свободный. Дата обращения: 30.01.2015.
4. *Дмитриев В.М.* Арайс Л.А., Шутенков А.В. Автоматизация моделирования промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1995.
5. *Ганджа Т.В.* Формализованное представление технически сложного объекта с компьютерной моделью в контуре управления // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2012. – № 2. – С. 29-35.
6. *Строгалева В.П., Толкачева И.О.* Имитационное моделирование. – М.: МГТУ им. Баумана, 2008.
7. *Григорьева Т.Е.* Дискретно-событийное моделирование в СМ MAPS для курса «Системы массового обслуживания» // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1 (31). – С. 152-155.
8. MPI: A Message-Passing Interface Standard. Version 3.1- Message Passing Interface Forum, September 21, 2021. – 822 P. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mpi-forum.org/docs/mpi-3.0/mpi30-report.pdf>, свободный. Дата обращения 06.02.2015.
9. *Дмитриев В.М., Ганджа Т.В.* Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами // Информатика и системы управления. – 2013. – № 2 (36). – С. 24-35.
10. *Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Ганджа Т.В.* Архитектура универсального вычислительного ядра для реализации виртуальных лабораторий // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2004. – № 2. – С. 24-28.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Шелупановым.

E-mail:

Дмитриев Вячеслав Михайлович – dmitriewm@gmail.com;

Ганджа Тарас Викторович – gandgatv@gmail.com;

Зайченко Татьяна Николаевна – zntomsk@rambler.ru.