



УДК 004.94: 621.3

Т. Н. Зайченко, д-р техн. наук
Томский государственный ун-т систем
управления и радиоэлектроники
(Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 40,
тел. (382 2) 510530, E-mail: zntomsk@rambler.ru)

Разработка и применение средств компьютерного моделирования для исследования электротехнических устройств и электроэнергетических систем

(Статью представила канд. техн. наук Э. П. Семагина)

Описан общий подход к моделированию электротехнических устройств и систем, основанный на универсальном методе компонентных цепей и его объектной ориентации. Представлены программные реализации данного метода.

Описано загальний підхід до моделювання електротехнічних пристроїв та систем, який базується на універсальному методі компонентних ланцюгів і його об'єктній орієнтації. Наведено програмні реалізації даного методу.

К л ю ч е в ы е с л о в а: компонент, компонентная цепь, метод компонентных цепей, компьютерное моделирование, электротехнические устройства и системы.

Компьютерное моделирование является мощным средством познания процессов и явлений. Особую значимость оно имеет для таких объектов как электротехнические комплексы и системы. Их топологическая, лингвистическая, математическая и алгоритмическая сложность требует использования методов и программных средств аналитического и схемного, в том числе многоуровневого, моделирования. Рассмотрим подход к компьютерному моделированию электротехнических устройств и систем (ЭТУС), реализованный на основе универсального метода моделирования — метода компонентных цепей (МКЦ) [1].

Общие вопросы моделирования ЭТУС на основе МКЦ. Моделирование как процесс представляет собой совокупность процедур формирования, преобразования и анализа структурных и функциональных моделей исследуемых объектов. Обозначим M_c структурную модель, отображающую структурные свойства объекта, его состав и структуру. Функциональная модель M_ϕ — математическая модель, характеризующая процессы, протекающие в объекте.

Описание моделей осуществляется на соответствующих профессиональных языках. Для описания структурных моделей M_c обычно применяются языки схем L_c , имеющие графическую нотацию. Структура аппаратных средств детализируется с помощью функциональных, структурных и принципиальных схем, структура программных средств — с использованием схем алгоритмов, программ, данных и программных систем.

Описание функциональных моделей M_ϕ аппаратных средств осуществляется на математическом языке L_m , программных средств — на алгоритмических языках, языках программирования и моделирования программных систем. Функциональные модели также могут быть представлены в виде структурных схем. С позиций задания исходной информации об объекте будем считать возможным назвать «схемными» способы моделирования, для которых эта информация имеет вид схем, т. е. схемотехническое, функциональное, логическое моделирование.

Аналитическое моделирование как процесс анализа аналитических моделей может осуществляться аналитическими и численными методами. В данном случае будем рассматривать программные средства схемного и аналитического моделирования, ориентированные на численные методы исследования моделей и реализованные на основе МКЦ.

Метод компонентных цепей предназначен для моделирования физически неоднородных устройств и систем, исходная информация о которых задана в форме компонентной цепи (КЦ), т. е. в виде модели структуры $M_{ц.с.}$. Основным объектом метода КЦ является многополюсный компонент с произвольным числом связей, которым инцидентны переменные связей. Математическая модель компонента, описывающая процесс функционирования соответствующего элемента, — это уравнение либо система уравнений относительно его переменных связей и внутренних переменных.

Допускаются три типа уравнений модели компонента: линейные, нелинейные и обыкновенные дифференциальные первого порядка. Следовательно, МКЦ предназначен для моделирования устройств с сосредоточенными параметрами. Форму записи исходной математической модели, в которой используются уравнения допустимого типа, назовем базовой аналитической и обозначим $F_{б.а.}$

Совокупность компонентов, связи которых (именуемые ветвями КЦ) объединены в общих точках (именуемых узлами), определяется как КЦ $C_k = \{\mathbf{K}, \mathbf{S}, \mathbf{N}\}$, где \mathbf{K} — множество компонентов; \mathbf{S} — множество связей компонентов из \mathbf{K} ; \mathbf{N} — множество узлов цепи.

Методом КЦ предусматриваются четыре типа связей компонента:

связи энергетического типа S_k^e , которым соответствует пара топологических координат и пара дуальных переменных,

$$S_k^e \rightarrow (n_k, \eta_k b_k) \rightarrow (V_{nk}, V_{bk}),$$

где n_k — номер узла k -й связи; b_k — номер ветви; η_k — знак, задающий ориентацию связи; V_{nk}, V_{bk} — переменные связи потенциального и потокового типа;

связи информационного типа S_k^i , которым соответствует одна топологическая координата и одна переменная связи, имеющая произвольный физический смысл, $S_k^i \rightarrow n_k \rightarrow V_{nk}$;

связи скалярного типа, которым соответствует не более одной переменной одного типа; к ним относятся связи энергетические и информационные;

связи векторного типа, которым соответствуют более одной переменной одного типа; они являются объединением связей скалярного типа.

Математическая модель КЦ $M_{ц.ф}$, описывающая процесс функционирования исследуемого объекта, имеет вид

$$M_{ц.ф} = \{U_{КЦ}, U_{\delta}, U_{\tau}\} \text{ при } S^e \neq \emptyset \text{ либо } M_{ц.ф} = \{U_{КЦ}\} \text{ при } S^e = \emptyset, \quad (1)$$

где $U_{КЦ}$ — совокупность уравнений моделей компонентов, входящих в КЦ; U_{δ} — уравнения базового узла; U_{τ} — уравнения узловых топологических законов сохранения для переменных потокового типа, записанные для всех узлов КЦ за исключением базового; S^e — множество связей энергетического типа.

В методе КЦ предусматривается автоматическое формирование моделей КЦ во временной и частотной (для линейных непрерывных схем) областях. Каноническими формами компонентных уравнений во временной области являются: линейное, нелинейное и обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка. При моделировании во временной области $V_{nk} \rightarrow x(t), V_{bk} \rightarrow y(t)$, где x, y — физические переменные связи. При анализе в частотной области $V_{nk} \rightarrow \operatorname{Re} x(j\omega), V_{bk} \rightarrow \operatorname{Re} y(j\omega)$, где $j\omega$ — комплексная частота, а мнимые составляющие реализуются посредством внутренних переменных $V_{вн nk} \rightarrow \operatorname{Im} x(j\omega), V_{вн bk} \rightarrow \operatorname{Im} y(j\omega)$.

В результате алгебраизации и линеаризации дифференциальных и нелинейных уравнений моделей компонентов из (1) модель $M_{ц.ф}$ для временной и частотной областей принимает вид системы линейных алгебраических уравнений относительно переменных связей КЦ и вспомогательных переменных:

$$\Phi V = W, \quad (2)$$

где Φ — квадратная матрица коэффициентов; W — вектор-столбец правых частей; V — вектор-столбец решения КЦ, $V = [V_n, V_b, V_{вн}]^T$, где $V_n, V_b, V_{вн}$ — векторы потенциальных, потоковых и внутренних пере-

менных КЦ. При этом исходной формой модели компонента является модель во временной области, на основании которой также формируются уравнения для действительных и мнимых составляющих при моделировании в частотной области.

Достоинства метода КЦ при моделировании ЭТУС обусловлены следующим:

использованием в качестве базовой структурной сущности многополюсного компонента, что позволяет обеспечить совпадение либо близость языка формализованного представления ЭТУС в виде КЦ к профессиональному языку схем;

возможностью одновременного использования всех типов связей компонентов, что позволяет реализовать в рамках единых методических основ как физический, так и информационный подходы к моделированию ЭТУС;

возможностью использования в качестве компонентных уравнений линейных, нелинейных и обыкновенных дифференциальных уравнений, что позволяет реализовать широкий спектр моделей элементов ЭТУС в рамках задач схмотехнического, функционального и структурного моделирования; алгоритмической простотой формирования моделей КЦ вида (1) и (2).

Недостатком метода КЦ является использование полного координатного базиса КЦ, что приводит к увеличению времени решения системы (2).

Для реализации технологии визуального схемного моделирования функциональный аспект моделирования, отраженный в моделях КЦ вида (1), (2), дополнен конструкторским и поведенческим аспектами, а модель компонента рассматривается как совокупность трех субмоделей:

$$M_k(\mathbf{E}) = \{M_{k,\phi}(\mathbf{E}_\phi), M_{k,y}(\mathbf{E}_y), M_{k,v}(\mathbf{E}_v)\}, \quad (3)$$

где $M_{k,\phi}$ — математическая модель, описывающая процесс функционирования (функциональная субмодель); $M_{k,y}$ — геометрическая модель условного графического обозначения (УГО) компонента на чертеже КЦ (субмодель УГО); $M_{k,v}$ — геометрическая модель внешнего вида (субмодель внешнего вида); \mathbf{E}_ϕ , \mathbf{E}_y , \mathbf{E}_v — множества событий, приводящих к изменениям в субмоделях соответственно $M_{k,\phi}$, $M_{k,y}$, $M_{k,v}$; $\mathbf{E} = \mathbf{E}_\phi \cup \mathbf{E}_y \cup \mathbf{E}_v$.

Объектная ориентация МКЦ. Формализм МКЦ ориентирован на моделирование структурно сложных устройств и систем, к классу которых относятся ЭТУС и электроэнергетические системы, поскольку предусматривает реализацию методов подсхем, многоуровневого моделирования и моделирования по частям.

Цепное представление структурно сложных объектов осуществляется с использованием формализма иерархических подцепей [1, 2]. Как известно, для описания структурных моделей иерархического типа обыч-

но используется понятие подсистем, а для указания иерархии частей системы — термин «подподсистема» либо указывается уровень подсистемы. В методе КЦ цепное представление структурно сложных объектов осуществляется с использованием формализма иерархических подцепей (подсхем) [1, 2]. Подцепь C_n — это КЦ, для которой во множестве связей и узлов выделяются подмножества внутренних и внешних связей. Внешними связями подцепь подключается к другим структурным объектам КЦ. Подцепь i -го уровня — это подцепь, содержащая подцепи $(i+1)$ -го уровня и входящая в состав подцепи $(i-1)$ -го уровня. Будем выделять подцепи нижнего, промежуточного и верхнего уровней. Подцепь верхнего уровня — подцепь, которая не входит в состав других иерархических подцепей. Подцепь нижнего уровня — подцепь, которая не содержит подцепей. Таким образом, в общем случае объектом КЦ может быть компонент либо подцепь.

К особенностям структурно сложных объектов следует отнести переменную топологию КЦ и необходимость ее моделирования по частям. Для отображения данного свойства моделей используется такой объект КЦ как автономно моделируемая подцепь, т. е. подцепь, которая активизируется и включается в функциональную модель КЦ $M_{ц.ф}$ вида (1), (2) на определенных интервалах времени.

Реализация метода многоуровневого моделирования ЭТУС обеспечивается компонентами, относящимися к различным языкам описания ЭТУС: компонентами структурных, принципиальных электрических и кинематических схем, схем алгоритмов; согласующими компонентами, обеспечивающими согласование частей КЦ, состоящих из компонентов с различным типом связей.

Как указано выше, допустимые формы уравнений из $F_{б,а}$ определяют область применения МКЦ при моделировании устройств и систем непрерывного типа с сосредоточенными параметрами во временной области и линейных устройств и систем — в частотной области. Моделирование объектов, не относящихся к данному классу, может быть реализовано в МКЦ с использованием следующих подходов, при которых сохраняется инвариантность методов решения модели КЦ [2—4].

Для реализации логического моделирования цифровых устройств во временной области введены алгебраические аналоги логических переменных следующего вида: $V_i = 1$ — уровень логической единицы, $V_i = 0$ — уровень логического нуля. Функциональная модель компонента представляет собой совокупность уравнений, каждое из которых является линейным уравнением относительно переменной выходной связи компонента.

Как известно, при моделировании нелинейных систем автоматического управления (САУ) в частотной области уравнение для мнимой сос-

ставляющей переменной связи нелинейного компонента, в отличие от нелинейного, не может быть сформировано автоматически на основании исходного уравнения во временной области. Поэтому для нелинейных компонентов САУ уравнение для мнимой составляющей включено в функциональную субмодель компонента, а шаг его автоматического построения из алгоритма формирования модели КЦ исключен.

В качестве теоретической основы моделирования импульсных САУ в частотной области принята модель передаточной функции импульсной САУ вида

$$W^*(j\bar{\omega}) = \sum_{m=-m}^{m_{\max}} W(j(\bar{\omega} + 2\pi m)) W_{и.э}(j\bar{\omega}).$$

Здесь $W(j\bar{\omega})$ — амплитудно-фазовая характеристика линейной части; $\bar{\omega}$ — относительная частота; m, m_{\max} — относительное время; $W_{и.э}$ — амплитудно-фазовая характеристика импульсного элемента, интерпретируемого как звено задержки на время $\gamma(\bar{\omega} + 2\pi m)/(2\bar{\omega})$ с коэффициентом передачи

$$\bar{k}_\tau = \bar{k} \left(\sin \frac{\bar{\omega} + 2\pi m}{2} \gamma \right) / \left(\frac{\bar{\omega} + 2\pi m}{2} \gamma \right),$$

где $\bar{k} = k_{и}\gamma$; $k_{и}$ — коэффициент передачи импульсного элемента; γ — относительная длительность импульса.

Моделирование систем с распределенными параметрами требует построения эквивалентных схем замещения, которое может быть выполнено вручную либо автоматически.

В связи с многообразием форм описания исходных функциональных моделей компонентов ЭТУС определим приемы их преобразования к двум каноническим формам представления моделей МКЦ — базовой аналитической модели непрерывного типа $M_{к.ф} F_{б.а} \bar{D}$, где \bar{D} — признак непрерывности, и структурной модели в виде подцепи $M_{к.ф} C_{п}$, т. е. к форме схемы замещения. Введем следующие виды преобразований:

модели элемента непрерывного типа $M_{к.ф} \bar{D}$, заданной в аналитической форме F_a с использованием нелинейных и интегродифференциальных уравнений произвольного вида, к базовой аналитической форме

$$\langle M_{к.ф} \bar{D} F_a \rangle \rightarrow \langle M_{к.ф} \bar{D} F_{б.а} \rangle;$$

модели элемента непрерывного типа $M_{к.ф} \bar{D}$, заданной в таблично-графическом виде $F_{тг}$, к базовой аналитической форме в два этапа,

$$\langle M_{к.ф} \bar{D} F_{тг} \rangle \rightarrow \langle M_{к.ф} \bar{D} F_a \rangle \rightarrow \langle M_{к.ф} \bar{D} F_{б.а} \rangle;$$

модели элемента дискретного типа $M_{к.ф}D$, представленной в аналитическом виде с использованием логических уравнений $F_{а.л}$, к базовой аналитической форме

$$\langle M_{к.ф} D F_{а.л} \rangle \rightarrow \langle M_{к.ф} \bar{D} F_{б.а} \rangle;$$

модели элемента дискретного типа $M_{к.ф}D$, представленной в таблично-графической форме $F_{тг}$ в виде таблицы истинности либо временных диаграмм входных-выходных сигналов, к базовой аналитической форме в два этапа,

$$\langle M_{к.ф} D F_{тг} \rangle \rightarrow \langle M_{к.ф} D F_{а.л} \rangle \rightarrow \langle M_{к.ф} \bar{D} F_{б.а} \rangle;$$

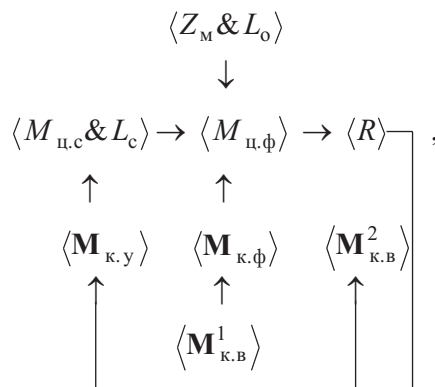
модели элемента дискретного типа, заданной в виде разностных уравнений $F_{а.р}$, к форме подцепи

$$\langle M_{к.ф} D F_{а.р} \rangle \rightarrow \langle M_{к.ф} C_{п} \rangle;$$

модели элемента дискретного типа, заданной в виде дискретной передаточной функции $F_{а.в}$, к форме подцепи

$$\langle M_{к.ф} D F_{а.в} \rangle \rightarrow \langle M_{к.ф} D F_{а.р} \rangle \rightarrow \langle M_{к.ф} C_{п} \rangle.$$

Обобщенная схема процесса компьютерного моделирования на основе МКЦ. Для организации процесса схемного моделирования в форме эксперимента вводятся в рассмотрение компоненты — средства эксперимента, т. е. компоненты-источники, компоненты-регуляторы, компоненты-измерители, в том числе регистрирующего типа, и функционалы, а также компоненты контроля вычислительного эксперимента и управления им. Тогда технология визуального эксперимента может быть реализована посредством субмоделей внешнего вида данных компонентов. С учетом субмоделей конструкторского типа (субмоделей УГО $M_{к.у}$ и внешнего вида $M_{к.в}$) модель процесса визуального схемного моделирования на основе МКЦ может быть представлена модулем информационного преобразования вида



где $M_{к.в}^1$ и $M_{к.в}^2$ — множества моделей внешнего вида соответственно средств воздействия и регулирования и средств индикации и измерения; L_o — внутренний язык описания, используемый в программном средстве моделирования; Z_m — задание на моделирование; R — результаты моделирования.

Аналитическое моделирование состоит из трех шагов: ввод функциональной модели ЭТУС $M_{ф}$, записанной на языке математики L_m , решение модели $M_{ф}$ и визуализация результатов. Поскольку структурная схема является графическим способом представления математической модели, программно-алгоритмические средства схемного моделирования можно применить для решения задач аналитического моделирования, если реализовать его в виде

$$\langle M_{ф} \& L_m \rangle \rightarrow \langle M_{ц.с} \& L_o, Z_m \& L_o \rangle \rightarrow \langle M_{ц.ф} \rangle \rightarrow \langle R \rangle,$$

$$\uparrow$$

$$\langle M_{к.ф} \rangle,$$

где $M_{ц.с}$ и $M_{ц.ф}$ — структурная и функциональная модели КЦ соответствующей исходной математической модели ЭТУС $M_{ф}$. Здесь КЦ $M_{ц.с}$ состоит из компонентов структурных схем. Поскольку визуализация данной КЦ на чертеже не требуется, для ее описания используется некоторый внутренний язык L_o .

Обобщенная схема процесса компьютерного моделирования на основе МКЦ представлена на рис. 1.

Блок 1 соответствует принятию пользователем решения о способе моделирования, режиме и параметрах схемного моделирования.

Блоки 2 — 4 характеризуют процессы задания информации о моделях ЭТУС: структурных (блоки 2, 3) для схемного моделирования и функциональной (блок 4) для аналитического моделирования. Для реализации процессов в блоках 2 и 3 должен быть разработан редактор схем, для блока 4 — редактор математических выражений или редактор формул, обеспечивающий ввод математической модели на языке, приближенном к естественно-математическому, т. е. в символьно-графическом виде. Выходной информацией блоков 2—4 является структурная модель КЦ и задание на моделирование, записанные с использованием внутренней формы представления $M_{ц.с} \& L_o, Z_m \& L_o$. Для блоков 2 и 3 информация о задании на моделирование Z_m формируется пользователем. В блоке 4 выполняется автоматический синтез структурной модели КЦ $M_{ц.с}$ и задания на моделирование Z_m .

Блок 5 обеспечивает формирование и решение функциональной модели КЦ $M_{ц.ф}$ для статических и динамических режимов моделирования во

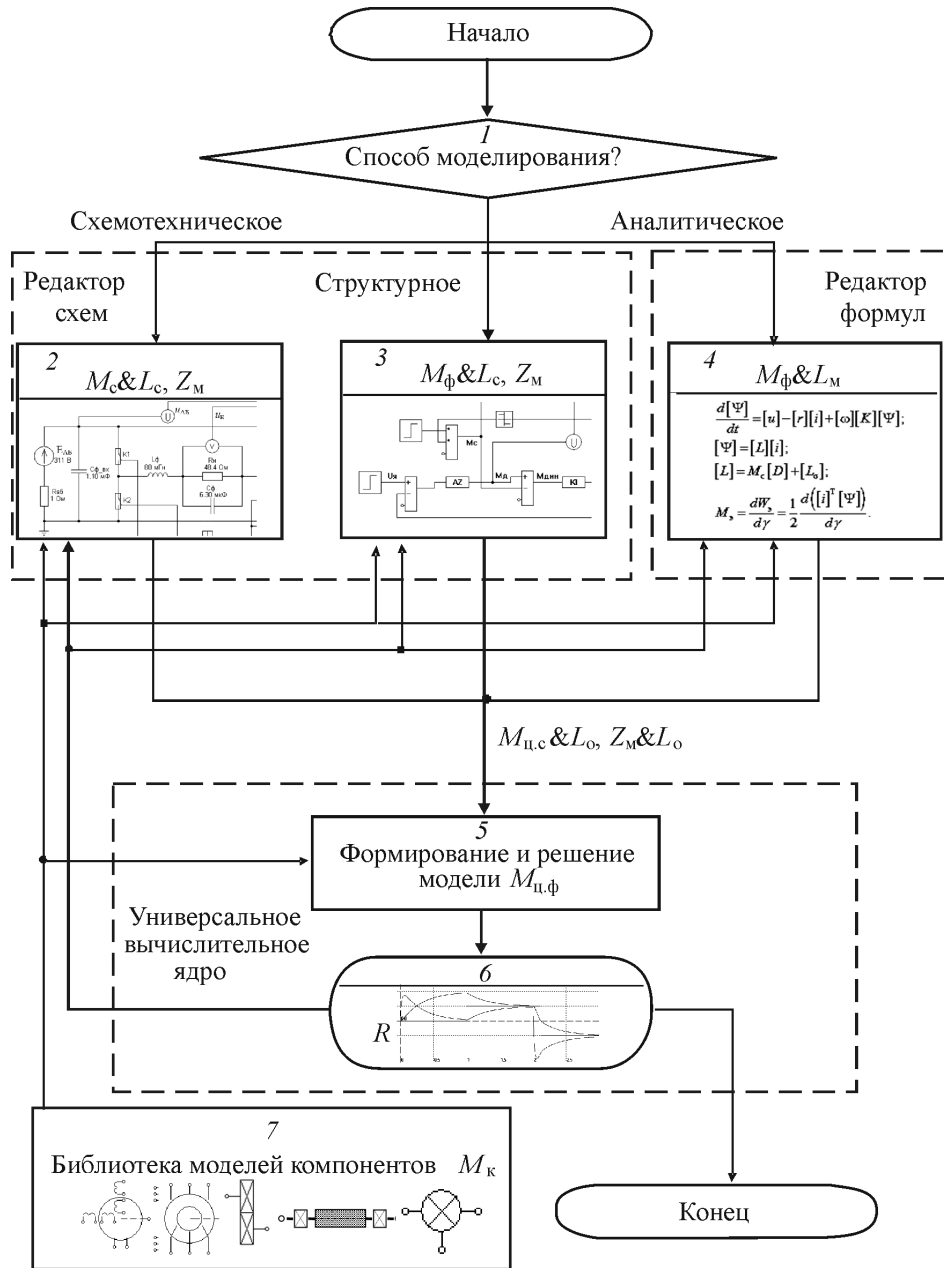


Рис. 1.

временной и в частотной областях. Его выходные данные (блок б) визуализируются в редакторе КЦ либо в редакторе формул, а также могут быть записаны в файл для хранения, последующего их анализа и обработки.

Блок 7 — библиотека моделей компонентов — центральный блок, определяющий объектную ориентацию средств моделирования. Библиотека содержит модели компонентов и поддерживает процессы создания чертежей схем, формирования и решения модели КЦ, визуализации результатов расчетов.

Средства компьютерного моделирования на основе МКЦ. Алгоритмы моделирования ЭТУС и модели компонентов реализованы в виде программных средств, разработанных с использованием технологии объектно-ориентированного программирования и предназначенных для использования на IBM-совместимых компьютерах под управлением операционной системы Windows (язык программирования — Microsoft Visual C++). На основании того что структурная схема является графическим способом представления математической модели, была исследована возможность применения программно-алгоритмических средств схемного моделирования для решения задач аналитического моделирования. Выбраны теоретические основы для выполнения преобразования в виде методов анализа и расчета математических выражений, базирующихся на обратной польской записи. Разработанные программные средства моделирования ЭТУС включают следующее:

систему схемного моделирования МАРС-ЭТУ в составе универсальной системы МАРС [5] и объектно-ориентированной библиотеки вычислительных моделей компонентов ЭТУС;

систему автоматизации математических вычислений «Макрокалькулятор» [6] для аналитического моделирования ЭТУС;

генераторы моделей компонентов.

На рис. 2, а, б представлены основные экранные формы интерфейса пользователя систем МАРС-ЭТУ, а на рис. 2, в — «Макрокалькулятор». Система моделирования МАРС-ЭТУ обеспечивает расчет статического и динамического режимов во временной и частотной областях, расчет семейств характеристик, анализ чувствительности, статистический анализ. Центральную часть вычислительного ядра системы моделирования в настоящее время составляют:

режимы анализа во временной и в частотной областях, в том числе режимы «статика линейная», «статика нелинейная», «динамика», «динамика с рабочей точкой», «динамика с итерациями» для анализа во временной области;

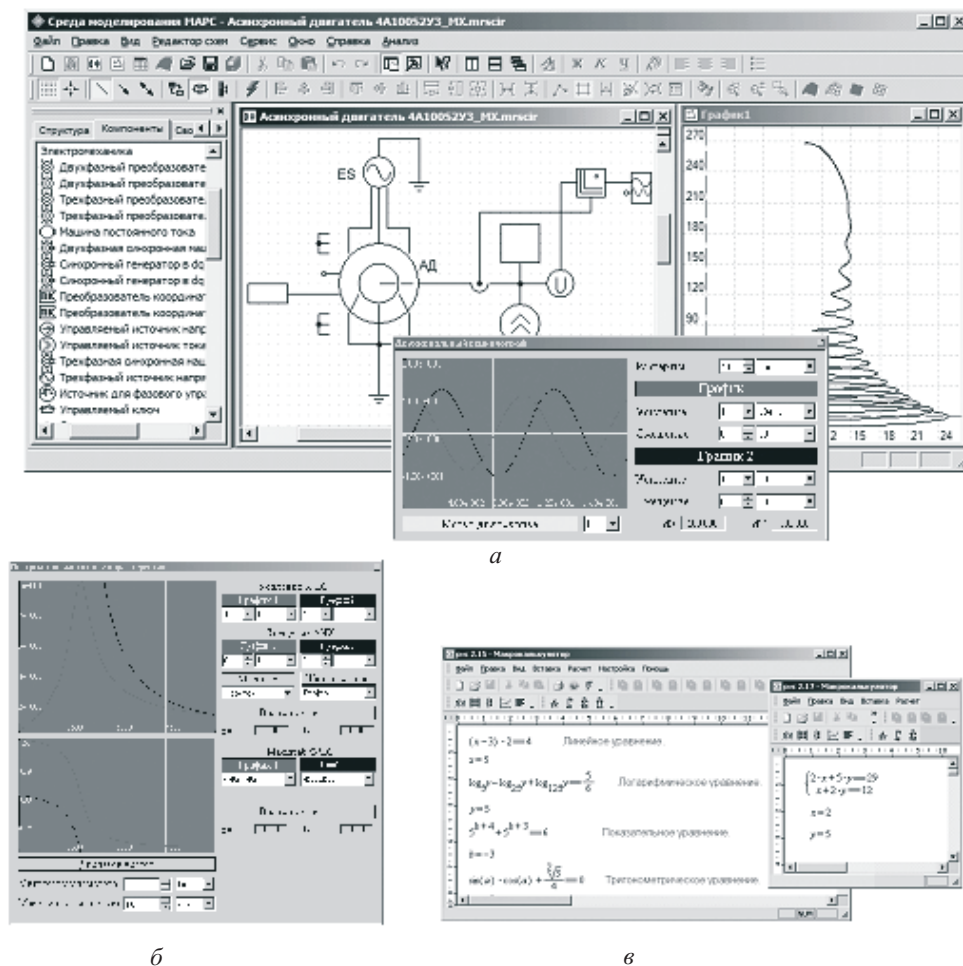


Рис. 2

методы формирования линеаризованной модели КЦ вида (2) во временной и в частотной областях, в том числе с постоянным и переменным шагом;

явные и неявные схемы алгебраизации дифференциальных уравнений — методы Эйлера, трапеций, Рунге—Кутта, Гира;

метод Ньютона для линеаризации нелинейных уравнений и свободных членов дифференциальных уравнений;

методы решения систем линейных алгебраических уравнений.

Следует заметить, что компьютерные модели компонентов являются инвариантными относительно методов алгебраизации дифференциальных

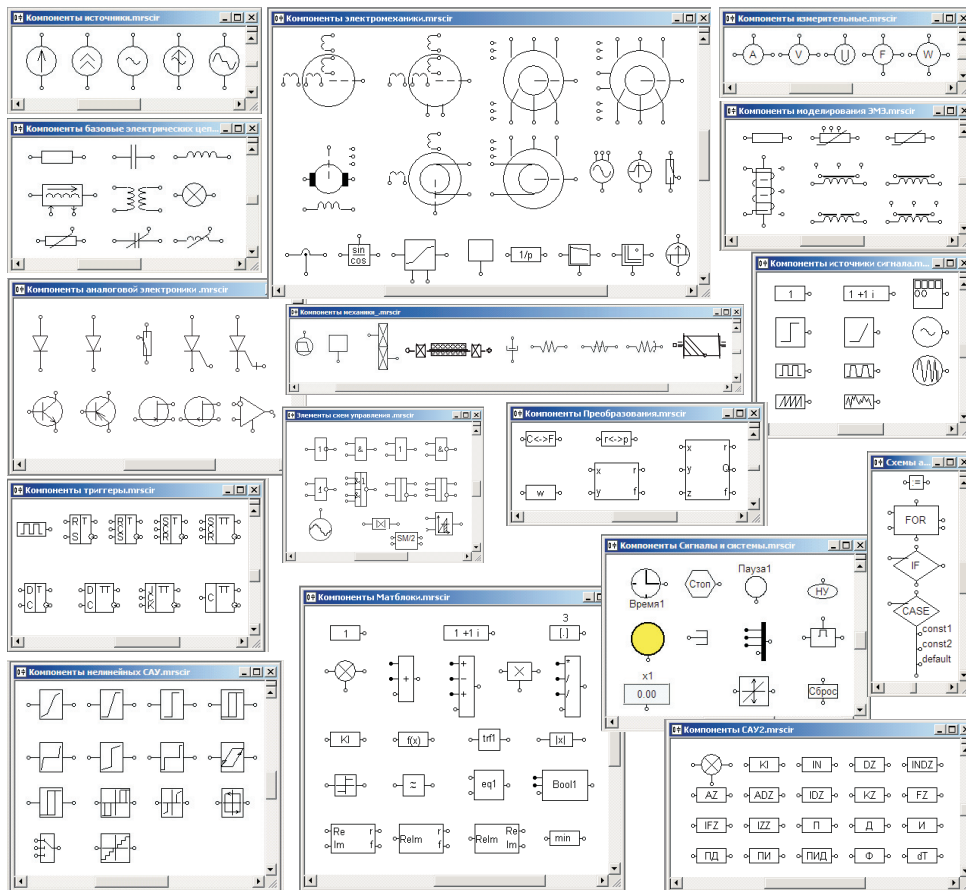


Рис. 3

уравнений и решения модели КЦ, т. е. наполнение библиотеки методов решения дифференциальных уравнений не потребует модификации библиотеки моделей компонентов.

Состав ядра библиотеки моделей компонентов ЭТУС показан на рис. 3. Компоненты для схемотехнического моделирования имеют связи энергетического типа, потенциальные переменные которых в зависимости от типа компонента имеют смысл напряжения, скорости, магнитного напряжения, потоковые — тока, момента, силы, магнитного потока. Построение КЦ осуществляется согласно формализму принципиальных и структурных схем. Предусмотрено взаимодействие с базой данных параметров компонентов, в том числе параметров PSpice-моделей полупроводниковых приборов. Разработанная библиотека моделей обеспечивает решение

задач схемотехнического, структурного и многоуровневого моделирования однородных и неоднородных электронных, механических, электромеханических и электроэнергетических систем. Процесс разработки встроенных вычислительных моделей компонентов поддерживается программными средствами создания геометрических субмоделей УГО, а функциональных субмоделей (3) — генераторами субмоделей.

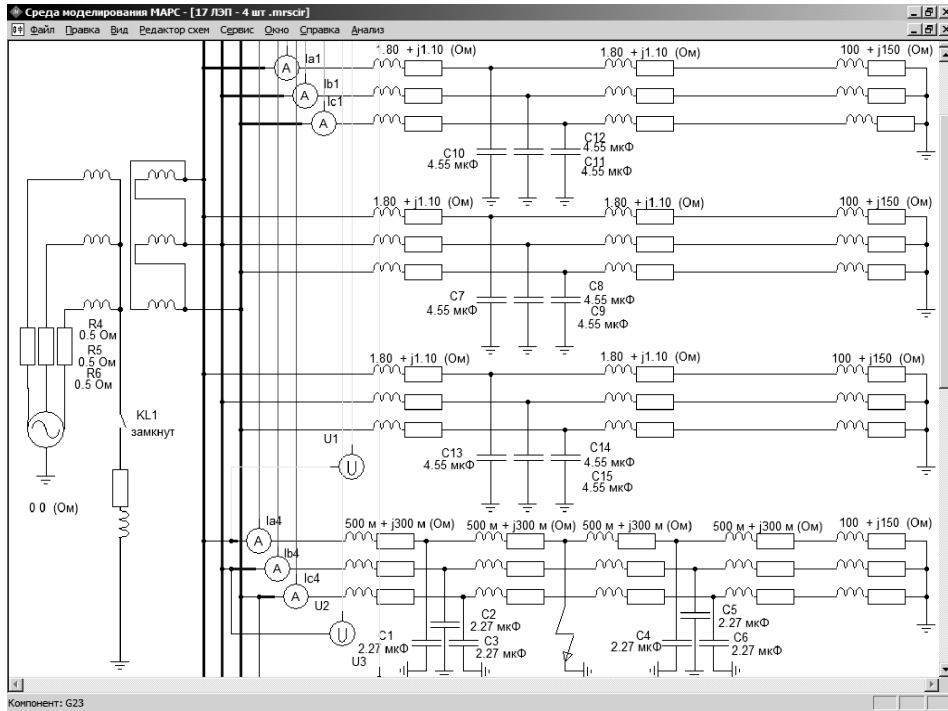
Система автоматизации математических вычислений «Макрокалькулятор» обеспечивает решение задач аналитического моделирования ЭТУС с использованием численных методов решения моделей, а именно: вычисление математических выражений, решение уравнений и систем уравнений, построение графиков функций. Поддерживается работа со стандартными функциями и функциями пользователя, дискретным аргументом, векторами и матрицами.

Достоверность способов формализованного представления ЭТУС, взаимодействия с моделью КЦ и вычислительным ядром обусловлена применением методов теории электрических цепей, электропривода, автоматического управления, теории моделирования, алгоритмизации, методов вычислительной математики и анализа математических выражений и подтверждается многочисленными тестовыми исследованиями, результатами численного и аналитического моделирования, полученными с использованием систем Matlab/Simulink, Mathcad, Electronics Workbench, которые не противоречат теоретическим представлениям о характере процессов, протекающих в ЭТУС, и данным натурных экспериментов.

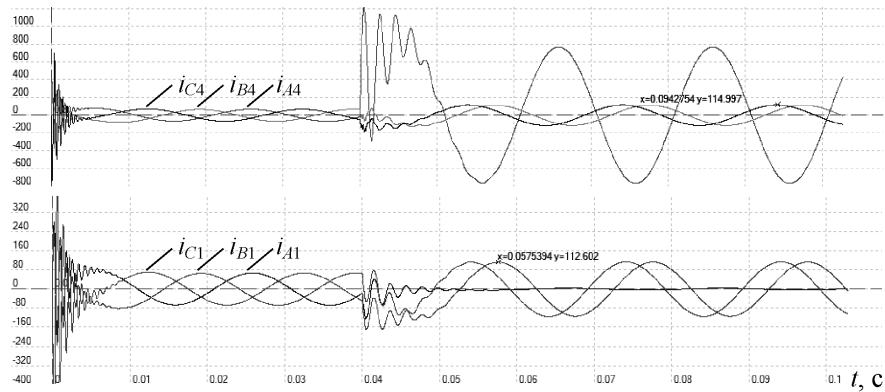
Практика моделирования ЭТУС. Разработанные программные средства моделирования ЭТУС используются в программах обучения и при выполнении научно-исследовательских работ, в частности при моделировании систем электропитания и электроприводов, при исследовании электромагнитных переходных процессов в линиях электропередач 6—10 кВ и разработке систем релейной защиты и автоматики, для моделирования электроинструмента ударного действия, при проектировании и экспертизе строительных и дорожных машин.

На основе системы схемного моделирования МАРС-ЭТУ разработаны виртуальные учебные лаборатории по электротехнике и электронике, системам автоматического управления, преобразовательной технике и электрическим машинам. Система аналитического моделирования «Макрокалькулятор» вошла в состав учебно-методического комплекса по электротехнике и электронике, включающего учебное пособие, виртуальную лабораторию, компьютерный задачник и тренажер.

Пример моделирования электрических переходных процессов в электрической системе распределения электрической энергии. Рас-



а



б

Рис. 4

смотрим пример моделирования электроэнергетической системы, состоящей из четырех линий электропередачи, для расчета токов линий при однофазном коротком замыкании на землю в одной из линий. Для формализованного представления электроэнергетических систем при решении задач исследования электромагнитных и электромеханических переход-

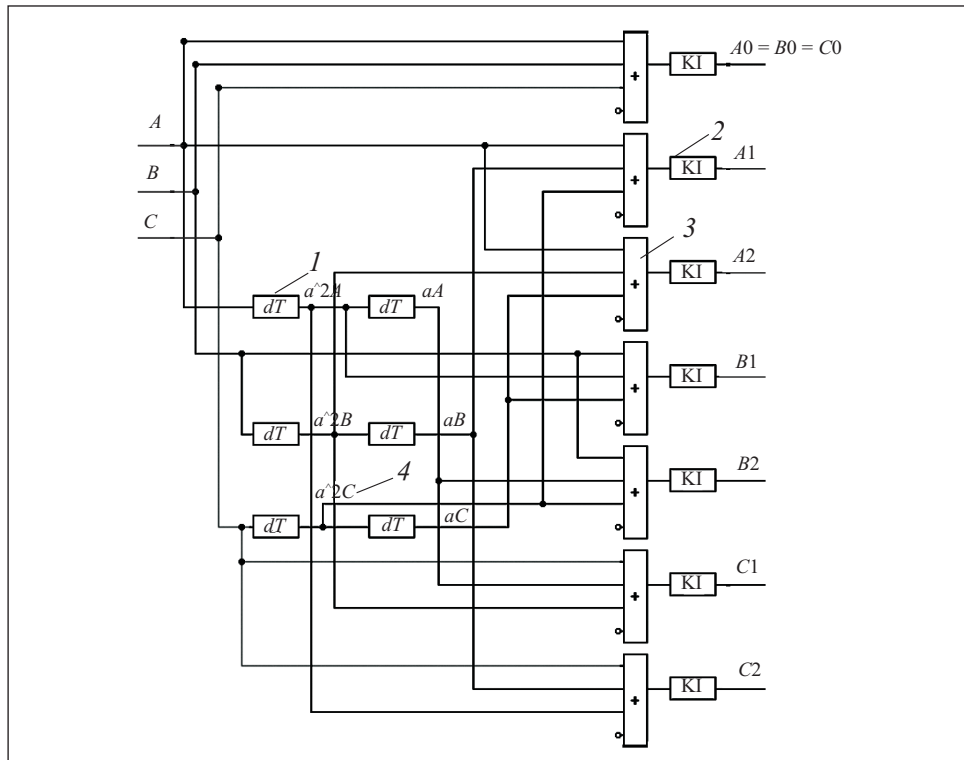


Рис. 5

ных процессов могут быть использованы компоненты электротехники и электромеханики (см. рис. 3), а также специализированные компоненты электроэнергетики — две обмотки трехфазного трансформатора, активно-индуктивная ветвь, короткое замыкание, короткое замыкание с дугой.

На рис. 4, а изображена КЦ энергетической системы при условии короткого замыкания в фазе А четвертой линии. В модели приняты следующие параметры генератора: действующее напряжение 115 кВ, частота 50 Гц, внутреннее сопротивление 0,5 Ом. Параметры трансформатора: номинальное напряжение первичной обмотки 110 кВ, номинальное напряжение вторичной обмотки 11 кВ, синхронная частота 50 Гц, номинальная (полная) мощность 16 МВА, напряжение короткого замыкания 0,1 %, активные потери мощности короткого замыкания 85 кВт. Модели линий электропередачи построены на основе Т-образных схем замещения из компонентов «активно-индуктивная ветвь».

На рис. 4, б представлены временные диаграммы токов линий электропередачи: i_{A4} , i_{B4} , i_{C4} — токи четвертой линии, в которой произошло ко-

роткое замыкание; i_{A1} , i_{B1} , i_{C1} — токи первой линии. Короткое замыкание произошло в момент 0,04 с. Сопротивление замыкания $R_{к.з}$ может варьироваться в процессе исследования. Результаты, представленные на рис. 4, б, соответствуют $R_{к.з} = 0$. Моделирование выполнено в режиме «динамика неявная» с алгебраизацией дифференциальных уравнений неявным методом Эйлера.

Решение задач анализа энергетических систем требует специализированной обработки результатов, т. е. расчета составляющих нулевой, прямой и обратной последовательностей, определение модуля и фазы этих составляющих. Для выполнения данных расчетов созданы специальные компоненты-измерители.

При разработке компонента для расчета составляющих последовательностей использован формализм подцепей. Структурная схема данного компонента приведена на рис. 5, ее чертеж выполнен в редакторе схем системы МАРС-ЭТУ. Модель реализована с помощью компонентов «запаздывание» (1), «пропорциональное звено» (2) и «сумматор» (3). Переменные связей, расположенных слева от компонента и обозначенных буквами A , B и C , соответствуют входным сигналам, переменные связей, расположенных справа, — составляющим последовательностей: нулевой ($A0 = B0 = C0$), прямой ($A1, B1, C1$) и обратной ($A2, B2, C2$); a — оператор поворота, $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$. Запись операций с векторами при обозначении переменных внутренних связей (4) выполнена с использованием символики, принятой в языках программирования.

В компоненте-измерителе модуля и фазы данные величины определяются относительно опорного сигнала, параметрами которого являются частота и фаза.

Для повышения быстродействия вычислительного эксперимента рекомендуется использовать компонент для задания точности решения линейной модели КЦ на временных интервалах анализа, соответствующих переходным процессам и установившимся режимам.

Выводы. Использование универсального метода компонентных цепей в качестве единой теоретической основы компьютерного моделирования позволило разработать программные средства, обеспечивающие реализацию системного подхода к исследованию ЭТУС и электроэнергетических систем. Применение представленных программных систем целесообразно на предприятиях, занимающихся разработкой, эксплуатацией и экспертизой ЭТУС и энергетических систем, а также в учебных заведениях различного уровня как средство организации компьютерных лабораторных и расчетно-графических работ.

A general approach to modeling electrical engineering devices and systems has been described. The approach is based on and its objective orientation method of component chains universal. The software realizations of the method are presented.

1. Арайс Е. А., Дмитриев В. М. Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ. — М. : Радио и связь, 1982. — 160 с.
2. Автоматизация функционального проектирования электромеханических систем и устройств преобразовательной техники/Дмитриев В.М., Зайченко Т.Н., Гарганеев А.Г., Шурыгин Ю. А. — Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та, 2000. — 292 с.
3. Зайченко Т. Н. Автоматизация схемотехнического моделирования электрических машин в системе МАРС // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2004. — № 11. — С. 1—9.
4. Зайченко Т. Н. Структурное моделирование электротехнических устройств в системе МАРС // Там же. — 2005. — № 10. — С. 1—9.
5. Программная система «Среда моделирования МАРС»/ Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Зайченко Т. Н., Кураколов А. Н. — М. : ВНИИЦ, 2007. — ОФАП № 50200701733.
6. Среда моделирования МАРС/В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, Т.В. Ганджа, А.Н. Кураколов. — Томск.: Из-во В-Спектр, 2007. — 296 с.

Поступила 13.08.08

ЗАЙЧЕНКО Татьяна Николаевна, д-р техн. наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. В 1985 г. окончила Томский государственный университет. Область научных исследований — разработка программных средств компьютерного моделирования устройств и систем различной физической природы.