

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.И., Юфит Г.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью ЭВМ. – М.: Советское радио, 1975. – 157 с.
2. Stukach O.V. Variable Attenuator with Low Phase Shift / Proceedings of the 9th European Conference on Wireless Technology. – Manchester, UK, 10-12 September 2006. – P. 241–244.
3. Ильюшенко В.Н., Стукач О.В., Туев В.И. Оптимизация аттенуаторов с фазовым сдвигом, инвариантным к вносимому ослаблению // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. – 1990. – Вып. 7. – С. 25–29.
4. Walker S. A Low Phase Shift Attenuator // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1994. – V. 42. – № 2. – P. 182–185.
5. Прикладной статистический анализ / С.В. Алексахин, А.В. Балдин. – М.: Приор, 2004. – 221 с.
6. Управляемые аттенуаторы / Г.М. Крылов, С.И. Хоняк, А.Н. Тыныныка и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 200 с.

Поступила 20.09.2007 г.

УДК 004.94

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ С ДИСКРЕТНЫМ ВРЕМЕНЕМ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ В СИСТЕМЕ МАРС

Т.Н. Зайченко

ФГНУ «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики», г. Томск
E-mail: aem@snc.com.ru

Рассматриваются вопросы формализованного представления и моделирования систем с дискретным временем и программных средств в отечественной системе моделирования МАРС. Приведены способы формализованного представления дискретных систем, заданных разностными уравнениями и передаточными функциями, модели компонентов схем алгоритмов. Представлены примеры моделирования в системе МАРС.

Введение и постановка задачи

На кафедре теоретических основ электротехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники на основе метода компонентных цепей (МКЦ) Е.А. Арайса и В.М. Дмитриева [1] создана универсальная система имитационного моделирования в среде Windows [2, 3]. В работах [2, 4, 5] были рассмотрены вопросы решения в системе МАРС задач динамики электротехнических устройств. С помощью компонентов структурных схем – источников воздействий пилообразной и прямоугольно-ступенчатой формы, компараторов и логических элементов было выполнено моделирование электронных средств управления ключами устройств силовой электроники, электрических аппаратов управления электротехническими устройствами, реализующими, например, пуск, торможение и реверс электрических двигателей, прием и сброс нагрузки. Анализ устройств с микропроцессорным управлением ставит задачи имитационного моделирования программных средств (ПС) без использования инструментальной ЭВМ. Целью настоящей статьи является исследование подходов к моделированию систем с дискретным временем и программных средств в рамках МКЦ и системы моделирования МАРС.

Концепция моделирования систем с дискретным временем

Известны два способа описания процессов в дискретных системах: с помощью разностных уравнений (РУ) и передаточных функций (ПФ). Так, например, для линейного РУ вида

$$y(k) = \sum_{l=0}^L a_l x(k-l) - \sum_{m=1}^M b_m y(k-m) = 0, \quad k \geq 0, \quad (1)$$

ПФ аргумента $z=e^{j\omega}$ имеет вид

$$W(z) = \frac{a_0 + \sum_{l=1}^L a_l z^{k-l}}{1 + \sum_{m=1}^M b_m z^{k-m}} = 0, \quad k \geq 0, \quad (2)$$

где $x(k-l)$, $y(k-m)$ – входной и выходной сигналы в моменты времени $(k-l)T$ и $(k-m)T$; k, l, m, L, M – целые; T – период квантования; a_l, b_m – коэффициенты; ω – частота.

Целью исследования систем с дискретным временем является расчет временных диаграмм либо числовых последовательностей сигналов.

Система МАРС предоставляет возможности моделирования объектов, допускающих формализованное представление в форме компонентных цепей (КЦ) из компонентов со связями энергетического и информационного типов, во временной и частотной для линейных КЦ областях. Связи энергетического типа инцидентны две переменные – потенциальная и токовая; связи информационного типа – потенциальная. Математическая модель КЦ со связями энергетического типа состоит из топологических и компонентных уравнений; для КЦ со связями информационного типа – только из компонентных. Основными режимами анализа во временной области в системе МАРС являются «статика» и «динамика», в том числе «динамика явная» и «динамика неявная». В первом случае дифференциальные уравнения моделей компо-

нентов алгебраизуются по явному методу Эйлера, во втором — по неявному. В обоих случаях линеаризация нелинейных уравнений осуществляется по методу Ньютона [1–3]. Для организации вычислительного эксперимента в КЦ включаются компоненты-источники воздействий и компоненты для визуализации результатов расчетов. Исследуем возможности применения МКЦ и системы MAPC для формализованного представления и моделирования систем с дискретным временем.

Очевидно, что с использованием компонентов структурных схем, относящихся к классу компонентов со связями информационного типа, в соответствии с общепринятыми правилами построения структурных схем может быть сформирована КЦ РУ. Для построения КЦ линейного РУ вида (1) необходимы компоненты:

- «запаздывание» для формирования задержанных сигналов;
- «пропорциональное звено» для формирования слагаемых РУ с учетом коэффициентов a_i , b_m ;
- «сумматоры» для формирования КЦ уравнения;
- «начальные условия» для задания отличных от нуля значений переменных связей компонентов.

Данные компоненты входят в состав библиотеки моделей компонентов структурных схем системы MAPC [2, 5]. Входные и выходные сигналы дискретных систем являются переменными связей КЦ. Для решения РУ в системе MAPC необходимо выполнить моделирование КЦ РУ во временной области. Результаты решения — временные диаграммы переменных связей КЦ РУ — могут визуализироваться как в табличном, так и графическом видах.

Вычислительный эксперимент по моделированию РУ в системе MAPC

В качестве примера рассмотрим РУ вида

$$y(k) = x(k) - x(k-1) - y(k-1), \quad k \geq 0, \quad (3)$$

где $x(k)$, $y(k)$ — входной и выходной сигналы в моменты времени kT , k — целое; T — период квантования; $x(k-1)$, $y(k-1)$ — входной и выходной сигналы в предыдущий момент времени $(k-1)T$;

$$x(k) = \begin{cases} 1, & \text{если } k \text{ четное;} \\ 0, & \text{если } k \text{ нечетное;} \end{cases} \quad (4)$$

$$x(-1) = y(-1) = 0. \quad (5)$$

Аналитическое уравнения (1) имеет вид:

$$y(0) = x(0) - x(-1) - y(-1) = 1 - 0 - 0 = 1;$$

$$y(1) = x(1) - x(0) - y(0) = 0 - 1 - 1 = -2;$$

$$y(2) = x(2) - x(1) - y(1) = 1 - 0 + 2 = 3;$$

$$y(3) = x(3) - x(2) - y(2) = 0 - 1 - 3 = -4;$$

$$y(4) = x(4) - x(3) - y(3) = 1 - 0 - 4 = 5 \text{ и т. д.}$$

Для первых десяти членов входной последовательности $X=[1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0]$ получим $Y=[1, -2, 3, -4, 5, -6, 7, -8, 9, -10]$.

КЦ для моделирования РУ вида (3) в системе MAPC приведена на рис. 1, а. КЦ РУ построена из компонентов «запаздывание» — 1, реализующих задержку входного и выходного сигналов на один такт времени, и «сумматор» — 2. Компонент «источник сигнала» — 3, являющийся генератором прямоугольных импульсов, предназначен для задания входной импульсной последовательности X вида (4). Нулевые начальные условия (5) в системе MAPC обеспечиваются автоматически. Для визуализации результатов в КЦ включены измерители переменных связей — 4 и компонент «график» — 5. Примем шаг квантования равным $T=1$ мкс. В этом случае компонент «источник сигнала» должен генерировать единичные прямоугольные импульсы длительностью 1 мкс с интервалом 1 мкс, а компоненты «запаздывание» — осуществлять задержку сигнала на 1 мкс.

Диаграммы, изображенные на рис. 1, б, получены при моделировании КЦ РУ с постоянным и переменным шагом в режимах «динамика явная» и «динамика неявная». В данном случае шаг моделирования принят равным $h=0,2T=0,2$ мкс. Результаты моделирования интерпретируются как временные диаграммы сигналов. Увеличение шага приводит к увеличению длительности фронтов сигналов.

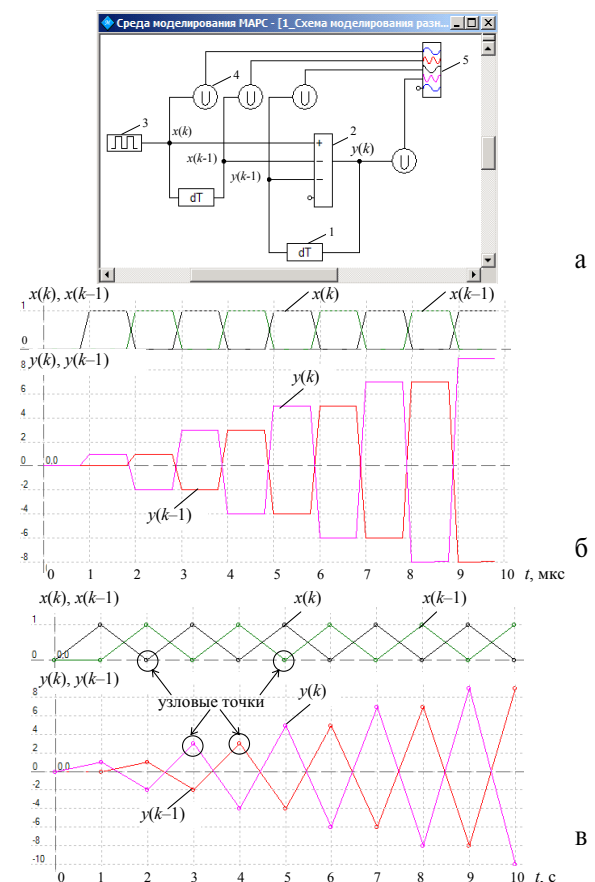


Рис. 1. Компонентная цепь (а) и результаты моделирования (б, в) разностного уравнения

Режим анализа «динамика с внутренними итерациями»

С целью получения результатов моделирования в форме элементов числовых последовательностей необходимо, чтобы шаг моделирования был равен периоду квантования. Если шаг моделирования h принять равным $T=1$ с, то целые значения времени можно интерпретировать как номера элементов последовательностей. Однако при $h=T$ численное решение модели КЦ в режимах «динамика явная» и «динамика неявная» не соответствует аналитическому. Поэтому для моделирования систем с дискретным временем был разработан режим анализа «динамика с внутренними итерациями». В данном режиме автоматически реализуется $n_{\text{и}}$ итераций в пределах заданного пользователем шага моделирования h , т. е. фактически расчет модели КЦ выполняется с постоянным шагом $h/n_{\text{и}}$, а на график выдаются значения переменных связей КЦ с шагом h . Следует отметить, что для данного режима анализа период квантования и шаг решения принимаются равными $T=h$, а время запаздывания, являющееся параметром компонентов «запаздывание», задается кратным T .

Диаграммы, изображенные на рис. 1, в, получены при моделировании рассмотренной выше КЦ РУ (3) в режиме анализа «динамика с внутренними итерациями». В данном случае смысловую нагрузку несут узловые точки графиков, которые интерпретируются как элементы последовательностей. Здесь длительности импульса и паузы источника сигнала, время запаздывания и шаг моделирования равны 1 с.

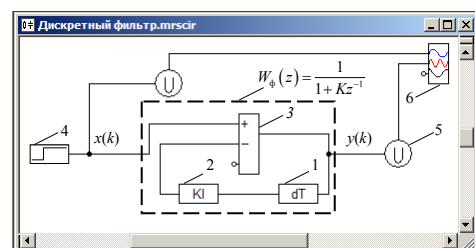
Формализованное представление и моделирование дискретных элементов, заданных ПФ

Для описания дискретных элементов наряду с РУ используются ПФ, в то время как целью моделирования по-прежнему является расчет временных диаграмм либо числовых последовательностей сигналов. В этой связи возникает вопрос о выборе способов формализованного представления и моделирования элементов, математические модели которых заданы в форме ПФ.

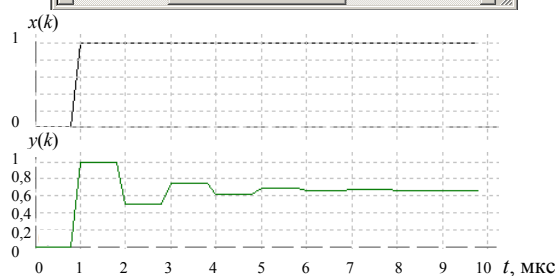
Как известно, ПФ представляет собой эквивалентный способ описания РУ, т. е. ПФ может быть преобразована к форме РУ и наоборот [6]. Поэтому модель дискретного элемента, заданного ПФ, может быть представлена в форме КЦ эквивалентного РУ, моделирование которого выполняют во временной области. При преобразовании ПФ к виду РУ следует учитывать, что ПФ вида $W_3(z)=z^{-k}$ имеет звено запаздывания, выполняющее задержку сигнала на целое число тактов k . На основе данного подхода может быть создана библиотека моделей дискретных компонентов, заданных ПФ. В состав системы МАРС входит инструментальное средство, обеспечивающее оперативную разработку структурных моделей компонентов в форме чертежей КЦ – редактор макрокомпонентов.

Рассмотрим пример моделирования дискретного фильтра с ПФ вида $W_{\Phi}(z)=1/(1+Kz^{-1})$ [7]. С учетом промежуточного преобразования $y(z)=x(z)-Kz^{-1}y(z)$ получим разностное уравнение $y(k)=x(k)-Ky(k-1)$, на основании которого может быть построена КЦ фильтра. На рис. 2, а, изображена КЦ для исследования данного фильтра. КЦ фильтра состоит из компонентов «запаздывание» – 1, «пропорциональное звено» – 2, «сумматор» – 3. К входному узлу КЦ фильтра подключен «источник ступенчатого воздействия» – 4. С целью измерения входного $x(k)$ и выходного $y(k)$ сигналов в КЦ включены измерители – 5, а для их визуализации – компонент «график» – 6. Аналитическое решение модели фильтра при $K=0,5$, единичном входном воздействии $x(k)=1$ при $k>0$ и нулевых начальных условиях $y(0)=0$ имеет вид:

$$\begin{aligned} y(1) &= x(1) - y(0) = 1 - 0,5 \cdot 0 = 0,5; \\ y(2) &= x(2) - y(1) = 1 - 0,5 \cdot 0,5 = 0,75; \\ y(3) &= x(3) - y(2) = 1 - 0,5 \cdot 0,75 = 0,625; \\ y(4) &= x(4) - y(3) = 1 - 0,5 \cdot 0,625 = 0,6875 \text{ и т. д.} \end{aligned}$$



а



б

Рис. 2. Компонентная цепь (а) и результаты моделирования (б) дискретного фильтра

Результаты моделирования фильтра во временной области при интервале дискретизации 1 мкс приведены на рис. 2, б. Они совпадают с аналитическим решением и результатами моделирования, полученными в системе *Matlab/Simulink* [7].

Концепция моделирования программных средств

Программа представляет собой последовательность операторов, производящих некоторое действие над данными. Наиболее удобной формой представления алгоритмов и программ являются схемы алгоритмов. Операции, связанные с обработкой данных, отображаются на схемах алгоритмов в виде символов процесса, а потоки данных и управления – с помощью символов линий. Очевидно, что в МКЦ имеются предпосылки для решения задач моделирования ПС. Во-первых, язык КЦ, имеющий графическую нотацию, позволяет реализовать формализованное представление алго-

ритмов и программ в виде схем алгоритмов. Во-вторых, с помощью компонентов структурных схем может быть выполнено формализованное представление и расчет достаточно широкого спектра математических выражений [5], являющихся неотъемлемой составной частью операторов программы. В этой связи исследуем подходы к формализованному представлению и моделированию ПС в рамках МКЦ.

Согласно общепринятой декомпозиции схем алгоритмов и программ естественно выделить базовый компонент схем алгоритмов «процесс», реализующий обработку данных. Как и при формализованном представлении структурных схем, данные, использующиеся в программе, являются переменными связей КЦ: данные скалярного типа – переменными связей скалярного типа; данные структурированного типа – переменными связей векторного типа, представляющими собой объединение скалярных связей [2]. Модель КЦ – это система алгебро-дифференциальных уравнений относительно переменных связей, которые могут принимать лишь числовые значения. Поэтому в рамках МКЦ естественным образом организуется работа с данными целого и вещественного типа. Другие типы данных могут использоваться после введения аналогий. Например, для булевого типа аналогия имеет вид: значение «истина» соответствует единичному значению переменной связи, а «ложь» – нулевому. Данная аналогия применялась в работах [2, 5] при моделировании цифровых элементов и логических функций.

В связи с тем, что программа – это упорядоченная последовательность действий, при тополого-математической интерпретации компонентов схем алгоритмов следует учесть событийный аспект и передачу управления от одного компонента типа «процесс» к другому. Для реализации событийного аспекта в рамках МКЦ в работе [8] было предложено использовать автономно моделируемые подцепи с управляющими связями информационного типа, предназначенными для активизации подцепей. При данном подходе в модель КЦ включаются уравнения моделей компонентов активизированных в данный момент подцепей. В результате КЦ объекта является цепью с переменной топологией, а модель КЦ имеет переменную размерность.

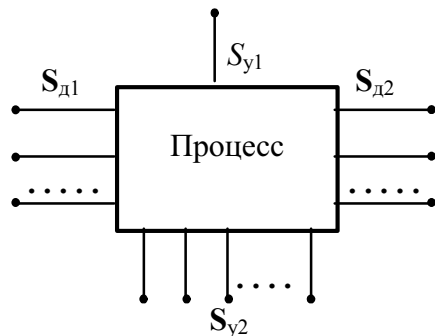


Рис. 3. Компонент «процесс»

Будем рассматривать обобщенный компонент «процесс» как автономно моделируемую подцепь со связями информационного типа (рис. 3). Среди связей выделим управляющие связи, обеспечивающие передачу управления от одного процесса к другому, и связи-данные, предназначенные для передачи данных. Одна из управляющих связей S_{y1} является входной. Переменная данной связи используется для активизации процесса преобразования входных данных в выходные. Остальные управляющие связи образуют множество выходных связей S_{y2} . Переменные этих связей предназначены для запуска процессов обработки данных, реализованных в других компонентах типа «процесс». Среди связей-данных также выделяются множества входных связей S_{d1} и выходных S_{d2} , переменные которых имеют смысл входных и выходных данных процесса. Основное содержание модели компонента «процесс» составляет КЦ из компонентов структурных схем, отображающая преобразование входных данных S_{d1} в выходные S_{d2} . Для удобства формализованного представления связи-данные могут объединяться в связи векторного типа. Для объединения скалярных связей в векторную и расщепления векторной на скалярные в системе МАРС предусмотрен компонент «микшер» [5]. Семантику связи будем отображать записью вида

$$S_n \rightarrow (n) \rightarrow (V_n) \rightarrow (u),$$

где S_n – идентификатор связи; n – топологическая координата связи (номер узла); V_n – потенциальная переменная связи; u – физическая переменная, действующая на связи и используемая в математической модели компонента.

В случае одной входной S_{y1} и одной выходной S_{y2} управляющих связей вида

$$S_{y1} \rightarrow (n_{y1}) \rightarrow (V_{ny1}) \rightarrow (u_{y1}); S_{y2} \rightarrow (n_{y2}) \rightarrow (V_{ny2}) \rightarrow (u_{y2}) \quad (6)$$

где u_{y1} и u_{y2} – флаги управления операцией в данном и последующем компонентах «процесс».

Передача управления осуществляется по следующему алгоритму:

- при $u_{y1}=0$ выполнение процесса запрещено, КЦ преобразования данных не активизирована; $u_{y2}=0$;
- при $u_{y1}=1$ выполнение процесса разрешено, КЦ преобразования данных активизирована; процесс выполняется, $u_{y2}=0$; если процесс завершен, то $u_{y1}=0$, $u_{y2}=1$.

Модели компонентов и правила построения схем алгоритмов

Операторы, использующиеся в программах, подразделяются на три группы: простые, включающие операторы присваивания, безусловного перехода, вызова процедуры; структурные – составные, условные и повтора; ввода – вывода. К основным формам управления процессом выполнения программы относятся выполнение последовательности операторов; выполнение последовательно-

сти операторов до тех пор, пока некоторое условие истинно; использование проверки истинности условия для выбора между различными возможными способами действия. Поэтому основными операторами являются оператор присваивания и структурные. Данным операторам и формам управления соответствуют символы схем алгоритмов «процесс», «решение» и состоящий из двух частей символ «граница цикла». Рассмотрим способы тополого-математической интерпретации основных операторов в рамках формализма МКЦ.

Центральным оператором программ является оператор присваивания вида « $y:=x$ », предписывающий выполнить выражение x и присвоить результат переменной y . Расчет значения выражения в системе МАРС осуществляется в процессе решения модели КЦ выражения, построенного из компонентов структурных схем. При этом одна из переменных связей КЦ выражения интерпретируется как его результат. Следует различать два типа операторов присваивания: операторы, в которых идентификатор переменной y не содержится в выражении x , и операторы, где y входит в x .

В первом случае специальный компонент, реализующий операцию присваивания, не требуется, но его можно ввести с целью более удобного визуального представления КЦ выражения. Данная задача решается двухсвязным компонентом «операция присваивания» ($S_1 \rightarrow (n_1) \rightarrow (V_{n1}) \rightarrow (x)$, $S_2 \rightarrow (n_2) \rightarrow (V_{n2}) \rightarrow (y)$) с моделью $V_{n1} - V_{n2} = 0$. Для построения КЦ оператора присваивания необходимо к связи S_1 подключить связь КЦ, переменная которой имеет смысл значения выражения. Также введем в рассмотрение односвязный компонент «переменная» ($S_1 \rightarrow (n_1)$), обеспечивающий визуализацию идентификатора переменной и не имеющий математической модели. Примеры построения КЦ, реализующих функцию присваивания, приведены на рис. 4. Рис. 4, а, соответствует исходной КЦ выражения, сформированной согласно формализму структурных схем. Переменная выходной связи сумматора имеет смысл переменной y , что отображается с помощью метки на чертеже КЦ. На рис. 4, б, в КЦ включен компонент «переменная» — 1. Имя переменной визуализируется на условном графическом обозначении компонента. В КЦ на рис. 4, в, используют компоненты «переменная» и «операция присваивания» — 2.

В том случае, когда идентификатор переменной используется в обеих частях оператора присваивания, значение переменной в правой части — это значение на предыдущем шаге вычислительного процесса обработки данных, т. е. задержанное значение. Введем в рассмотрение двухсвязный компонент «операция присваивания с задержкой» ($S_1 \rightarrow (n_1) \rightarrow (V_{n1}) \rightarrow (x)$, $S_2 \rightarrow (n_2) \rightarrow (V_{n2}) \rightarrow (y)$), предназначенный для присвоения переменной y задержанного значения x . Модель компонента имеет вид линейного уравнения относительно переменной связи V_{n2} с переменной правой частью: $V_{n2} = x$. Инициализация переменных связей, если их значения в начале моделирования отличны от нуля, осуществляется с использованием компонента «начальные условия».

Пример, иллюстрирующий построение КЦ операторов присваивания и организацию циклических вычислений, представлен на рис. 5, а. Здесь изображена КЦ алгоритма расчета выражений $X_1 = \sum i$ и $X_2 = \sum i^2$ путем выполнения в цикле двух операторов присваивания вида $X_1 := X_1 + i$; $X_2 := X_2 + i^2$, где i — параметр цикла. Компонент — 1 обеспечивает дискретное изменение переменной i в заданных пределах. Компоненты «начальные условия» — 2 используются для инициализации переменных X_1 , X_2 . С помощью компонентов структурных схем сумматора и умножителя осуществляется моделирование выражений, стоящих в правых частях операторов присваивания. Компонент — 3 — «операция присваивания с задержкой». На рис. 5, б, представлены результаты моделирования данной КЦ при $i=1, 10$, совпадающие с аналитическим решением $X_1=55$; $X_2=385$.

Одним из операторов, обеспечивающим организацию циклических вычислений, является оператор цикла типа FOR, предписывающий при изменении текущего значения параметра цикла i от начального значения $N1$ до конечного $N2$ выполнять оператор тела цикла. Для генерации значений параметра цикла введем в рассмотрение компонент «параметр цикла FOR». Поскольку параметр цикла обычно используется при расчете математических выражений, а значения $N1$ и $N2$ могут не быть константами, целесообразно предусмотреть три связи компонента, переменные которых имеют смысл $N1$, $N2$ и i . Модель компонента обеспечивает дискретное изменение переменной связи, имеющей смысл текущего значения параметра цикла i , от $N1$ до конечного $N2$.

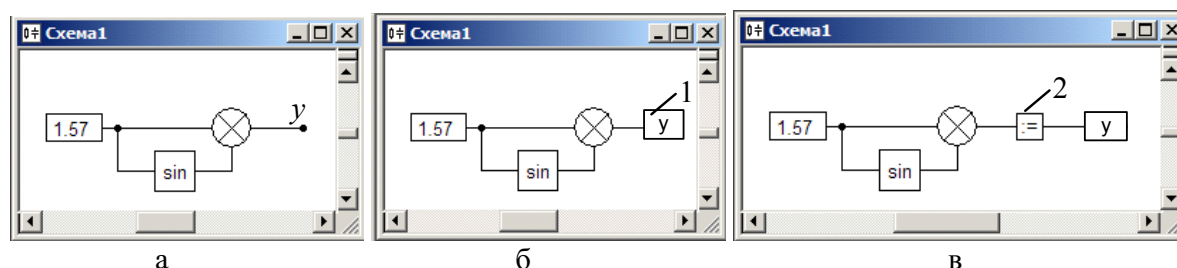


Рис. 4. Примеры построения КЦ

С целью выделения совокупности повторяющихся вычислений как процесса в рамках программы введем в рассмотрение компонент «оператор цикла FOR», относящийся к классу компонентов типа «процесс». Компонент имеет две управляющие связи типа (б) и связи-данные, две из которых предназначены для передачи в компонент параметров цикла $N1$, $N2$, остальные связи S_{d2} имеют смысл вход-выходных данных процесса. Основное содержание структурной модели компонента «оператор цикла FOR» как подцепи составляет КЦ операторов тела цикла. В ее состав входит компонент «параметр цикла FOR», при этом обеспечивается дискретное изменение параметра цикла i от $N1$ до конечного $N2$, начиная с того момента, когда компонент был активизирован, т.е. при $u_{y1}=1$.

Для организации выбора между процессами предусмотрены компоненты «условный оператор IF» и «условный оператор CASE» типа «процесс». Компоненты имеют управляющие связи и связи для передачи данных. Компонент «условный оператор IF» обеспечивает активизацию одного из двух альтернативных процессов в соответствии со значением выражения L , являющегося переменной связи компонента. Если компонент активизирован ($u_{y1}=1$), то

модель компонента инициализирует переменные выходных управляющих связей в соответствии с алгоритмом: если $L=1$, то $u_{y21}=1$, иначе $u_{y22}=1$. Компонент «условный оператор CASE» решает задачу активизации одного из нескольких процессов в соответствии со значением параметра C . При этом множество значений параметров $C_j[j]$, определяющих выбор j -го процесса обработки данных, является параметром компонента, а значение C – переменной связи. Если компонент активизирован ($u_{y1}=1$), модель компонента инициализирует переменные выходных управляющих связей в соответствии с алгоритмом: если $C=C_j[j]$, то $u_{y2j}=1$. К выходным управляющим связям компонентов «условный оператор IF» и «условный оператор CASE» выходными управляющими связями подключаются компоненты типа «процесс». Переменные данных связей обеспечивают активизацию соответствующих альтернативных процессов.

С целью активизации работы алгоритма в целом предусмотрен односвязный компонент «оператор начало» ($S_{y1} \rightarrow (n_{y1}) \rightarrow (V_{ny1}) \rightarrow (u_{y1})$), обеспечивающий инициализацию переменной управляющей связи $u_{y1}=1$. Условные графические обозначения базовых компонентов схем алгоритмов приведены на рис. 6.

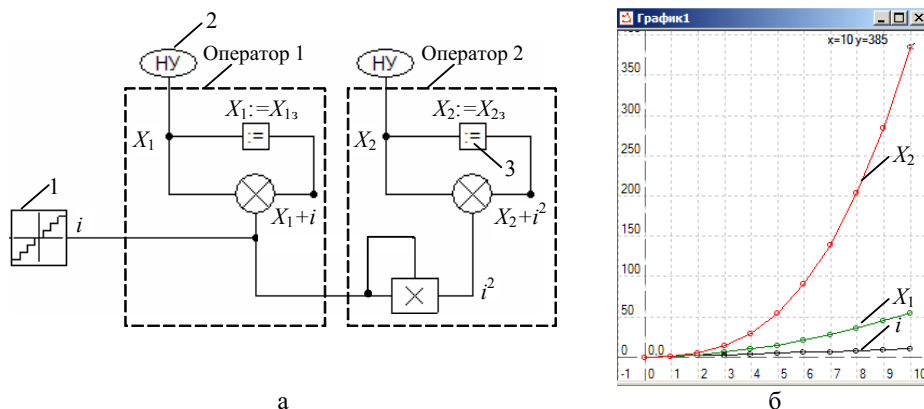


Рис. 5. КЦ для выполнения операторов в цикле (а) и результаты ее моделирования (б)

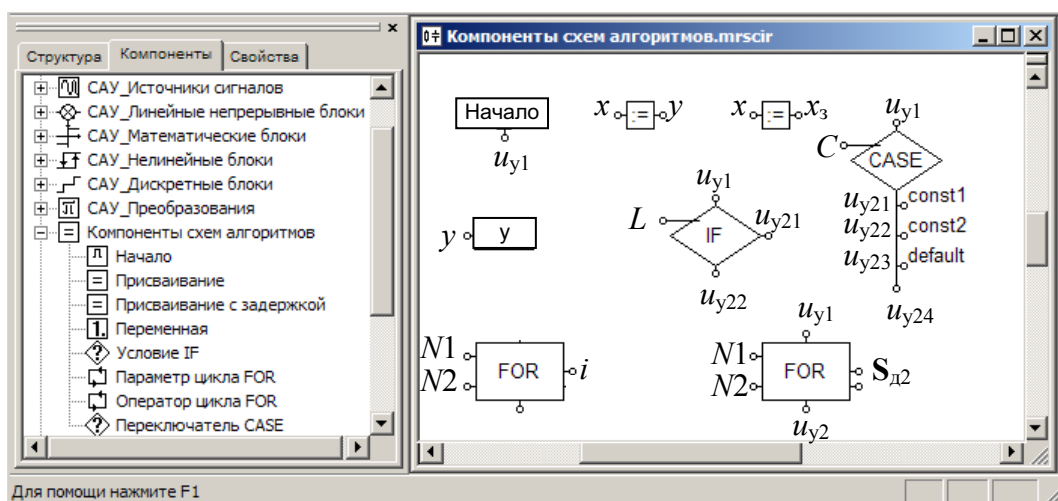


Рис. 6. Компоненты схем алгоритмов

Исходя из предложенной концепции формализованного представления ПС и моделей компонентов схем алгоритмов, сформулируем правила построения КЦ ПС.

1. КЦ ПС строится из компонентов схем алгоритмов и компонентов структурных схем с использованием блочно-иерархического подхода.
2. Все компоненты соединяются в узлах КЦ путем объединения управляющих связей и связей-данных согласно схеме алгоритма вычислений.
3. Для активизации начала вычислительного процесса к входной управляющей связи первого компонента-процесса подключается компонент «оператор начало».

Для измерения переменных связей к узлам КЦ ПС подключаются компоненты-измерители. Моделирование КЦ ПС осуществляется во временной области в режиме «динамика с внутренними итерациями».

Процесс представления в форме КЦ алгоритмов, реализуемых реальными микропроцессорными системами, может оказаться трудоемким. Поэтому дальнейшее развитие подходов к моделированию ПС связано с интеграцией системы имитационного моделирования МАРС с системой автоматизации математических вычислений «Макрокалькулятор» [9], также разработанной на кафедре теоретических основ электротехники. Теоретической основой системы «Макрокалькулятор» является МКЦ, но в качестве его входного языка используется не язык схем, как в системе МАРС, а математический язык. При этом вычисление математического выражения предполагает его преобразование к форме КЦ структурной схемы и ее моде-

лирование с использованием моделирующих программ системы МАРС.

Заключение

Исследованы подходы к формализованному представлению и моделированию систем с дискретным временем и программных средств в системе имитационного моделирования МАРС. Показано, что библиотека моделей компонентов структурных схем системы МАРС позволяет оперативно реализовать формализованное представление и моделирование систем с дискретным временем. Для получения результатов в форме временных диаграмм сигналов необходимо использовать режимы анализа «динамика явная» либо «динамика неявная»; в форме числовых последовательностей — в режиме «динамика с внутренними итерациями». Предложены модели компонентов схем алгоритмов и способы формализованного представления программных средств в виде компонентных цепей. Разработаны модели базовых компонентов схем алгоритмов. Корректность моделей дискретных систем и схем алгоритмов в системе МАРС продемонстрирована на примерах. Система МАРС может использоваться для исследования систем с дискретным временем и программных средств в рамках задач учебного процесса.

Предложенные способы формализованного представления элементов схем алгоритмов может служить основой цепного представления алгоритмов и программных средств в системе автоматизации математических вычислений «Макрокалькулятор».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 // В.М. Дмитриев, Т.Н. Зайченко, А.Г. Гарганеев, Ю.А. Шурыгин. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. — 292 с.
3. 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.
4. Зайченко Т.Н. Решение задач динамики электромеханических систем в среде автоматизированного моделирования МАРС // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 4. — С. 147–153.
5. Зайченко Т.Н. Структурное моделирование электротехнических устройств в системе МАРС // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2005. — № 10. — С. 1–9.
6. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. — 616 с.
7. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. — СПб.: Питер, 2002. — 528 с.
8. Зайченко Т.Н. Моделирование робота ГЛАЗ-РУКА с управлением по вектору скорости // Производственно-технический опыт. — 1990. — № 11. — С. 83–88.
9. Ерошкин М.А., Ганджа Т.В. Язык представления математических выражений для реализации редактора Макрокалькулятора // Компьютерные технологии в образовании / Под ред. В.М. Дмитриева. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. — Вып. 2. — С. 23–28.

Поступила 20.12.2006 г.