

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



Ц 840
К-523

18/VIII-75
11 - 8809

Н.Г.Клюкин

3043/2-75

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ
(описание языка и программы)

1975

11 - 8809

Н.Г.Клюкин

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ

(описание языка и программы)

Одним из эффективных методов исследования непрерывных систем и процессов является моделирование на цифровой ЭВМ с помощью специальных языков и программных комплексов ^{1/}.

Для исследователя с минимумом знаний в программировании и располагающим малой ЭВМ или терминалом в системе с разделением времени особенно привлекательны языки, позволяющие вести диалог с машиной. Среди них наиболее простым и распространенным является язык CSMP 1130 ^{2/}, разработанный для ЭВМ IBM 1130.

В работе описывается версия этого языка и программа для малой ЭВМ HP 2116C.

Описание языка

Язык имеет целью обеспечить доступ к цифровой ЭВМ широкого круга специалистов, занимающихся исследованием и проектированием непрерывных систем.

Эта цель достигается тем, что:

1. Язык переносит на цифровую ЭВМ идеологию аналогового моделирования, традиционно используемую для изучения непрерывных процессов.

2. Знание алгоритмического языка /Фортран/ может потребоваться лишь в некоторых случаях.

Диалоговый режим общения с машиной и использование средств графического отображения информации /дисплей, графопостроитель/ обеспечивает простоту и удобство работы с ЭВМ.

Язык ориентирован на структурное представление обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих непрерывные процессы. Его основу составляет набор стандартных блоков; функция каждого из них реализуется в ЭВМ некоторым программным модулем.

Закладывая соответствующие алгоритмы в функции блоков, язык можно специализировать для исследования систем регулирования, электрических схем, механических или других процессов. Так, например, для проектирования электрических схем нужно иметь блоки, воспроизводящие характеристики усилителей, вентилях, схем с насыщением и т.д.

Большинство блоков описываемого языка /табл. 1/ /напр., усилитель, интегратор, сумматор и др./ эквивалентно обычным элементам аналоговой ЭВМ. С их помощью можно моделировать линейные и нелинейные, статические и динамические элементы, арифметические и некоторые логические операции, запаздывание, детерминированные сигналы.

В общем случае функциональный блок языка выполняет преобразование $Y = F(\bar{X}, \bar{P})$, где Y - значение выхода блока, \bar{X} - n -мерный вектор входов, \bar{P} - m -мерный вектор параметров. Каждому типу блоков ставится в соответствие идентификатор длиной S символов и определенные величины размерностей векторов \bar{X} и \bar{P} .

Например, в табл. 1 усилитель имеет идентификатор G , один вход X_1 и один параметр P_1 /коэффициент усиления/, а сумматор с идентификатором $+$ может иметь до трех входов и не содержит параметров.

Некоторые часто используемые математические функции выполняются блоком типа 1 и приводятся в табл. 2.

Таблица 2
Функции, выполняемые блоком 1

$Y = F(X_1)$	SIN	COS	EXP	TAN	LN	LOG	ARCTAN
P_1	1	2	3	4	5	6	7

Элементы, для которых известны табличные значения характеристики вход-выход, могут быть представлены генератором функции.

С помощью специальных блоков, назначение которых определяет пользователь, есть возможность моделирования функций, для которых нет подходящих стандартных блоков.

Схема моделирования, отображающая исследуемый процесс или систему, вводится в ЭВМ с помощью трех типов операторов:

- оператор структуры определяет тип и взаимосвязи используемых блоков;
- оператор параметров устанавливает численные значения параметров тех блоков, которые их используют;

Таблица 1
Перечень функциональных блоков, реализованных
в программе МАСС

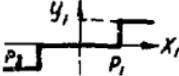
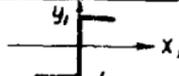
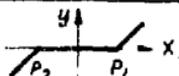
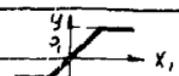
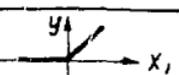
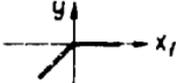
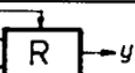
Тип блока	Обозначение	Функция
Реле с зоной нечувствительности	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	
Знаковая функция	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	
Нечувствительность	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	
Генератор функции	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	
Усилитель	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = P_1 x_1$
Корень квадратный	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = \sqrt{x_1}$
Интегратор	$x_1, x_2, x_3 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = P_1 \int (x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3) dt$
Датчик псевдослучайных чисел	 $\rightarrow y$	Псевдослучайные числа $[-1, 1]$
Постоянная	 $\rightarrow y$	$y = P_1$
Ограничитель	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	
Абсолютная величина	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = x_1 $
Срез минуса	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	
Смещение	$x_1, P_1, P_2 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = x_1 + P_1$

Таблица 1 (продолжение)

Тип блока	Обозначение	функция
Срез плюса	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	
Условие окончания моделирования	$x_1 \rightarrow$ $x_2 \rightarrow$ 	Конец, если $x_1 > x_2$
Переключение	$x_1 \rightarrow$ $x_2 \rightarrow$ $x_3 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = \begin{cases} x_2 & \text{если } x_1 \geq 0 \\ x_3 & \text{если } x_1 < 0 \end{cases}$
Генератор импульсов	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	Серия импульсов с периодом P_1 , если $x_1 \neq 0$
Задержка	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = x_1 \cdot [t - (P_1 + 1) \frac{t}{2}]$ $P_1 = 0, 1$
Весовой сумматор	$x_1 \xrightarrow{P_1}$ $x_2 \xrightarrow{P_2}$ $x_3 \xrightarrow{P_3}$  $\rightarrow y$	$y = P_1 x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3$
Умножитель	$x_1 \rightarrow$ $x_2 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = x_1 x_2$
Делитель	$x_2 \rightarrow$ $x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = x_1 / x_2$
Сумматор	$x_1 \rightarrow$ $x_2 \rightarrow$ $x_3 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = \pm x_1 \pm x_2 \pm x_3$
Инвертор	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = -x_1$
Математическая функция	$x_1 \rightarrow$  $\rightarrow y$	Часто используемая математическая функция
Запаздывание	$x \rightarrow$  $\rightarrow y$	$y = \begin{cases} P_1 & t \leq P_2 \\ x_1(t - P_2) & t > P_2 \end{cases}$ $P_2 \leq 100 \cdot \Delta t$
Специальный	\rightarrow  \rightarrow	Задается подпрограммой

- оператор таблиц определяет значение координат для генераторов функций.

Информация, задаваемая с помощью перечисленных операторов, преобразуется машиной в систему совместно рассматриваемых дифференциальных уравнений, решение которых состоит в использовании некоторого пошагового метода. Результаты вычислений представляются в форме графиков или таблицей значений.

Подготовка схемы моделирования для ЭВМ

Исследуемая модель может задаваться в виде уравнений или структурной схемой.

Составляется эквивалентная схема моделирования, которая графически отображает зависимости параметров модели с помощью функциональных блоков языка. Если необходимо использование специальных блоков, то алгоритм работы каждого из них записывается на языке Фортран. Приложение 1 поясняет этот случай. Каждому блоку в схеме присваивается порядковый номер в пределах от 1 до N.

Перечисленные действия пользователь выполняет перед выходом на ЭВМ.

Работа с программой

При наличии специальных блоков необходимо оттранслировать соответствующие файлы и выполнить сборку программы. Схема моделирования может вводиться в ЭВМ с терминала в формате, подсказываемом программой, или с перфоносителя. При первом обращении к машине предполагается использование терминала, а при повторном - перфоносителя, получаемого программой.

С помощью операторов структуры задается топология схемы. Для каждого блока указывается его номер, тип и номера предвключенных блоков. Последовательность ввода операторов может быть произвольной.

Диагностика, которую выполняет программа, помогает пользователю быстро выявить ошибки. Например,

если в схеме обнаружены недозволённый оператор, неопределённые или дублированные номера блоков, наличие алгебраических контуров, т.е. замкнутых путей, не содержащих элементов памяти, программа возвращает пользователя в фазу приема с терминала операторов структуры. После того, как сделаны соответствующие исправления, выполняется сортировка блоков, обеспечивающая правильную последовательность расчёта схемы.

С помощью операторов параметров задаются численные значения параметров для тех блоков, где они нужны. Указывается номер блока и соответствующие числовые значения. Аналогично операторам структуры, ввод параметров подвергается контролю.

Если в схеме используются генераторы функций, то для каждого из них задаются соответствующие координаты.

Отвечая на вопросы машины, пользователь определяет время наблюдения в схеме, шаг интегрирования, номер блока, выходная величина которого подлежит построению на дисплее /терминале/, примерный диапазон ее изменения и, наконец, интервал выдачи.

Шаг интегрирования в данной программе подбирается экспериментально. Первоначально пользователь руководствуется общими соображениями - для обеспечения устойчивости процесса интегрирования шаг должен быть в 5-10 раз меньше наименьшей постоянной интегрирования в системе. Затем шаг можно изменить и оценить точность получаемого решения.

Диапазон изменения выходной величины может быть задан произвольным и изменен в процессе счета или по его окончании.

Кроме основного наблюдаемого выхода, есть возможность указать еще до трех номеров блоков, если их выходы представляют интерес. В процессе счета происходит накопление этих величин.

После получения перечисленных параметров программа рассчитывает схему, выдавая на дисплей /терминал/ через заданный интервал вычисленное значение наблюдаемого выхода.

При помощи 16-разрядного регистра переключателей

/табл. 3/ пользователь может в любой момент перейти к определенной фазе программы.

Таблица 3
Назначение ключей управления программой

КЛЮЧ НОМЕР	НАЗНАЧЕНИЕ
0	ПРЕРВАТЬ РАБОТУ ПРОГРАММЫ
1	ИЗМЕНИТЬ СТРУКТУРУ СХЕМЫ
2	ИЗМЕНИТЬ ПАРАМЕТРЫ(НАЧ, УСЛОВИЯ)
3	ИЗМЕНИТЬ КООРДИНАТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ФУНКЦИЙ
4	ИЗМЕНИТЬ ВРЕМЯ НАБЛЮДЕНИЯ И ШАГ ИНТЕГРИРОВАНИЯ
5	ИЗМЕНИТЬ ИНТЕРВАЛ ВЫДАЧИ
6	ВЫДАТЬ НАКОПЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ
7	ПОСТРОИТЬ ГРАФИК НА ГРАФПОСТРОИТЕЛЕ
8	НАРИСОВАТЬ ДОП. ОСЬ X И ИЗМЕНИТЬ МАСШТАБ ПО ОСИ
9	НАРИСОВАТЬ ДОП. ОСЬ Y И ИЗМЕНИТЬ МАСШТАБ ПО ОСИ
10	ИГНОРИРОВАТЬ КОММЕНТАРИИ (ДЛЯ ОПЫТНОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ)
11	ИГНОРИРОВАТЬ РАСПЕЧАТКУ ВХОДНЫХ ДАННЫХ
12	ПЕРФОРИРОВАТЬ ИЛИ ПЕЧАТАТЬ СТРУКТУРУ И ПАРАМЕТРЫ СХЕМЫ
13	ЗАПРОСИТЬ ВЫХОДЫ БЛОКОВ
15	ПРОДОЛЖИТЬ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕ ПРЕРЫВАНИЯ

Например, наблюдая за ходом процесса на дисплее, он может прервать процесс моделирования, проконтролировать выходы интересующих блоков, изменить структуру и /или/ параметры и повторить расчет.

При каждом изменении в структуре схемы редактируется матрица структуры и выполняется сортировка блоков. При изменении параметров корректируется матрица параметров. Модификация схемы может многократно выполняться с терминала при незначительной затрате времени.

Диалоговый режим, гибкая структура, получение вещественных копий на графопостроителе и печатающем устройстве, совмещение кривых переходных процессов на дисплее для различных вариантов схем и некоторые другие возможности делают программу удобной в использовании.

Начинающий пользователь получает инструкции, помогающие ему планировать последовательность действий; с другой стороны, опытный пользователь может использовать программу при минимальной затрате времени на установление взаимодействия.

Программа нашла применение при решении некоторых практических задач, напр., при моделировании одной схемы преобразования амплитуды импульсов во временной интервал $1/3$, модель которой представляет собой систему с переменными параметрами.

Простой пример, поясняющий методику моделирования, приводится в *Приложении 2*.

Характеристика программы

Программа написана преимущественно на языке Фортран-IV для малой ЭВМ ИР 2116С.

Она имеет оверлейную структуру, т.е. состоит из головного сегмента, который всегда находится в оперативной памяти, и 12 сегментов, вызываемых с магнитного диска. Необходимая оперативная память составляет около 18 К слов.

В программе $N = 75$, $n = 3$, $m = 3$, $S = 1$.

Максимальное число интеграторов в схеме - 25, генераторов функций с линейной аппроксимацией - 3, блоков запаздывания - 3, блоков задержки - 25.

Интегрирование уравнений, описывающих динамику системы, выполняется по модифицированному методу Эйлера /Рунге-Кутта 2-г. порядка/.

Программа разработана так, что она в минимальной степени зависит от используемой машины. Модульность строения позволяет совершенствовать ее, не меняя основной структуры.

Перспектива

Первый опыт работы с программой подсказывает необходимость выполнения следующих действий:

1. Расширить возможности языка за счет использования логических операций и источников псевдослучайных процессов.

2. Сделать доступным использование других методов интегрирования.

3. Включить поисковые процедуры, которые позволят автоматически выполнять параметрическую оптимизацию системы.

4. Изменить некоторые количественные характеристики программы, в первую очередь, увеличить максимальное число блоков в схеме.

В заключение автор считает своим долгом поблагодарить следующих лиц: Л.П.Чхартишвили и Г.С.Чхартишвили за постоянное внимание и руководство при выполнении данной работы; С.В.Медведя за редактирование рукописи и то неоценимое содействие, которое позволило многие часы провести за терминалом, отлаживая программу; С.И.Орманджиева, который одним из первых предоставил реальную задачу и подтвердил полезность программы, воплотив результаты моделирования в изготовленном устройстве.

Приложение 1

Пусть требуется считывать с бумажной ленты одно значение переменной в равноотстоящие моменты времени моделирования. Используем для этого, например, специальный блок 6, на первый вход которого поступает серия импульсов с генератора T. Алгоритм работы специального блока занимает строки 44-48 нижеприведенного фрагмента программы.

Приложение 2

Система списывается нелинейным дифференциальным уравнением вида

$$T\ddot{x} + \dot{x} = -kF(x)$$

/1/

Нелинейный элемент $F(x)$ имеет релейную характеристику с зоной нечувствительности /рис. 1/.

Требуется оценить качество переходного процесса $x(t)$ в зависимости от величины a зоны нечувствительности.

Известно

$$b = 1, T = 10 \text{ сек}, k = 2, x(0) = 5, \dot{x}(0) = 0.$$

Покажем составление схемы моделирования /рис. 3/ по структурной схеме системы /рис. 2/, соответствующей уравнению /1/.

Блок 2 реализует нелинейность. Звено с передаточной функцией $K/(1+pT)$ формируется блоками 32, 6, 74, 15. Блоком 15 задается значение постоянной интегрирования T , а значением параметра P_1 весового сумматора 32 - коэффициент усиления K . Отрицательную обратную связь системы реализует инвертор 26. Использование генератора функций и специальных блоков не потребовалось.

Структура схемы задается следующими операторами.

НОМЕР БЛОКА	ТИП	ВХОД 1	ВХОД 2
2	A	26	
32	W	2	74
6	/	32	15
15	K		
74	I	6	
3	I	74	
26	-	3	

Операторы параметров для случая $a = 1$.

НОМЕР БЛОКА	P_1	P_2
32	2.0	-1.0
15	10.0	
3	5.0	
2	1.0	-1.0

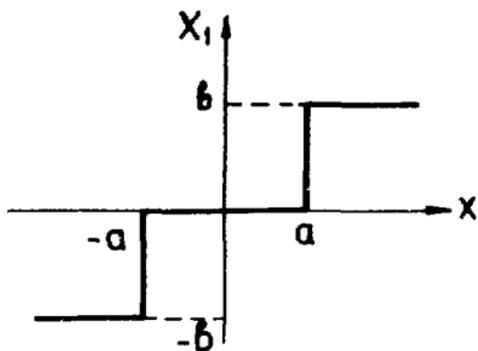


Рис. 1. Характеристика нелинейного элемента.

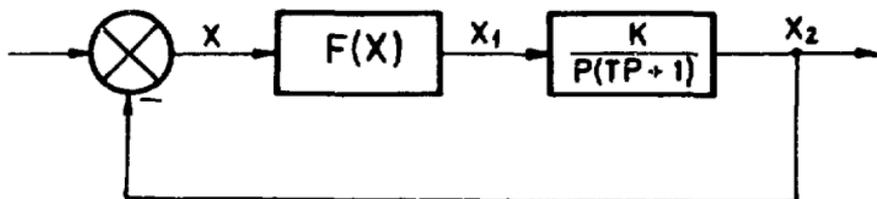


Рис. 2. Структурная схема системы.

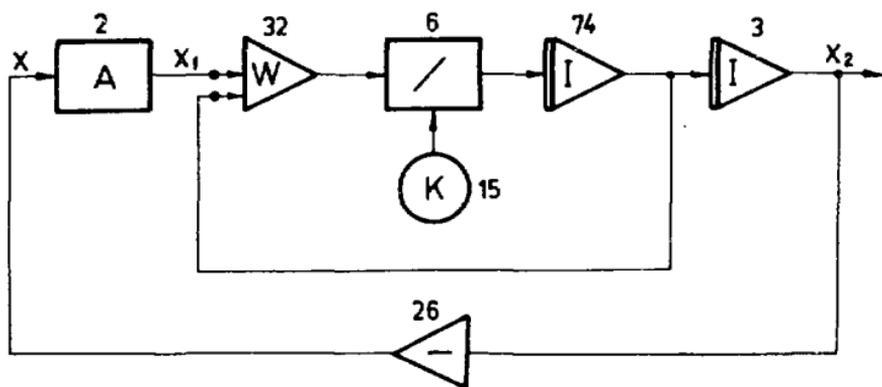


Рис. 3. Схема моделирования системы.

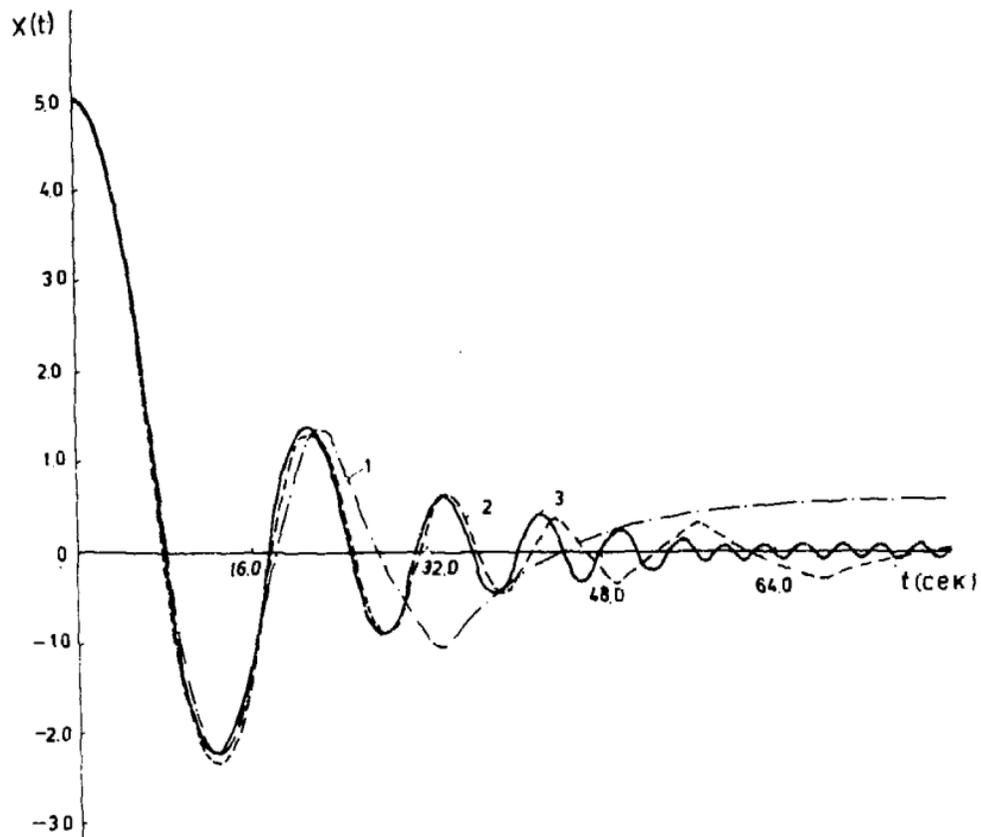


Рис. 4. Переходные процессы в системе 1) $a = 1,0$ 2) $a = 0,3$ 3) $a = 0$.

Выбираем время моделирования в схеме равным 80 сек, шаг интегрирования - 0,2 сек, в качестве наблюдаемого - выход блока 3.

Для изменения только величины зоны нечувствительности включаем ключ 2, с терминала вводим оператор параметров, например, 2 0,3 -0,3 и выключаем ключ 2.

Переходные процессы в схеме при различной величине зоны нечувствительности приведены на рис. 4.

Результаты моделирования и аналитического расчета системы методом припасовывания совпадают.

Литература

1. *IFAC Symposium on Digital Simulation of Continuous Processes. Hungary, Gyor, September 6-10, Preprints No. 1, No. 2.*
2. *M. Y. Silberberg. Build Digital Models of Analog Systems. Electron. Design., 21, October 11, 1966, pp. 90-93.*
3. *Н.Г. Клюкин, С.И. Орманджиев. Сообщение ОИЯИ, 13-8629, Дубна, 1975.*
4. *Н.Г. Клюкин, Л.П. Чхартишвили. В сб. Достижения и перспективы развития технической кибернетики. Вып. 1, Киев, Укр. НИИНТИ, 1975, стр. 20-21.*

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1975 года.