

Библиографический список

1. Телевизионные методы и устройства отображения информации /Под ред. М.И.Кривошеева. - М.: Советское радио, 1975.
2. Гуглин И.Н. Электронный синтез телевизионных изображений.- М.: Советское радио, 1979.
3. Варбанский А.М. Телевизионная техника. - М.Л.: Энергия, 1964.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1977.
5. А.С.485478 СССР.Устройство отображения информации/Гуглин И.Н - Опубл. БИ, 1975, № 35.
6. А.с. 841029. Устройство для формирования кривых на экране ЭЛГ /О.П.Валов, В.И.Макаров, Л.М.Шарнин. - Опубл. 24.03.80. БИ, 1981, № 23.

УДК 378.1:681.31

Ю.Г.Кавалев, А.И.Хмельницкий

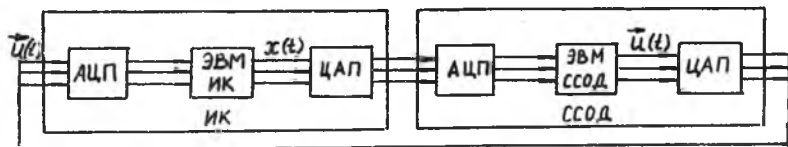
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА УРОВНЕ РЕАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ  
ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ, ОПИСЫВАЕМЫХ ДИНАМИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ  
(г. Москва)

Рассматриваются вопросы имитационного моделирования объектов, описываемых динамическими моделями вида

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f}(\vec{x}, \vec{u}, t), \quad (1)$$

где  $\vec{x} = \vec{x}(t)$  -  $n$ - мерный вектор состояния объекта,  $\vec{u} = \vec{u}(t)$  -  $k$ - мерный вектор управляющих воздействий (управления);  $x_0$  - заданное начальное состояние объекта,  $0 \leq t \leq T$ . Модели вида (1) встречаются при описании широкого класса физических систем. С ними связаны важные практические приложения в таких областях, как управление движущимися объектами, управление технологическими процессами и процессами в системах автоматизации эксперимента.

Структурная схема общей процедуры имитационного моделирования изображена на рис. 1.



Р и с. 1. Структурная схема имитации

На рисунке даны обозначения: ИК - имитационный комплекс, который осуществляет имитационное моделирование на уровне реальных сигналов согласно модели (I), ССОД - система сбора и обработки данных, которая осуществляет измерение состояний объекта и формирует управление в аналоговом виде. При исследовании схемы (I) необходимо выделить также упрощенную схему имитации (рис. 2). Эта схема связана с исследованием точности конечно-разностной аппроксимации системы (I) и цифро-аналогового преобразования в зависимости от длины шага дискретизации  $T_m$ , выбранном в ЭВМ ИК при решении (I), времени преобразования ЦАП  $\tau$  (способ преобразования далее выбирается кусочно-линейным с аппроксимацией линейных участков ступеньками продолжительностью  $\tau$ ). Длина шага дискретизации  $T_m$  ограничена снизу в связи с имитационным моделированием в реальном времени. Упрощенная схема имитации позволяет определить границы точности восстановления состояния объекта как непрерывной функции времени при знании управления, выбрать правильно параметры дискретизации. Полученная информация важна при исследовании точности имитационного моделирования согласно схеме на рис. 1. В этой схеме о точности имитации можно говорить для конкретной ССОД.



Р и с. 2. Упрощенная схема имитации

При заданных управляющих воздействиях будем для определенности рассматривать одношаговые методы аппроксимации (например метод Рунге-Кутты) для решения модели (I). При выбранной длине шага дискретизации  $h$  дискретные приближения к (I) запишем в виде

$$\bar{x}_{i+1} = \bar{x}_i + h \bar{f}_f(\bar{x}_i, \bar{u}_i, t_i, h), \quad (2)$$

где  $\bar{f}_f$  определяется через функцию  $f$ ,  $t_i = ih$ ,  $\bar{u}_i = u(ih)$ .

В выражении (2) задано начальное приближение  $\vec{x}_0$ . Так как речь идет об имитационном моделировании в реальном времени, то при решении уравнения (2) в ЭВМ ИК выбор шага  $h$  связан с ограниченным быстродействием ЭВМ ИК при вычислениях значений  $\vec{y}_p$  в точках  $(\vec{x}_i, \vec{u}_i, t_i)$  в темпе поступления значений  $\vec{u}_i$ . Обозначим нижнюю границу для  $h$  через  $T_y$ . Предположим, что при решении (2) выбран шаг дискретизации  $T_m \geq T_y$ . Тогда приближение  $\vec{y}_i$  к решению (I) в момент  $t = i T_m$  определяется из соотношения

$$\vec{y}_{i+1} = \vec{y}_i + T_m \vec{y}_p(\vec{y}_i, \vec{u}_i, t_i, T_m) \quad (3)$$

$$i = 0, 1, \dots$$

$$\vec{y}_0 = \vec{x}_0.$$

Учитывая выбранный выше способ цифро-аналогового преобразования, на выходе ЦАП получим сигнал  $\vec{y}(t)$ , который описывается приближением

$$\vec{y}(t) = \begin{cases} \vec{x}_0, & t = 0 \\ \vec{y}_i + \vec{y}_p(\vec{y}_i, \vec{u}_i, i, T_m)(t - i T_m), & i T_m \leq t < (i+1) T_m. \end{cases} \quad (4)$$

$$i = 0, 1, \dots$$

Ошибку восстановления состояния  $\vec{x}$  в процедуре имитации согласно рис. 2 логично определить через сравнение решения формулы (2)  $\vec{x}_i$  с шагом  $h = \tau$ , где  $\tau$  - время преобразования ЦАП, с сигналом  $\vec{y}(t)$ , значения которого вычисляются в моменты  $t_i = i\tau$ . Далее для удобства анализа будем предполагать, что  $T_m = r\tau$ , где  $r$  - некоторое натуральное. Тогда соотношения (2)-(4) можно переписать в виде

$$\vec{x}_{s+i+1} = \vec{x}_{s+i} + \tau \vec{y}_p(\vec{x}_{s+i}, \vec{u}_{s+i}, s+i, \tau), \quad (5)$$

$$\vec{y}_{s+i+1} = \vec{y}_s + \tau(i+1) \vec{y}_p(\vec{y}_s, \vec{u}_s, s, \tau, r),$$

$s = 0, r, 2r, \dots, i = 0, 1, \dots, r-1$  при фиксированном  $S$ .

В соотношениях (5) учитывается, что  $\vec{y}((s+i)\tau) = \vec{y}_{s+i}$ , где  $s = 0, r, 2r, \dots, a$   $i = 0, 1, \dots, r$  - для фиксированного  $S$ . Как функцию от  $\vec{u}, T_m$  при заданном  $\tau$  ошибку имитации первого типа (восстановления) можно определить так:

$$\varepsilon(\vec{u}, T_m) = \sum_{j=1}^N \|\vec{x}_j - \vec{y}_j\|^2, \quad (6)$$

где  $N = \text{INT}(\frac{T}{\tau})$ ,  $\|\vec{x}_j\|^2 = \sum_{i=1}^n (x_j^i)^2$ ,  $x_j^i$  -  $i$ -я компонента вектора  $\vec{x}_j$ . Найдем границы изменения  $\varepsilon(\vec{u}, T_m)$  при фиксированном  $T_m \geq T_y$  для заданного ограниченного множества управлений  $U = U(t)$ .

Для этого необходимо решить следующие задачи оптимизации

Задача 1. Найти максимальную ошибку имитации

$$\mathcal{E}_1(T_m) = \max \sum_{j=1}^N \|\bar{x}_j - \bar{y}_j\|^2 \quad (7)$$

$$\bar{u}_i \in U(i\tau)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

при ограничениях (5).

Задача 2. Найти минимальную ошибку имитации

$$\mathcal{E}_2(T_m) = \min \sum_{j=1}^N \|\bar{x}_j - \bar{y}_j\|^2 \quad (8)$$

$$\bar{u}_i \in U(i\tau)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

при ограничениях (5).

При практическом решении задач (7) и (8) множество  $U$  целесообразно задавать параметрически, например:

$$U = U(A, t) = \{\bar{u} : \bar{u} = \bar{\varphi}(\bar{a}, t), \bar{a} \in A\}, \quad (9)$$

где  $A$  - ограниченное множество векторов параметров,  $\bar{\varphi}$  - определенная функция.

Тогда задачи (7) и (8) сводятся к задачам оптимизации на ограниченном множестве параметров.

Задача 3. Найти гарантированную ошибку имитации.

Ошибка  $\mathcal{E}_2$  в (8) определяется на ограниченном множестве  $U$ .

Важно оценить ту минимальную ошибку имитации, когда нет ограничений на управление, т.е.  $\bar{u}_j \in E_k$ , где  $E_k - k$  - мерное евклидово пространство. Такую ошибку будем называть гарантированной. Она определяется из решения задачи (10):

найти

$$\mathcal{E}_3(T_m) = \min \sum_{j=1}^N \|\bar{x}_j - \bar{y}_j\|^2 \quad (10)$$

$$\bar{u}_i \in E_k$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

при ограничениях (5).

Задачу (10) можно решить, используя дискретный принцип максимума. Отметим, что при довольно общих предположениях о свойствах функции  $\bar{\varphi}_s$  структура оптимального управления для задачи (10) такова: для всех  $s$ , не кратных  $r$ ,  $\bar{x}_s = \bar{y}_s$  (см.(5)). Заметим также, что  $\mathcal{E} = 0$  при  $T_m = \tau$ . Однако, как уже отмечалось ранее, требование

имитации в реальном времени приводит к ограничению  $T_m \geq T_\varphi$ , причем  $T_\varphi$  может быть заметно больше  $\tau$ . Таким образом, каждой функции  $f^*$  в модели (I), выбранным размерностями  $n$  и  $k$  векторов состояний и управлений, заданному способу аппроксимации можно поставить в соответствие гарантированную ошибку имитации  $\varepsilon_3 = \varepsilon_3(T_\varphi)$ .

Ошибки имитации первого типа характеризуют точность имитации независимо от конкретной ССОД, которая непосредственно связана с ИК. При решении задач управления наличие ИК не должно быть для ССОД заметным. Если предположить действие внешнего возмущения, которое приводит к отклонению от номинального состояния  $\vec{x}^*$ , получаемого из модели (I) при заданном номинальном управлении  $\vec{u}^*$ , то для "незаметности" ИК необходимо потребовать, чтобы ошибка имитации подавлялась в некотором смысле таким возможным отклонением в состоянии. Проведем соответствие между ошибкой имитации для конкретной ССОД и возможным отклонением в состоянии при действии возмущений следующим образом.

Пусть в ССОД сформировано некоторое номинальное управление  $\vec{u}^*(t)$ . Для этого управления из приближений (2) найдем номинальное состояние  $\vec{x}^*(t)$  (шаг дискретизации  $h$  выбираем равным  $\tau$ ). Управляющее воздействие  $\vec{u}(t)$ , которое воспринимает ИК, на самом деле отличается от  $\vec{u}^*$  на некоторую величину  $\Delta \vec{u}^*$  вследствие ошибок дискретизации, наличия ЦАП, АЦП (см. рис. I). Для управления  $\vec{u}(t)$  на выходе ИК получим сигнал  $\vec{y}(t)$ . Этот сигнал опрашивается ССОД, и в результате его аналого-цифрового преобразования получаем сигнал  $\vec{x}(t)$ , заданный в дискретные моменты времени  $t = S T_d$  ( $T_d$  - период опроса значений  $\vec{y}(t)$  АЦП ССОД). Определим ошибку имитации второго типа для каждого  $\vec{u}^* \in U$ :

$$\Delta^* = \Delta^*(\vec{u}^*, T_m, \tau, T_d, H) = \|\vec{x} - \vec{x}^*\|, \quad (II)$$

здесь  $H$  - шаг квантования АЦП.

Как и для ошибок имитации первого типа (см. (7), (8), (10)), можно определить минимальную, максимальную и гарантированную ошибки имитации с точки зрения конкретной ССОД. Исследование ошибок имитации позволяет правильно выбирать параметры ССОД и ИК.

Часто для реализации номинального управления при действии внешних возмущений в цифровой автоматической системе в целях осуществления регулирования вдоль номинальной траектории выполняют линеаризацию исходной системы (I). Линеаризуют систему (I) на номи-

нальной траектории, при этом уравнение для отклонений  $\Delta \vec{u}, \Delta \vec{x}$  вследствие возмущений имеет вид

$$\frac{d}{dt} \Delta \vec{x} = \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{x}}(\vec{x}^*, \vec{u}^*, t) \Delta \vec{x} + \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{u}}(\vec{x}^*, \vec{u}^*, t) \Delta \vec{u}. \quad (12)$$

В модели (I) предполагается  $\Delta \vec{x}(0) = 0$ . Решим уравнение (12) при  $\Delta \vec{u} = \Delta \vec{u}^*$  с шагом дискретизации  $h = T_d$ . Обозначим такое решение через  $\Delta \vec{x}^*$ . Назовем эту величину линейной ошибкой имитации. Эта ошибка имитации непосредственно связана с возможным регулированием вдоль номинальной траектории. Будем считать качество имитации для ССОД удовлетворительным, если для выбранных  $T_m, \tau, T_d, H$  ошибка имитации второго типа не превосходит линейной ошибки имитации:

$$\|\vec{x} - \vec{x}^*\| \leq \Delta \vec{x}^*. \quad (13)$$

Соотношение (13) указывает на то, что при регулировании вдоль номинальной траектории ошибка имитации подавляется линейной частью приращения вектора состояния при отклонении от номинального управления, вызванного необходимостью его дискретизации, аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования.

УДК 681.325

Е.П.Калина, П.Н.Новоселов.

СЕМАНТИЧЕСКИЙ ИНТЕРАКТИВНЫЙ РЕДАКТОР  
ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИНЦИПАЛЬНЫХ СХЕМ

(г. Москва)

Задачи автоматизации проектирования РЭА становятся все более актуальными по мере совершенствования технологии, сокращения сроков разработки, усложнения как самих объектов разработки, так и их элементной базы. Большинство усилий сосредоточивается на автоматизации этапа конструкторской проработки изделия (компоновка - размещение - трассировка) /1, 2/. В то же время само проектирование, как создание (выбор) схемотехнических решений, базируется большей частью на использовании ручных операций. Отметим, что на стыке этих этапов выполняется кропотливая работа по составлению тщательно выверенных спецификаций, подготовке технической документации в соответствии с требованиями