

УДК 621.314.632

В. Ш. Пасик*(Новосибирск)***ИМИТАЦИОННЫЙ МЕТОД
ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**

Предложен универсальный метод численного анализа динамических систем на базе имитационного метода. Показаны особенности применения метода для систем с обратной связью. Разработана методика повышения точности расчетов с помощью разностных схем. Предлагается использовать метод для автоматизированного анализа систем управления.

Постановка задачи. Как правило, проектирование современных систем автоматического управления (САУ) – двухэтапная задача. На первом этапе обычно синтезируются структура и система регуляторов управления на базе теории линейных фильтров [1–3]. На втором этапе происходит детализация регуляторов управления, исходя из физических свойств элементной базы, составляющей регуляторы, а также с учетом физических явлений, не рассматриваемых на первом этапе [4]. Так, например, только пульсации вентильного преобразователя (ВП) могут вносить до 10 % нелинейных искажений в спектр выходного напряжения [5]. Замена аналоговых регуляторов на цифровые в системах с прямым цифровым управлением требует изучения влияния дискретизации по времени и квантования по уровню и т. д.

Отсутствие эффективных аналитических методов, позволяющих конструктору точно и оперативно решать задачи второго этапа проектирования, заставляют его обращаться к системам автоматизированного проектирования (САПР), обеспечивающих численный анализ систем управления. Однако недостаточная разработанность методики формирования и решения системы дифференциальных, алгебраических и логических уравнений серьезным образом сдерживает применение метода моделирования.

Рассмотрим наиболее известный метод переменных состояния, предлагаемый в [2, 6] и применяемый, например, в [4, 7–9].

Сущностью метода является формирование системы дифференциальных и алгебраических уравнений в форме Коши и ее решение стандартными методами (например, методом Рунге – Кутты четвертого порядка):

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BF, \\ Y = CX + DF, \end{cases} \quad (1)$$

где X – вектор значений выходных сигналов звеньев САУ, определяющих независимые переменные; F – вектор возмущающих воздействий; A, B, C, D – матрицы коэффициентов системы уравнений; Y – вектор значений выходных сигналов неинерционных звеньев.

Рассматриваемый метод имеет ряд существенных недостатков: невозможность эффективно исследовать цифроаналоговые САУ по причине наличия разрывных функций первого и второго рода в системе уравнений (1); проблема размерности системы (1) [3]. Поэтому актуальной является задача разработки высокоточного имитационного метода, позволяющего рассчитывать САУ по частям без приведения к форме Коши (1).

Характеристика имитационного метода. Анализ отдельного звена САУ выполняется за счет обмена сигналами этого звена с внешней средой. Поэтому, как правило, имитационный метод трактуется как численный эксперимент, а не как расчет системы уравнений с контролируемой погрешностью [8–10].

Для выяснения возможностей метода в трактовке [10] оценим его точность и устойчивость на примере одноконтурной САУ (последовательность расчета звеньев указана на рис. 1) с передаточной функцией фильтра:

$$W(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0} = \frac{A_n(p)}{B_m(p)}. \quad (2)$$

Алгоритм расчета записывается в виде

$$x_i = (U_{+i} - Kx_{i-1}) \frac{\Delta_A^n}{\Delta_B^m}, \quad (3)$$

где x_i, x_{i-1} – решения в t_i, t_{i-1} моменты времени; $\frac{\Delta_A^n}{\Delta_B^m}$ – коэффициент алгебра-

изации $\frac{A_n(p)}{B_m(p)}$.

Сравнивая (3) с точным решением, получим погрешность

$$D(h) \approx Kh \frac{\Delta_A^n}{\Delta_B^m} \frac{\partial x_{i-1}}{\partial t} \sim h, \quad (4)$$

где h – шаг интегрирования.

Из (4) следует, что имитационный метод в [10] для систем с обратной связью дает решение системы уравнений с минимальной точностью, что не зависит от точности расчета отдельных звеньев.

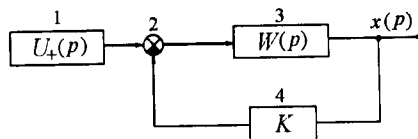


Рис. 1

Условие устойчивости получаем при $h \rightarrow 0$. Имитационный метод в этом случае превращается в итерационный, сходящийся при условии

$$\prod_{i=1}^N K_i < 1, \quad (5)$$

где K_i – алгебраический коэффициент усиления i -го звена в контуре управления.

Повышение точности расчетов. Предлагается применение разностных схем высокого порядка для расщепленных задач [11]. Расчет встроеного в контур управления аperiodического звена $\left(W(p) = \frac{1}{Tp+1}\right)$ выполняется по

двухциклической схеме. Первый цикл:

$$T \frac{x_{i+1} - x_i}{h} + x_{i+1} = F_{i+1} \quad (6)$$

– неявная схема Эйлера первого порядка. Второй цикл:

$$T \frac{x_{i+1} - x_i}{h} + \frac{x_{i+1} + x_i}{2} = \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \quad (7)$$

– схема Кранка – Николсона второго порядка, где F – значение входного воздействия.

Контроль погрешности расчета выполняется по формуле

$$\delta = \max \left| \frac{X_2 - X_1}{X_2} \right|, \quad (8)$$

где X_2 – вектор решений по схеме (7); X_1 – вектор решений по схеме (6).

Следующей ступенью повышения точности является экстраполяция по Ричардсону:

$$x^{(i+1)} = \frac{4}{3} x_{h/2}^{(i+1)} - \frac{1}{3} x_h^{(i+1)}, \quad (9)$$

где $x_{h/2}^{(i+1)}$ – решение с шагом $h/2$ по схеме (7); $x_h^{(i+1)}$ – решение с шагом h по схеме (7). Экстраполяция достигается за четыре имитационных цикла с погрешностью расчета $\sim h^4$.

Имитационный метод при анализе цифроаналоговых систем позволяет методом припасовки рассчитывать начальные условия в момент перехода процесса на новый участок непрерывности без потери точности и машинного времени, а также без вмешательства пользователей в описание исходных данных.

Таким образом, имитационный метод не уступает по точности расчета аналоговых систем методу переменных состояния и превосходит его в универсальности.

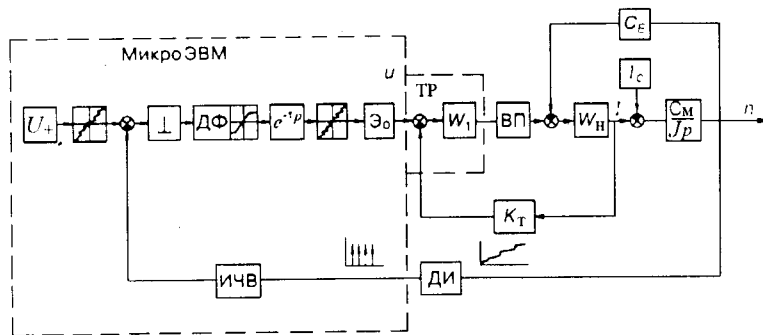


Рис. 2

Пример расчета. Исследовалась одна из систем регулирования частоты вращения (РЧВ) с прямым цифровым управлением (рис. 2, 3).

Решались следующие задачи: выбор структуры дискретного фильтра (ДФ) для замены аналогового П-регулятора; оценка влияния эффекта квантования по времени и по уровню; обоснование выбора периода дискретности T .

Расчеты выполнялись в комплексе с учетом основных нелинейных свойств ВП. Входная информация для микроЭВМ поступает в виде дискретной последовательности с датчика импульсов (ДИ), где на первом этапе реализуется алгоритм измерения частоты вращения (ИЧВ).

Расчет относительной ошибки частоты вращения, связанной с использованием управляющей микроЭВМ, выполнен методом сравнения с процессами в аналоговой системе по формуле

$$\delta^n = \left| \frac{n_a - n}{n_a} \right|, \quad (10)$$

где n_a – значение скорости в аналоговой системе; n – значение скорости в заданной системе.

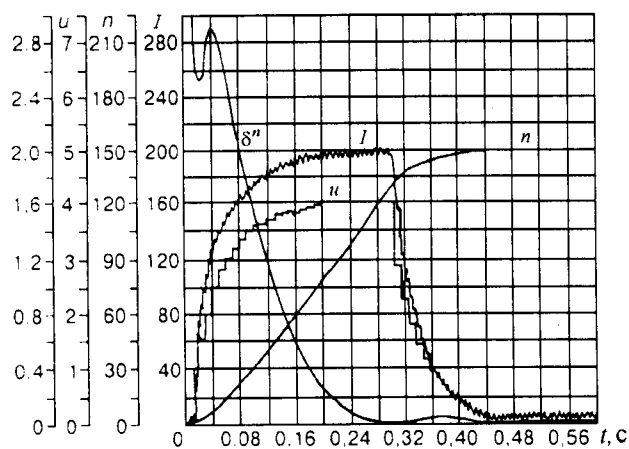


Рис. 3

Параметры передаточных функций системы:

$$W_1(p) = \frac{T_1 p + 1}{Tp}; \quad W_H(p) = \frac{1/R_H}{T_1 p + 1}. \quad (11)$$

Результаты моделирования показали, что для практической реализации с помощью микроЭВМ П-регулятора частоты вращения целесообразно использовать ДФ второго порядка:

$$Y[mT] = K_p \left\{ \frac{3}{2} x[mT] - \frac{1}{2} x[(m-1)T] \right\}, \quad (12)$$

где $x[mT]$, $x[(m-1)T]$ – значения входной последовательности мгновенных импульсов в m -й и $(m-1)$ -й моменты времени; $Y[mT]$ – выходная последовательность мгновенных импульсов; K_p – параметр П-регулятора.

Оптимальное значение $T = 0-10$ мс.

Заключение. Разработан имитационный метод анализа САУ с обратной связью, обеспечивающий высокую точность расчета. Универсальность метода позволяет представлять анализируемый объект с произвольной степенью подробностей. Имитационный метод, реализованный в пакете прикладных программ, является эффективным средством проектирования САУ пользователями-непрограммистами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Параев Ю. И.** Введение в статическую динамику процессов управления и фильтрации. М.: Сов. радио, 1976.
2. **Меризм К.** Теория оптимизации и расчет систем управления с обратной связью. М.: Мир, 1976.
3. **Домбровский В. В.** Понижение порядка систем оценивания и управления. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994.
4. **Егоров В. Н., Шестаков В. М.** Динамика систем электропривода. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
5. **Каган В. Г.** Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений. М.: Энергия, 1975.
6. **Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч.** Пространство состояния в теории управления. М.: Наука, 1970.
7. **Корова И. Л.** Применение пакета "MatLab" для анализа динамики систем автоматического управления, заданных структурной схемой. Санкт-Петербург: БГТУ, 1995.
8. **Бусленко В. Н.** Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М.: Наука, 1977.
9. **Егоров В. Н., Корженевский-Яковлев О. В.** Цифровое моделирование систем электропривода. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
10. **Шеннон Р. Ю.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978.
11. **Марчук Г. И., Шайдуров В. В.** Повышение точности решений разностных схем. М.: Наука, 1979.

Поступила в редакцию 13 января 1998 г.