

что предлагаемый алгоритм дает возможность значительно снизить погрешность измерения массы отпускаемой или принимаемой в резервуары жидкости и сэкономить ресурсы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кюрегян С. Г. К вопросу о построении автоматизированной системы распределения и учета жидких продуктов в резервуарах // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1980.—Т. XLIII.—№ 6.—С. 273—277.
2. Кюрегян С. Г., Кюрегян П. С. Алгоритмы оптимального измерения массы жидких продуктов в резервуарах // Изв. НАН Армении. Сер. ТН.—1994.—Т. XLVII.—№ 1—2.—С. 33—40.

ГИУА

3. X. 1992

Изв. НАН Армении (сер. ТН), т. XLVII, № 3, 1994, с. 87—90.

УДК 62.50

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

С. Е. ЧИМИШКЯН

### ОПСОБ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Предлагается численный метод построения переходных процессов, требующий вычисления значений передаточных матриц отдельных звеньев системы при некоторых вещественных значениях переменной Лапласа  $s$ . В его основе лежит известный метод Закиана для численного определения оригиналов.

Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 1 назв.

*Առաջարկվում է անցողիկ ընթացքների կառուցման մի թվային եղանակ, որի համար պահանջվում է կապարի փոփոխականի մի շարք իրական արժեքներով հաշվարկել համակարգի առանձին մասերի փոխանցման մատրիցները, որպես հիմք է ընդունված բնորոշակի թվային հաշվարկի ջարհանի հայտնի եղանակը:*

При рассмотрении линейных многосвязных динамических систем регулирования часто возникает следующая задача. Дается описание системы на основе передаточных матриц (ПМ) отдельных звеньев, как это изображено, например, на рис. 1, где  $G(s)$ —ПМ объекта ре-

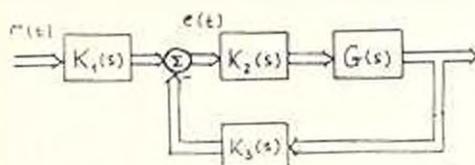


Рис. 1. Структурная схема системы

гулирования,  $K_1(s)$ —ПМ корректирующих устройств. Необходимо определить переходный процесс, т. е. вектор реакции системы  $x(t)$  в некоторой точке замкнутого контура на вектор внешних воздействий  $r(t)$ , заданный изображением Лапласа  $R(s)$ . В общем случае размерности векторов  $x(t)$  и  $r(t)$  могут не совпасть.

Один из естественных подходов к данной задаче заключается в

следующем: вычисляется ПМ  $H_{RX}(s)$ , определяющая преобразование  $g(t)$  в  $x(t)$ :

$$X(s) = H_{RX}(s)R(s), \quad (1)$$

где  $X(s)$  и  $R(s)$  — изображения Лапласа для векторов-процессов  $x(t)$  и  $r(t)$ .

Полученное таким образом изображение Лапласа  $X(s)$  искомого процесса преобразовывается тем или иным способом, чтобы получить собственно искомый процесс:

$$x(t) = L^{-1}\{X(s)\}.$$

Основная трудность при этом связана с необходимостью получить ПМ  $H_{RX}(s)$  в аналитической форме, что требует перемножения и обращения полиномиальных матриц. Так, например, для ПМ замкнутой системы регулирования по ошибке  $H_{RE}(s)$ , соответствующей рис. 1, имеем

$$H_{RE}(s) = [1 + K_2(s) \cdot G(s) \cdot K_1(s)]^{-1} K_3(s).$$

Трудоёмкость и погрешности вычисления  $H_{RX}(s)$  быстро возрастают с увеличением числа входов и выходов системы регулирования и порядков полиномов элементов звеньев ПМ, что заметно сужает границы применимости этого подхода.

Предлагаемый способ вычисления переходных процессов позволяет приближенно обратить изображение Лапласа  $H_{RX}(s)$ , вообще не прибегая к вычислению  $H_{RX}(s)$  в аналитической форме, тем самым удается полностью устранить отмеченную выше трудоёмкость вычисления  $H_{RX}(s)$ . В основе лежит простой и эффективный численный метод приближенного обращения изображения Лапласа — скалярной функции  $F(s)$ , а именно, метод Закиана [1]. Согласно [1], скалярный процесс  $f(t)$  аппроксимируется рядом длины  $N$ :

$$f_N(t) = \sum_{i=1}^N \frac{k_i}{t} \cdot F\left(\frac{\alpha_i}{t}\right), t \in T, T = \{t | t > 0, \alpha_i < \min |R_{\alpha_i}|\},$$

где  $\alpha_i \geq 0$  — абсциссы сходимости обратного преобразования Лапласа. Параметры  $\{\alpha_i\}$  и  $\{k_i\}$  не зависят от вида  $F(s)$ , а при данной длине ряда  $N$  и выбранном наборе  $\{\alpha_i\}$  параметры  $\{k_i\}$  определяются однозначно. Рекомендации по выбору  $\{\alpha_i\}$  и процедура вычисления  $\{k_i\}$  приводятся в [1].

Для рассматриваемой задачи очень важно, чтобы все параметры  $\alpha_i$  были выбраны вещественными, так как комплекснозначная функция  $F(s)$  при  $s = \alpha_i/t$  принимает вещественные значения  $F(\alpha_i/t)$ . Очевидно, для процесса  $x(t)$  можно аналогичным образом построить аппроксимацию:

$$x_N(t) = \sum_{i=1}^N \frac{k_i}{t} X\left(\frac{\alpha_i}{t}\right). \quad (2)$$

На основании этого комплекснозначные функции  $X(s)$ ,  $R(s)$ ,  $G(s)$  и другие ПМ вычисляются лишь в точках  $s = \alpha_i/t$ , где они также принимают лишь вещественные значения, например,

$$X\left(\frac{\alpha_i}{t}\right) = H_{RX}\left(\frac{\alpha_i}{t}\right)R\left(\frac{\alpha_i}{t}\right).$$

На современных ЦВМ операции перемножения и обращения вещественных матриц не слишком большой размерности ( $\leq 10$ , что характер-

но для практических задач) выполняются быстро и с малыми погрешностями. Поэтому практическое вычисление  $X(u_i/t)$  и  $x_n(t)$  (2) не представляет труда даже при весьма сложной, многоконтурной конфигурации многосвязной системы регулирования. Процедура вычисления переходных процессов, построенная по описанному принципу, обладает важным преимуществом частотных методов теории автоматического регулирования: трудоемкость вычислений зависит в основном от числа входов и выходов звеньев и медленно растет с увеличением степеней полиномов, т. е. порядка вектора состояния замкнутой системы.

В качестве примера рассмотрим процедуру вычисления ошибки  $e(t)$  в системе регулирования с двумя входами и выходами и ПМ разомкнутой системы вида

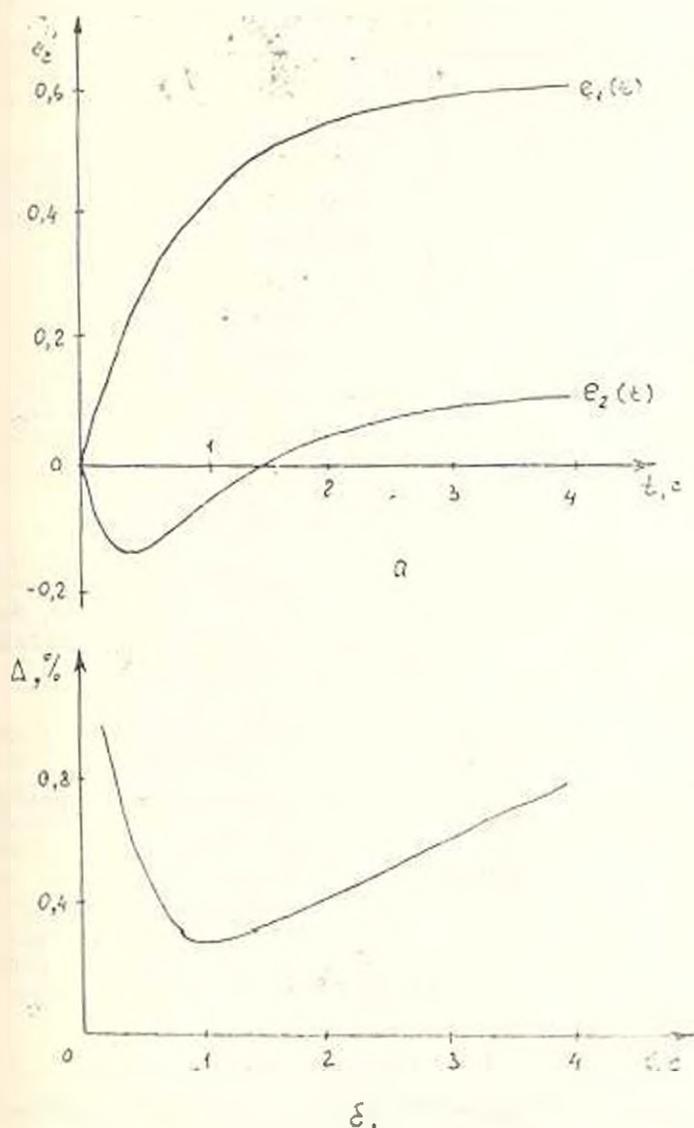


Рис. 2. Переходный процесс (а) и относительная погрешность аппроксимации (б)

$$Q(s) = \begin{bmatrix} 1,75 & -0,75 \\ -2,25 & 3,25 \end{bmatrix} s^{-1}$$

при действии на входе системы линейно-возрастающего сигнала

$$r(t) = (t-1)^T, \quad t \geq 0,$$

т. е.

$$R(s) = (s^{-2} - s^{-1})^T.$$

Очевидно, изображение ошибки имеет вид

$$E(s) = [I - Q(s)]^{-1} R(s).$$

Коэффициенты  $k_i$  [1]

Таблица

$i$	$k_i$
1	$1,181456802 \cdot 10^1$
2	$-1,492146320 \cdot 10^0$
3	$3,903740292 \cdot 10^1$
4	$-3,741798377 \cdot 10^0$
5	$1,799253674 \cdot 10^0$
6	$-4,920471595 \cdot 10^0$
7	$8,008119819 \cdot 10^0$
8	$-7,682426490 \cdot 10^0$
9	$4,011324521 \cdot 10^0$
10	$-8,792031534 \cdot 10^0$

При выборе параметров  $\alpha_i = 2i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , длины аппроксимирующего ряда  $N = 10$  и коэффициентов  $k_i$ , приведенных в таблице [1], получаем аппроксимацию процесса ошибки (рис. 2а), практически совпадающую с истинным процессом ошибки, выражаемым аналитически:

$$e(t) = \begin{bmatrix} 0,625 - 0,5e^{-t} - 0,125e^{-4t} \\ 0,125 - 0,5e^{-t} + 0,375e^{-4t} \end{bmatrix}.$$

На рис. 2б изображена относительная погрешность аппроксимации, определяемая выражением

$$\Delta(t) = \frac{\|e(t) - e_N(t)\|}{\|e(t)\|},$$

где

$$\|x\| = \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{1/2}.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zakian V., Gannon D. R. Least-squares optimization of numerical inversion of Laplace transforms // Electronics Letters. — 1971. — V. 7. № 3. — P. 70—71.