

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИСКРЕТНОЙ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ИМИТАЦИОННОЙ  
МОДЕЛИ ОБЪЕКТА**

*Цель работы:* изучение методов построения дискретных динамических моделей, используемых при синтезе цифрового управления, и идентификация параметров моделей объектов регулирования, описываемых конечно-разностными уравнениями.

## 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

### 1.1 Построение математических моделей объектов регулирования с помощью конечно-разностных уравнений и дискретных передаточных функций

Методы расчета и синтеза цифровых систем управления существенно отличаются от классических методов, применяемых для непрерывных систем. Это связано с тем, что основой математического аппарата построения цифровых систем являются разностные схемы, которые заменяют дифференциальные уравнения, описывающие непрерывные системы. Цифровые системы отличаются от аналоговых тем, что сигнал в одной или нескольких точках представляет собой цифровой код. Поэтому алгоритмы, применяемые при расчете цифровых систем, могут быть реализованы только с помощью ЭВМ.

В реальных системах управления могут присутствовать как аналоговые, так и цифровые сигналы. Поэтому такие системы в целом называют дискретными. Преобразование аналоговых сигналов в цифровые и обратно осуществляется с помощью аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей.

Непрерывная модель, описывающая поведение объекта с сосредоточенными параметрами, представляет собой непрерывную функцию  $f(t)$  и может быть интерпретирована в виде графика (рис.1).

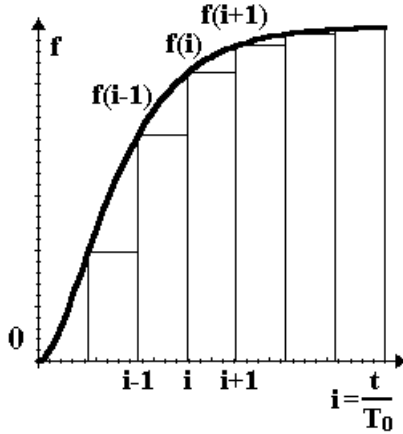


Рис.1. График функции  $f(t)$

Весь диапазон времени разбивается на равные интервалы.  $T_0$  - такт квантования. Обозначим  $i$  - текущий индекс (номер) такта квантования.

При малых тактах квантования разностные уравнения можно получать из дифференциальных путем дискретизации последних [2]. В частности, дифференциалы могут приближенно заменяться правыми разностями:

$$\begin{aligned}\frac{df(t)}{dt} &\approx \frac{\Delta f(i)}{T_0} = \frac{f(i+1) - f(i)}{T_0}; \\ \frac{d^2 f(t)}{dt^2} &\approx \frac{\Delta^2 f(i)}{T_0^2} = \frac{f(i+1) - 2f(i) + f(i-1)}{T_0^2}; \\ \frac{d^3 f(t)}{dt^3} &\approx \frac{\Delta^3 f(i)}{T_0^3} = \frac{f(i+1) - 3f(i) + 3f(i-1) - f(i-2)}{T_0^3}.\end{aligned}\tag{1}$$

Таким образом можно получить производную  $n$  - го порядка в виде разностной схемы.

Из теории автоматического управления известно, что модели (рис.2) динамических объектов с запаздыванием в непрерывном виде могут быть представлены дифференциальными уравнениями или соответствующими передаточными функциями:

$$T_n^n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + T_{n-1}^{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + T_1^1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t - \tau), \quad (2)$$

или

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{ke^{-\tau s}}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s) \dots (1 + T_n s)} = \\ &= \frac{ke^{-\tau s}}{1 + T_1^1 s + T_2^2 s^2 + \dots + T_n^n s^n}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $y$  - выходной сигнал объекта;  $u$  - входной сигнал объекта;  $k$  - коэффициент усиления объекта;  $\tau$  - время чистого запаздывания объекта;  $s$  - оператор преобразования Лапласа;  $T_1, T_2, \dots, T_n$  - постоянные времени объекта, по которым могут вычисляться коэффициенты  $T_1^1, T_2^2, \dots, T_n^n$  дифференциального уравнения (2):

$$\text{при } n = 1 \quad T_1^1 = T_1,$$

$$\text{при } n = 2 \quad T_1^1 = T_1 + T_2, \quad T_2^2 = T_1 T_2,$$

$$\text{при } n = 3 \quad T_1^1 = T_1 + T_2 + T_3, \quad T_2^2 = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3,$$

$$T_3^3 = T_1 T_2 T_3.$$

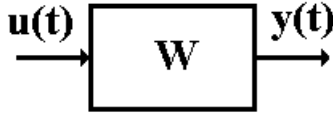


Рис.2. Динамическое звено с одним входом и выходом

Если система регулирования реализуется на ЭВМ, то необходимо дискретное (цифровое) представление динамических моделей. В этом случае согласно выражениям (1) непрерывному дифференциальному уравнению (2) соответствует конечно-разностное уравнение

$$T_n^n \frac{\Delta^n y_i}{T_0^n} + T_{n-1}^{n-1} \frac{\Delta^{n-1} y_i}{T_0^{n-1}} + \dots + T_1^1 \frac{\Delta y_i}{T_0} + y_i = k u_{i-d}, \quad (4)$$

а непрерывной передаточной функции (3) соответствует дискретная передаточная функция [5]:

$$W(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{B(z)z^{-d-1}}{A(z)}, \quad (5)$$

где  $B(z), A(z)$  - полиномы числителя и знаменателя дискретной передаточной функции;  $z$  - оператор сдвига;  $d = \frac{\tau}{T_0}$  - целое число тактов запаздывания, соответствующее времени чистого запаздывания  $\tau$ .

Если  $d$  при вычислении не является целым числом, то оно округляется до ближайшего целого.

Например, апериодическое звено второго порядка с чистым запаздыванием представляется в виде дифференциального уравнения второго порядка

$$T_2^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1^1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t - \tau), \quad (6)$$

или соответствующей передаточной функции

$$W(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{1 + T_1^1 s + T_2^2 s^2}. \quad (7)$$

Из дифференциального уравнения (6) получим конечно-разностное:

$$T_2^2 \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{T_0^2} + T_1^1 \frac{y_{i+1} - y_i}{T_0} + y_i = ku_{i-d}. \quad (8)$$

Преобразуя это уравнение, выразим из него  $y_{i+1}$ .

$$y_{i+1} = \frac{T_1^1 T_0 + 2T_2^2 - T_0^2}{T_2^2 + T_1^1 T_0} y_i - \frac{T_2^2}{T_2^2 + T_1^1 T_0} y_{i-1} + \frac{kT_0^2}{T_2^2 + T_1^1 T_0} u_{i-d}. \quad (9)$$

Введем обозначения:

$$a_1 = \frac{T_1^1 T_0 + 2T_2^2 - T_0^2}{T_2^2 + T_1^1 T_0}, \quad (10)$$

$$a_2 = -\frac{T_2^2}{T_2^2 + T_1^1 T_0}, \quad (11)$$

$$b = \frac{kT_0^2}{T_2^2 + T_1^1 T_0}. \quad (12)$$

Отсюда

$$y_{i+1} = a_1 y_i + a_2 y_{i-1} + bu_{i-d}. \quad (13)$$

Уменьшая текущий индекс такта квантования на единицу в левой и правой частях уравнения (13), получим конечно-разностное уравнение второго порядка, удобное для практического использования:

$$y_i = a_1 y_{i-1} + a_2 y_{i-2} + bu_{i-d-1}. \quad (14)$$

Для систем, описываемых линейными конечно-разностными уравнениями с постоянными коэффициентами, используется операционное исчисление, в котором входные и выходные величины описываются оператором сдвига  $z$  аналогично оператору Лапласа  $s$ :

$$\begin{aligned} y_i &= yz^0 = y; & u_i &= uz^0 = u; \\ y_{i-1} &= yz^{-1}; & u_{i-1} &= uz^{-1}; \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot & & \\ y_{i-n} &= yz^{-n}; & u_{i-d-1} &= uz^{-d-1}. \end{aligned} \quad (15)$$

Использование оператора сдвига  $z$  позволяет получить из конечно-разностного уравнения передаточную функцию в  $z$  - преобразовании. Используя соотношения (15) для уравнения второго порядка (14) получим

$$yz^0 = a_1 yz^{-1} + a_2 yz^{-2} + buz^{-d-1}. \quad (16)$$

Отсюда дискретная передаточная функция

$$W(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{bz^{-d-1}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}}. \quad (17)$$

Это упрощает математические преобразования для получения разностных уравнений замкнутых цифровых систем регулирования. Аналогично можно получить конечно-разностные уравнения и передаточные функции в  $z$  - преобразовании объектов и

регуляторов, описываемых интегро-дифференциальными уравнениями любого порядка, в том числе типовых динамических звеньев и регуляторов.

## 1.2 Имитационная модель объекта регулирования

При отсутствии реального объекта регулирования или невозможности получения его динамической характеристики (например, кривой разгона объекта) применяют имитационные модели.

Под имитационной моделью объекта регулирования понимается такая модель, которая имитирует поведение исследуемого объекта в реальных условиях. Имитационная модель не используется непосредственно для синтеза системы регулирования, а служит лишь источником информации о характере зависимости между входными и выходными параметрами объекта. Основным отличием реального объекта от его математической модели является наличие помех при измерении выходного сигнала  $y$ . Пренебрегая структурным несоответствием объекта и имитационной модели, примем в качестве объекта регулирования имитационную модель в виде конечно-разностного уравнения второго порядка с чистым запаздыванием с наложением случайной помехи  $\xi_i$  на выходную переменную:

$$y_i = a_1 y_{i-1} + a_2 y_{i-2} + b u_{i-d-1}, \quad (18)$$

$$y_i'' = y_i + p \xi_i, \quad (19)$$

где  $y_i$  - выход объекта без помехи;  $y_i''$  - измеряемое значение выходного сигнала с помехой  $\xi_i$ ;  $p$  - коэффициент помехи, определяющий уровень помехи на каждом такте  $T_0$  квантования;  $\xi_i = 2\text{random}(1001) / 1000 - 1$ .



Расчет значения случайной помехи  $\xi_i$  реализуется стандартным оператором – функцией `int random(int num)` в языке *Cu* (генератор случайных чисел). Помеха  $\xi$  принимает значения в пределах от -1 до +1 случайным образом.

С помощью имитационной модели (18),(19) рассчитываются значения точек переходного процесса объекта регулирования с тактом квантования  $T_0$  при различных значениях входного воздействия. Для расчета кривой разгона по имитационной модели необходимо знать параметры  $a_1, a_2, b, d$  уравнения (18), такт квантования  $T_0$ , коэффициент помехи  $p$  и задаться начальными условиями по входу и выходу объекта, а также величиной входного ступенчатого воздействия  $u$ .

Для уравнения (18) начальные условия принимаются нулевыми и определяются его порядком:

$$y_1 = \dots = y_{2+d} = 0, \quad (20)$$

$$u_1 = 0.$$

Если на вход имитационной модели подается единичное ступенчатое воздействие, то, начиная с такта квантования  $i = 2$ ,  $u_i = 1$  ( $i = \overline{2, N}$ ).  $N$  определяется временем переходного процесса  $t_n$ :

$$N = \frac{t_n}{T_0}. \quad (21)$$

Так как  $t_n$  заранее не известно, то число  $N$  выбирается экспериментально подбором при расчете переходного процесса.

Вначале по уравнению (18) рассчитывается переходный процесс без помехи, начиная с такта  $i = 3 + d$ :

$$\begin{aligned}
y_{3+d} &= a_1 y_{2+d} + a_2 y_{1+d} + bu_2 = b; \\
y_{4+d} &= a_1 y_{3+d} + a_2 y_{2+d} + bu_3 = b(a_1 + 1); \\
y_{5+d} &= a_1 y_{4+d} + a_2 y_{3+d} + bu_4 = a_1 b(a_1 + 1) + b(a_2 + 1); \\
&\quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
y_{N+d} &= a_1 y_{N-1+d} + a_2 y_{N-2+d} + bu_{N-1}; \\
y_{N+d+1} &= a_1 y_{N+d} + a_2 y_{N-1+d} + bu_N.
\end{aligned} \tag{22}$$

Затем по уравнению (19) рассчитывается переходный процесс объекта регулирования  $y_i''(i = \overline{3+d, N+1+d})$  с учетом помехи  $\xi$ .

### 1.3 Параметрическая идентификация модели в условиях активного эксперимента

При синтезе оптимальной системы регулирования ставится две основные задачи:

1. Идентификация модели объекта регулирования.
2. Выбор структуры регулятора и оптимизация его настроек.

Рассмотрим подробно решение первой задачи.

Параметрическая идентификация заключается в расчете параметров  $a_1, a_2, \dots, a_n, b, d$  конечно-разностного уравнения модели объекта для выбранной структуры (порядка уравнения), обеспечивающих минимум отклонения переходного процесса, рассчитанного по полученной модели и кривой разгона объекта.

В качестве объекта регулирования примем имитационную модель (18),(19). На вход имитационной модели объекта подается единичное ступенчатое воздействие  $u_i = 1 \ (i = \overline{2, N})$ , т.е. проводится активный эксперимент. Точки кривой разгона  $y_i''$  для заданного такта квантования  $T_0$  рассчитываются по уравнениям

(18),(19). Ставится задача: по полученной на имитационной модели объекта регулирования кривой разгона найти параметры математической модели той же структуры, то есть восстановить коэффициенты  $a_1^m, a_2^m, b^m$  в уравнении (23):

$$y_i^m = a_1^m y_{i-1}^m + a_2^m y_{i-2}^m + b^m u_{i-d-1}, \quad (23)$$

где  $y_i^m$  - выход восстанавливаемой модели объекта;  $a_1^m, a_2^m, b^m$  - восстанавливаемые коэффициенты модели объекта.

Поставленную задачу можно представить следующей структурной схемой (рис.3).



Рис.3. Структурная схема задачи идентификации в условиях активного эксперимента

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК), широко применяющимся для параметрической идентификации моделей объектов регулирования. Критерием МНК является наилучшее совпадение переходных процессов  $y_i^m$  и  $y_i^u$ , определяемое выражением:

$$\Phi = \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_i^u - y_i^m)^2 \xrightarrow{a_1, a_2, b} \min. \quad (24)$$

В уравнении (23) индекс  $m$  при  $y_{i-1}^m$  и  $y_{i-2}^m$  можно заменить на индекс  $u$ , т.к. для определения  $y_i^m$  всегда известны измеренные значения  $y_{i-1}^u$  и  $y_{i-2}^u$ . Поэтому для любого  $i$ -го такта квантования справедливо:

$$y_i^m = a_1^m y_{i-1}^u + a_2^m y_{i-2}^u + b^m u_{i-d-1}. \quad (25)$$

Подставив (25) в (24), получим:

$$\Phi = \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_i^u - a_1^m y_{i-1}^u - a_2^m y_{i-2}^u - b^m u_{i-d-1})^2 \xrightarrow{a_1, a_2, b} \min. \quad (26)$$

Так как функция  $\Phi$  положительно определенная в силу квадратичной формы, то необходимым и достаточным условием экстремума  $\Phi$  является равенство нулю первых производных по искомым параметрам:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial a_1^m} &= 2 \sum_{i=3+d}^{N+1+d} [(y_i^u - a_1^m y_{i-1}^u - a_2^m y_{i-2}^u - b^m u_{i-d-1})(-y_{i-1}^u)] = 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial a_2^m} &= 2 \sum_{i=3+d}^{N+1+d} [(y_i^u - a_1^m y_{i-1}^u - a_2^m y_{i-2}^u - b^m u_{i-d-1})(-y_{i-2}^u)] = 0; \quad (27) \\ \frac{\partial \Phi}{\partial b^m} &= 2 \sum_{i=3+d}^{N+1+d} [(y_i^u - a_1^m y_{i-1}^u - a_2^m y_{i-2}^u - b^m u_{i-d-1})(-u_{i-d-1})] = 0; \end{aligned}$$

После преобразования получим:

$$\begin{aligned} &a_1^m \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_{i-1}^u)^2 + a_2^m \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_{i-1}^u y_{i-2}^u) + b^m \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_{i-1}^u u_{i-d-1}) = \\ &= \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_i^u y_{i-1}^u); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& a_1^m \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_{i-1}^u y_{i-2}^u) + a_2^m \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_{i-2}^u)^2 + b^m \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_{i-2}^u u_{i-d-1}) = \\
& = \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_i^u y_{i-2}^u); \\
& a_1^m \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_{i-1}^u u_{i-d-1}) + a_2^m \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_{i-2}^u u_{i-d-1}) + b^m \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (u_{i-d-1})^2 = \\
& = \sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_i^u u_{i-d-1}).
\end{aligned} \tag{28}$$

Параметры  $a_1^m, a_2^m, b^m$ , удовлетворяющие критерию (24), находятся решением системы (28) линейных уравнений [1]. МНК в приведенной постановке со стохастическим возмущающим сигналом позволяет получить достоверные и несмещенные оценки параметров  $a_1^m, a_2^m, b^m$ .

При равенстве нулю коэффициента помехи  $p$ , т.е. при отсутствии возмущений на выходе имитационной модели, когда  $y_i^u = y_i$ , оценки  $a_1^m, a_2^m, b^m$  должны совпадать с  $a_1, a_2, b$  (до погрешности вычислений).

По полученным  $a_1^m, a_2^m, b^m$  из системы (28) можно восстановить значения параметров соответствующей передаточной функции объекта (7)  $T_2^2, T_1^1, k$ .

#### 1.4 Установление адекватности полученной дискретной модели объекту

После получения параметров  $a_1^m, a_2^m, b^m$  разностного уравнения (23) необходимо оценить меру соответствия полученной модели реальному объекту (имитационной модели), т.е. проверить адекватность модели объекту.

Адекватность устанавливается по критерию Фишера [3], для чего рассчитывается дисперсионное соотношение  $F$  :

$$F = \frac{S_y^2}{S_{ocm}^2}, \quad (29)$$

где  $S_y^2$  - дисперсия относительно среднего, характеризующая отклонение выхода объекта  $y_i^u$  от среднего значения  $\overline{y^u}$ ;  $S_{ocm}^2$  - остаточная дисперсия, характеризующая отклонение выхода модели  $y_i^m$  от выхода объекта  $y_i^u$ .

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_i^u - \overline{y^u})^2}{N-1}, \quad (30)$$

$$S_{ocm}^2 = \frac{\sum_{i=3+d}^{N+1+d} (y_i^m - y_i^u)^2}{N-1-l}, \quad (31)$$

где  $\overline{y^u} = \frac{\sum_{i=3+d}^{N+1+d} y_i^u}{N-1}$  - среднее значение выхода объекта;  $l$  - число связей, наложенных на выборку, равное числу определяемых коэффициентов (для уравнения (23)  $l = 3$ ).

Полученное разностное уравнение (25) модели считается адекватным объекту, если расчетное значение  $F$  больше некоторого критического значения  $F_{табл}(p, f_1, f_2)$ , т.е. при выполнении неравенства:

$$F = \frac{S_y^2}{S_{ост}^2} > F_{табл}(p, f_1, f_2), \quad (32)$$

где  $F_{табл}(p, f_1, f_2)$  - критическое значение критерия, зависящее от чисел  $f_1, f_2$  степеней свободы для дисперсии  $S_y^2$  и  $S_{ост}^2$  ( $f_1 = N - 1, f_2 = N - 1 - l$ ) и от уровня значимости  $p$ .

Критическое значение Фишера выбирается из таблиц распределения Фишера [4]. Уровень значимости принять равным  $p = 0,01$ . При невыполнении условия (32) уравнение (25) модели не адекватно объекту.

### 1.5 Алгоритм решения

Алгоритм решения должен включать в себя выполнение следующих этапов (рис.4).

1. Вычисление коэффициентов разностного уравнения (18) имитационной модели объекта по параметрам непрерывной передаточной функции (7) по формулам (10)-(12).

2. Расчет переходного процесса по имитационной модели (18),(19) при единичном ступенчатом воздействии и определение параметров модели объекта МНК (идентификация).

3. Проверка адекватности полученной модели по критерию Фишера.

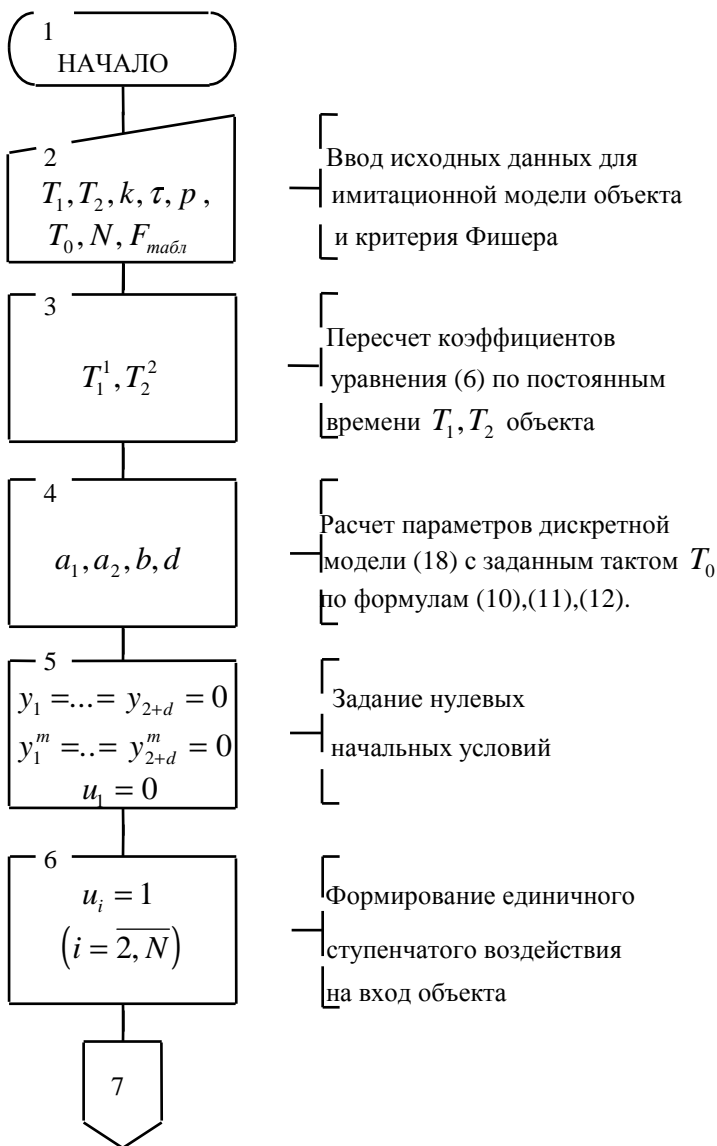


Рис. 4. Схема алгоритма решения задачи





Рис. 4. Продолжение

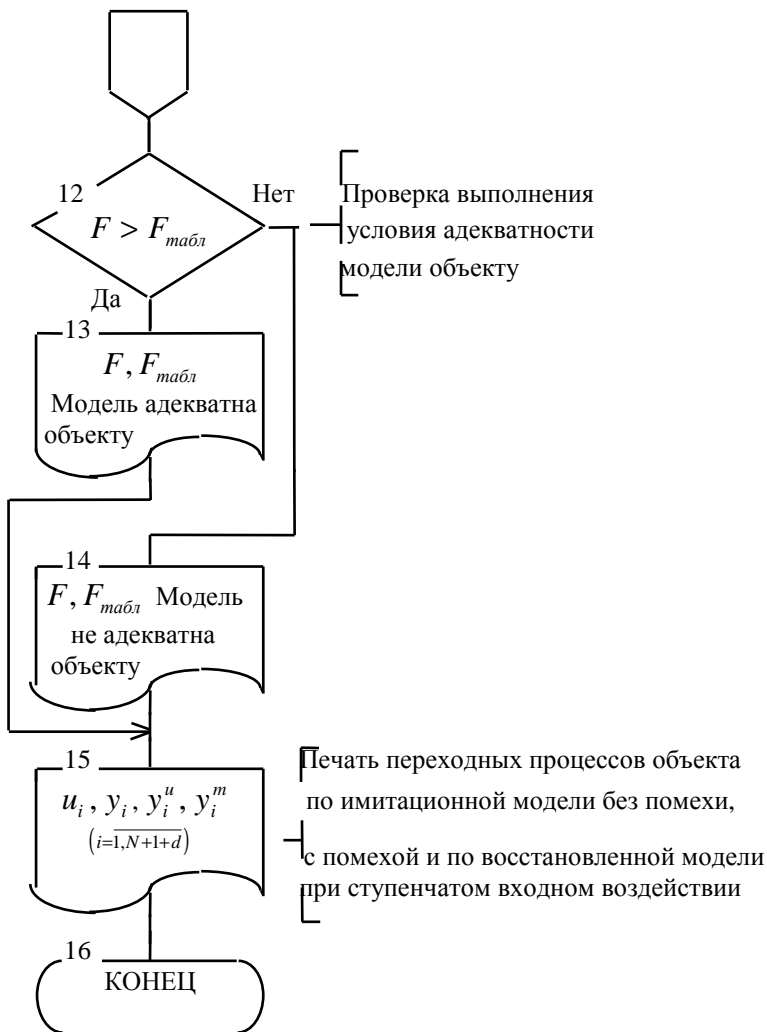


Рис.4. Окончание

## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1 Изучить методические указания.

2.2 В соответствии с вариантом задания (графа 1 таблицы), полученным от преподавателя, выписать исходные данные и уяснить постановку задачи.

2.3 Составить алгоритм решения поставленной задачи, включающий:

а) расчет параметров разностного уравнения имитационной модели 1-го, 2-го или 3-го порядка (в зависимости от варианта задания (графы 4-6 таблицы)) и переходных процессов по имитационной модели при наличии помехи и без нее ( $p = 0$ );

б) параметрическую идентификацию восстанавливаемой модели разностными уравнениями различных порядков (графа 11 таблицы) по переходным характеристикам имитационной модели при наличии помехи и без нее;

в) проверку адекватности полученных моделей по имитационной при наличии помехи и без нее.

2.4 Составить программу на языке *Си* и провести расчеты на ПЭВМ.

2.5 Провести анализ полученных результатов и сделать вывод о качестве идентификации модели уравнениями различных порядков при наличии помехи и без нее.

2.6 Оформить отчет о работе.

## 3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

3.1 Наименование и цель работы.

3.2 Описание постановки задачи.

3.3 Математическая формулировка задачи.

3.4 Схема алгоритма решения.

3.5 Распечатка программы и результатов расчетов.

3.6 Графики переходных процессов объекта  $y_i''$  (при наличии помехи и без нее) и модели  $y_i^m$  (разных порядков).

### 3.7 Анализ полученных результатов.

## 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 Как осуществляется переход от непрерывной передаточной функции к конечно-разностному уравнению и к дискретной передаточной функции?

4.2 В чем заключается МНК?

4.3 Что собой представляет имитационная модель объекта?

4.4 Что такое параметрическая идентификация объекта регулирования?

4.5 Какие начальные условия задаются для расчета переходного процесса по дискретной модели?

4.6 Как устанавливается адекватность модели объекту?

## Варианты заданий

№ варианта	Технологический объект (ТО)	Канал объекта регулирования	Пар. модели ТО
			Первая пост. врем.
			$T_1$
1	2	3	4
1	Теплообменник	Расход греющего пара - температура смеси на выходе теплообменника	4,21 мин
2	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - содержание компонента смеси на к.т.	81 мин
3	Полимеризатор	Расход рассола в рубашку полимеризатора - температура смеси	6 мин
4	Колонна экстрактивной ректификации	Расход флегмы - содержание компонента смеси в дистилляте	41,8 мин
5	Теплообменник	Расход греющего пара - температура смеси на выходе теплообменника	8 мин
6	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - температура смеси в кубе колонны	12 мин
7	Паровой котел	Расход топлива - температура в котле	153,5 с
8	Полимеризатор	Расход рассола в рубашку полимеризатора - конверсия мономера	78 мин
9	Теплообменник	Расход греющего пара - температура смеси на выходе теплообменника	4,21 мин
10	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - температура смеси в кубе колонны	3,59 мин
11	Теплообменник	Расход греющего пара - температура смеси на выходе теплообменника	7,86 мин
12	Колонна экстрактивной ректификации	Расход флегмы - содержание компонента смеси на в.к.т.	11,7 мин

13	Теплообменник	Расход греющего пара - температура смеси на выходе теплообменника	8 мин
----	---------------	--	-------

Таблица

к выполнению работы

Параметры модели ТО					Такт кван- това- ния	Порядки уравне- ний вос- станов- ливаемых моделей	Метод решения системы лин. уравне- ний
Вторая пост. врем.	Третья пост. врем.	Коэффи- циент усиления	Время чистого запзд.	Коэф. поме- хи			
$T_2$	$T_3$	$k$	$\tau$	$P$	$T_0$		
5	6	7	8	9	10	11	12
-	-	12,1 °C/(т/ч)	2,3 мин	0,61	0,1 мин	1;2	Правило Крамера
27 мин	-	-5 %/(т/ч)	27 мин	0,25	1 мин	1;3	Метод Гаусса
2 мин	-	4 °C/(м <sup>3</sup> /ч)	2 мин	0,2	0,1 мин	2;3	Правило Крамера
15,3 мин	10,2 мин	-5,81 %/(т/ч)	16 мин	0,29	2 мин	1;2	Метод Гаусса
2 мин	-	1 °C/(т/ч)	3,8 мин	0,05	0,2 мин	1;3	Правило Крамера
2,44 мин	-	4,5 °C/(т/ч)	3 мин	0,225	0,25 мин	2;3	Метод Гаусса
24 с	15 с	1,77 °C/( м <sup>3</sup> /ч)	0 с	0,089	10 с	1;2	Правило Крамера
77 мин	-	1,5 %/(м <sup>3</sup> /ч)	6 мин	0,075	2 мин	1;3	Метод Гаусса
3,19 мин	-	12,1 °C/(м <sup>3</sup> /ч)	0,5 мин	0,61	0,1 мин	2;3	Правило Крамера
2,8 мин	-	7,3 °C/(т/ч)	4 мин	0,37	0,5 мин	1;2	Метод Гаусса
-	-	3,05 °C/(т/ч)	2 мин	0,15	0,25 мин	1;3	Правило Крамера
5,48 мин	4,9 мин	-4,33 %/(т/ч)	20 мин	0,22	2 мин	2;3	Метод Гаусса

2 мин	-	1 °C/(м <sup>3</sup> /ч)	2,1 мин	0,05	0,1 мин	1;2	Правило Крамера
-------	---	--------------------------	---------	------	------------	-----	--------------------



№ вари- анта	Технологический объект (ТО)	Канал объекта регулирования	Пар. мо- дели ТО
			Первая пост. врем.
			$T_1$
1	2	3	4
14	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - температура смеси в кубе колонны	73,84 мин
15	Полимеризатор	Расход катализатора - температура в реак- торе	41,72 мин
16	Теплообменник	Расход греющего пара - температура смеси на выходе теплообменника	4,21 мин
17	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - температура смеси в кубе колонны	73,84 мин
18	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - температура смеси в кубе колонны	35,18 мин
19	Полимеризатор	Расход катализатора - вязкость выходного продукта	45,45 мин
20	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - содержание компонента смеси в кубе кол.	65 мин
21	Теплообменник	Расход греющего пара - температура смеси на выходе теплообменника	4,21 мин
22	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - температура смеси в кубе колонны	73,84 мин
23	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - температура смеси в кубе колонны	10,12 мин
24	Колонна экстрактив- ной ректификации	Расход флегмы - содержание компонента смеси в дистилляте	41 мин
25	Колонна ректификации	Расход теплоносителя в кипятильник - температура смеси в кубе колонны	12 мин

## Продолжение таблицы

Параметры модели ТО					Такт кван- това- ния	Порядки уравне- ний вос- станов- ливаемых моделей	Метод решения системы лин. уравне- ний
Вторая пост. врем.	Третья пост. врем.	Коэффи- циент усиления	Время чистого запазд.	Коэф. поме- хи			
$T_2$	$T_3$	$k$	$\tau$	$P$	$T_0$		
5	6	7	8	9	10	11	12
15,13 мин	-	0,08 °C/(т/ч)	10 мин	0,04	1 мин	1;3	Метод Гаусса
17,28 мин	-	-1,03 °C/(м³/ч)	8 мин	0,052	1 мин	2;3	Правило Крамера
3,19 мин	-	12,1 °C/(м³/ч)	5 мин	0,61	0,5 мин	1;2	Метод Гаусса
15,13 мин	-	0,08 °C/(т/ч)	15 мин	0,04	1 мин	1;3	Правило Крамера
2,88 мин	-	1,04 °C/(т/ч)	9 мин	0,052	1 мин	2;3	Метод Гаусса
20,35 мин	-	0,4 г/см³/(т/ч)	12 мин	0,02	1 мин	1;2	Правило Крамера
40 мин	15 мин	-0,9 %/(т/ч)	10 мин	0,045	2 мин	1;3	Метод Гаусса
-	-	12,1 °C/(м³/ч)	7 мин	0,61	0,5 мин	2;3	Правило Крамера
15,13 мин	-	0,08 °C/(т/ч)	8 мин	0,004	1 мин	1;2	Метод Гаусса
2,77 мин	-	3,12 °C/(т/ч)	8 мин	0,16	0,5 мин	1;3	Правило Крамера
19,17 мин	0,698 мин	-0,13 %/(т/ч)	20 мин	0,007	2 мин	2;3	Метод Гаусса
-	-	2 °C /(т/ч)	2 мин	0,2	0,2 мин	1;2	Правило Крамера



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баглаев Ю.П. Вычислительная математика и программирование. - М.: Высш. шк., 1990. С.312-322.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. С.58-72.
3. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1985. С.72-73.
4. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. - М.: Высш.шк.,1982. С.196-197.
5. Плютто В.П., Путинцев В.А., Глумов В.М. Практикум по теории автоматического управления химико-технологическими процессами. – М.: Химия, 1989. С.66-73.

