

П. В. Петров

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Показана необходимость описания гидромеханических систем методами алгоритмического моделирования. На простом примере продемонстрирована процедура численного исследования систем по нелинейным моделям, с учётом существенных нелинейностей и перестроения структуры. *Гидромеханические системы, устройства автоматики, нелинейность, алгоритмическое моделирование*

ВВЕДЕНИЕ

Исследование нелинейных гидромеханических систем связано с усложнением математического аппарата, так как анализ и расчет таких систем приходится вести по нелинейным дифференциальным уравнениям. При этом не может быть применен принцип суперпозиции и, следовательно, отклик системы на произвольное входное воздействие нельзя определить в виде суммы откликов на последовательность скачков или импульсов. Форма переходного процесса, вызванного в нелинейной системе ступенчатым воздействием, зависит от значения воздействия. Вследствие отмеченных особенностей процессов в нелинейных системах, для описания таких систем не могут быть использованы независимые от входного воздействия передаточные функции, которые эффективны при исследовании линейных систем. Стоит отметить, что методы интегрирования в конечном виде нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и их систем в случаях, когда это возможно, в настоящее время все еще слабо развиты. Именно поэтому зачастую сложные гидромеханические системы ГТД пытаются описывать как обычные аналоговые системы при помощи линейных или кусочно-линейных методов, которые базируются на описании физических процессов, протекающих вблизи положения равновесия. Для таких методов построения модели необходимо как детальное представление физической картины изучаемого процесса, так и возможности упрощения его математического описания. По большей части такие методы расписаны в литературе, посвященной проблеме разработки моделей сложных гидромеханических объектов.

Однако реальные системы, вследствие сложности протекающих в них физических про-

цессов, а также конструктивных особенностей элементов обычно получаются нелинейными. Многие физические явления, и это особенно заметно на стадии проектирования, при малейшей попытке их линеаризации исчезают [1]. Также при линейном описании системы невозможно математически расписать изменение структуры объекта, т.е. изменение его состояния. Линейные аналитические методы здесь не приемлемы и потому для того, чтобы описать такого рода ограничения, необходимо вводить логические условия, а это уже является прямым шагом к отказу от аналитического решения и переходу к алгоритмическому моделированию. Это позволит нам получить более полное математическое описание моделей объекта [2].

1. Принципы алгоритмического моделирования

В частности, переходу к алгоритмическому моделированию способствует развитие сложных мощных вычислительных комплексов и аппаратных средств ЭВМ в сфере моделирования и исследования систем. Новые компьютерные технологии позволяют автоматизировать процесс численного исследования модели, и появляется возможность реализации более сложных и громоздких систем в компьютерном исполнении [3]. Это приводит к постепенному отказу от традиционных приближённых аналитических и графоаналитических методов исследования и к повышению значимости алгоритмического моделирования и численного исследования.

Алгоритмическое моделирование несколько условное понятие. Его обычно противопоставляют (по методу реализации) аналитическим методам, имея в виду, что алгоритмические модели не могут быть решены в символьном виде, а чаще всего решаются численно. Однако и в алгоритмических моделях могут иметь место

аналитические выражения, дополненные условными переходами и изменяемой структурой. Это и сближает друг с другом аналитические и алгоритмические методы исследования.

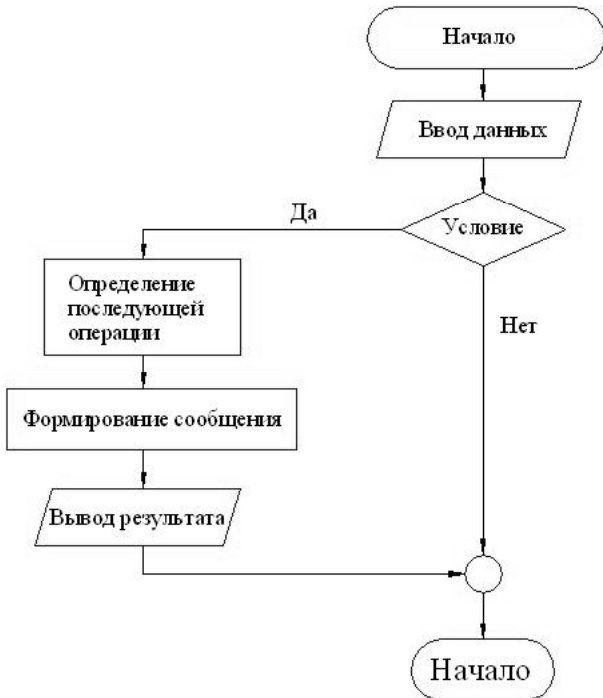


Рис. 1. Пример использования блок-схемы

Суть методики алгоритмического моделирования в следующем: записывается математическая модель реального объекта в линейном виде. Далее выписываются все присущие нелинейности для этого объекта и вставляются в математическую модель в виде алгоритмических условий. Таким образом, мы как бы дополняем модель, например, ограничиваем перемещение рабочих органов, описываем изменяемую структуру модели, которая может меняться по времени, описываем нечувствительность системы, насыщение и т.д.

Модель в таком представлении, как показали численные эксперименты, получается наиболее адекватной и максимально приближенной по описанию к реальному объекту.

Алгоритмическое моделирование по своей сути является структурным программированием. Программа для реализации алгоритмической модели может быть написана с использованием трех управляющих структур: следования, выбора и повторения. При описании алгоритмических условий, которые учитываются в математических моделях, применяются три структуры выбора: *if end* – структура с единственным

выбором, *if else end* – структура с двойным выбором и *switch* – структура с множественным выбором.

Структура выбора *if end*, при описании алгоритма задачи, используется в тех случаях, когда должно выполняться действие или последовательность действий в зависимости от некоторых условий. Структура выбора *if end* имеет следующую форму:

```

if логическое_выражение
инструкция_1
инструкция_2
.....
инструкция_n
end
  
```

Если условие выполняется, то выполняются инструкции, расположенные в теле структуры. В противном случае программа переходит на следующую инструкцию, расположенную после ключевого слова *end*.

На рис.1 представлена, в качестве примера демонстрации работы алгоритмических условий, блок-схема. Кроме этого, в моделях могут использоваться множество других структур выбора таких как:

if elseif else end – (если иначе если);
switch – (структура множественного выбора);
for end – (структура повторения);

и многие другие, полно описывающие алгоритмические условия.

Во время разработки программ, описания алгоритмов, следует применять правила структурного стиля программирования:

- разработка начинается с простейшей блок-схемы;
- каждый прямоугольник (действие) может быть заменен двумя последовательными прямоугольниками (более детальными действиями);
- каждый прямоугольник (действие) может быть заменен любой структурой управления.

2. Моделирование систем автоматизации

В качестве объекта, на котором применяется методика алгоритмического моделирования, была взята довольно сложная гидравлическая система с перестраиваемой структурой – гидропривод с объемным регулированием и дистанционным управлением, принципиальная схема

которого изображена на рис. 2. В качестве дистанционного управления принят электрогидравлический следящий привод.

Гидропривод с объемным регулированием и дистанционным управлением имеет силовую часть, состоящую из регулируемого объемного насоса, гидродвигателя, вспомогательных устройств, и управляющую часть, которой служит электрогидравлический привод с дроссельным регулированием. Такие приводы различаются по принципиальной схеме, по конструкции гидромашин силовой части, по виду элементов управляющей части, по типу корректирующих устройств и другим признакам.

В работе представлены алгоритмические модели привода, каскады в котором согласованы только статически, динамически они не согласованы, так как постоянная времени заслонки на порядок меньше, чем у золотника, поршня или вала гидродвигателя. При подаче максимального сигнала управления заслонка становится

на упор, в то время как золотник продолжает движение, не ограничиваясь конечным положением, поэтому в дифференциальное уравнение следует вводить ограничения. Но такого рода ограничения не описывались в моделях ранее, и поэтому в алгоритм следует ввести логические условия, которые численно на графиках будут ограничивать перемещение.

Стоит отметить, что мы рассматриваем реальные объекты, а значит, геометрические параметры для ЭМП и других элементов берутся из паспортных данных. Значение перемещения заслонки при максимальном токе не будет превышать максимального значения h_0 , а значит, ограничивать его нет необходимости, стоит лишь в модели довольствоваться ограничением на ток, т.е. ток не может быть больше максимального. Совершенно другая картина в случае перемещений золотника, поршня и вала гидромотора.

Далее для выбранной схемы назначаются основные исходные параметры реального объекта, необходимые для расчета.

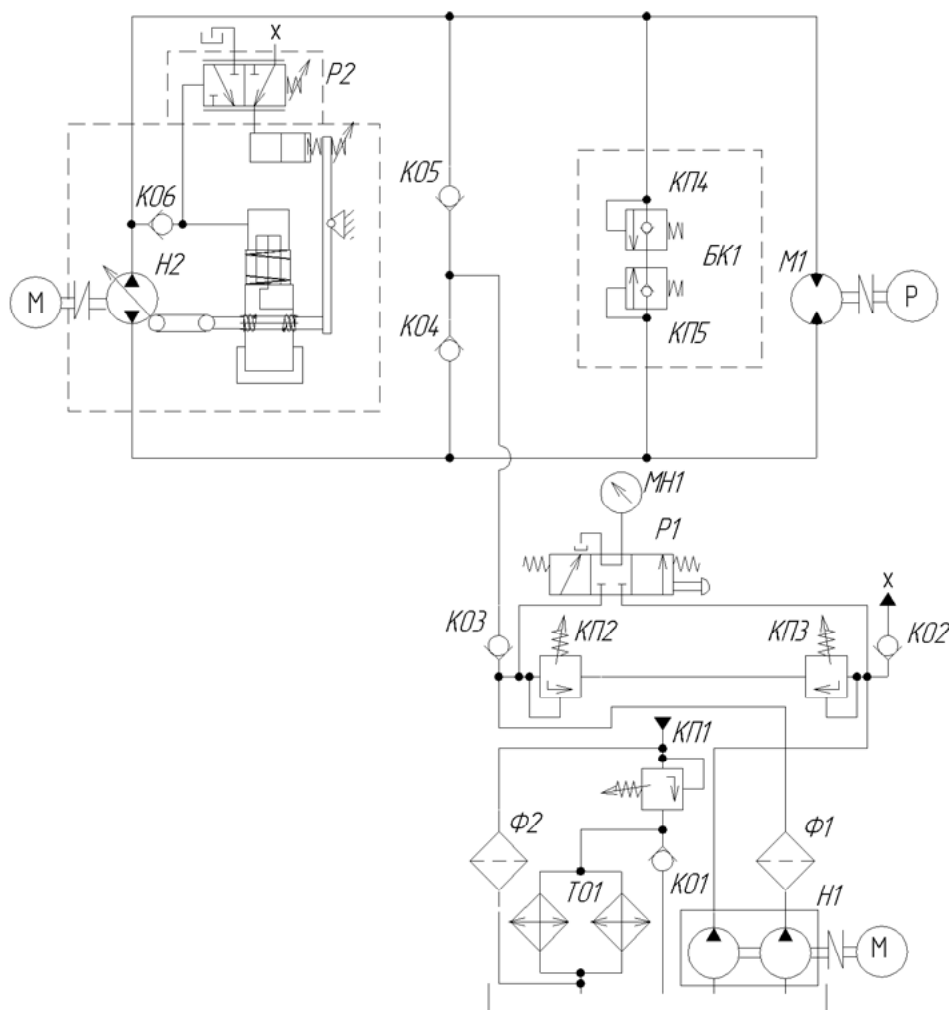


Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема гидропривода с объемным регулированием

Следующим этапом исследования данной модели является получение статической модели и построение статических характеристик, здесь нет ничего нового, поэтому этот пункт пропускается, и переходим сразу к динамике системы [4].

Каскады в исследуемой системе динамически не согласованы, так как постоянная времени подвижной части ЭМП на порядок меньше, чем у золотника, поршня или вала гидромотора. Уже при сравнительно небольших сигналах управления заслонка может становиться на упор; при больших сигналах золотник также может совершить полный ход.

Математически перемещение ничем не ограничено и в случае максимального значения входного сигнала перемещение золотника будет бесконечно большим, что не допустимо. Таким образом, вводится ограничение, но не на перемещение золотника, а на конечное значение величины щелей по обеим сторонам заслонки, тем самым ограничивая перемещение. Такие условия будут иметь следующий вид:

Учет геометрии размера щелей в сопло – заслонке, золотнике.

Функция, описывающая ограничение зазора между заслонкой и соплом (слева):

$$\begin{aligned} & \text{If } h \leq 0 \text{ then } X_{shl}(h) = h_0, \\ & \text{Else if } h > 0 \text{ and } h < h_0 \\ & \quad \text{then } X_{shl}(h) = (h_0 - h), \\ & \text{Else } X_{shl}(h) = 0, \\ & \text{End.} \end{aligned} \quad (1)$$

Функция, описывающая ограничение зазора между заслонкой и соплом (справа):

$$\begin{aligned} & \text{If } h \leq 0 \text{ then } X_{shl}(h) = h_0, \\ & \text{Else if } h > 0 \text{ and } h < h_0 \\ & \quad \text{then } X_{shl}(h) = (h_0 + h), \\ & \text{Else } X_{shl}(h) = 2 \cdot h_0, \\ & \text{End.} \end{aligned} \quad (2)$$

Другими словами, это звучит так – если выполняется условие $y < h_0$, то зазор между заслонкой и соплом с одной стороны, будет равен $(h - y)$, а если это условие не выполняется, то зазор равен нулю. Условие, ограничивающее размер щели с другой стороны, звучит так – если выполняется условие $y < h_0$, то зазор между заслонкой и соплом с одной стороны будет равен $(h + y)$, а если это условие не выполняется, то зазор равен $2h_0$.

Условие ограничение размера щели в золотнике

$$\begin{aligned} & 1) \text{ If } X_{Sh} \leq 0; \\ & \quad \text{then } 0; \\ & \quad \text{else } X_{Sh}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 2) \text{ If } X_{Sh} \geq X_{\max}; \\ & \quad \text{then } X_{\max}; \\ & \quad \text{else } X_{\max}. \end{aligned} \quad (3)$$

Условие ограничения размера щели в цилиндре

$$\begin{aligned} & 1) \text{ If } Y_{Sh} \leq 0; \\ & \quad \text{then } 0; \\ & \quad \text{else } Y_{Sh}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & 2) \text{ If } Y_{Sh} \geq Y_{\max}; \\ & \quad \text{then } Y_{\max}; \\ & \quad \text{else } Y_{\max}. \end{aligned}$$

В пакете MATCAD программный код представляется в виде функций пользователя: $h(y) = \text{if}(y, h_0, y, h_0)$ и $x(y) = \text{if}(y, x_{\max}, y, x_{\max})$, которые останавливают заслонку и золотник на упорах.

Ограничение перемещения (упор).

Ограничение перемещения заслонки:

$$\begin{aligned} & a) \text{ If } h \leq 0 \text{ then } H(h) = 0, \\ & \quad \text{Else if } h > 0 \text{ and } h < h_0 \\ & \quad \text{then } H(h) = h, \\ & \quad \text{Else } H(h) = h_0, \\ & \quad \text{End.} \end{aligned} \quad (5)$$

Ограничение перемещения золотника:

$$\begin{aligned} & б) \text{ If } x \leq 0 \text{ then } X(x) = 0, \\ & \quad \text{Else if } x > 0 \text{ and } x < x_{\max} \\ & \quad \text{then } X(x) = x, \\ & \quad \text{Else } X(x) = x_{\max}, \\ & \quad \text{End.} \end{aligned} \quad (6)$$

Ограничение перемещения поршня:

$$\begin{aligned} & в) \text{ If } y \leq 0 \text{ then } Y(y) = 0, \\ & \quad \text{Else if } y > 0 \text{ and } y < y_{\max} \\ & \quad \text{then } Y(y) = y, \\ & \quad \text{Else } Y(y) = y_{\max}, \\ & \quad \text{End.} \end{aligned} \quad (7)$$

Нелинейное изменение входного сигнала.

Функция изменения сигнала управления:

$$\begin{aligned} & \text{If } t < 0 \text{ then } T_{ok}(t) = 0, \\ & \quad \text{Else if } t \geq 0 \\ & \quad \text{then } T_{ok}(t) = I \cdot 10^{10} \cdot t^2, \\ & \quad \text{Else } T_{ok}(t) = I, \\ & \quad \text{End.} \end{aligned} \quad (8)$$

Функция, ограничивающая величину сигнала управления:

$$\begin{aligned} & \text{If } I < I_{\max} \text{ then } T_{okm}(t) = T_{ok}(t), \\ & \quad \text{Else } T_{okm}(t) = I_{\max}, \\ & \quad \text{End.} \end{aligned} \quad (9)$$

Ограничение величины давления (насыщение по давлению):

$$\begin{aligned} & в) \text{ If } p_i \leq p_{sl} \text{ then } P(p_i) = p_{sl}, \\ & \quad \text{Else if } p_i > p_{sl} \text{ and } y < P_k \\ & \quad \text{then } P(p_i) = p_i, \end{aligned} \quad (10)$$

Else $P(p_i) = P_k$,
End.

Изменение модуля объемной упругости (газо-
содержание) по эмпирической формуле [5]:

Процесс – адиабатный ($n_1 = 1.4$)

$$\alpha = \frac{V_{go}}{V_{co}}, \quad (11)$$

где V_{go} – объем воздуха, V_{co} – объем полости;

$$E(p_i) = \frac{10^4}{\frac{\alpha}{n_1} + \frac{1}{E_c} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\left(\frac{p_i}{10^5} + 1 \right)^{\frac{1}{n_1}}} \right)} \quad (12)$$

Принимая ряд некоторых допущений, математическая модель с учетом нелинейностей, введенных в виде алгоритмических условий, примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_h}{dt} = \frac{1}{m_e} \left(k_{FI} \cdot T_{ok}(t) - \frac{k_{oc} \cdot Y(y)}{R_b} \right) - c_{\Sigma} \cdot H(h) - k_{\text{ЭМП}} \cdot \frac{dh}{dt} - c_{oc} \cdot (X(x) - H(h)) - F_{ce}; \\ \frac{dp_1}{dt} = \frac{E(p_1)}{V_0 + f_3 \cdot X(x)} \left[\begin{array}{l} \mu_{dr} \cdot f_{dr} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_n - P(p_1))} \cdot \text{sign}(P_n - P(p_1)) - \\ - \mu \cdot b_c \cdot X_{sh1}(h) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P(p_1) - p_{cл})} \cdot \text{sign}(P(p_1) - p_{cл}) - f_3 \cdot \frac{dx}{dt} \end{array} \right]; \\ \frac{dp_2}{dt} = \frac{E(p_2)}{V_0 - f_3 \cdot X(x)} \left[\begin{array}{l} \mu_{dr} \cdot f_{dr} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_n - P(p_2))} \cdot \text{sign}(P_n - P(p_2)) - \\ - \mu \cdot b_c \cdot X_{sh2}(h) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P(p_2) - p_{cл})} \cdot \text{sign}(P(p_2) - p_{cл}) + f_3 \cdot \frac{dx}{dt} \end{array} \right]; \\ \frac{dv_x}{dt} = \frac{1}{m_3} \left[f_3 \cdot (P(p_1) - P(p_2)) - c_{oc} \cdot (X(x) + H(h)) - k_{v3} \cdot \frac{dx}{dt} - F_{cz} \right]; \\ \frac{dv_y}{dt} = \frac{1}{m_p} \left[f_p \cdot (P(p_3) - P(p_4)) - k_{vp} \cdot \frac{dy}{dt} - F_{cx} \right]; \\ \frac{dp_3}{dt} = \frac{E(p_3)}{V_1 + f_p \cdot Y(y)} \left[\mu \cdot b \cdot X_{sh4}(x) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_n - P(p_3))} \cdot \text{sign}(P_n - P(p_3)) - f_p \cdot \frac{dy}{dt} \right]; \\ \frac{dp_4}{dt} = \frac{E(p_4)}{V_1 - f_p \cdot Y(y)} \left[f_p \cdot \frac{dy}{dt} - \mu \cdot b \cdot X_{sh4}(x) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P(p_4) - p_{cл})} \cdot \text{sign}(P(p_4) - p_{cл}) \right]; \\ \frac{dv_m}{dt} = \frac{1}{J} \left[\frac{V_m (P(p_5) - P(p_6))}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{MM}} - k_{vm} \cdot \frac{d\alpha}{dt} - M_c - M_p - \Delta M \right]; \\ \frac{dp_5}{dt} = \frac{E(p_5)}{V_2} \left[\frac{Q_{\max}}{z_{\max}} \cdot (z_0 + Y(y)) \cdot \eta_{oh}(y) - \frac{V_m}{2 \cdot \pi \cdot \eta_q} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right]; \\ \frac{dp_6}{dt} = \frac{E(p_6)}{V_2} \left[\frac{V_m}{2 \cdot \pi \cdot \eta_q} \cdot \frac{d\alpha}{dt} - \frac{Q_{\max}}{z_{\max}} \cdot (z_0 + Y(y)) \cdot \eta_{oh}(y) \right]; \end{array} \right.$$

где m_e – масса подвижных частей ЭМП; m_3 – масса золотника; h_0, h – начальное и текущее значения положения заслонки; k_{FI} – коэффициент усиления ЭМП; I – ток управления; R_b – сопротивление катушки; $k_{\text{ЭМП}}, k_{v3}$ – соответственно коэффициенты вязкого трения ЭМП и золотника; $c_{\text{ЭМП}}$ – жесткость ЭМП; k_{oc} – коэффициент обратной связи; F_{ce}, F_{cz} – соответственно силы сухого трения в ЭМП и золотнике; V_0, V_1, V_2 – соответственно суммарные объемы гидравлических

плеч; b_c – ширина сопла; $p_k, p_{cл}$ – соответственно давление питания первого каскада усилителя и давление слива; f_{dr} – площадь нерегулируемого дросселя; $x_{ш1}, x_{ш2}$ – размер щелей в золотнике; J – момент инерции на валу гидромотора; k_{vm} – коэффициент вязкого трения гидромотора; $M_c, M_p, \Delta M$ – соответственно силы трения гидромотора, рабочий момент гидромотора и изменение момента гидромотора; c_{Σ}, C_{oc} – соответственно суммарная жесткость ЭМП и обратной связи.

В расчетах приняты следующие исходные данные:

для гидропривода с объемным регулированием и дистанционным управлением:

- общие параметры гидравлической системы:

$$\begin{aligned} E &= 2 \cdot 10^8 \text{ Па}; & \rho &= 785 \text{ кг/м}^3; \\ \mu &= 0,65; & P_n &= 20 \cdot 10^6 \text{ Па}; \\ I_{\max} &= 0,035 \text{ А}; & R_b &= 300 \text{ Ом}; \\ k_{OC} &= 625; & p_{сн} &= 0 \text{ Па}; \end{aligned} \quad (14)$$

- параметры каскада сопло-заслонка:

$$\begin{aligned} m_e &= 6,8 \cdot 10^{-4} \text{ кг}; & c_{\text{ЭМП}} &= 1,7 \cdot 10^4 \text{ Н/м}; \\ c_{\Sigma} &= 2,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}; & C_{OC} &= 4,6 \cdot 10^3 \text{ Н/м}; \\ k_{\text{ЭМП}} &= 2 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; & h_0 &= 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}; \\ b_c &= 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & k_{FI} &= 40 \text{ Н/м}; \end{aligned} \quad (15)$$

- параметры гидроусилителя (золотник-гидроцилиндр):

$$\begin{aligned} m_3 &= 0,02 \text{ кг}; & m_p &= 0,5 \text{ кг}; \\ z_{\max} &= 0,014 \text{ м}; & z_0 &= 0,002 \text{ м}; \\ f_3 &= 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; & f_p &= 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \\ f_{dr} &= 1,84 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2; & b &= 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ \mu_{dr} &= 0,71; & F_{ce} &= F_{cx} = F_{cz} = 0; \\ P_0 &= 1,75 \cdot 10^5 \text{ Па}; & k_{v3} &= 5 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; \\ V_0 &= 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3; & V_1 &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \\ V_2 &= 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; & k_{vp} &= 100 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; \end{aligned} \quad (16)$$

Параметры гидромотора:

$$\left[\begin{aligned} P_{clm} &= 6 \cdot 10^5 \text{ Па}; \\ M_c &= 0; \\ Q_{\max} &= 0,02 \text{ м}^3/\text{с}; \\ M_{\max} &= 2290 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\ k_{vm} &= 10 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; \\ Q_0 &= 2,86 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}; \\ J &= 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\ \eta_q &= 0,85; \\ \eta_{MM} &= 0,9; \\ V_m &= 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \end{aligned} \right] \quad (17)$$

Данные условия является более чем существенным и его в первую очередь следует включать в описание математической модели. В линейном приближении это ограничение учтено быть не может.

Интегрирование этой нелинейной системы может быть выполнено только численными методами. На рис. 3 показаны типовые переходные процессы, полученные методом Рунге-Кутты с числом шагов не менее 10000-50000, с исходными данными описанными выше. Здесь видно, как система, с учетом внесенных ограничений, при максимальном задающем сигнале работает

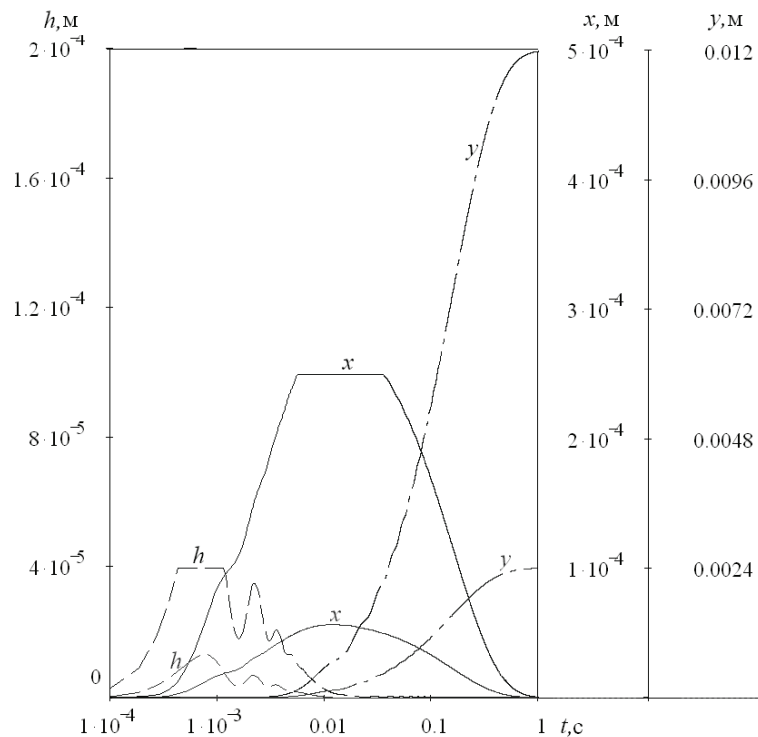


Рис. 3. Переходные процессы системы

по упорам. В работу вступают функции пользователя описанные выше.

Таким образом, на примере типового гидропривода показано как, вводя в математическую модель какую либо нелинейность в виде функций пользователя, можно делать эту модель более адекватной по отношению к реальному объекту.

ВЫВОДЫ

Переходу к методу машинной имитации в значительной степени способствует совершенствование аппаратных средств и математического обеспечения, которое приведет к существенному прогрессу в части решений дифференциальных уравнений; тогда даже не очень опытный пользователь с использованием пакетов прикладных программ может решать задачи, которые ранее были доступны лишь опытным программистам.

Модели, рассчитанные методом машиной имитации, должны удовлетворять ряду требований, в частности, не занимать много времени на программирование. Запись имитационных моделей в оперативной форме делает их весьма удобными для программирования на ЭВМ и, кроме того, облегчает разработку специальных языков для реализации этих моделей на ЭВМ [6].

Наряду с достоинствами предлагаемой методики реализации моделей существует ряд трудностей. При решении получают ряды данных, где нет выражения взаимосвязей свойств и параметров объекта в аналитической замкнутой форме. При их использовании объекты, характеризующие непрерывными моделями необходимо представить в виде дискретного вычислительного процесса, что обуславливает появление дополнительных погрешностей и информационных шумов самой вычислительной среды. Все это приводит к практической невозможности обобщения численных расчетов и опасности получения трудно интерпретируемых решений.

Но, несмотря на такие существенные недостатки, можно утверждать, что метод машинной имитации на данный момент является наиболее перспективным в плане исследования и конструирования гидромеханических систем. К тому же существует ряд предложений по снижению количества таких недостатков в алгоритмических

моделях реализованных методом машинной имитации. Одним из таких предложений является применение перехода от первоначальных переменных к обобщенным переменным.

Применяя методику алгоритмического моделирования, можно получить результаты ни чем не уступающие линейным методам. Кроме того, благодаря этому методу появляется возможность решения более сложных задач. Полученные результаты в обобщенном виде позволяют исследовать внутреннюю структуру исследуемого объекта, чего не делалось ранее [1]. Данный подход можно применить к моделированию систем любой сложности. Появляется возможность решения существенно-нелинейных задач с построением большого числа характеристик, определяющих структуру объекта. Это позволит получить громадное количество информации об исследуемом объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сунарчин Р. А. Выбор параметров гидромеханических регуляторов авиационных двигателей. Анализ и синтез гидромеханических регуляторов. Учебное пособие / Уфа: УГАТУ. 2005. 87 с.
2. Петров П. В., Коева А. А., Целищев В. А., Сунарчин Р. А. Влияние нерастворенного воздуха на рабочие характеристики гидромеханического привода ЛА // Вестник УГАТУ. Уфа. Т. 14, № 1 (36), 2010.
3. Алексанкин Я. Я., Бржозовский А. Э., Жданов В. А. и др. Автоматизированное проектирование систем автоматического управления / под ред. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1990. 332 с.
5. Цуханова Е. А. Динамический синтез дроссельных управляющих устройств гидроприводов. М.: Наука, 1978.
4. Петров П. В., Целищев В. А., Сунарчин Р. А. Технология проведения вычислительного эксперимента применительно к гидромеханическому следящему приводу // Вестник УГАТУ. Т. 10, №1 (26), 2008.
6. Петров П. В., Коева А. А., Целищев В. А. Автоматизация численного моделирования гидромеханических регуляторов двигателей летательных аппаратов // Вестник УГАТУ. Уфа. Т. 15, № 4 (44), 2011.

ОБ АВТОРЕ

Петров Павел Валерьевич, доцент каф. приклад. гидро. мех. Дипл. магистра (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по гидравл. маш. и гидропневмо агрегаты (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. систем автоматики летательных аппаратов.