

О.И.Сауленко, П.С.Манько, Б.И.Смирнов, В.А.Шабалов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИЕМОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Гидравлическая система современных летательных аппаратов (ЛА) включает подсистемы, работа которых на определенных участках циклограммы характеризуется переходными процессами. Решение задач анализа и синтеза агрегатов, задач диагностирования гидропривода опирается на изучение работы гидросистем по результатам эксперимента, а также на исследование их математических моделей. Большое схемное разнообразие участков гидравлических систем даже в пределах одного изделия, значительный объем многовариантных расчетов приводят к необходимости разработки новых подходов в моделировании. Сказанное послужило поводом для рассмотрения возможности использования микроЭВМ для моделирования динамических процессов в отдельных подсистемах, входящих в состав сложных гидросистем ЛА, что менее трудоемко, более экономически выгодно по сравнению с существующими примерами решения задач подобного класса на мощных ЭВМ.

Задачами исследования являются создание методики моделирования переходных процессов в функциональных подсистемах сложных гидросистем с использованием микроЭВМ и анализ модели с точки зрения решения прикладных задач.

Моделирование переходных процессов в гидравлических системах ЛА в первую очередь связывается с численным решением задачи о неустановившемся движении жидкости. Для описания движения жидкости в цилиндрическом трубопроводе выберем систему линеаризованных дифференциальных уравнений /1/

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho}{s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda \rho}{2d s^2} Q^2 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho a^2}{s} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями.

Для нахождения решения системы уравнений (1) и (2) используем метод характеристик, учитывая что это простейший метод, работающий в условиях зависимости граничных условий от времени. Применение метода позволяет перейти от системы с распределенными параметрами к системе с сосредоточенными параметрами, в которую входят дифференциальные уравнения с одной независимой переменной – временем. Получим систему уравнений

$$\frac{dp}{dt} + \frac{qa}{s} \frac{dQ}{dt} - \frac{a\lambda g}{2aS^2} Q^2 = 0 \quad \text{при} \quad \frac{dx}{dt} = a; \quad (3)$$

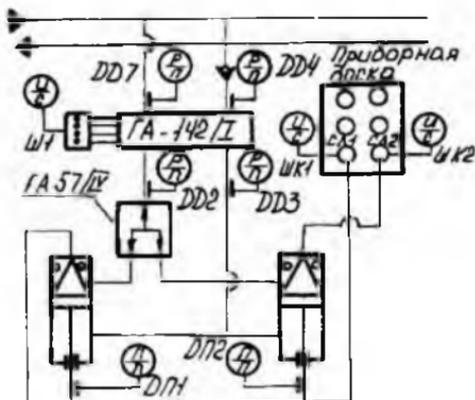
$$-\frac{dp}{dt} + \frac{qa}{s} \frac{dQ}{dt} + \frac{a\lambda g}{2aS^2} Q^2 = 0 \quad \text{при} \quad \frac{dx}{dt} = -a; \quad (4)$$

которая после представления (3) и (4) в конечно-разностной форме может быть легко решена с использованием ЭВМ. При расчете нестационарных процессов без разрыва сплошности количество расчетных участков, на которые делится трубопровод, мало влияет на результаты расчета и определяется из соображений выбора оптимального шага по времени. При возникновении разрывов для обеспечения приемлемой точности каждый конструктивный участок следует разбивать не менее чем на 18...20 расчетных участков [2].

Дальнейшее рассмотрение методики моделирования необходимо продолжить на конкретном примере гидросистемы. В качестве объекта моделирования выберем подсистему управления внутренними интерцепторами (ИИ) самолета, предназначенными для торможения самолета при пробеге. Управление – электрогидравлическое и выполнено по двухпроводной гидравлической схеме параллельного действия двух гидравлических приводов с гидравлической синхронизацией правого и левого ВИ. Подсистема ИИ включает следующие основные агрегаты (рис. 1): гидрораспределитель ГА 142/1; гидравлический порционер ГА 57/1У; два гидравлических цилиндра управления.

На основе анализа структурной схемы подсистемы ВИ сделаем следующие предположения:

гидропривод, расположенный на значительном удалении от гидрокрана, оказывает очень малое влияние на переходные процессы по сравнению с влиянием гидропривода, расположенного в непосредственной близости от гидрокрана;



Р и с. 1. Схема подсистемы управления внутренними интерцепторами

С учетом этих предположений расчетная схема подсистемы представляет собой однониточный трубопровод, в начальном сечении которого расположен бак, а в конечном сечении в одном и том же расчетном узле — клапан и подсоединенная емкость, имитирующая гидропривод.

Начальные условия имеют вид

$$Q(x) = 0; \quad p(x) = p_{\text{НОМ}} \quad \text{при } t \leq t_0, \quad (5)$$

где $p_{\text{НОМ}}$ — нормальное давление, определяемое наддувом бака или напором насоса; t_0 — время начала переходного процесса.

Граничные условия для бака имеют вид

$$p(t) = p_{\text{НОМ}} \quad \text{при } x = 0. \quad (6)$$

Для расчетного узла, в котором установлен гидрокран с подсоединенной к нему емкостью, граничные условия запишутся в виде двух уравнений

$$Q(t) = \kappa_{\text{ГК}} \tau_{\text{ГК}} \sqrt{p(t) - p_H(t)} \quad \text{при } x = L; \quad (7)$$

$$Q(t) = -B \frac{dp_H(t)}{dt}, \quad \text{при } x = L, \quad (8)$$

объем рабочей полости гидропривода не меняется во время переходного процесса, так как процесс заканчивается раньше, чем начинается движение штоков;

трубопровод, соединяющий гидрокран и гидропривод, не оказывает существенного влияния на переходные процессы, так как имеет небольшую по сравнению со всей системой длину;

пульсации давления за насосом не оказывают существенного влияния на переходные процессы, так как насосная станция достаточно удалена от гидрокрана.

где $\kappa_{ГК}$ - стационарное значение проводимости гидрокрана в состоянии полного открытия, определяемое по дроссельной характеристике;

P_H - давление в подсоединенной емкости; B - податливость;
 $\tau_{ГК}$ - относительное время срабатывания гидрокрана; L - длина трубопровода.

Значения давления и расхода при $x = 0$ находятся из совместного решения уравнений (4) и (6), а при $x=L$ - уравнений (3), (7), (8). Традиционно решение задач данного типа реализуется на мощных ЭВМ. Здесь расчет реализован на микроЭВМ "Электроника ДЭ-28". Программа составлена на языке "Бейсик". Результаты расчета выводятся в виде числовых таблиц и графических зависимостей давления и расхода от времени в расчетных узлах в течение переходного процесса.

Рассмотрим некоторые особенности организации счета. Расчет параметров происходит сначала на одном уровне времени во всех расчетных узлах трубопровода последовательно. Затем происходит переход на следующий уровень времени, где расчет во всех узлах повторяется, и так далее. При вводе исходных данных определяются номера узлов, в которые размещены конструктивные устройства. В программе происходит сравнение номера рассчитываемого узла с номером узла с конструктивным устройством. В результате сравнения расчет ведется в соответствующих подпрограммах. По завершении перебора узлов на каждом уровне происходит сравнение текущего времени с временем окончания расчета. При их совпадении подается команда на окончание счета.

С целью выяснения сходимости расчетных переходных процессов к реальным и получения самостоятельной экспериментальной информации был проведен натуральный эксперимент.

Исследовались переходные процессы в гидравлических и электрических цепях подсистемы управления внутренними интерцепторами.

При работе подсистемы регистрировались (см. рис. 1):

давления: в трубопроводе насос-гидрораспределитель (датчик ДД1); в трубопроводе гидрораспределитель - силовые цилиндры (датчик ДД3); в трубопроводе гидрораспределитель - обратный клапан (датчик ДД4); в трубопроводе гидрораспределитель - порционер (датчик ДД2);

перемещение штоков левого и правого силовых цилиндров (датчики перемещений ДД1 и ДД2);

токи и напряжения в магнитных катушках (или определяются по подпиточный штепсельный разъем ПИ);

сигналы концевых выключателей сигнальных цилиндров.

Измерение давлений осуществлено тензосенсорными преобразователями давления типа ЛХ-412. В качестве вспомогательной аппаратуры использовался усилитель-преобразователь ЛХ-5815. В качестве регистратора был использован шлейфовый осциллограф ПИ17. В ходе эксперимента были проведены серии измерений для выпуска и убора ВП в случаях работы подсистемы от различных энергетических приводов. Полученная экспериментальная информация была проанализирована с целью выделения точек, отражающих сущность физических процессов. В этих точках на микроЭВМ рассчитывались выборочные средние значения и их доверительные интервалы.

Анализ результатов эксперимента позволяет сделать вывод о независимости характера переходного процесса от вида энергетического привода и режима его работы. Это обстоятельство обеспечивает свободу выбора энергетического привода (бак, насос и т.д.) при создании стенда для автономных испытаний или модели системы управления, подобной рассмотренной. С точки зрения моделирования сделанный вывод важен при задании граничных условий.

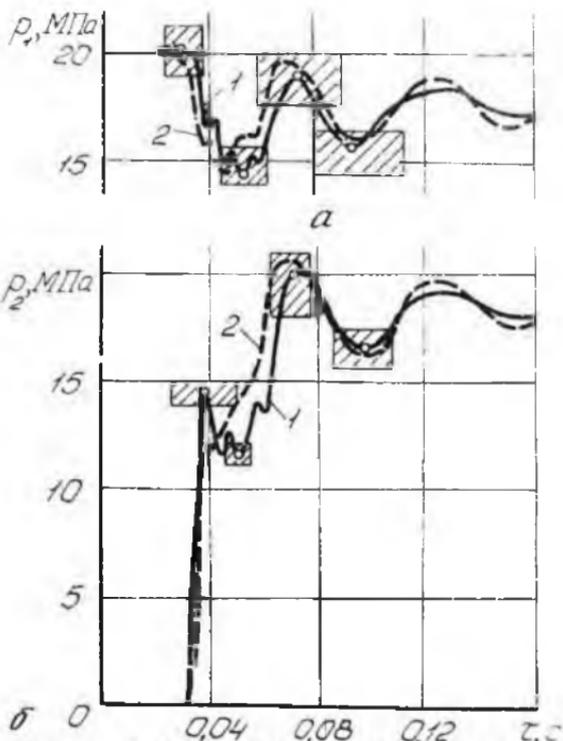
Эффективность применения методов математического моделирования неустановившихся процессов в гидросистемах определяется степенью адекватности модели реальной системы. Ее надежную оценку можно получить с помощью сравнительного анализа результатов расчета и эксперимента. На рис. 2 показаны осциллограммы изменения давлений перед гидрораспределителем и за ним, выделены разброс экспериментальных значений давлений и времен для характерных точек, полученные при математической обработке информации, построены расчетные кривые изменения давлений. Сравнение приведенных результатов показывает совпадение расчетных и экспериментальных кривых в пределах полученной точности эксперимента. Вместе с тем характер изменения давления за гидрокраном при эксперименте в первой фазе гидроудара несколько отличается от расчетного. Возможной причиной этого является то, что в настоящей работе на основании анализа конструкции гидрораспределителя был принят линейный закон увеличения проходного сечения, причем время открытия разбито на два интервала, на которых скорость открытия различна. Реальный же закон изменения проходного сечения кли-

пана достоверно неизвестен. Предложенная модель в целом правильно отражает характер изменения параметров неустановившегося движения, что позволяет использовать ее при решении задач анализа динамики гидропривода.

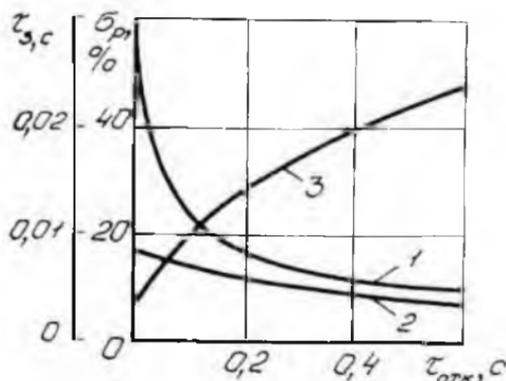
Рассмотрим в качестве примера решение задачи о повышении эксплуатационной надежности подсистемы ВМ.

В эксперименте отмечены ощутимые (до 20...30% от $p_{ном}$) динамические составляющие в процессах изменения давлений, вызванных срабатыванием агрегатов управления. Опыт эксплуатации энергетически напряженных авиационных и других систем с повышенными требованиями по надеж-

ности в течение ресурса показывает, что обеспечение качества переходных процессов играет значительную роль в получении требуемых показателей надежности. В случае гидросистемы требование улучшения качества можно интерпретировать как достижение минимума перерегулирования на интервале времени срабатывания исполнительного органа, т.е. стремление к реализации монотонного переходного процесса. Были просчитаны несколько вариантов переходных процессов, возникающих в исследуемой гидросистеме, для различных времен срабатывания управляющего органа. Из сравнения полученных переходных процессов следует, что при увеличении времени открытия гидрокрана уменьшается величина провала давления перед гидрокраном в первой фазе гидроудара, уменьшаются перерегулирование и темп нарастания давления в полости гидропривода, характер процесса становится более спокойный. На рис.



Р и с. 2. Сравнение экспериментального и расчетного переходных процессов:
 — эксперимент, --- расчет



Р и с. 3. Влияние времени открытия гидрокрана на качество переходных процессов: 1 — переопределение по давлению перед гидрокраном δp_1 ; 2 — переопределение по давлению за гидрокраном δp_2 ; 3 — время задержки τ_3

через 0,1 с после начала открытия гидрокрана и продолжается до полного выпуска — 1,3 с. Колебания давлений перед гидрокраном и за ним затухают через 0,12 с. Следовательно, существует возможность варьирования временем открытия в достаточно широких пределах.

Важным звеном при решении задач технической диагностики, выяснении причин отказа является моделирование. Оно позволяет сузить круг поиска возможных причин отказа, отбросить несостоятельные версии, а в отдельных случаях однозначно установить причину отказа. Для решения подобных задач возможно широкое использование моделей рассматриваемого типа. Рассмотрим вариант применения описанной выше упрощенной математической модели для диагностирования работы управляющих гидроустройств на основе анализа переходных процессов в подсистеме ВИ. При этом предполагается, что любая неисправность приводит к нарушению режима работы и вызывает в ней переходный процесс.

Оговорим способы задания факторов неисправностей. При возникновении негерметичности магистралей гидросистемы исследуемого изделия

казаны графики перерегулирования по давлению перед гидрокраном δp_1 и за ним δp_2 , а также времени задержки τ_3 в зависимости от времени открытия гидрокрана. Полученные результаты расчетов хорошо иллюстрируют положение с тем, что улучшить качество переходного процесса можно путем ввода таких конструктивных изменений, которые обеспечили бы большее время открытия гидрокрана. В то же время такие изменения не отражаются на выполнении органами управления своих функций. Это подтверждает эксперимент, по данным которого движение штоков гидропривода начинается

величина утечки задается введением дополнительного расхода рабочего тела в соответствующем сечении трубопровода. Частичное перекрытие (засорение) гидравлической магистрали задается увеличенным (по сравнению с номинальным) значением коэффициента гидравлического сопротивления соответствующего участка. При полном разрушении участка трубопровода следует изменить граничное условие. Коэффициент гидравлического сопротивления участка до места разрушения необходимо увеличить на величину коэффициента сопротивления при истечении из отверстия. Начальные условия при расчете переходных процессов, возникающих в авиационных гидросистемах при неисправностях, определяются параметрами установившегося режима, который предшествовал возникновению неисправности, и конкретными условиями отказа: размером образовавшегося отверстия при негерметичности гидравлических магистралей, степени уменьшения проходного сечения трубопровода при его засорении и т.д.

Исследование проводилось на основе результатов расчетов в предположении определенной неисправности по изложенной выше методике. Были рассмотрены случаи перекрытия проходного сечения гидрокрана, отрыва трубки, соединяющей гидрокран и гидропривод. С целью исследования влияния степени перекрытия проходного сечения гидрокрана на характер переходных процессов проведены расчеты для ряда вариантов степеней перекрытия.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что характер переходного процесса в случае неисправности существенно меняется, при этом негерметичность магистрали может приводить к значительному изменению режима работы функциональной подсистемы изделия, а в отдельных случаях и к полному прекращению работы. При увеличении степени перекрытия гидравлической магистрали уменьшается перерегулирование, увеличиваются времена нарастания переходного процесса и достижения первого максимума, переходный процесс приближается к монотонному.

Таким образом, разработанная методика расчета переходных процессов в авиационных гидросистемах, основанная на использовании микроЭВМ, дает возможность значительно упростить задачу исследования, сократить затраты на испытания, позволяет успешно решать задачи технической диагностики, оптимизации параметров трубопроводов и конструктивных узлов по выбранной оценке, целевой функции и др.

Изложенную методику можно использовать как основу для создания более сложных программ для решения задач оптимизации, для расчета процессов в разветвленных гидросистемах, более детального моделирования гидросистемы с целью получения лучшей сходимости с экспериментом.

Библиографический список

1. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. – М.: Наука, 1986. – 368 с.
2. Лямцев В.Ф. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. – М.: Машиностроение, 1978. – 192 с.