УДК 621.43.001.519.711.3:681.518.54.

ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ В САУ РАСХОДОМ ТОПЛИВА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Г.С. Ранченко, канд. техн. наук,
В.Ф. Миргород, канд. техн. наук,
КБ «Элемент», г. Одесса, Украина

Общая постановка. Основным способом решения задач управления в авиационном двигателестроении является в настоящее время реализация сложных и высокоэффективных компьютерно-интегрированных информационно-измерительных и управляющих систем.

Таким примером может служить система автоматического управления расходом топлива (САУРТ), предназначенная для обеспечения заданных параметров расхода топлива на форсунки авиационного двигателя в различных режимах. Решение указанной задачи обеспечивает разработанный в КБ «Элемент» регулятор двигателя цифровой (РДЦ-450), осуществляющий в реальном времени позиционирование рабочего органа насоса-дозатора (НД) с помощью цифрового регулирования тока в обмотках управления электромагнитного исполнительного механизма НД.

Наиболее существенными проблемами, возникшими при создании РДЦ-450, были проблемы корректного описания свойств объекта управления – НД, представляющего собой сложный электромагнитный исполнительный механизм (ИМ) с существенно нелинейными характеристиками, причем повторяемость этих характеристик в настоящее время еще не обеспечена.

Обзор публикаций. Специфические отличия задачи регулирования расходом топлива на системном уровне заключаются в нелинейности объекта НД в связи с влиянием момента трения, составляющего значительную (для НД-450 до 20 %) часть рабочего диапазона.

Задача регулирования положением исполнительного механизма в условиях неблагоприятного влияния нелинейной функции момента трения является одной из классических в теории автоматического управления и ее рассмотрению посвящено большое число публикаций, обзор которых выполнен в [1].

Математические модели ИМ с учетом момента трения предложены в различном виде [2 - 4], однако сложность контактных явлений не позволяет рекомендовать какую-либо из известных моделей в качестве универсальной. В работах [4 - 6] предлагается наряду с классическим кулоновским сухим трением движения учитывать также момент трения покоя, однако ситуация, характерная, как это условленно в [5, 6], для НД, для которого момент трения покоя превышает момент трения движения, в известной литературе освещена слабо. Предполагается, что для совершенных САУ момент трения покоя в ИМ должен быть сведен к минимуму конструктивными решениями, однако для НД-450 эта задача еще не решена.

Следует отметить также работу [7], в которой рассмотрены весьма специфичные режимы в САУ, применяемых в авиации, возникающие при учете разрывной функции момента трения.

Таким образом, проблема построения адекватной математической модели ИМ с учетом момента трения в настоящее время еще не в полной мере разрешена.

Цель исследований. Целью исследований является анализ особенностей объекта в САУРТ и качественное исследование режимов ее функционирования с учетом влияния момента трения, в сопоставлении с результатами экспериментальных измерений.

Результаты исследования. Исходная математическая модель НД-450 с учетом динамики входной цепи ИМ представлена следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} I\frac{d\omega}{dt} + \kappa_v\omega + M_{тр}\mathrm{Sign}(\omega) &= \kappa_i i, \\ L\frac{di}{dt} + Ri + c_e\omega &= u = j\cdot R, \\ \frac{d\alpha}{dt} &= \omega; G = G_0 + c\alpha, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где I – момент трения;

κ_v – коэффициент вязкого трения;

$M_{кр}$ – момент сухого трения;

κ_i – коэффициент крутящего момента;

α – угол поворота дозирующего элемента;

G – расход топлива; c – коэффициент расхода;

L, R – индуктивность и сопротивление обмотки;

c_e – коэффициент обратной ЭДС;

i – ток в обмотке;

j – ток управления РДЦ-450.

Математической модели (1) соответствует структурная схема объекта, изображенная на рис. 1. На рисунке обозначены

$$W_1(p) = \kappa_i/(Lp/R+1) = \kappa_i/(\tau_1 p+1);$$
$$W_2(p) = \kappa_v^{-1}/(Ip/\kappa_v+1) = \kappa_v^{-1}(\tau_2 p+1);$$
$$W_3(p) = 1/p; W(p) = c_e/R; W_5(p) = c;$$

F – нелинейная функция момента трения, принятая в (1):

$$F = M_{тр}\mathrm{Sign}(\omega).$$

Поиск стационарных точек системы (1) при j=0 приводит к очевидному и парадоксальному результату – математическая модель НД в виде (1) таковых точек не имеет.

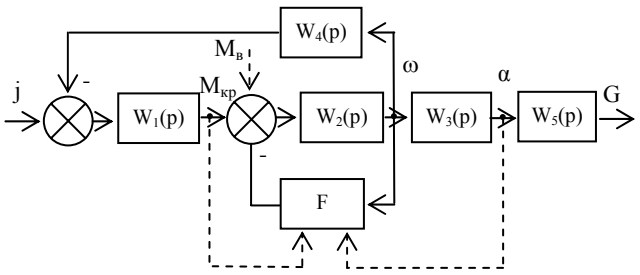

Рис. 1. Структурная схема объекта

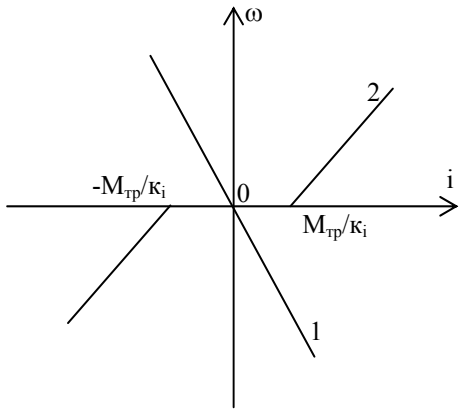

Рис. 2. Диаграмма стационарного состояния

$$1: \omega = -\frac{R}{C_e} i,$$

$$2: \omega = \frac{\kappa_i}{\kappa_v} i - \frac{M_{тр}}{\kappa_v}\mathrm{Sign}(\omega).$$

Действительно, диаграмма стационарного состояния (1), приведенная на рис. 2, показывает, что такой точкой может быть точка в положении равновесия, однако при ω=0 функция момента трения в ноль не обращается, если только не предположить, что объект имеет также момент трения покоя.

Таким образом, из анализа диаграммы стационарного состояния следует, что при заданной модели объекта в виде (1) «стационарное» состояние достигается только в режиме переключений, то есть в скользящем режиме [7].

Для детального анализа преобразуем систему (1) к одному уравнению

$$\tau_1\tau_2\frac{d^2 i}{at^2} + (\tau_1+\tau_2)\frac{di}{at} + (c_e\kappa_i/R\kappa_v+1)i = \\ = \tau_1\frac{dj}{at} + j + \frac{c_e}{R\kappa_v} M_{тр}\mathrm{SignS}, \qquad (2)$$

где $S = j - i - \tau_2\frac{di}{at}$ – функция переключения.

Заметим, что общепринятый переход к дифференциальному уравнению относительно ω не является корректным, поскольку при таком переходе разрывная функция момента трения попадает под знак дифференциала.

Фазовый портрет невозмущенного движения, объекта, построенный на основании (2), представлен на рис. 3.

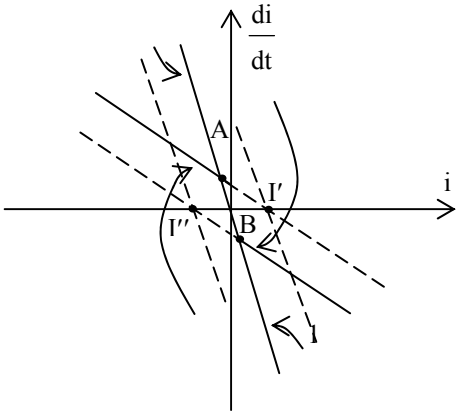

Рис. 3. Фазовый портрет невозмущенного движения объекта

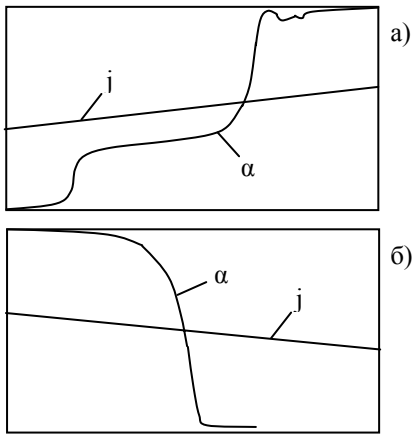

Рис. 4. Реализации экспериментальных измерений

Объект имеет два устойчивых фокуса в точках I′, I″, разделенных линией переключения S, на участке AB которой реализуется скользящий режим. В скользящем режиме $\varpi = 0$, и нетрудно установить, что и $d\omega/dt = 0$, то есть выполняются условия залегания и скользящий режим устойчив. При медленном изменении тока управления, таком, что составляющей $\tau_1 dj/dt$ можно пренебречь, если только ток управления находится в пределах $j \in (I', I'')$, фазовый портрет перемещается вместе с током управления и по-прежнему $\varpi = 0$, то есть перемещения ИМ не происходит.

Таким образом, может быть объяснено возникновение зоны нечувствительности в ИМ с сухим трением. Если только ток управления превысит указанные пределы и будет оставаться постоянным, то согласно (1) и (2) реализуется один устойчивый фокус, отстающий от значения тока управления на I′ либо I″, в зависимости от знака тока управления, что эквивалентно $M_{кр}=к_i i \pm M_{тр}$. Движение объекта в скользящем режиме имеет малый запас устойчивости, поэтому согласно (2) весьма чувствительно к изменению направления тока управления. Если ток управления находится вблизи границ интервала (I′, I″) и меняется его направление, скользящий режим срывается и возникает переходный процесс по фазовой траектории объекта до попадания в зону нового скользящего режима.

Таким образом, могут быть объяснены срывы движения в объекте с сухим трением и его внезапные остановки [2, 3]. При высоких темпах изменения тока управления, то есть при выполнении условия

$$\left|\tau_1 \frac{dj}{at}\right| > \frac{c_e}{Rк_v} M_{тр},$$

скользящие режимы в объекте не возникают, поскольку функция переключения становится знакоопределенной.

Сопоставление результатов, следующих из модели (1), с экспериментальными измерениями с помощью созданного в КБ «Элемент» стенда позволили установить, что момент трения НД дополнительно зависит от угла поворота рабочего органа и изменяется в широких пределах, причем для различных экземпляров НД эти зависимости существенно отличаются.

Характерные реализации экспериментальных измерений приведены на рис. 4.

Указанная зависимость момента трения от угла, как и зависимость от направления управляющего тока, изображена на структурной схеме пунктиром.

Процессы в НД в рабочем состоянии (с топливом) сопровождаются влиянием возмущающего момента $M_в$, природа которого интерпретирована в [5, 6]. При этом происходит захват колебаний скользящего ре-

жима внешним осциллирующим возмущающим воздействием.

Таким образом, учет динамики входной цепи в модели (1) электромагнитного исполнительного механизма НД позволяет объяснить описанный в [5, 6] эффект разделения режимов движения в САУРТ и уточнить природу этих режимов. Практически неуправляемость объекта в скользящем режиме может быть исключена выбором законов изменения тока управления, не создающих условий для возникновения таких режимов.

Перспективы. Дальнейшие исследования целесообразно направить на уточнение нелинейных характеристик НД как объекта регулирования, поскольку именно наличие момента трения определяет предельно достижимую точность САУРТ.

Выводы**.** Математическая модель объекта управления в САУРТ содержит разрывную функцию момента трения, что допускает возможность существования скользящих режимов движения, которые хорошо интерпретируют известные внешне проявляемые эффекты влияния момента трения: зону нечувствительности, срывы движения и внезапные остановки в процессе позиционирования. Процессы регулирования в зонах скользящих режимов отличаются сложностью описания и трудностями при их математическом моделировании. Исполнительные механизмы САУРТ, например НД–450, имеют существенно нелинейные неидентичные характеристики по входу тока управления. Принципиальным решением задачи обеспечения управляемости объекта во всем рабочем диапазоне является использование управляющих сигналов с высокой интенсивностью их изменения, в частности импульсных законов регулирования. На этом принципе функционирует созданный регулятор НД типа РДЦ-450.

Литература

1. Нелепин Р.А. Точные аналитические методы в теории нелинейных автоматических систем.– Л.: Судостроение, 1967.– 446 с.
2. Попов Е.П. Автоматическое регулирование и управление.– М.: Физматгиз, 1962.– 388 с.
3. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах.– М.: Наука, 1973.– 584 с.
4. Зельченко В.А., Шаров С.Н. Расчет и проектирование автоматических систем с нелинейными динамическими звеньями.– Л.: Машиностроение, 1986.– 174 с.
5. Параметрическая и структурная идентификация объекта в контуре управления расходом топлива методами активного и пассивного эксперимента / В.И. Колесников, В.А. Седристый, Г.С. Ранченко, Н.Д. Голубев, Д.И. Волков // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 2002.– Вып. 31. Двигатели и энергоустановки.– С. 228-231.
6. Цифровое регулирование расхода топлива в системе с существенной нелинейностью типа «сухое трение» / В.И. Колесников, В.А. Седристый, Г.С. Ранченко, Н.Д. Голубев, Д.И. Волков // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 2002.– Вып. 30. Двигатели и энергоустановки.– С. 191-194.
7. Петров Б.Н., Емельянов С.В. Системы с переменной структурой и их применение в задачах автоматизация полета.– М.: Наука, 1968.– 324 с.

Поступила в редакцию 01.06.03

Рецензенты: ученый секретарь научно-технического совета Н.П. Волошина, КБ «Элемент», г. Одесса; канд. техн. наук, доц. С.А. Положаенко, ОНПУ, г. Одесса.