

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С УЧЁТОМ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ СЕРВОПРИВОДА

В процессе полёта на движение ракеты-носителя (РН) оказывают существенное влияние технологические и ветровые воздействия. Наибольшие ветровые воздействия приходится на первую ступень полёта РН. На практике при анализе устойчивости замкнутой системы «ракета-носитель — автомат стабилизации» возникают ситуации, когда её нелинейности оказывают существенное влияние на устойчивость системы в целом. Это приводит к тому, что анализ устойчивости, проводимый на основе линеаризованной системы уравнений, на практике иногда является недостаточным. Поэтому проверочный расчёт, связанный с построением переходных процессов движения РН на первой ступени полёта при действии технологических и ветровых воздействий, необходимо проводить с учётом нелинейностей, присущих типовому сервоприводу.

В системах управления (СУ) летательных аппаратов (ЛА) в качестве исполнительных элементов применяются сервоприводы. В зависимости от типа летательного аппарата и решаемой им задачи сервоприводы являются силовыми приводами исполнительных органов (аэродинамических рулей, поворотных рулевых или маршевых двигателей).

Применяемые в системах управления пневматические, гидравлические, электрические, электрогидравлические и другие типы сервоприводов являются инерционными элементами. При проектировании систем управления РН важно знать математическую модель сервопривода как динамического звена. Это обусловлено тем, что сервопривод является «индивидуальным» звеном в СУ. Если остальные звенья СУ для различных РН могут быть унифицированы, то сервоприводы такой унификации не поддаются [1].

По своему назначению в системах управления сервоприводы (рулевые машины (РМ) с жёсткой отрицательной обратной связью) являются преобразователями электрического сигнала (напряжения) с усилителя или вычислительного устройства СУ в пропорциональный этому напряжению угол поворота вала сервопривода, а через соответствующую кинематику и в угол поворота аэродинамических рулей РН, рулевых или основных двигателей.

Для проведения моделирования движения ракеты-носителя с учётом нелинейностей сервопривода на кафедре динамики полёта и систем управления Самарского государственного аэрокосмического университета по учебной дисциплине «Динамика по-

лёта ЛА» разработан компьютеризированный лабораторный стенд. Он позволяет проводить моделирование движения системы «РН – АС» с реальной аппаратурой (используется электрогидравлическая рулевая машина РМ 8Л69) (рис. 1).

Стенд состоит из блока питания (1), сервопривода (2), персонального компьютера с программным обеспечением (3) и принтера.



Рис. 1. Компьютеризированный лабораторный стенд

В основу математической модели движения РН заложены линеаризованные уравнения возмущённого движения РН первой ступени по каналу тангажа (рыскания) записанные в вариациях относительно программного движения в матричной форме:

$$C_{\dot{X}} \dot{X} + C_X X + C_A X = F,$$

где  $C_{\dot{X}}, C_X, C_A$  – матрицы коэффициентов уравнений движения размерностью  $(n \times n)$  ( $n = 3 + m - h$ );  $F$  – вектор-столбец возмущений размерностью  $(n \times 1)$ ;  $m$  – количество упругих колебаний корпуса конструкции РН;  $h$  – тонов колебаний жидкости в баках;

$X$  – вектор-столбец  $(n \times 1)$  состояния системы с компонентами:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 = \vartheta \\ \dot{x}_2 = Y \\ \dot{x}_{2+i} = S_i \\ \dots \\ \dot{x}_{2+m} = S_m \\ \dot{x}_{2+m+j} = \beta_j \\ \dots \\ \dot{x}_{2+m+h} = \beta_h \\ \dot{x}_{1+m+i} = \delta \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 = \vartheta \\ \dot{x}_2 = Y \\ x_{2+i} = S_i \\ \dots \\ x_{2+m} = S_m \\ \dot{x}_{1-m+j} = \beta_j \\ \dots \\ x_{2-m+h} = \beta_h \\ \dot{x}_{1-m+i} = \delta \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_1 = \vartheta \\ x_2 = Y \\ x_{2+i} = S_i \\ \dots \\ x_{2+m} = S_m \\ x_{2-m+j} = \beta_j \\ \dots \\ x_{2-m+h} = \beta_h \\ x_{1-m+i} = \delta \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_{2+m} \\ f_{2+m+j} \\ \dots \\ f_{2+m+h} \\ f_{1-m+i} \end{bmatrix}$$

Здесь  $\delta$  – угловое отклонение управляющих двигателей и воздушных рулей, рад;

отклонения от программных значений угла тангажа, рад;  $Y$  – линейные отклонения центра масс РН от номинальной траектории;  $\Delta$  – параметр, характеризующий упругие перемещения корпуса РН при колебаниях в канале тангажа;  $\beta_e$  – параметр, характеризующий деформацию свободной поверхности жидкости в баке с номером  $e$  [3].

Линеаризованное уравнение автомата стабилизации в плоскости тангажа представлено в виде:

$$\tau_2 \cdot \delta_v + \tau_1 \cdot \dot{\delta}_v + \delta_v = a_{0v} \cdot \vartheta + a_{1v} \cdot \dot{\vartheta} + a_{2v} \cdot \ddot{\vartheta} + a_{3v} \cdot \gamma + a_{4v} \cdot \ddot{\gamma}, \quad (3)$$

где индексы  $v$  {Ц, Б, В} соответствуют блокам «Ц» и «Б» ракеты-носителя и воздушным рулям «В»;  $\delta$  – угол отклонения управляющих двигателей для «Ц» и «Б» блоков и воздушных рулей в плоскости тангажа;  $a_i$  ( $i = \overline{0,4}$ ) – передаточные числа автомата стабилизации (АС) по соответствующим входным сигналам;  $\tau_1, \tau_2$  – коэффициенты, характеризующие динамические свойства АС.

Математическая модель ракеты-носителя соответствует РН типа «Союз» [2].

В связи с тем, что сервопривод осуществляет преобразование управляющих сигналов в перемещение управляющих органов, в математическую модель компьютеризованного стенда заложены нелинейности, присущие сервоприводу (рис. 2).

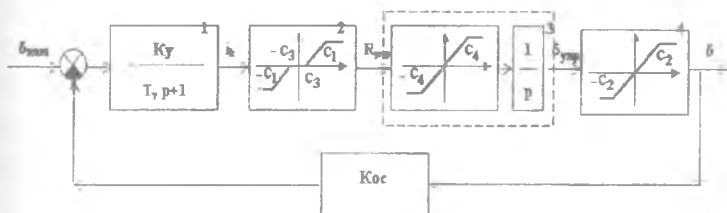


Рис. 2. Структурная схема сервопривода

На рис. 2 отмечены: усилитель сервопривода (1), описываемый уравнением апериодического звена; нелинейность типа «зоны нечувствительности с насыщением» по углу (2), обусловленная ограничениями энергетики; скоростная характеристика рулевой машины (3); нелинейное звено типа «зоны насыщения» по отклонению рулевой машины (4), обусловленное конструктивными ограничениями на угол поворота.

Сервопривод включает в себя усилитель сервопривода, рулевую машину и обратную связь. Усилитель сервопривода является усилителем мощности управляющих сигналов. Одновременно усилитель сервопривода используется как сумматор командного сигнала  $\delta_{ком}$  и сигнала обратной связи (рис. 2).

Рассмотрим математическое описание отдельных звеньев.

1. Усилитель сервопривода описывается уравнением аperiodического звена

$$T_s \frac{di_k}{dt} + i_k = K_v (\bar{\omega}_{\text{зад}} - K_{oc} \bar{\omega}_k), \quad (4)$$

где  $K_v$ ,  $K_{oc}$  – коэффициенты усиления;  $T_s$  – постоянная времени;  $i_k$  – выходной сигнал усилителя сервопривода.

2. Нелинейное звено может быть разбито на два звена:

а) нелинейное звено типа «зоны насыщения» по управляющему току, которое обусловлено ограничениями энергетик и описывается алгоритмом:

$$R = \begin{cases} R(t) = i_k(t), & \text{при } |i_k(t)| \leq |c_j|; \\ R(t) = c_j \cdot \text{Sign}(i_k(t)), & \text{при } |i_k(t)| > |c_j| \end{cases} \quad (5)$$

Здесь  $R(t)$  – выходной сигнал звена;  $c_j$  – ограничение по току, мА

б) нелинейное звено типа «зоны нечувствительности» описывается алгоритмом:

$$R_{\text{уп}} = \begin{cases} R_{\text{уп}}(t) = 0, & \text{при } |R(t)| \leq |c_j|; \\ R_{\text{уп}}(t) = R(t) - |c_j| \cdot \text{Sign}(R(t)), & \text{при } |R(t)| > |c_j| \end{cases}$$

Здесь  $R_{\text{уп}}(t)$  – выходной сигнал звена;  $c_j$  – граница области нечувствительности по току, А.

3. Скоростная характеристика рулевой машинки описывается уравнением:

$$\delta(t) = \int_0^t \dot{\delta}(t) dt. \quad (6)$$

Здесь  $\dot{\delta}$  – угловая скорость управляющих органов, которая вычисляется по формуле:

$$\dot{\delta} = f(M, R_{\text{уп}}); \quad M = k \delta(t). \quad (7)$$

где  $M$  – шарнирный момент,  $k$  – коэффициент шарнирного момента.

Данное звено описывается следующим уравнением:

$$\dot{\delta}_{\text{ру}}(t) = \begin{cases} \dot{\delta}(t) = 0, & \text{при } |R_{\text{уп}}(t)| \leq |c_4|; \\ \dot{\delta}(t) = \dot{\delta}_1(t) + \frac{|M(t)| \cdot (\dot{\delta}_3(t) - \dot{\delta}_1(t))}{B}, & \text{при } |R_{\text{уп}}(t)| < |c_3|; \\ \text{где } \dot{\delta}_1(t) = \Delta_1 \frac{|R_{\text{уп}}(t)| - c_4}{c_3 - c_4}, \quad \dot{\delta}_3(t) = \Delta_3 \frac{|R_{\text{уп}}(t)| - c_3}{c_3 - c_4}; \\ \dot{\delta}(t) = \dot{\delta}_1(t) + \frac{|M(t)| \cdot (\dot{\delta}_3(t) - \dot{\delta}_1(t))}{B}, & \text{при } |R_{\text{уп}}(t)| \geq |c_3|; \\ \text{где } \dot{\delta}_1(t) = \Delta_1, \quad \dot{\delta}_3(t) = \Delta_3; \\ \dot{\delta}_{\text{ру}}(t) = |\dot{\delta}(t)| \cdot \text{Sign}(R_{\text{уп}}) \end{cases} \quad (8)$$

Здесь  $\delta_{PM}(t)$  – выходной сигнал звена;  $c_4, c_5, A_1, A_2, B$  – постоянные данного звена.

4. **Нелинейное звено** типа «зоны насыщения» по отклонению рулевой машины описывается выражением:

$$\delta(i) = \begin{cases} \delta(t) = \delta_{PM}(t), & \text{при } |\delta_{PM}(t)| \leq |c_2|; \\ \delta(t) = c_2 \operatorname{Sign}(\delta_{PM}(t)), & \text{при } |\delta_{PM}(t)| > |c_2|. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь  $c_2$  – ограничение по углу отклонения, град.,  $\delta(t)$  – выходной сигнал данного звена.

5. **Электрическая обратная связь**, охватывающая усилитель сервопривода и рулевую машину, описывается уравнением:

$$i_{oc}(t) = -\beta_{oc} \cdot \delta_{oc}(t), \quad (10)$$

где  $i_{oc}(t)$  – выходной сигнал звена;  $\beta_{oc}$  – коэффициент усиления.

Нелинейное звено типа «гистерезис» в математической модели не учитывается ввиду малости его влияния.

Следует отметить, что математическая модель сервопривода не может учитывать все нюансы работы его реального аналога, что может негативно сказаться на работе всей системы «РН – АС».

Стенд позволяет проводить моделирование переходных процессов движения первой ступени РН. При этом возможно проводить моделирование движения системы «РН – АС» как с учётом работы реального сервопривода, так и без него (используется только математическая модель сервопривода). Такой подход позволяет проводить сравнительный анализ движения РН по траектории выведения и оценивать влияние динамики реального сервопривода на различного рода воздействия.

Результатами работы лабораторного стенда являются временные зависимости по контролируемым параметрам. На рис. 3-7 представлены временные зависимости движения РН с учётом нелинейностей сервопривода. На рис. 3 показан процесс выхода на максимально допустимые углы отклонения (выход на упор) исполнительных органов при работе неустойчивой системы, где  $T$  – время.

Для аэродинамических рулей РН максимальный угол отклонения составляет  $25^\circ$ , а для управляющих камер –  $45^\circ$ .

При моделировании переходных процессов по каналу тангажа важно провести анализ влияния работы реального сервопривода на работу всей системы «РН – АС». На рис. 4 приведён профиль ветрового возмущения ( $W$ ) в функции времени  $T$ .

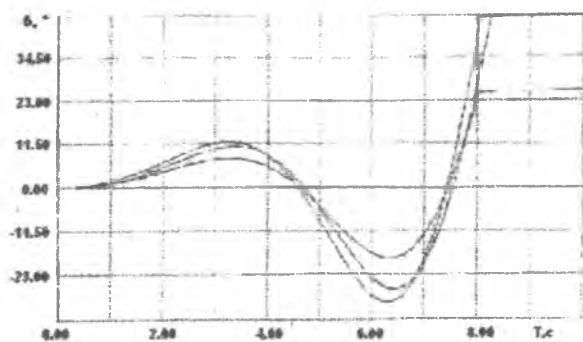


Рис. 3. Динамика исполнительных органов на максимально допустимые углы

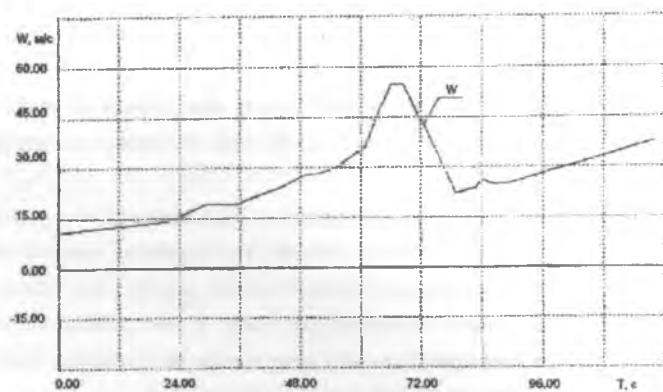


Рис. 4. Зависимость  $W$  от времени

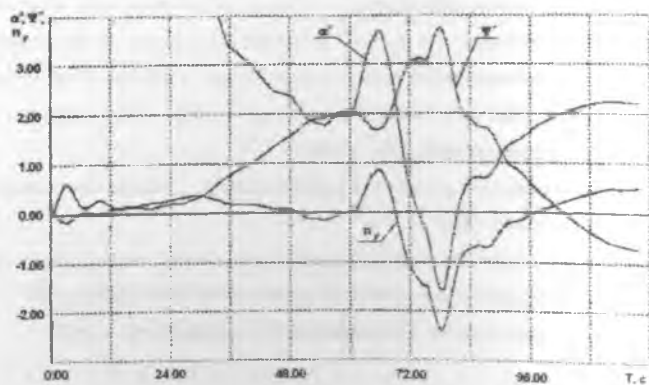


Рис. 5. Значения  $\alpha$ ,  $\psi$  и  $n_r$  от времени

Оценка работы системы оценивалась для данного профиля возмущения. Результаты сравнительного анализа по углу атаки  $\alpha$ , углу тангажа  $\psi$  и перегрузки  $n_y$  приведены на рис. 5, 6. Для построения временных зависимостей, приведённых на рис. 5, использовалась математическая модель сервопривода, а для построения временных зависимостей, представленных на рис. 6, использовался реальный сервопривод.

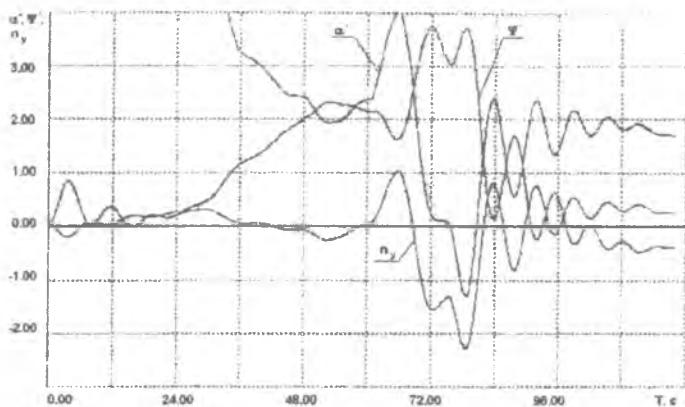


Рис. 6. Значения  $\alpha$ ,  $\psi$  и  $n_y$  от времени

Стенд позволяет провести исследования влияния вибрационной помехоустойчивости на параметры движения РН. На рис. 7 представлена зависимость от времени скорости отклонения центра масс РН относительно опорной траектории по каналу тангажа с учётом влияния упругих колебаний конструкции.

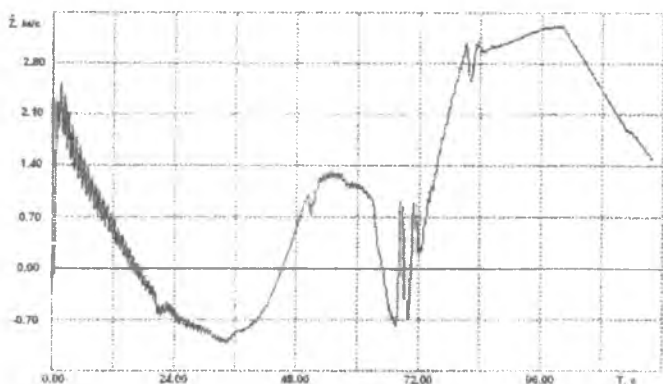


Рис. 7. Влияние первого тона упругих колебаний конструкции на скорость отклонения центра масс РН

Разработанный компьютеризированный стенд позволяет проводить исследования влияния работы реального сервопривода на движение РН. Это позволяет оценить взаимное влияние параметров РН и АС с учётом реальных характеристик сервопривода, что является важным при проведении анализа устойчивости системы в целом.

#### Библиографический список

1. Айзенберг, Я.Е. Проектирование систем стабилизации носителей космических аппаратов [Текст]/ Я.Е. Айзенберг, В.Г. Сухоревый. – М.: Машиностроение, 1986.
2. Динамика ракет: Учебник для студентов вузов [Текст]/ К.А. Абгарян, Э.Л. Калязин, В.П. Мишин и др.: Под общ. ред. В.П. Мишина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990.
3. Колесников, К.С. Жидкостная ракета как объект регулирования [Текст]/ К.С. Колесников. – М.: Машиностроение, 1969.