УДК 629.78

В.А.Афанасьев, А.С.Мещанов, Т.К.Сиразетдинов

УПРАВЛЕНИЕ МЯГКИМ ПРИЗЕМЛЕНИЕМ ДВУХКОНУСНОГО СПУТНИКА НА МНОГОШАГОВЫХ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМАХ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

I. Рассматривается движение спутника, изготавливаемого в рамках конверсии из корпусов боеголовок баллистических ракет. На образующих конусов спутника размещено по три реактивных двигателя. Отвесное падение спутника после аэродинамического торможения описывается системой /1/:

$$\dot{x}=f(x,t)+b(x,t)p+dF(t), \tag{1}$$

где $t\in I=(t_0,t_k]$, $t_k<\infty$; $x=(h,v,m)^T$; $f=f_H+\Delta f$, $f_H=(-v,g(h)-X_H/m,\ 0)^T$, $\Delta f=(0,\ \Delta X/m,\ 0)^T$; $X_H=C_{xH}(h,v)\rho_H(h)v^2\bar{s}/2$, $\Delta X=\Delta(C_x\rho)v^2\bar{s}/2$, $\Delta(C_x\rho)=$ $=C_{xH}(h,v)\Delta\rho+\rho_H(h)\Delta C_x+\Delta C_x\Delta\rho$; $b=b_H+\Delta b$, $b_H=(b_{HI},b_{H2},b_{H3})^T=(0,-1/m,$ $-1/(g(h)J_H))^T$, $\Delta b=(\Delta b_1,\Delta b_2,\Delta b_3)^T=(0,0,\Delta J/(g(h)J_HJ))^T$, $J=J_H+\Delta J$; $d=(1,0,0)^T$; $F(t)=F_H(t)+\Delta F(t)$; f_H,b_H,F_H – номинальные известные составляющие; неопределенные внешнее возмущение ΔF и параметрические возмущения ΔC_x, $\Delta\rho$, ΔJ с производными $\Delta\dot{C}_x$, $\Delta\dot{\rho}$ являются ограниченными с известными предельными значениями.

Промежуток I разбивается на шаги $I_i=(t_i,t_{i+1}]$, $i=\overline{0,k-1}$, на каждом из которых для нахождения управления p – суммарной тормозящей силы – используется упрощенная модель движения спутника

$$\dot{x}_M=f_M(x_M)+b_M(x_M)p_{Mi}, \tag{2}$$

где $x_M=(h_M,v_M,m_M)^T$, $f_M=(-v_Mg_i-C_{xi}\rho_i\bar{s}v_M^2/(2m_i),0)^T$, $b_M=(0,-1/m_{Mi},0)^T$, $g_i=g(h_i)$, $h_i=h(t_i)$, $C_{xi}=C_{xH}(h_i,v_i)$, $v_i=v(t_i)$, $\rho_i=\rho_H(h_i)$, $m_i=m(t_i)$. Равенством $x_M(t_i)=x(t_i)$ осуществляется обратная связь. К началу $t=t_i$ каждого шага I_i по данной модели на бортовой ЦВМ находится постоянное управление $p=p_i=p_{Mi}(h_i,v_i)=\text{const}$, приводящее модель (2) за время t_k-t_i точно в терминальную точку

$$h_M(t_k)=h_k=0,\quad v_M(t_k)=v_k=0. \tag{3}$$

Такое многошаговое терминальное управление (МТУ) спутником по упрощенной модели обеспечивает приемлемую точность без перегрузки бортовой ЦВМ /1/.

В целях дальнейшего повышения точности предлагается систему управления приводить в особый – многошаговый – скользящий режим, инвариантный к неопределенностям ΔC_x, $\Delta\rho$, ΔJ, ΔC_x, $\Delta\dot{C}_x$, $\Delta\dot{\rho}$. В отличие от обычных скользящих режимов параметры поверхности скольжения определяются здесь заново в начале каждого шага I_i.

Задача: I) Найти управление $p=p_i(t_i)$, $i=\overline{0,k-1}$, обеспечивающее в системе (1) в условиях действия неопределенных возмущений ΔC_x, $\Delta\rho$, ΔJ тождественное воспроизведение модельного движения (2) с управлением $p_M=p_{Mi}=\text{const}$ при $F(t)\equiv 0$ и воспроизведение с заданной точностью при $F(t)\neq 0$ по координатам h и v, определяющим качество управления. 2) Сопоставить предлагаемое управление $p(t)$ по точности и загрузке бортовой ЦВМ с обычным МТУ /1/.

2. Так как известные условия инвариантности скользящих режимов в системе (I) не выполняются, то предлагается ее эквивалентное преобразование в координаты h, v, $z=\dot{v}$, определяющие качество управления:

$$\dot{y}=\varphi(y,p,\dot{p},\Delta C_x,\Delta\rho,\Delta\dot{C}_x,\Delta\dot{\rho})+qU(y,p,\dot{p})+rF, \qquad (4)$$

где $y=(h,v,z)^T$; $\varphi=\varphi_H+\Delta\varphi$, $\varphi_H=(-v,z,\Phi_H)^T$, $\Delta\varphi=(0,0,\Delta\Phi)^T$, $\Delta\Phi=\Delta\Phi$ $(\Delta C_x$, $\Delta\dot{C}_x,\Delta\rho,\Delta\dot{\rho},y,p,\dot{p})$, $q=(0,0,1)^T$, $r=(1,0,0)^T$. Можно показать, что условия инвариантности к неопределенности $\Delta\Phi$ в скользящем режиме на подвижной гиперплоскости S

$$S(s=c^T(t)y=c_1(t)h+c_2(t)v+c_3(t)z=0) \qquad (5)$$

выполняются. Применяя один из методов вывода уравнений скольжения /2/, получаем систему

$$\dot{y}=(E-qc^T/(c^Tq))(\varphi_H+rF)-(q\dot{c}^T/(c^Tq))y, \quad y(t_i)=y_i, \qquad (6)$$

или, исключая координату z в силу $s=0$, систему

$$\dot{h}=-v+F(t), \quad \dot{v}=-(c_1(t)h+c_2(t)v)/c_3(t), \quad z=\dot{v} \qquad (7)$$

с многошаговым определением коэффициентов $c_j(t)$, $j=\overline{1,3}$.

3. Для приведения системы (4) в скользящий режим (7) строится

разрывное управление

$$U=U_H+U\Delta \ . \qquad (8)$$

По методике работ /3,4/ получаем

$$U_H=(c^Tq)^{-1}(\text{æ}_{g}g+\text{æ}_{s}s-c^T\varphi_H-c^TrF_H-\dot{c}^Ty),$$

$$U\Delta=(c^Tq)^{-1}\sum_{j=1}^{7}\text{æ}_j\varphi_j, \qquad (9)$$

где æ – разрывные коэффициенты, переключаемые по знаку функции s и определяемые в силу неравенств, $g=d^T(t)y$ – вспомогательная функция переключений, φ_j – известные функции состояния y и p, $\dot{p}$. Приравнивая выражения функции U в системе (4) и найденное в виде суммы (8), (9), получаем для нахождения искомого управления $p=p_i(t)$ в исходной системе (I) дифференциальное уравнение:

$$\dot{p}=\eta(p,\text{æ},c,y) \qquad (10)$$

с некоторыми начальными условиями $p(t_i)$ на каждом шаге $t\in I_i$, $i=\overline{0,k-1}$.

4. Модельное движение (2) в координатах $y_M=(h_M,v_M,z_M)^T$, $z_M=\dot{v}_M$, запишется

$$\dot{y}_M=\varphi_M(y_M)+q_MU_M, \qquad (11)$$

где $\varphi_M=(-v_M,z_M,0)^T$; $q_M=q=(0,0,I)^T$; $U_M=U_M(p_{Mi},\dot{p}_{Mi},y_M,C_{xi},\rho)$, $y_M(t_i)=$ $=y(t_i)$. Равенство $z_M(t_i)=z(t_i)$ достигается либо на основе идентификации неопределенности ΔX (I) и соответствующего задания начальных условий $p(t_i)$ (10), либо нахождением U_M не по известному управлению p_{Mi}, а непосредственно по решению системы (II), либо на основе методики, изложенной в работе /5/. Для тождественного воспроизведения в скользящем режиме (6) при $F(t)\equiv 0$ модельного движения (II) приравниваем правые части этих систем при одинаковых начальных условиях. Достаточным условием такого воспроизведения является определение коэффициентов $c_j(t)$ в результате многошагового интегрирования двух уравнений:

$$\dot{c}_1=c_1v_M/h_M-c_3v_M/h_M,\ \dot{c}_2=-c_2z_M/v_M,\ c_3=c_3(t_i)=\text{const} \qquad (12)$$

при начальных условиях $c(t_i)$, удовлетворяющих условию прохождения гиперплоскости S (5) в начале $t=t_i$ каждого шага I_i через точку состояния $y(t_i)=y_M(t_i): s(t_i)=c^T(t_i)y(t_i)=0$. Отметим, что интегрирование может проводиться не тольно многошагово, но и многократно на каждом шаге при $t_i^j \in I_i$, $s(t_i^j)=c^T(t_i^j)y(t_i^j)=0$, $j=0,1,\ldots,t_i^0=t_i$.

5. Многошаговый скользящий режим (6), (7) не инвариантен к возмущению $F(t)$, поэтому при $F(t)\neq 0$ на нем возможно воспроизведение модельного движения (II) только с заданной точностью. Для этого шаги I_i должны выбираться достаточно малыми. Можно показать, что модельное движение (II) представимо как скользящее

$$\dot{h}_M=-v_M,\ \dot{v}_M=-(c_1(t)h_M+c_2(t)v_M)/c_3,\ z_M=\dot{v}_M,\ y_M(t_i)=y(t_i). \tag{13}$$

Тогда, вводя отклонения $\Delta y=y-y_M=(\Delta h,\Delta v,\Delta z)^T$, из систем (I2), (I3) получаем уравнения:

$$\Delta\dot{h}=-\Delta v+F(t),\ \Delta\dot{v}=-(c_1(t)\Delta h+c_2(t)\Delta v)/c_3,\ \Delta z=\Delta\dot{v},\ \Delta y(t_i)=0. \tag{14}$$

Следовательно, отклонения определяются интегралом

$$(\Delta h,\Delta v)^T=\int_t^{t_{i+1}}\Phi(t,\tau)F(\tau)d\tau,\ \Delta z=-(c_1(t)\Delta h+c_2(t)\Delta v)/c_3, \tag{15}$$

где $\Phi(t,\tau)$-фундаментальная матрица однородной системы. С учетом ограниченности элементов матрицы Φ и столбца F на шаге I_i отклонения Δy будут достаточно малыми при $t_{i+1}-t_i \to 0$. Кроме того, матрица Φ и величины отклонений Δy определяются мгногошаговой, помимо P_{Mi}, а при необходимости и многократной, настройкой начальных значений переменных коэффициентов $c_j(t)$, $j=I,3$.

Отклонения $x=(\Delta h,\Delta v,\Delta m)^T$, $\Delta z=\Delta\dot{v}$ движения системы (I) от модельного (2) при МТУ $P=P_i=P_{Mi}$ также могут бытиь сделаны достаточно малыми, однако зависимость их не только от $F(t)$, но и от неопределенностей Δc_x, $\Delta\rho$, ΔJ, а также отсутствие дополнительных, кроме P_{Mi}, настраиваемых параметров, приводят к длине шагов $t_{i+1}-t_i$ меньшей, чем на многошаговых скользящих режимах. Следовательно, бортовая ЦВМ больше загружается. Однако повышение точности на скользящих режимах помимо вычисления P_{Mi}, как и при МТУ /1/, масштабе времени уравнения первого порядка (I0). Решения же систем (2), (I2) находятся аналитически.

Сопоставление предлагаемых алгоритмов управления между собой и с МТУ /1/ по требующемуся быстродействию показывает преимущество в разгрузке бортовой ЦВМ многошаговых скользящих режимов с определением постоянных управлений $v_M = v_{M1}$ непосредственно по решению системы (II).

Список литературы

I. Афанасьев В.А., Мещанов А.С., Мещеряков М.Г., Сиразетдинов Т.К. Многошаговое терминальное управление приземлением спускаемого летательного аппарата //Изв.вузов. Авиационная техника. 1993. N:I. С. I3-I7.

2. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, I974. 275 с.

3. Мещанов А.С. Об одном алгоритме управления в системах переменной структуры //Труды КАИ, вып. I87. I975. С. 42-48.

4. Мещанов А.С. Разрывное управление манипуляторами с инерционными приводами. I,II //Изв.вузов. Авиационная техника. I99I. N:3. С. I3-20, I992. N:I. С. 20-24.

5. Афанасьев В.А., Мещанов А.С., Сиразетдинов Г.К. Многошаговое терминальное управление линейными системами при параметрических и постоянно действующих возмущениях //Изв.вузов. Авиационная техника. I984. N:4. С. II-I8.

УДК 53I.383

М.А.Ахмеров, А.И.Маликов

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С АППАРАТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Для систем автоматического управления с аппаратурной избыточностью решение задачи обнаружения отказов, как правило, предполагает параллельное функционирование множества динамических фильтров, настроенных на разные виды (источники) возможных отказов и на различное время появления отказа, и определение фильтра, наиболее согласованного с САУ, например, путем сравнения статистических характеристик "обнов-