

С.В. Хорошилов

**ОБ АЛГОРИТМИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ УПРАВЛЕНИЯ
ОРИЕНТАЦИЕЙ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. ЧАСТЬ 2**

Анотація. Позначено ряд важливих задач, які необхідно вирішувати при створенні системи керування орієнтацією сонячної космічної електростанції. Представлено методичне забезпечення для оцінки впливу дисипативних і пружних характеристик конструкції на стійкість об'єкта керування, аналізу спостережливості і керованості при неповному векторі стану, а також синтезу алгоритмів керування орієнтацією електростанції робастних стосовно ряду невизначеностей, що може бути основою при створенні алгоритмічного забезпечення системи керування орієнтацією електростанції.

В настоящей статье продолжены исследования, выполненные в работе [1], где рассмотрены наиболее важные задачи, которые необходимо будет решать при создании системы управления ориентацией солнечных космических электростанций (СКЭС), а именно, математическое описание упругих СКЭС, редукция размерности уравнений динамики станции, оценка диссипативных и упругих характеристик ее конструкции. Здесь рассматриваются учет влияния упругих и диссипативных параметров на устойчивость объекта управления, вопросы наблюдаемости и управляемости при неполном векторе состояния, а также синтез алгоритмов управления ориентацией электростанции, робастных по отношению к ряду неопределенностей.

При построении системы управления СКЭС целесообразно предъявить определенные требования к конструкции электростанции. Важными параметрами конструкции станции, с точки зрения ее управления, являются степень жесткости и степень демпфирования ее колебаний [2]. Правильность выбора этих параметров может быть оценена следующим образом.

Воспользуемся линеаризованной математической моделью системы в упрощенном виде (каналы управления не взаимосвязаны). Та-

кая модель позволяет исследовать динамику станции в одной плоскости движения. Для такого случая блок схема приведена на рис. 1 [3].

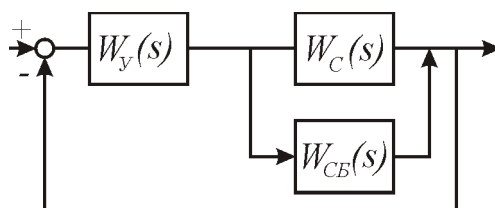


Рисунок 1 - Упрощенная блок схема одного канала управления ориентацией станции

Передаточная функция жесткой станции имеет вид

$$W_c(S) = \frac{1}{J_1 S^2}, \quad (1)$$

передаточная функция упругой солнечной батареи может быть представлена так:

$$W_{cb}(S) = \sum_{j=1}^n \frac{K_j}{S^2 + 2\varepsilon_j S + \Omega_j^2}, \quad (2)$$

а передаточная функция управляющего устройства записана в форме

$$W_y(S) = K_y + K_{\Pi} S + \frac{K_{\text{И}}}{S}. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) использованы следующие обозначения: J_1 – момент инерции станции относительно рассматриваемой оси вращения; K_y , K_{Π} , $K_{\text{И}}$ – коэффициенты усиления, связанные с ошибкой ориентации, ее производной и интегралом соответственно; S – оператор Лапласа; Ω_j , ε_j – собственная частота и декремент колебаний солнечной батареи по j -му тону.

Передаточная функция системы, блок-схема которой приведена на рис.1, при разомкнутой цепи обратной связи равна

$$W(S) = W_y(S) [W_c(S) + W_{cb}(S)].$$

Передаточная функция такой системы при замкнутой цепи обратной связи определяется таким образом

$$W_3 = \frac{W(S)}{1 + W(S)}.$$

С учетом одной формы собственных колебаний передаточную функцию системы можно записать так:

$$W(S) = \frac{(a_{\Pi}S^2 + a_yS + a_{И})[(1 + a_1)S^2 + 2\varepsilon_1S + \Omega_1^2]}{S^3(S^2 + 2\varepsilon_1S + \Omega_1^2)}, \quad (4)$$

где $a_{\Pi} = \frac{K_{\Pi}}{J_1}$, $a_y = \frac{K_y}{J_1}$, $a_{И} = \frac{K_{И}}{J_1}$, $a_1 = K_1J_1$.

Характеристическое уравнение для рассматриваемого случая можно записать в форме

$$\sum_{k=0}^5 f_k S^k = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} f_0 &= a_{\Pi}\Omega_1^2, \quad f_1 = 2a_{\Pi}\varepsilon_1 + a_y\Omega_1^2, \quad f_2 = 2a_y\varepsilon_1 + a_{\Pi}\Omega_1^2 + a_{И}(a_1 + 1), \\ f_3 &= 2a_{\Pi}\varepsilon_1 + \Omega_1^2 + a_y(a_1 + 1), \quad f_4 = 2\varepsilon_1 + a_{\Pi}(a_1 + 1), \quad f_5 = 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Параметры, входящие в (6), можно выразить через величину η , характеризующую степень устойчивости системы, в виде

$$a_{\Pi} = 3\eta, \quad a_y = 5,46\eta^2, \quad a_{И} = 5,46\eta^3.$$

Для исследования системы на устойчивость может быть использован критерий Гурвица. На основании этого критерия необходимым и достаточным условием устойчивости системы является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения (5) и всех определителей матрицы, составленной по определенному правилу [4]. Для характеристического уравнения (5), раскрывая определители, получим два условия

$$f_1f_2 - f_0f_3 > 0, \quad (f_1f_2 - f_0f_3)(f_3f_4 - f_2) - (f_1f_4 - f_0)^2 > 0. \quad (7)$$

Нетрудно видеть из (6), что условие положительности всех коэффициентов уравнения (5) при $\varepsilon_1 > 0$ выполняется всегда. Следовательно, для контроля устойчивости системы достаточно проверить выполнение неравенств (7).

На рис. 2 приведены области устойчивости на плоскости параметров $\varepsilon_1 - \Omega_1$ для $\eta = 1$. На этом рисунке кривые 1, 2, 3 ограничивают области устойчивости, построенные для a_1 , равного 50, 100 и 150 соответственно. Из рисунка видно, что с ростом a_1 область неустойчивости увеличивается.

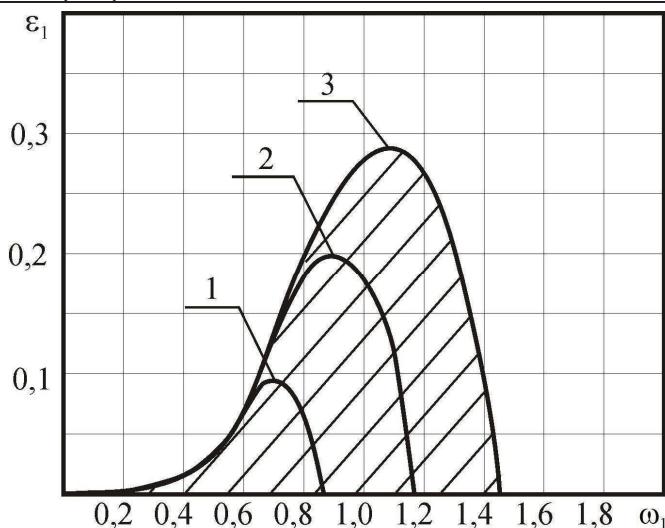


Рисунок 2 - Области устойчивости на плоскости параметров $\varepsilon_1 - \Omega_1$ для $\eta = 1$.

С использованием критерия Гурвица могут быть получены условия устойчивости для большего количества форм, аналогичные условиям (7). В таком случае методика исследования устойчивости является итерационной. Сначала исследуется на устойчивость характеристическое уравнение, учитывающее только первую форму колебаний. После того, как построены области устойчивости на плоскости параметров $\varepsilon_1 - \Omega_1$, выбираются значения ε_1 , Ω_1 , a_1 . Для выбранных параметров ε_1 , Ω_1 , a_1 строятся области устойчивости на плоскости параметров $\varepsilon_2 - \Omega_2$. Полученные области устойчивости позволяют выбрать значения параметров ε_2 , Ω_2 , a_2 , соответствующие второй форме колебаний. Процедуру можно продолжить для произвольного количества форм колебаний.

Для синтеза законов управления математическую модель СКЭС целесообразно представить в нормальной форме. После линеаризации уравнение динамики СКЭС может быть записано следующим образом:

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X} + B\bar{U}, \quad (8)$$

а уравнение измерителей представлено в виде

$$\bar{Y} = C\bar{X},$$

где \bar{X} – вектор состояния системы; \bar{U} – вектор управления; \bar{Y} – вектор выходных координат; A , B , C – постоянные матрицы.

На практике не все компоненты вектора состояния доступны для измерения, потому что число измерительных устройств ограни-

чено, кроме того, часть переменных вектора состояния затруднительно измерить.

Опираясь на знание векторов $\bar{Y}(t)$, $\bar{U}(t)$ и матриц A , B , C , необходимо оценить вектор состояния объекта $\tilde{X}(t)$. Оценка вектора состояния \tilde{X} может быть получена таким образом:

$$\dot{\tilde{X}} = A\tilde{X} + B\bar{U}. \quad (9)$$

Недостаток оценки в соответствии с уравнением (9) состоит в том, что она действует по разомкнутому циклу и со временем ошибка оценки $\bar{X}(t)$ накапливается. Для устранения этого недостатка в уравнение контура оценки вектора состояния вводится еще один член

$$\dot{\tilde{X}} = A\tilde{X} + B\bar{U} + KC(\bar{X} - \tilde{X}), \quad (10)$$

где K – постоянная матрица

Численно решив уравнение (10), получим оценку вектора состояния $\tilde{X}(t)$, которая используется при формировании управления

$$\bar{U}(t) = -L\tilde{X},$$

где L – постоянная матрица.

Задача управления объектом с неполной информацией сводится к исследованию системы (4) на наблюдаемость и управляемость и синтезу контура оценки состояния.

Как показал Калман [5], проверка условия наблюдаемости сводится к определению ранга коагулированной матрицы

$$Q_n = \left[C^T : A^T C^T : (A^T)^2 C^T : \dots : (A^T)^{n-1} C^T \right].$$

Для выполнения условия наблюдаемости ранг этой матрицы должен быть равен порядку исследуемой системы n . Эквивалентный критерий наблюдаемости формулируется следующим образом. Система (8) наблюдаема тогда и только тогда, когда система

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X}, \quad C\bar{X} = 0$$

имеет единственное решение $\bar{X} = 0$.

Условием полной управляемости системы (8) является равенство ранга матрицы управляемости

$$Q_y = \left[B : AB : A^2 B : \dots : A^{n-1} B \right]$$

порядку системы n . Эквивалентный критерий управляемости: система (8) управляема тогда и только тогда, когда система

$$\dot{\bar{X}} = A^T \bar{X}, \quad B^T \bar{X} = 0$$

имеет единственное решение $\bar{X} = 0$.

Для уменьшения громоздкости аналитических выражений рассмотрим линеаризованную систему уравнений, описывающую динамику станции, без учета внешних возмущений для одного канала управления в следующем виде:

$$\ddot{\phi}_1 + \sum_{i=1}^n b_i \ddot{q}_i = U_1, \quad \ddot{q}_i + \varepsilon_i \dot{q}_i + d_i q_i + \ddot{\phi}_1 = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где ϕ_1 – угловая координата движения станции в одном канале управления; q_i – координаты, характеризующие деформации упругого элемента конструкции; b_i , c_i , ε_i – постоянные коэффициенты; U_1 – управляющий момент.

Для преобразования системы уравнений (11) к виду (8) представим вектор состояния \bar{X} следующим образом:

$$\bar{X} = |x_1, x_2, \dots, x_{2n+2}|^T,$$

где $x_{n+1} = q_1, \dots, x_{2n} = q_n, x_{n+1} = \dot{q}_1, \dots, x_{2n} = \dot{q}_n, x_{2n+1} = \phi_1, x_{2n+2} = \dot{\phi}_1$.

В рассматриваемом случае измеренными могут быть $\phi_1, \dot{\phi}_1$. Деформации панели измерению не подлежат.

Измерения могут быть трех типов:

$$1) y_1 = x_{2n+1}; \quad 2) y_1 = x_{2n+1}, y_2 = x_{2n+2}; \quad 3) y_2 = x_{2n+2}.$$

Уравнение $S\bar{X} = 0$ для каждого случая можно расписать в виде

$$1) \phi_1 = 0, \text{ откуда } \dot{\phi}_1 = \ddot{\phi}_1 = 0;$$

$$2) \phi_1 = \dot{\phi}_1 = 0, \text{ откуда } \ddot{\phi}_1 = 0;$$

$$3) \dot{\phi}_1 = 0, \text{ откуда } \ddot{\phi}_1 = 0, \phi_1 \neq 0.$$

Для случая 3, так как $\phi_1 \neq 0$, то условие $\bar{X} = 0$ не выполняется. Поэтому измерение только угловой скорости $\dot{\phi}$ недостаточно для создания устойчивого регулятора системы.

С целью исследования на наблюдаемость для случаев 1 и 2 запишем однородную систему уравнений для системы (11) с учетом того, что $\ddot{\phi}_1 = 0$, в таком виде

$$\sum_{i=1}^n b_i \ddot{q}_i = 0, \quad (12)$$

$$\ddot{q}_i + \varepsilon_i \dot{q}_i + c_i x_i = 0. \quad (13)$$

Характеристическое уравнение, соответствующее уравнениям (12-13), имеет решение

$$P_{1,2} = -\frac{\varepsilon_i}{2} \pm \sqrt{\frac{\varepsilon_i^2}{4} - c_i}.$$

Введем обозначения $e_i = -\frac{\varepsilon_i}{2}$, $\omega_i = \sqrt{\frac{\varepsilon_i^2}{4} - c_i}$ и рассмотрим три случая:

- а). $c_i > \frac{\varepsilon_i^2}{4}$, то есть ω_i мнимое число;
- б). $c_i = \frac{\varepsilon_i^2}{4}$, то есть $\omega_i = 0$;
- в). $c_i < \frac{\varepsilon_i^2}{4}$, корни вещественные, разные $e_i^{(1)}$, $e_i^{(2)}$.

Исследования, проведенные в работах [6–7], показали, что для рассмотренных случаев измерений необходимыми условиями наблюдаемости системы (11) является $b_i \neq 0$ $i = 1, 2, \dots, n$, то есть упругие деформации должны оказывать влияние на движение объекта. Достаточные условия записываются следующим образом.

Система наблюдаема для $i \neq j = 1, 2, \dots, n$ при выполнении условий

$$1) \ c_i > \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i^2 + \omega_i^2 \neq 0; \text{ а) } e_i = e, \ \omega_i \neq \omega_j; \text{ б) } e_i \neq e_j, \ \omega_i = \omega \text{ либо}$$

$\omega_i \neq \omega_j$;

$$2) \ c_i = \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i \neq e_j;$$

$$3) \ c_i < \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i^{(1)} \neq e_j^{(1)}, \ e_i^{(2)} \neq e_j^{(2)}$$

и ненаблюдаема, если

$$1) \ c_i > \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i = e, \ \omega_i = \omega;$$

$$2) \ c_i = \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \ e_i = e;$$

$$3) c_i < \frac{\varepsilon_i^2}{4}, e_i^{(1)} = e_j^{(1)}, e_i^{(2)} = e_j^{(2)}.$$

На практике демпфирование упругих колебаний за счет рассеивания энергии в материале мало. Поэтому, так как $c_i \gg \varepsilon_i$, можно предположить, что $\varepsilon_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$. В этом случае необходимыми и достаточными условиями наблюдаемости будут

$$b_i \neq 0, \omega_i \neq 0, \omega_i \neq \omega_j, i = 1, 2, \dots, n.$$

То есть частоты упругих колебаний панели не должны быть одинаковыми.

Проведенные исследования показали, что система (11) управляема во всех случаях, кроме:

$$\text{при } c_i > \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \text{ если } e_i = e, \omega_i = \omega;$$

$$\text{при } c_i = \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \text{ если } e_i = e_j;$$

$$\text{при } c_i < \frac{\varepsilon_i^2}{4}, \text{ если } e_i^{(1)} = e^{(2)}, i \neq j = 1, 2, \dots, n.$$

Учитывая, что на практике $c_i \gg \varepsilon_i$ и предполагая, что $\varepsilon_i = 0$ $i = 1, 2, \dots, n$, то есть необходимым и достаточным условием управляемости является $\omega_i \neq \omega_j$, где $i \neq j = 1, 2, \dots, n$, то есть разнесение частот упругих колебаний.

Рассмотрим синтез регулятора при учете одной формы упругих колебаний и использование датчика углового отклонения в качестве единственного измерительного устройства. В таком случае матрицы A , KC и вектор B , входящие в уравнения (4), принимают вид

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{42} & 0 & 0 \end{vmatrix}, KC = \begin{vmatrix} 0 & 0 & K_{13} & 0 \\ 0 & 0 & K_{23} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & 0 \end{vmatrix}, \bar{B} = |0, -1, 0, 1|^T,$$

$$\bar{L} = |l_1, l_2, l_3, l_4|^T,$$

где $a_{21} = -c_1^*$, $a_{22} = -e_1^*$, $a_{41} = b_1 c_1^*$, $a_{42} = b_1 e_1^*$, $c_1^* = c_1/b^*$, $e_1^* = e_1/b^*$, $b^* = 1 - b_1$.

Для определения коэффициентов K_{i3} составим многочлен

$$f_1(\lambda) = \det(A - KC - \lambda E), \quad (14)$$

а для определения элементов l_i - многочлен

$$f_1(\lambda) = \det(A - BL - \lambda E), \quad (15)$$

где E - единичная матрица.

Многочлены (14) и (15) могут быть представлены в общем виде

$$f(\lambda) = \lambda^4 + a_3\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0.$$

Коэффициенты K_{i3} выразим следующим образом:

$$K_{13} = \frac{a_{41}p_1 - a_{42}p_2}{a_{41}^2 - (a_{21}a_{42} - a_{22}a_{41})a_{42}}, \quad K_{23} = \frac{a_{41}p_2 - (a_{21}a_{42} - a_{22}a_{41})p_1}{a_{41}^2 - (a_{21}a_{42} - a_{22}a_{41})a_{42}},$$

$$K_{33} = a_3 + a_{22}, \quad K_{43} = a_2 + a_{22}(a_3 + a_{22}) + a_{21},$$

где $p_1 = a_1 + a_{21}(a_3 + a_{22}) + a_{22}[a_2 + a_{22}(a_3 + a_{22}) + a_{21}]$,

$p_2 = a_0 + a_{21}[a_2 + a_{22}(a_3 + a_{22}) + a_{21}]$.

Аналогично запишем и коэффициенты l_i

$$l_1 = \frac{a_0}{a_{21} + a_{41}} - a_2 + \frac{a_{22} + a_{42}}{a_{21} + a_{41}} \left[a_1 - \frac{a_0(a_{22} + a_{42})}{a_{21} + a_{41}} \right] - a_{21},$$

$$l_2 = \frac{1}{a_{21} + a_{41}} \left[a_1 - \frac{a_0(a_{22} + a_{42})}{a_{21} + a_{41}} \right] - a_{22} - a_3,$$

$$l_3 = -\frac{a_0}{a_{21} + a_{41}}, \quad l_4 = \frac{1}{a_{21} + a_{41}} \left[-a_1 + \frac{a_0(a_{22} + a_{42})}{a_{21} + a_{41}} \right].$$

Для обеспечения устойчивости и требуемых качеств системы (11) выберем корни характеристического уравнения, используя правило Баттерворта. В таком случае значения корней определяются выражениями

$$a_0 = \omega_0^4, \quad a_1 = 2,6\omega_0^3, \quad a_2 = 3,4\omega_0^2, \quad a_3 = 2,6\omega_0,$$

где ω_0 - параметр, характеризующий быстроту протекания переходного процесса.

Следует отметить, что на практике сложно избежать неточностей при создании математических моделей. Так динамические характеристики СКЭС точно неизвестны, возмущающие моменты сложным образом зависят от различных факторов. В связи с этим система

управления должна обладать робастностью по отношению к этим неопределенностям.

В работе [8] такая задача решается путем оценки вектора неопределенности с помощью робастного наблюдателя с последующей его компенсацией регулятором. Следуя результатам этой работы системе уравнений, описывающую вращательное движения СКЭС, можно представить следующим образом:

$$\dot{\bar{J}}\bar{\Theta} + \bar{J}\dot{\bar{\Theta}} + \bar{G}^T\ddot{\bar{q}} + \bar{\Theta} \times (\bar{J}\bar{\Theta} + G^T\dot{\bar{q}}) = \bar{M}_B + \bar{M}_Y, \quad (16)$$

$$\bar{G}\dot{\bar{\Theta}} - 0,5 \frac{\partial}{\partial \bar{q}} (\bar{\Theta}^T \bar{J}) \bar{\Theta} + M_e (\ddot{\bar{q}} + D\Omega\dot{\bar{q}} + \Omega^2\bar{q}) = \bar{Q}, \quad (17)$$

где \bar{J} – тензор инерции СКЭС; $\bar{\Theta}$ – вектор абсолютной угловой скорости станции; \bar{G} – коэффициент влияния движения станции на упругие деформации; M_e – диагональная матрица присоединенных масс упругих элементов; Ω – диагональная матрица собственных частот упругих элементов; D – матрица демпфирования упругих колебаний; \bar{Q} – вектор внешних воздействий на упругие элементы; \bar{M}_B – вектор внешних воздействий на станцию; \bar{M}_Y – вектор управления станцией.

Тензор инерции станции можно представить в виде

$$\bar{J} = \bar{J}_0 + \bar{J}_\Delta + \bar{J}_\delta,$$

где J_δ – приращение матрицы J за счет упругих деформаций; J_0 – диагональная матрица, составленная из расчетных значений матрицы J ; J_Δ – учитывает недиагональные элементы и погрешности знания диагональных элементов J_0 .

Введем вектор неопределенности

$$\bar{Z} = \bar{M}_B - \dot{\bar{J}}\bar{\Theta} - (\bar{J}_\Delta + \bar{J}_\delta)\dot{\bar{\Theta}} - \bar{G}^T\ddot{\bar{q}} - \bar{\Theta} \times [(\bar{J}_\Delta + \bar{J}_\delta)\bar{\Theta} + \bar{G}^T\dot{\bar{q}}]. \quad (18)$$

С учетом (18) уравнение (17) принимает вид

$$\bar{J}_0\dot{\bar{\Theta}} + \bar{\Theta} \times \bar{J}_0\bar{\Theta} - \bar{M}_Y = \bar{Z}. \quad (19)$$

Считая, что вектор \bar{Z} непрерывен во времени и на коротких интервалах можно считать $\bar{Z} = \text{const}$, и обозначив измерение этого вектора через y_z для динамического уравнения $\dot{\bar{Z}} = 0$ можно построить наблюдатель в виде

$$\dot{\tilde{Z}} = L_z (\tilde{Z} - \bar{y}_z), \quad (20)$$

где \tilde{Z} – оценка вектора \bar{Z} .

В качестве измерения \bar{y}_z может выступать левая часть уравнения (18). Подставляя ее в (20), получим

$$\dot{\tilde{Z}} = L_z (\tilde{Z} - \bar{J}_0 \dot{\bar{\Theta}} - \bar{\Theta} \times \bar{J}_0 \bar{\Theta} + \bar{M}_y).$$

Введем новый вектор \bar{R}

$$\dot{\bar{R}} = \bar{L}_z (\bar{R} - \bar{L}_z \bar{J}_0 \dot{\bar{\Theta}} - \bar{\Theta} \times \bar{J}_0 \bar{\Theta} + \bar{M}_y).$$

Таким образом, для оценки вектора \bar{Z} необходимо знание только $\bar{\Theta}$.

Пусть $\bar{M}_y = -(\bar{U}_0 + \tilde{Z})$. В таком случае закон управления и уравнение (19) принимают вид

$$\bar{U} = -(\bar{U}_0 + \tilde{Z}),$$

$$\bar{J}_0 \dot{\bar{\Theta}} + \bar{\Theta} \times \bar{J}_0 \bar{\Theta} = -\bar{U}_0 - \tilde{Z} + \bar{Z}.$$

Для простоты рассмотрим плоское движение (по одному из каналов управления) с учетом одного тона упругих колебаний. Уравнения (16-17) примут вид

$$J\ddot{\phi} + G^T \dot{q} = M_b + M_y,$$

$$G\ddot{\phi} + M(\ddot{q} + D\Omega\dot{q} + \Omega^2 q) = Q,$$

$$\tilde{Z} = R - L_z J_0 \dot{\phi}, \quad \dot{R} = L_z (R - L_z J_0 \dot{\phi} - M_y),$$

$$U = U_0 + R - L_z J_0 \dot{\phi}, \quad U = U_0 + \tilde{Z}.$$

Здесь все переменные и коэффициенты являются скалярами.

Зададим M_y в форме

$$M_y = K_1 \phi + K_2 \dot{\phi},$$

Характеристическое уравнение для этого случая имеет вид

$$\left[(Js^2 + K_2s + K_1)s - L_z (J_0s^2 + K_2s + K_1) \right] M (s^2 + D\Omega s + \Omega^2) - H^2 s^5 = 0.$$

Возможны различные сочетания параметров системы управления. Рассмотрим следующие случаи: а) упругие колебания являются быстрыми по отношению к остальным движениям системы; б) работа наблюдателя и упругие колебания являются быстрыми по сравнению

с движением жесткой станции; в) быстрым является процесс в наблюдателе, медленными упругие колебания и движение жесткой станции.

Для этих случаев можно констатировать следующее:

1. При достаточно больших L_z и $L_z < 0$; $D, K_1, K_2 > 0$ система будет робастно устойчивой по отношению к разбросу, как инерционных характеристик станции, так и по отношению к параметрам ее упругости. Более того, система будет сохранять асимптотическую устойчивость при любых значениях инерционных характеристик и параметрах упругости СКЭС.

2. При достаточно больших L_z система будет обладать робастной модальностью, то есть сохранять неизменными определяющие корни характеристического уравнения всей системы, которые определяются уравнением

$$J_0 p^2 + K_2 p + K_1 = 0. \quad (21)$$

3. В том случае, когда $\Omega < \infty$, $-\infty < L_z < 0$, система будет асимптотически устойчивой и при отсутствии конструкционного демпфирования упругих колебаний. Рассеяние энергии упругих колебаний будет происходить за счет наблюдателя.

4. Увеличение L_z при $L_z < 0$ помимо сказанного увеличивает точность системы по отношению к внешним системам.

5. Синтез системы управления сводится к оптимизации корней уравнений (21) и уравнения

$$(JM - H^2) p^3 + M(JD\Omega - L_z J_0) p^2 + M\Omega(J\Omega - L_z J_0 D) p - L_z J_0 M \Omega^2 = 0$$

второго и третьего порядка путем выбора коэффициентов K_1, K_2, L_z и расчетного значения J_0 .

Таким образом, в настоящей статье продолжено рассмотрение наиболее важных задач, которые необходимо будет решать при создании системы управления ориентацией СКЭС, начатое в работе [1]. Для таких задач, как влияние диссипативных и упругих характеристик конструкции на устойчивость объекта управления, наблюдаемость и управляемость при неполном векторе состояния, а также синтез алгоритмов управления ориентацией электростанции робастных по отношению к ряду неопределенностей, в обзорном стиле представлено методическое обеспечение, которое может служить основой

при создании алгоритмического обеспечения систем ориентации СКЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорошилов С.В. Об алгоритмическом обеспечении управления ориентацией солнечных космических электростанций. Часть 1 / С.В. Хорошилов // Системні технології. – Вып. 2(61). – 2009. – С. 153–167.
2. Хорошилов С.В. Особенности динамики деформируемых космических аппаратов в переходных и нештатных режимах движения / С.В. Хорошилов // Вісник Дніпропетровського університету. Ракетно-космічна техніка. – Вып. 3. – 1999. – С. 118–120.
3. Иванова Г.И. Определение требований к динамическим характеристикам деформируемых элементов движущихся механических систем / Г.И. Иванова, В.С. Хорошилов // Динамические задачи механики сложных систем. – 1984. – С. 76–81
4. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. М.: Наука, 1972. – 767 с.
5. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
6. Ткаченко В.А. Стабилизация углового положения космического аппарата с упругими панелями солнечной батареи динамическим регулятором / В.А. Ткаченко // Космические исследования. – Т. XXII, вып. 4. – 1984. – С. 520-530.
7. Ткаченко В.А. Синтез динамического регулятора при искусственной взаимосвязи движений космического аппарата с упругими панелями солнечной батареи / В.А. Ткаченко // Космические исследования. – Т. XXIII, вып. 3. – 1984. – С. 520-530.
8. Потапенко Е.М. Синтез и анализ робастной системы управления маневрирующего космического аппарата / Е.М. Потапенко, В.Г. Бичай // Космические исследования. – Т. 36, №. 4. – 1998. – С. 399-406.