

УДК 517.977.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С АКТИВНЫМ КООРДИНАТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Павлов А.Н., Алёшин Е.Н., Воротягин В.Н. (Санкт-Петербург),
Серегин Г.Г. (Москва)

Введение

Конструктивное решение задач повышения качества управления программным (опорным) движением космического аппарата с присоединенными упругими элементами конструкции (УЭК) потребовало разработки нового метода синтеза управления, названного методом компенсационно-параметрической стабилизации [1]. Этот метод развивает основные идеи комбинационного подхода о разделимости поступательного и переносного (углового) движения КА, а также относительного движения присоединенных УЭК, находящихся в «затвердевшем» состоянии.

Метод компенсационно-параметрической стабилизации [1] предполагает:

– проведение пространственной и временной декомпозиции в соответствии с принципами многоконтурности и многорежимности управления прецизионной стабилизацией опорного движения КА с присоединенными УЭК, обеспечивающей на основе принципа «квазизатвердевания» разделение задач централизованного управления движением корпуса объекта и локально-автономного управления динамикой упругой системы на этапах выведения в окрестность программной фазовой траектории (ПФТ) целевого функционирования;

– формирование финитного (таймерного или терминального) профилированного опорного управления затвердевшим объектом на этапе его выведения в окрестность ПФТ целевого функционирования);

– формирование опорного управления движением «затвердевшего» объекта по ПФТ с обеспечением инвариантности или субинвариантности динамики объекта к действующим координатно-параметрическим возмущениям в окрестности ПФТ за счёт использования компенсационного управления стабилизацией опорного движения;

– формирование локального координатно-параметрического управления динамикой присоединенных УЭК, обеспечивающего стабилизацию состояния упругой системы в окрестности соответствующих стационарных состояний;

– формирование структуры, идеологии (стратегии) и циклограммы функционирования иерархической многоконтурной и многорежимной системы согласованного управления поступательным и переносным (вращательным) движением сравнительно жёсткой части (корпуса объекта), а также относительным движением присоединённых УЭК с использованием возможностей как исполнительных органов (ИО), установленных на корпусе объекта (централизованное управление), так и локальных ИО, размещённых непосредственно на УЭК (локальное управление);

– оценку эффективности разработанной иерархической многоконтурной системы управления в различных режимах функционирования с учётом имевших место системообразующих затрат и принятие решение о целесообразности её практического применения, массового тиражирования или проведения доработок и модернизации.

**Синтез системы компенсационного управления стабилизацией
опорных траекторий углового движения космического аппарата
с упругими элементами конструкции**

Математическая модель управляемого движения КА, с учетом возможностей организации как централизованного, так и локального управлений может быть представлена конечномерной системой обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Эйлера-Лагранжа [1]

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \Phi(\varphi)W; \dot{W} = V_r(W) + V + V_q(\dot{q}) + V_B \\ \ddot{q} = D(U)\dot{q} + \Omega(U)q = T(U) + Q(\dot{W}) + G \end{cases} \quad (1)$$

где φ , $W_{\langle s \rangle}$ – расширенные векторы перемещений и скоростей корпуса многосвязного динамического объекта (МДО) соответственно; V , V_r , V_q , V_B – векторы соответственно управляющего ускорения корпуса; ускорения, обусловленного наличием гироскопических связей; ускорения, обусловленного влиянием динамики УЭЖ, а также возмущающего ускорения, обусловленного наличием прочих факторов; $\Phi(\varphi)$ – матрица кинематических преобразований, соответствующих и отражающих принятую последовательность поворотов связанного координатного базиса при совмещении его осей с осями опорной системы координат; $M_{\langle s \rangle}$ – вектор управляющих воздействий, формируемых ИО подсистемы централизованного управления (ПЦУ); $Q_{\langle k \rangle}(\dot{W})$ – векторы нагружающих ускорений упругой части конструкции, обусловленных соответственно динамикой корпуса объекта, наличием силовых воздействий со стороны локальных ИО подсистемы локально-автономного управления (ПЛАУ), а также прочих возмущающих воздействий; $L_{s[n_s, n_s]}$ – диагональная матрица инерционных характеристик s -го УЭЖ; $U_{\langle p \rangle}$ – вектор параметров локального управления; $D_{[k, k]}$, $\Omega_{[k, k]}$ – диагональные матрицы диссипативных коэффициентов и квадратов парциальных частот присоединённых УЭЖ соответственно.

При решении целевых задач желаемую динамику корпуса объекта с жёстко закреплённым на нём специальным бортовым оборудованием, к параметрам движения, которого, собственно, и предъявляются высокие требования, зададим опорной траекторией, определённой на множестве решений систем дифференциальных уравнений:

$$\dot{\varphi}_0 = \Phi(\varphi_0)W_0, \dot{W}_0 = V_r(W_0) + V_0. \quad (2)$$

Заметим, что опорное движение объекта может быть задано, вообще говоря, не единственным способом, и в этой связи следует отметить, что выбор конкретного варианта в определённой степени зависит от сложности решения соответствующей задачи синтеза опорного управления. В частности, опорное управление может быть найдено в классе оптимальных законов (как в форме программы, так и в форме синтеза), законов терминального и адаптивного управлений, законов, полученных с позиций теории устойчивости либо иным образом. В дальнейшем полагаем опорное управление известным.

В соответствии с принципом квазизатвердевания, в предположении тождественности начальных состояний корпуса КА в реальном и опорном движении, задача управления объектом (1) может быть формализована следующим образом.

Найти такие централизованное $V \in V \subset R^6$ и локальное $U \in U \subset R^p$ управления объектом (1), что в течение управляемого процесса удовлетворяются условия:

$$\|\Delta\dot{W}\|_1 = \|\dot{W} - \dot{W}_0\|_1 = \|V_r(W) - V_r(W_0) + V_v + V - V_0\|_1 \leq \varepsilon_i^*, i = \overline{1,6} \quad (3)$$

где $\|\cdot\|_1$ – некоторая выбранная норма $V_v = V_q(\ddot{q}) + V_B$; ε_i^* – параметр, характеризующий допустимый уровень отклонений реальной динамики объекта (1) от его опорного движения (2) по i -му каналу управления.

В идеальном случае при $\varepsilon^* = \text{col}(\varepsilon_i^*, i = \overline{1,6}) = 0$ реальное движение объекта тождественно совпадает с опорным, и задача управления может быть сведена к задаче инвариантного синтеза [2]. Для этой цели централизованное управление в (1) разделим «на две части»: $V = V_0 + \Delta V$. При этом составляющая ΔV отражает зависимость управления V от динамики УЭК и прочих возмущений, а также, возможно, от локального управления U . При этом система (1) примет вид:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \Phi(\varphi)W; \dot{W} = V_r(W) + V_0 + \Delta V(\varphi, W, q, \dot{q}, V_0, U, V_v, G) + V_v \\ \ddot{q} + D(U)\dot{q} + \Omega(U)q = I(U) + Q(\dot{W}) + G \end{cases} \quad (4)$$

Задача инвариантного синтеза для объекта (1) в наиболее общем случае формулируется следующим образом: найти такую функцию $\Delta V = \Delta V(y, V_0, U, V_m)$, при которой система (4) обладает нетривиальными инвариантными функциями по возмущениям V_m , параметрам q, \dot{q} и управлению U .

Здесь $y_{<2k+1>} = \text{col}(\varphi, W, q, \dot{q})$, $V_m = \text{col}(V_v, G)$.

Функция $H(y, V_0, U, V_m)$ называется нетривиальной инвариантной функцией системы (4) по возмущениям V_m , параметрам q, \dot{q} управлению U , если для любых двух решений $(V_0(t), U^1(t), V_m^1, y^1(t))$ и $(V_0(t), U^2(t), V_m^2, y^2(t))$ системы (4), удовлетворяющих в начальный момент времени t_0 условиям $\varphi^1(t_0) = \varphi^2(t_0)$, $W^1(t_0) = W^2(t_0)$, имеет место равенство:

$$H(y^1(t), V_0(t), U^1(t), V_m^1) = H(y^2(t), V_0(t), U^2(t), V_m^2).$$

Исходя из физического смысла задачи, в качестве инвариантной функции системы (4) целесообразно выбрать функцию

$$H = V_r(W) + V_0 + \Delta V(y, V_0, U, V_m) + V_v,$$

причём такую, что при $\text{col}(q, \dot{q}, V_m, U) = 0$ (объект затвердел идеально в «натуральном» состоянии [1], возмущения отсутствуют – справедливо соотношение

$$H(\cdot) = V_r(W_0) + V_0, \quad (5)$$

где $H(\cdot) = V_r(W) + V_0 + \Delta V^*(\varphi, W, V_0)$, $\Delta V^* = \Delta V(\varphi, W, 0, 0, V_0, 0, 0, 0)$. Анализ соотношения (5) совместно с (2) и (4) показывает, что для его выполнения необходимо и достаточно обеспечить

$$\Delta V + V_v \equiv 0, \quad (6)$$

В силу инвариантности функции H , соотношение (5) должно быть справедливо при любых допустимых значениях параметров q, \dot{q}, V_m, U . Как следует из соотношений (4) и (2), это возможно, если в течение всего управляемого процесса выполняется тождество (6), т.е. обеспечивается полная компенсация действующих на корпус МДО возмущений (абсолютная инвариантность динамики корпуса к внешним возмущениям). Существенно при этом, что для формирования компенсирующей добавки ΔV допускается использование информации о динамике УЭК, текущем локальном управлении U и возмущениях V_m , оказывающих непосредственное влияние на

динамику корпуса и упругой системы. Локальное управление, в свою очередь, может быть построено произвольным образом и, в частности, с использованием информации о величине текущего централизованного управления.

Таким образом, предлагаемый подход, допуская функциональную связь между локальным и централизованным управлениями, позволяет провести декомпозицию математической модели управляемого движения объекта (1), и на этой основе разделить и решать независимо друг от друга задачи синтеза инвариантного (субинвариантного) централизованного управления корпусом с затвердевшими УЭК и локально-автономного управления динамикой упругой системы.

(Суб)инвариантное централизованное управление КА, по своей сути, призвано обеспечить выполнение условий (3) или, иными словами, гарантировать устойчивость нулевого решения системы дифференциальных уравнений, описывающих возмущённую динамику корпуса объекта в окрестности опорной траектории, определяемой системой (2). Практическую реализацию такого управления целесообразно осуществлять в классе комбинированных систем стабилизации, поскольку в них, как показал предварительный анализ принципов функционирования подобных систем, не возникает противоречия между условиями инвариантности и условиями устойчивости. В этом заключается их существенное преимущество по сравнению с системами регулирования по отклонению [2]. Согласно принципу комбинированного управления и в соответствии с принципом двухканальности Б.Н. Петрова [3], компенсирующая добавка ΔV должна задаваться в виде:

$$\Delta V = \Delta V_T + \Delta V_r$$

где ΔV_r – составляющая, формируемая контуром грубого управления контура управления по возмущению; ΔV_T – составляющая, формируемая контуром точного управления, реализующего, например, принцип управления по отклонению.

В качестве контура точного управления, например, может быть использован традиционный пропорционально-дифференциальный регулятор, оптимизируемый, например, по квадратичному критерию качества [1], вида $\Delta V_T = K_1 \Delta \varphi + K_2 \dot{\varphi}$.

Здесь $\Delta \varphi = \varphi - \varphi_0$; $\Delta \dot{\varphi} = \dot{\varphi} - \dot{\varphi}_0 = \Phi(\dot{\varphi})W - \Phi(\dot{\varphi}_0)W_0$;

$$K_1 = \text{diag} \{ K_{1i} < 0, i = \overline{1,6} \}; K_2 = \text{diag} \{ K_{2i} < 0, i = \overline{1,6} \}.$$

При рассмотрении информационного аспекта организации функционирования грубого контура признано целесообразным использовать оценку вектора ускорения корпуса объекта $X_{\dot{\omega}}$, а также суммарный сигнал V , поступающий на вход системы ИО ПЦУ, для формирования управления в виде:

$$\Delta V_r = V_r(W_0) + V - X_{\dot{\omega}}.$$

Отметим, что соотношение (6) в данном случае выполняется лишь в идеале при $X_{\dot{\omega}} = \dot{W}$. Поскольку реально $\|X_{\dot{\omega}} - \dot{W}\|_1 \leq \varepsilon_{\dot{\omega}}^i$, где $\varepsilon_{\dot{\omega}}^i$ – параметр, характеризующий точностные характеристики датчиков первичной информации (акселерометров), то это приводит к нарушению условия (6) и, как следствие, к трансформации условий (3) к виду $\varepsilon_{\dot{\omega}}^i \leq \varepsilon_{\dot{\omega}}^*, i = \overline{1,6}$. Последние соотношения могут рассматриваться, с одной стороны, как требования к точностным характеристикам акселерометров, используемых в контуре грубого управления, с позиций необходимых условий обеспечения квазизатвердевания объекта управления, а с другой стороны, как оценки возможностей системы управления движением (СУД) при имеющихся точностных параметрах датчиков первичной информации.

Таким образом, для объектов рассматриваемого класса целесообразная структура СУД включает подсистемы централизованного (ПЦУ) и локально-автономного (ПЛАУ) управления. Последняя, в свою очередь, должна представлять совокупность независимых контуров активного демпфирования колебаний, формируемых для каждого УЭК в отдельности и организационно включающих в себя группы разнотипных локально-автономных контуров управления (ЛАКУ). Последние, в зависимости от типа используемых локальных ИО, могут подразделяться на контуры координатного и параметрического управления. Контуры координатного управления призваны обеспечить решение задачи за счёт приложения к УЭК управляющих сил и моментов, а параметрического – за счёт управляемого изменения динамических параметров (жёсткости, коэффициента диссипации) присоединённых УЭК. Существенно, что при таком подходе СУД МДО становится многоконтурной и приобретает рассредоточенный характер, в наибольшей степени отвечающий особенностям объекта управления как распределённой системы.

Заключение

Подчинённая согласованность режимов работы ЛАКУ с режимом работы ПЦУ с целью исключения переходов на минимальную жёсткость УЭК в режимах высокодинамического изменения централизованного управления является основным отличительным признаком иерархического двухуровневого построения многоконтурной СУД, в которой верхний уровень (ПЦУ) имеет дело с отработкой опорного движения корпуса объекта в условиях действия ограниченных внешних возмущений, а нижний уровень (ПЛАУ) осуществляет управление «остатком» системы в декомпозиционной структуре. Использование иерархических двухуровневых многоконтурных систем, реализующих предлагаемое компенсационно-параметрическое управление движением МДО, позволяет существенно повысить качество управляемых процессов. В частности, при стабилизации углового положения упругого объекта с крупногабаритными выносными УЭК длительность переходных процессов сокращается в два и более раз по сравнению со случаем использования традиционного пропорционально-дифференциального регулятора [4].

Литература

1. Мануйлов Ю.С., Алешин Е.Н., Зиновьев С.В. Методы и алгоритмы компенсационно-параметрического управления угловым движением космического аппарата с упругими элементами конструкции. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2015. – 223 с.
2. Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М. Стабилизация упругих колебаний конструкции крупногабаритных спутников с переменными параметрами методами адаптации // Автоматика и телематика. – 2011. – № 12. – С. 91-103.
3. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
4. Алешин Е.Н. Комбинированное управление стабилизацией углового положения космического аппарата с активным координатно-параметрическим демпфированием упругих элементов конструкции / Я.Н. Гусеница, Е.Н. Алешин, В.Н. Воротягин и др. // Известия Института инженерной физики. – 2020. – № 1. – С. 64-68.