

СБОРКА И УПРАВЛЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ НА ОРБИТЕ

Глумов В.М., Ермилов А.С.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
vglum@ipu.ru, yermas@ipu.ru

Аннотация: Определены задачи сборки крупномасштабных космических конструкций на орбите с использованием космических роботов. Разработана математическая модель движения нежестких крупномасштабных космических конструкций с дискретно изменяющимся в процессе сборки на орбите числом степеней свободы. Проведен анализ изменения свойств крупномасштабной космической конструкции при ее сборке. Предлагаются алгоритмы управления, обеспечивающие устойчивость при возникновении упругих колебаний элементов конструкции.

Ключевые слова: большие космические конструкции, оценивание координат объекта, управление движением, алгоритм управления.

Введение и постановка задачи

Перспективное направление освоения космоса предполагает сборку на околоземной орбите крупномасштабных больших космических конструкций (БКК), предназначенных для решения научно-технических задач, например энергетического и информационного характера [1]. Для реализации подобных проектов необходимо решать задачу управления их угловым положением в пространстве. Проблема создания на околоземной орбите БКК остается до настоящего времени практически не решенной. Одной из основных причин этого является невозможность выведения на орбиту современными средствами окончательно собранных объектов космической техники требуемого размера. Отсутствуют также и технологии поэлементной сборки БКК непосредственно на орбите. Недостаточно уделяется внимания вопросам стабилизации и управления ориентацией

БКК как многомерной механической системы с дискретно изменяющейся в процессе ее сборки структурой.

Таким образом, существует необходимость дальнейшего изучения как вопросов разработки принципов сборки БКК на орбите, так и методов проектирования систем управления дискретно изменяющимися в процессе сборки крупномасштабными конструкциями. При этом следует учитывать, что возможно практически единственным способом поэтапной сборки в космосе является использование свободно летающих космических манипуляционных роботов (КМР) [2].

Собираемые на орбите крупномасштабные БКК представляют собой упругие многочастотные колебательные механические системы с дискретно изменяющимся во времени большим числом степеней свободы. Одной из основных задач, решаемых при управлении космическими аппаратами, является управление ориентацией и стабилизация осей несущего тела (корпуса) БКК относительно требуемого направления. Из соображений надежности и экономичности функционирования системы управления, а также из-за использования БЦВМ решение этой задачи традиционно осуществляется в классе релейных или дискретных систем с разрывными управлениями, для которых на любом из временных интервалов дискретности уровень управляющего воздействия $m(u)$ сохраняется неизменным. Разрывный характер управляющих воздействий является основной причиной возникновения и развития упругих колебаний конструкции. В сочетании с априорной неопределенностью задания параметров модели ДКА λ и их переменностью, вызванной наличием движущихся масс (например, панели солнечных батарей, антенны слежения и т.д.), возникающие колебания конструкции могут явиться причиной неустойчивости системы из-за неконтролируемого нарастания амплитуды в процессе управления основным ("жестким") движением упругого объекта. В [3] проведен анализ проблем управления при сборке БКК на орбите с использованием космических роботов, снабженных многозвенными манипуляторами. Одной из основных проблем является обеспечение устойчивого высокоточного управления при возникновении упругих колебаний элементов БКК. Координация взаимодействия БКК с космическим роботом при реализации сборочного процесса требует от алгоритмов угловой стабилизации и ориентации БКК повышенной точности и быстродействия.

При проектировании системы управления БКК необходимо различать три качественно отличающиеся фазы развития собираемой конструкции как объекта управления:

1. начальная фаза соответствует установке в заданной точке пространства приборного отсека с последующей стабилизацией относительно требуемого положения;
2. после присоединения первого и ряда последующих нежестких элементов конструкции собираемый объект приобретает свойства упругой механической системы, характеризующейся наличием одной или нескольких сравнительно высокочастотных ($\sim 1 \div 10$ Гц) тонов упругих колебаний;
3. при дальнейшем увеличении числа звеньев собираемая конструкция превращается в плохо управляемую систему, отличающуюся значительными моментами инерции присоединенной упругой части и низкими модальными частотами ($< 0,1$ Гц) близкими к частотам управления "жестким" движением объекта.

До настоящего времени не уделено достаточного внимания некоторым специальным вопросам управления взаимодействующими в процессе сборки космическими объектами типа КМР и БКК. К таким вопросам относятся:

- а) Обеспечение условий безопасного функционирования КМР в непосредственной близости к собираемой им БКК. Одним из возможных средств реализации условий безопасности является, например, использование предельно низких ("ползучих") скоростей при сближении КМР с БКК и при манипуляционных перемещениях присоединяемых к БКК строительных элементов. Использование режима "зависания" КМР над местом установки детали (бесконтактный метод сборки) также повышает степень безопасного взаимодействия участников сборочного процесса.
- б) Использование "технологических" разворотов БКК к приближающемуся роботу с грузом, позволяющих исключить процедуру облета БКК и одновременно снизить затраты топлива для управления траекторным движением КМР.
- в) Синтез алгоритмов согласованного управления взаимодействующими в процессе сборки объектами при решении общей для них задачи.
- г) Исследование проблемы возмущений вектора координат, которые соответствуют упругим компонентам БКК, вызываемых ударными воздействиями присоединяемых с помощью КМР строительных элементов.

Возможные варианты решений вопросов взаимодействия КМР и БКК в процессе сборки на орбите представлены в [4]. В настоящей работе решается проблема управления БКК при наличии упругих колебаний, возникающих при сборке конструкции.

Для обеспечения нормального функционирования БКК на всех этапах сборки в работе решаются следующие основные задачи:

- разработка математической модели механической системы, позволяющей проводить исследование процесса изменения динамических свойств дискретно изменяющейся конструкции на заданной последовательности ее сборки;
- выявление границ интервалов, в пределах которых собираемая конструкция сохраняет свойства, присущие управляемому объекту как: а) твердому телу; б) деформируемой механической системе с несущественным влиянием упругих колебаний конструкции на динамику управления; в) упругой многочастотной конструкции, требующей расширения вектора наблюдения для реализации желаемой динамики управления;
- решение задачи управления движением изменяющегося объекта с нежесткой конструкцией на основе применения последовательности соответствующих текущему состоянию объекта алгоритмов, обеспечивающих устойчивое по отношению к упругим колебаниям и высокоточное управление.

2 Математическая модель движения большой космической конструкции

Разнообразие конструкций современных космических аппаратов, обусловленное многофункциональностью решаемых ими задач, порождает множество типов конфигураций механической структуры. Самая обширная группа из них включает в себя объекты, состоящие из конечного числа жестких тел, тем или иным образом соединенных друг с другом условно безмассовыми упругими связями. Угловое движение космических аппаратов этой группы в режиме стабилизации обычно описывается с помощью дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода. На практике довольно часто выполняются условия, позволяющие пренебречь коэффициентами перекрестных связей в соответствующих матрицах уравнений Лагранжа, вследствие чего модель пространственного углового движения БКК декомпозируется на три независимые плоские модели. Абсолютное плоское угловое движение основного тела по координате x может быть представлено в виде суммы составляющих переносного движения \bar{x} , определяемого вращением БКК как жесткого объекта, и относительного движения \mathcal{X} , происходящего под влиянием упругих колебаний конструкции

$$(1) \quad x = \bar{x} + \mathcal{X} = \bar{x} + \sum_{i=1}^n \mathcal{X}_i.$$

Введенное разделение движений (1) позволяет перейти от уравнений Лагранжа к представлению углового движения БКК в форме модально-физической модели [5]. Наиболее часто используется ее скалярная форма следующего вида [6]

$$(2) \quad \ddot{\mathcal{X}}_i = m(u), \quad \ddot{\mathcal{X}}_i + \omega_i^2 \mathcal{X}_i = k_i^0 m(u), \quad i = \overline{1, n},$$

Где $m(u)$ – скалярная функция управления, $u(x, t)$ – алгоритм управления. Вместе с упорядоченной по i матрицей собственных частот $\omega^2 = \text{diag}(0, \omega_1^2, \dots, \omega_n^2)$ такой, что $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$, вектор коэффициентов возбудимости $k = (1, k_1^0, \dots, k_n^0)$ упругих мод МФМ ДКА, а также зависящий от них вектор, элементы которого суть единичные степени возбудимости [5] $\mu_i = k_i^0 \omega_i^{-2}$ являются важнейшими характеристиками, определяющими динамику конструкции упругого космического аппарата.

На основе (2) в [5] разработано математическое описание собираемых на орбите БКК.

Достижение высоких требований к управлению БКК невозможно обеспечить без высокоточной информации как о координатах углового движения рассматриваемой механической системы, так и о координатах колебаний упругих элементов конструкций, а также их параметрах. Следует отметить, что измерения координат упругих колебаний на борту и оценивание параметров БКК и особенно упругих колебаний с помощью наземных испытаний и исследований не позволяют достичь требуемой точности.

В качестве варианта синтеза алгоритма совместного оценивания и идентификации рассматривается динамика углового движения БКК с силовым гироскопическим приводом (ГСП).

С целью получения более достоверных результатов при исследовании динамики углового движения БКК на основе математической модели [7] разработана более полная математической модель в виде

$$\begin{aligned}
 & J_i \ddot{\varphi} + \sum_{i=1}^n a_i \tilde{I}_i (b_i \dot{q}_i + c_i q_i) - h \dot{\beta} = 0, \\
 & I_\beta \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} + h \dot{\varphi} = M_\beta(\hat{u}), \\
 & J_i \ddot{q}_i + J_j (b_j \dot{q}_i + c_j q_i) + a_i \sum_{j=1, j \neq i}^n \tilde{I}_j (b_j \dot{q}_j + c_j q_j) + a_i h \dot{\beta} = 0, \\
 & J_i = I_\varphi - \sum_{i=1}^n a_i \tilde{I}_i, \quad J_j = I_\varphi - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_j \tilde{I}_j,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где I_φ – момент инерции корпуса БКК относительно центра масс; h – кинетический момент ГСП; φ – угол отклонения корпуса от заданного направления в инерциальном пространстве; β – угол поворота ГСП; I_β – момент инерции ГСП относительно оси прецессии; k_D – коэффициент вязкого трения ГСП, $M_\beta(u)$ – управляющий момент ГСП, u – управляющий сигнал на входе ГСП, q_i – координата, характеризующая i -й тон упругих колебаний, a_i , b_i и c_i – параметры i -ого тона упругих колебаний, n – число тонов; Так как на борту БКК в качестве измерений могут использоваться только координаты φ , $\dot{\varphi}$ и, может быть, $\dot{\beta}$, то в модели (3) координаты q_i и параметры a_i , b_i и c_i упругих колебаний оказываются ненаблюдаемыми, поскольку условие полной наблюдаемости не выполняется.

Так как априори необходимая информация о координатах и параметрах тонов упругих колебаний отсутствует, то на основе нелинейного расширенного фильтра Калмана разработан алгоритм совместного оценивания координат углового движения рассматриваемой механической системы и неизмеряемых координат тонов упругих колебаний, а также идентификации их ненаблюдаемых параметров [7]. Вектор состояния алгоритма совместного оценивания и идентификации включал в себя следующие координаты и параметры $X = (\varphi, \dot{\varphi}, q_i, \dot{q}_i, \beta, \dot{\beta}, a_i, b_i, c_i)^T$, где $i = \overline{1, n}$. При этом предполагалось, что параметры a_i , b_i и c_i в течение процесса оценивания и идентификации постоянны.

С целью исследования устойчивости, быстродействия, сходимости и точности синтезированного алгоритма было проведено статистическое математическое моделирование. Для сокращения времени моделирования каждого процесса оценивания и идентификации в математической модели БКК с ГСП исследовались только два тона, при этом параметр c_1 стал переменным. Математическое моделирование подтвердило высокие точность, быстродействие и устойчивость предложенного алгоритма совместного оценивания координат углового движения БКК и тонов упругих колебаний конструкции, а также идентификации параметров тонов. Так, точность полученных оценок в 2% от максимального реального начального значения оцениваемых координат и идентифицируемых параметров достигается за 14-25 с. Причем параметры оцениваются медленнее, что связано с их отсутствием в явном виде в математической модели измерений, принятой в совместном алгоритме оценивания, а часть параметров еще и изменяется во времени.

При исследовании алгоритма управления угловой ориентацией и стабилизацией БКК с ГСП и с активной компенсацией влияния колебаний упругих частей конструкции БКК на динамику углового движения при координированном взаимодействии с КМР в алгоритме совместного оценивания и идентификации использовалась полная математическая модель (3). В этой модели предполагалось, что все параметры тонов упругих колебаний не постоянны. Закон управления угловым движением БКК с ГСП с использованием оценок координат формировался в виде

$$\hat{u} = K \hat{\varphi} - I_\varphi^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \tilde{I}_i \hat{q}_i,
 \tag{4}$$

здесь $\hat{\varphi}$ – угол поворота корпуса, вызванный вращением БКК как жёсткого объекта, K – постоянный коэффициент. Существует значительный разброс по времени затухания упругих колебаний из-за значений используемых коэффициентов \tilde{K}_i , который объясняется тем, что

параметры тонов имеют различные значения, т. к. упругие колебания отличаются по амплитуде и частоте. Выбор коэффициентов усиления \tilde{K}_i в (4) позволяет, по меньшей мере, на порядок уменьшить время затухания упругих колебаний.

Предлагается следующая методика использования получаемых в реальном времени оценок в управлении. В течение первых 6 – 9 секунд получаемые оценки координат и параметров в процессе управления угловым движением БКК не используются. После достижения значений оценок в 80 – 85% от реальных значений эти оценки можно использовать в законах управления угловым движением, что позволит значительно сократить (на 15 – 20%) время самих процессов управления и стабилизации с активной компенсацией влияния колебаний упругих частей конструкции БКК на динамику углового движения. Степень приближения полученных оценок координат и параметров к их реальным значениям оценивается с помощью оптимальных среднеквадратических ошибок, получаемых в реальном времени из диагональных элементов ковариационной матрицы фильтра Калмана.

2 Изменение свойств БКК как объекта управления в процессе сборки

В качестве объекта исследования принята дискретно изменяющаяся в процессе сборки БКК "зонтичного" типа, которая достаточно хорошо подходит для описания регулярных структур типа больших космических зеркал или радиотелескопов [5]. Как механическая система структура такого типа представляет собой совокупность твердых тел, одно из которых является несущим. Остальные (носимые тела) являются строительными элементами, присоединяемыми в том или ином порядке, к несущему телу при использовании спиральной схемы сборки каркаса «зонтичного» типа. В точках присоединения элементов конструкции учитывается вращательная степень свободы в рассматриваемой плоскости движения и упругая связь, ограничивающая возможные смещения элементов областью малых отклонений относительно состояния равновесия. Рассматривается плоскопараллельное движение всех составляющих БКК тел.

Изменение динамических свойств промежуточных структур собираемой БКК выражено через изменение коэффициентов модели вида (3), расчет которых при достаточно больших значениях числа элементов n конструкции требует большого объема оперативных вычислений. Для решения задачи анализа особенностей динамики изменения моделей ДРК в процессе сборки используется разработанный пакет программ машинного построения графа модели собираемой на орбите БКК [8]. Выходным продуктом этого пакета, помимо компьютерной визуализации графовой модели динамики конструкции, являются также матрицы параметров, позволяющие при необходимости восстановить любую из промежуточных моделей БКК на соответствующих n -фазах существования объекта в неизменном виде.

Графики изменения динамических коэффициентов в процессе сборки БКК показывают, что с ростом n диапазон собственных частот упругой конструкции расширяется. При этом из-за увеличения инерции собираемого объекта в соответствии с общей теоремой Релея низшая частота конструкции уменьшается, что ведет к нежелательному сближению с системными частотами управления основным движением конструкции и, как следствие, к возрастанию возмущающего влияния регулятора на колебания конструкции. В процессе установки элементов одного ряда зонтичной структуры частоты сближаются медленно, что объясняется незначительностью изменения суммарного момента инерции механической системы. При переходе с текущего ряда на следующий момент инерции резко возрастает пропорционально квадрату удаления присоединяемой массы от центра инерции. Это вызывает соответствующее скачкообразное сближение частот. Возникает необходимость в некоторый момент сборки ввести более сложный (по отношению к начальному) алгоритм управления, способный обеспечивать нормальное функционирование системы при больших значениях суммарного коэффициента возбудимости упругих колебаний.

Для анализа негативных последствий сближения основной частоты упругих колебаний БКК с системной частотой управления основным ("жестким") движением конструкции на динамику системы рассмотрим процесс изменения указанных частот на примере пропорционально-дифференциального управления (PD-управление) движением БКК как эквивалентного твердого тела с изменяющимся в процессе сборки "по спирали" моментом инерции $I_c(n)$. В этом случае управляющее воздействие имеет вид $M(u) = -I_c(n)(k_1\bar{\varphi} + k_2\dot{\bar{\varphi}})$, u – сигнал управления на входе исполнительного органа системы ориентации, k_1, k_2 – постоянные коэффициенты. При этом

системная частота $\bar{\omega}(n)$ эквивалентного БКК определяется из характеристического уравнения $\lambda^2 + I_c(n)(k_1 + k_2\lambda) = 0$ подстановкой $\lambda = j\bar{\omega}$. Построенный на компьютере график сближения частот $\Delta_\omega(n) = \tilde{\omega}_1(n) - \bar{\omega}(n)$ в процессе сборки для рассматриваемого случая, представлен на рис. 1. Видно, что в процессе установки элементов одного ряда (например, $k=1, n=\overline{1,12}$) частоты сближаются медленно ($\Delta_\omega(n) \approx 1,2$), что объясняется незначительностью изменения суммарного момента инерции БКК. При переходе с текущего ряда на следующий ($k=2, n=13$) момент инерции резко возрастает пропорционально квадрату удаления присоединяемой массы от центра инерции. Это вызывает соответствующее скачкообразное сближение частот ($\Delta_\omega \approx 0,4$).

Указанное сближение частот, существенно влияющее на динамику управления БКК, отчетливо прослеживается и в общем случае PD-управления многочастотным изменяющимся объектом. Для анализа используется компьютерное построение годографа траекторий корней в пространстве трех измерений $(\alpha, j\omega, n)$, по третьей оси которого $0n$, дополняющей плоскость комплексного переменного $(\alpha, j\omega)$ до ортогонального трехгранника, откладывается порядковый номер присоединяемого в процессе сборки строительного элемента. Такой подход к анализу динамических свойств системы позволяет непосредственно, связать конфигурацию распределения корней, с текущим значением варьируемого параметра n .

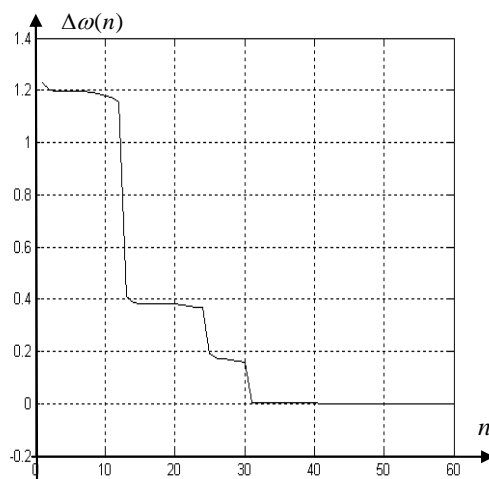


Рис. 1. График сближения частот

Получаемый годограф траекторий корней показывает возможности используемого PD-алгоритма управления движением БКК на уменьшение частоты и амплитуды упругих колебаний. Исследуется поведение траекторий корней характеристического уравнения системы с линейным PD-управлением при увеличении параметра n . Имеющая место заметная удаленность начальных точек траекторий корней $\bar{\lambda}(n_{\min})$ и $\tilde{\lambda}(n_{\min})$ друг от друга вдоль оси $j\omega$ указывает на несущественность влияния доминирующей моды $\tilde{\varphi}_1(t)$ на динамику жесткого движения $\bar{\varphi}(t)$ БКК. При увеличении варьируемого параметра n указанное свойство в целом сохраняется в области низких значений n . При переходе с одного уровня сборки на следующий, наблюдается скачкообразный характер сближения корней за счет уменьшения частоты упругих колебаний. С ростом n расстояние между корнями, соответствующими «жесткому» и «упругому» движениям, уменьшается и, начиная с некоторого номера n^* , расстояние между корнями становится настолько малым, что для обеспечения желаемой динамики управления БКК необходимо применять более сложные алгоритмы.

3 Формирование вариантов алгоритмов управления БКК в процессе сборки

Наличие трех последовательно сменяющихся при сборке фаз существования БКК (твердое тело → упругая механическая система → существенно нежесткая механическая система), требует особого подхода к решению задачи управления движением на каждой фазе.

Управление в начальной фазе существования БКК в виде твердого тела основывается на использовании базового алгоритма, представляющий собой дискретный аналог PD-алгоритма. Для конкретности изложения и учитывая, что в последние годы неотъемлемым элементом системы управления космических аппаратов является БЦВМ, базовый алгоритм примем в виде

$$(5) \quad u(t_i) = -k_0[k_1\hat{\varphi}(t_i) + k_2\Delta\hat{\varphi}(t_i)], \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Использование алгоритма (5) при управлении "жестким" движением конструкции нередко вызывает неконтролируемое возбуждение упругих ее колебаний. В (5) обозначено: $\hat{\varphi}$ – оценка измеряемой координаты φ , для получения которой используется s значений $\varphi(r)$, $r = \overline{1, s}$ на периоде дискретности T_0 ; $\Delta\hat{\varphi}$ вычисляется как первая разность $\varphi(t_k)$; для дискретной системы управляющее воздействие $m(u)$ является разрывным и сохраняет на периоде дискретности T_0 постоянное значение.

В режиме стабилизации, который обычно является основным режимом управления, наличие нелинейностей типа зоны нечувствительности или гистерезиса в начале координат, образуется предельный цикл. Этот цикл является устойчивым, отвечает требованиям обеспечения желаемой динамики процессов стабилизации и принят за эталонное движение. К этому движению, принимаемому за невозмущенное движение, в соответствии с условием малости влияния упругих колебаний конструкции на точность стабилизации, определяемое в виде неравенства

$$(6) \quad |\tilde{\varphi}| = |\varphi - \bar{\varphi}| \leq \varepsilon_0, \quad \varepsilon_0 = \text{const},$$

должны стремиться процессы управления БКК на всех последующих этапах сборки объекта.

После присоединения к несущему телу первого нежесткого элемента космическая конструкция переходит в фазу существования в виде упругой механической системы вида (3). В этой фазе управляющие воздействия, формируемые любым базовым алгоритмом, включая (4) и (5), как правило, оказывают раскачивающее влияние на упругие колебания конструкции. Упругие колебания, деформируя предельный цикл, приводят к нарушению условия (6) и, соответственно, ухудшают точность стабилизации. При отсутствии специальных мер, изменяющих стратегию управления, возросшая амплитуда колебаний может оказаться причиной неустойчивости системы, выражающейся в захвате регулятора упругими колебаниями [3, 5]. Другой проблемой при управлении БКК в фазе упругой механической системы является возрастающий в процессе наращивания каркаса момент инерции конструкции, ведущий к снижению эффективности управления и к увеличению динамической ошибки. Основной проблемой при синтезе системы управления БКК является нарастающая в процессе сборки размерность модели (3), сопровождающаяся скачкообразным изменением всех ее параметров при постепенном падении нижней границы диапазона собственных частот до значений, приближающихся к частотам базового управления (рис. 1).

Управление на этапах существования БКК в виде упругой механической системы основана на адаптивной настройке базового алгоритма, которая обеспечивает стабилизацию как основного ("жесткого") движения объекта, так и упругих колебаний его конструкции. Неточность задания механических параметров собираемой конструкции (следовательно, коэффициентов модели) и отсутствие информации о начальных значениях возникающих на каждом этапе сборки новых упругих компонент (в сочетании с другими проблемами управления БКК) требуют не только своевременной смены стратегии управления при переходе конструкции из одного класса механических систем в другой, но и применения принципов адаптивного управления на интервале развития объекта внутри каждого класса выше первого.

На этапе существования БКК в виде упругой механической системы число тонов колебаний относительно невелико, собственные частоты упругих колебаний конструкции достаточно высоки и удалены от частот управления "жестким" движением объекта (рис. 1). Всё это позволяет в качестве стратегии управления движением БКК принять за основу предложенный в [9] подход к управлению механическими системами с нежесткой конструкцией, основанный на использовании подсистемы интеллектуальной диагностики, осуществляющей адаптивную настройку базового алгоритма, которая обеспечивает стабилизацию как основного ("жесткого") движения объекта, так и упругих колебаний его конструкции.

Кратко суть этого подхода заключается в следующем.

Возбуждение упругих колебаний конструкции и изменение их амплитуды при дискретном управлении происходит в каждой точке переключения управляющего воздействия. Пусть

$\rho(t) = |\tilde{\varphi}(t)|$ – интенсивность колебаний конструкции, возбуждаемых базовым управлением основным ("жестким") движением БКК. При превышении интенсивности некоторого критического уровня $\rho_{кр}$ (в основном за счет роста доминирующей моды $\tilde{\varphi}_d$) возникает потеря устойчивости. Следовательно, величина $\rho(t)$ и проверка выполнения условия $\rho(t) < \rho_{кр}$ могут использоваться для диагностики "исправного" состояния системы и в качестве управляющего сигнала $u_a = f(\rho_{кр} - \rho(t))$ в контуре адаптации настраиваемого параметра λ базового алгоритма $u_0(x, \dot{x}, t, \lambda)$. При этом влияние базового алгоритма на характер изменения интенсивности $\rho(t)$ колебательной составляющей модели (1) может быть определено с помощью квазиогibaющей колебательного процесса $\tilde{\rho}(t, \lambda) = \text{Env}[\tilde{\varphi}(u(\square \lambda), t)]$ на интервале T_{sur} , равном нескольким периодам предельного цикла. Эту огибающую после двухступенчатой аппроксимации можно представить с помощью экспоненциальной функции $\tilde{\rho}(t, \nu(\lambda)) \approx ae^{\nu(\lambda)t}$. Найденное при этом значение величины $|\nu(\lambda)|$ определяет скорость изменения амплитуды колебаний. Знак $\text{sign } \nu$ определяет затухающий ($\text{sign } \nu = -1$) или расходящийся ($\text{sign } \nu = +1$) характер колебательного процесса.

Таким образом, для любого фиксированного значения $\lambda_* \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$, $([\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ – диапазон допустимых значений параметра λ), влияние регулятора на упругую компоненту может быть определено единственным числом $\nu_* = \nu(\lambda_*)$. Изменяя λ и вычисляя при этом показатель $\nu(\lambda)$, получим "модельную" функцию $\nu_d = \nu_d(\lambda)$, описывающую влияние базового алгоритма на упругие колебания БКК. Множество "модельных" функций $Y_d = \{\nu_d(\lambda)\}$, каждая из которых имеет конечное число локальных экстремумов, включая глобальный минимум [9], используется для адаптивной коррекции базового алгоритма, преследующей цель снижения интенсивности колебательной компоненты в случае ее близости к критическому уровню. Для формирования такого управления ориентацией БКК на каждом этапе сборки необходимо решать две следующие задачи: 1 – определить номер d доминирующей моды, признаком которой может служить идентифицируемое значение частоты $\tilde{\omega}_d$, $d \in \overline{1, j}$ доминирующей компоненты $\tilde{\varphi}_d$; 2 – используя найденное значение d , из хранящегося в базе данных массива $Y_d = \{\nu_d(\lambda)\}$ необходимо выбрать соответствующую "модельную" характеристику $\nu_d(\lambda)$, задающую новое значение $\lambda_1 \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$, при котором выполняются два условия $\text{sign}[\nu(\lambda_1)] = -1$ и $\nu(\lambda_1) = \nu_{min}$. При такой перенастройке базового алгоритма новое управление $m[u_1(\square \lambda_1)]$, сохраняя приемлемое качество управления "жестким" движением конструкции, одновременно обеспечивает максимальную скорость гашения доминирующей моды.

Под влиянием скорректированного базового управления доминирующая компонента упругих колебаний оптимальным образом демпфируется, в то время как амплитуды других упругих компонент могут увеличиваться до тех пор, пока одна из них не окажется доминирующей, что вызовет очередную процедуру перестройки параметра адаптивного алгоритма. Далее процессы последовательного подавления возникающих доминирующих упругих компонент повторяются в течение всего времени существования БКК в виде упругой механической системы.

Основная проблема в применении рассмотренного выше способа управления при переходе БКК в фазу существенно нежесткой механической системы состоит в потере возможности построения квазиогibaющей $\tilde{\rho}(t)$ на приемлемом для целей управления интервале наблюдения. Причиной этого является сближение низшей частоты упругих колебаний конструкции с частотой управления "жестким" движением БКК (рис. 1), вследствие чего возникают резонансные процессы, ускоренно ведущие к потере устойчивости системы.

В основу стратегии управления БКК на данной стадии сборки можно положить предложенный в [10] способ управления ориентацией упругого спутника с использованием оценок фазовых значений доминирующей моды в моменты переключения регулятора. Суть способа заключается в формировании временных задержек τ_β на включение управляющего воздействия в части точек

переключения до момента $t_j^* = t_j + \tau_\beta$ появления оптимальной фазы, при которой данное воздействие окажется стабилизирующим по отношению к доминирующей моде.

Оптимальным по фазе условием j -го переключения управления соответствует такое состояние системы $([\beta(t_j), \text{sign}(\dot{m}_j(u))])$, где β – фаза, при котором амплитуда доминирующей моды после переключения регулятора (t_j^+) примет наименьшее значение $\rho_d(t_j^+)_{\min} = \rho_d(t_j^-) - \mu_d$ из всех возможных для заданного направления переключения $\text{sign} \dot{m}_j$. Условия оптимального в указанном смысле переключения могут быть записаны в следующем виде:

$$(7) \quad \beta_j = \begin{cases} 2\pi k & \forall \text{sign} \dot{m}_j = +1, \\ \pi(2k + 1) & \forall \text{sign} \dot{m}_j = -1, \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

Минимальное время задержки реализации команды на переключение управления, например, в точке, характеризующейся состоянием $u(x(t_0)) = \varepsilon$, $\text{sign} \dot{m}(t_0) = -1$, вычисляется с учетом (7) по формуле:

$$(8) \quad \tau_\beta = \begin{cases} [\pi - \beta_d(t_0)] \tilde{\omega}_d^{-1} & \forall 0 \leq \beta_{d0} \leq \pi, \\ [3\pi - \beta_d(t_0)] \tilde{\omega}_d^{-1} & \forall \pi < \beta_{d0} \leq 2\pi, \end{cases}$$

где $\beta_{d0} = \beta_d(t_0)$ – фаза доминирующей компоненты в момент выполнения необходимого условия переключения регулятора: $\varphi(t_0) = \varepsilon$. В [10] показано, что для устойчивого управления нежесткой механической системы необходимо, по крайней мере, в половине из общего числа точек переключения на каждом периоде предельного цикла обеспечивать оптимальные по фазе условия переключения (7).

Блок-схема системы, реализующей фазовое управление с использованием (8) нежесткой конструкцией, представлена на рис. 2. Пунктиром выделен контур управления "жестким" движением БКК, содержащий дополнительное звено с переменными (перестраиваемыми) параметрами K_m, τ . K_m – переменный коэффициент усиления исполнительного устройства (ИУ), обеспечивает поддержание постоянного уровня эффективности управляющего воздействия $m_u = M_u K_m I_c^{-1}(n)$ на множестве n -фаз сборки БКК. Переменный коэффициент τ , управляемый сигналом τ_β с выхода информационного модуля подсистемы управления задержкой, обеспечивает фактическое переключение управляющего воздействия в соответствии с требованиями базового алгоритма по выполнению оптимальных условий переключения (7). Наличие информации о текущем значении фазы доминирующей моды обеспечивает включенный параллельно основному контуру фильтр Калмана, решающий задачу оценивания доминирующей компоненты в реальном времени [7].

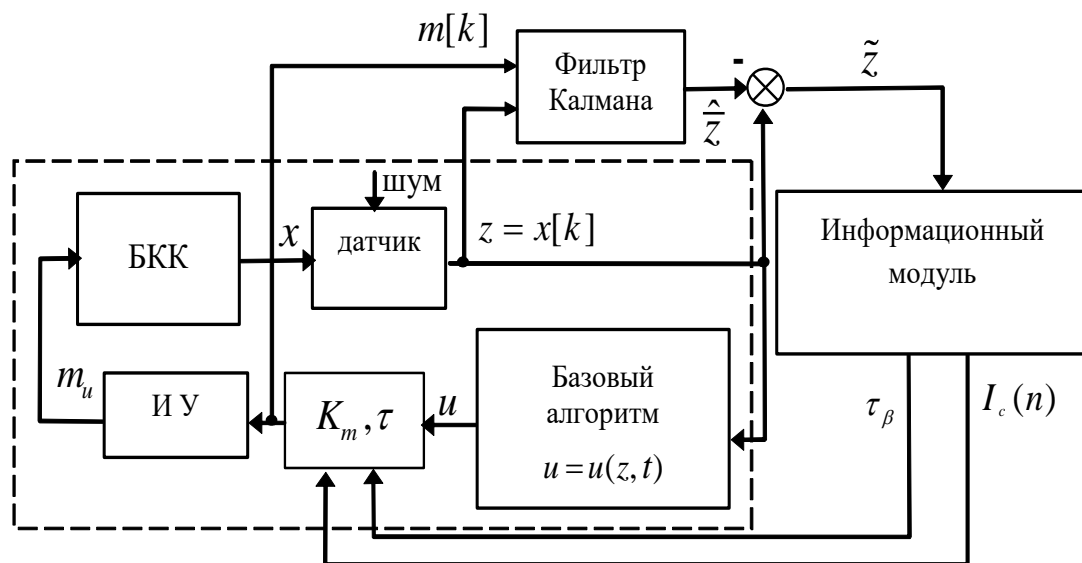


Рис.2. Блок-схема системы управления БКК

Было проведено компьютерное моделирование системы управления (рис. 2) с алгоритмами фазового управления существенно нежесткой конструкцией на одном из этапов сборки БКК. В качестве объекта, отвечающего уравнениям (3) при $n=6$, принята большая конструкция с моментом инерции $I_c(n=6)=10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Доминирующей упругой компонентой в начальной фазе управления является \tilde{x}_1 . Эта же компонента наиболее подвержена влиянию управляющих воздействий, т.к. обладает наибольшей среди остальных степенью возбудимости. При оценке работоспособности системы фазовой стабилизации БКК на начальной стадии моделирования ($t \leq t_1 = 220c$) контур подсистемы управления задержкой исполнения команды базового алгоритма отключен. При этом управляющие воздействия $m(u_0)$ основного контура системы стабилизации вызывают увеличение амплитуды колебаний до значений $\tilde{A}_d \approx 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$, близких к критическому.

Для предотвращения развития процесса захвата регулятора при $t_1 = 220c$ был введен в действие алгоритм фазового управления $m(u_{0,\beta})$. Результаты моделирования показали, что использование алгоритмов фазового управления привело в итоге к быстрому снижению амплитуды колебаний доминирующей упругой компоненты до исходного уровня.

Заключение

Предложенные подходы, реализующие адаптивную коррекцию базового алгоритма с использованием получаемых оценок координат и параметров механической структуры БКК, а также метод фазового управления, позволяют стабилизировать упругие колебания собираемой БКК без дополнительных затрат энергии. Использование в законе управления активной компенсации влияния упругих частей конструкции БКК на угловое движение позволяет за счет оптимального выбора коэффициентов в алгоритме управления не только значительно сократить время их затухания, но и обеспечивает безопасное координированное взаимодействие с КРМ в процессе сборки на орбите.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-08-01708).

Литература

1. <http://assemblingospace.ru>
2. Flores-Abad A., Ma O., Pham K. and Ulrich S. A review of space robotics technologies for on-orbit serving // Progress in Aerospace Sciences. 2014. No. 68. – P. 1-26.
3. Земляков С.Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Некоторые проблемы управления при роботизированной сборке больших космических конструкций на орбите // Автоматика и телемеханика № 8. 2006. – С.89-116.
4. Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники: монография / С. Н. Васильев и др.; под ред. акад. РАН С. Н. Васильева. – М.: Машиностроение, 2015. – 519 с.
5. Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В. М. Метод построения математической модели дискретно развивающейся большой космической конструкции // Автоматика и телемеханика. 2003. № 10. – С. 15-33.
6. Kabganian, M. and Shahravi, M. Attitude Tracing and Vibration of Flexible Spacecraft Using Implicit
7. Adaptive Control Law // Proc. 16 IFAC Sympos. Automat. Control Aerospace. Vol. 1. 2004. – P. 91-97.
8. Ермилов А. С., Ермилова Т. В. Оценивание ненаблюдаемых координат упругих колебаний больших космических конструкций с гиросиловым приводом // Автоматика и телемеханика. 2013. № 9. – С. 143-156.
9. Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В. М. Метод формирования траектории орбитальной сборки большой космической конструкции на основе алгоритмов оптимизации на графах // Автоматика и телемеханика. 2005. № 9. – С. 12-26.
10. Rutkovsky V.Yu., Zemlyakov S.D., Sukhanov V.M., Glumov V.M. The design method of robust control by flexible spacecraft // 16-th Congress IFAC, Prague, Czech, July 4-8, 2005. Full paper (Mo-E02-TO/6) on CD-ROM.
11. Rutkovsky V.Yu., Sukhanov V.M. Attitude control algorithms in flexible satellites using information on the phase of elastic oscillations // Proceedings of the 6-rd IFAC Symposium on Automatic Control in Space. 1974. – P. 41-47.