

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРИ СБОРКЕ НА ОРБИТЕ БОЛЬШОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА**

**Глумов В.М., Ермилов А.С.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,*

*Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

*vglum@ipu.ru, yermas@ipu.ru*

*Аннотация: Рассматриваются особенности динамики управляемого движения нежестких больших космических конструкций с дискретно изменяющимся в процессе сборки на орбите числом степеней свободы. Определяются задачи управления движением такого типа нестационарных объектов, Предлагаются алгоритмы, обеспечивающие устойчивость по отношению к упругим колебаниям и высокоточное управление.*

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

## **Введение и постановка задачи**

Собираемые на орбите большие космические конструкции (БКК) представляют собой упругие многочастотные колебательные механические системы с дискретно изменяющимся во времени большим числом степеней свободы. В [1] 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.

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: *a)* твердому телу; *b)* деформируемой механической системе с несущественным влиянием упругих колебаний конструкции на динамику управления; *c)* упругой многочастотной конструкцией, 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.

## **1 Математическая модель углового движения 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. С целью получения более достоверных результатов при исследовании динамики углового движения БКК на основе предыдущей математической модели [2] разработана более полная математическая модель. 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. 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. При этом 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 силовым гироскопическим приводом и с активной компенсацией влияния колебаний упругих частей конструкции БКК на динамику углового движения при координированном взаимодействии с космическим манипуляционным роботом в алгоритме совместного оценивания и идентификации использовалась более полная математическая модель. В этой модели предполагалось, что все параметры тонов упругих колебаний не постоянны. Решается задача оптимизации коэффициентов при координатах тонов упругих колебаний при формировании закона управления БКК с активной компенсацией с точки зрения быстродействия.

## **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 [3]. 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 плоско-параллельное движение всех составляющих БКК тел.

Изменение динамических свойств промежуточных структур собираемой БКК выражено через изменение коэффициентов модели, 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. 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.

Из приведенных графиков изменения динамических коэффициентов в процессе сборки БКК видно, 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.

Анализируются 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  $n$ . 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 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. 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, в соответствии с условием малости влияния упругих колебаний конструкции на точность стабилизации, должны стремиться процессы управления БКК на всех последующих этапах сборки объекта.

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. 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 описанные процессы последовательного подавления возникающих доминирующих упругих компонент повторяются в течение всего времени существования БКК в виде упругой механической системы.

Управление БКК в фазе существенно нежесткой механической системы основано на использовании оценок фазовых значений доминирующей упругой компоненты в моменты переключения регулятора. Суть способа заключается в формировании временных задержек на включение управляющего воздействия в части точек переключения до момента появления фазы, при которой данное воздействие окажется стабилизирующим по отношению к доминирующей компоненте. Предлагается блок-схема системы, реализующей стратегию фазового управления существенно нежесткой конструкцией.

### **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 компенсацией 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 космическим манипуляционным роботом в процессе сборки на орбите.

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

### **Литература**

1. 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 .
2. Ермилов А.С., Ермилова Т.В. Оценивание ненаблюдаемых координат упругих колебаний больших космических конструкций с гиросиловым приводом // Автоматика и телемеханика. № 9. 2013. – С. 143-156.
3. 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. № 9. 2005. – С. 12-26.