

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СБОРКИ НА ОРБИТЕ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА**

Новый этап освоения космоса предполагает сборку на околоземной орбите космических конструкций (КК), 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 КК остается до настоящего времени практически нерешенной. 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 КК непосредственно на орбите. Недостаточно уделяется внимания вопросам стабилизации и управления ориентацией КК как многомерной механической системы с дискретно изменяющейся в процессе ее сборки структурой.

Таким образом, существует необходимость дальнейшего изучения как вопросов разработки принципов сборки КК на орбите, так и методов проектирования систем управления дискретно изменяющимися в процессе сборки КК. При этом следует учитывать, что, возможно, практически единственным способом поэлементной сборки в космосе является использование свободно летающих космических роботов-манипуляторов (КРМ) [2, 3].

В настоящей работе приводится анализ и возможные пути решения проблем управления, возникающих в процессе сборки КК на орбите с помощью КРМ.

### **1. Проблемы в решении задач управления КК в процессе сборки на орбите**

Основные проблемы, возникающие при проектировании систем управления дискретно изменяющимися в процессе сборки КК, совпадают с трудностями управления собранной большой КК:

1. Большая размерность модели, нарастающая по мере развития КК в процессе сборки. Возникающие из-за этого трудности синтеза регулятора преодолеваются путем редукции математической модели КК [4]. Однако, «потерянные» при этом

в редуцированной модели координаты, учитывающие колебания упругих элементов, возбуждаются в процессе управления, приводя к «излишнему управлению» и давая не только ухудшение точности, но иногда и потерю устойчивости системы. Необходимые для решения проблемы требования к проектируемой системе управления КК состоят в обеспечении устойчивости и показателей качества управления в условиях изменения параметров и самого вида модели, т.е. синтеза алгоритмов, удовлетворяющих условиям робастного управления объектом на всем жизненном цикле его существования [4].

2. Плохая определенность моделей КК, вызванная невозможностью в наземных условиях выполнить испытания полностью собранной КК, позволяющие уточнить коэффициенты ее модели. Решение проблемы ищется на пути использования различных методов идентификации и последующей коррекции параметров модели КК по результатам эксперимента на орбите. Используя результаты идентификации параметров КК

на последовательности этапов ее развития, можно осуществлять соответствующую настройку регулятора, реализуя тем самым те или иные методы адаптивного управления, что нередко позволяет обеспечить в системе свойства робастности [5, 6].

3. Проблема недостаточности информационного обеспечения системы управления КК имеет место из-за ограниченности традиционно используемого при управлении космическими аппаратами измерительного комплекса при исключительно большом числе степеней свободы КК, т.е. высокой размерности вектора координат, подлежащих регулированию. Это противоречие провоцирует неконтролируемое возрастание координат, которые соответствуют упругим компонентам. Возможным решением проблемы может быть использование тех или иных методов оценивания неизмеряемых координат [5, 7], применение интеллектуальных средств диагностики и прогнозирования для компенсации информационной недостаточности при управлении.

4. Специфической проблемой при проектировании систем управления изменяющейся при сборке КК является необходимость обеспечить устойчивость и требуемое качество управления на всех этапах сборки (т.е. для всей последовательности дискретно изменяющихся моделей КК [4]) при условии использования единого для всех этапов исполнительного органа. Хотя исследование этой проблемы находится в начальной фазе, тем не менее, уже выявлена целесообразность использования компьютерных методов оперативного вывода уравнений движения объектов с упругой конструкцией [8] для формирования последовательности моделей КК с помощью бортовой вычислительной

техники. Такой подход упрощает решение задач управления ориентацией конструкции в процессе орбитальной сборки.

В зависимости от типа и назначения собираемой КК можно принять один из трех известных способов сборки: а) поблочная сборка методами автономной стыковки; б) незначительные сборочные работы могут выполнить космонавты; в) для проведения поэлементной сборки решетчатых крупномасштабных КК различного назначения целесообразно применять способ автоматизированной сборки с помощью свободнолетающих КРМ. Именно этот способ сборки КК, освобождающий человека от опасных работ в открытом космосе, принимается далее в качестве основного.

## 2. Вопросы управления КРМ при их использовании в сборке КК на орбите

При использовании КРМ в качестве транспортного средства для доставки строительных элементов с базового корабля к месту сборки КК и, одновременно, в качестве оператора-сборщика необходимо обеспечить три основных условия успешного завершения сборочной операции, поясняемых представленной на рис. 1 кинематикой фазы присоединения детали к КК:

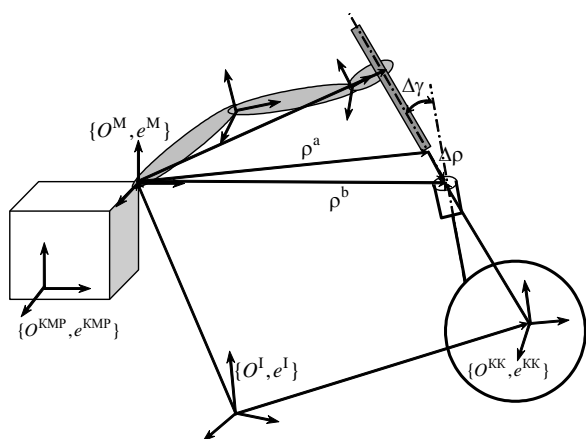


Рис. 1. Системы координат и конфигурация взаимодействующих объектов (КРМ и КК) на завершающей стадии стыковки.

- совмещение соединяемых посадочных мест строительного элемента и ответной части конструкции ( $\Delta\rho = \rho^a - \rho^b = 0$ );
- относительные скорости стыковочных точек сопрягаемых деталей должны быть пренебрежимо малы ( $\Delta\dot{\rho} \approx 0$ );
- совпадение пространственного углового положения оси устанавливаемой детали с направлением оси соответствующей приемной части конструкции ( $\Delta\gamma = 0$ ).

К числу задач, требующих рассмотрения при разработке систем управления полным вектором движений свободно летающим КРМ, относятся следующие задачи.

1. Определение оптимальной структуры и параметров механической системы КРМ, обеспечивающей возможность выполнения сборочных операций с учетом существенной подвижности основания манипулятора и разнообразия используемых при сборке строительных элементов КК [9].

2. Формирование аппаратного и измерительно-информационного комплекса, обеспечивающего высококачественное функционирование КРМ при решении последовательности задач, сопровождающих процесс сборки КК. Сложность вопроса порождается с одной стороны множественностью и разнообразием функций, выполняемых КРМ при сборке КК на орбите и вытекающей отсюда необходимостью иметь высокий уровень информационного обеспечения, и с другой стороны почти полным отсутствием практического опыта создания и использования таких объектов космической техники. Представляется, что в качестве отправной точки при решении задачи можно принять приборные конфигурации систем управления летающим роботом, предложенные в работах [2, 10].

3. Синтез алгоритмов высокоточного и экономичного управления на множестве режимов функционирования КРМ, обеспечивающих реализацию безопасного выполнения работ при сборке КК, включая режимы манипуляционного обслуживания «в состоянии зависания» над рабочей зоной, в которых с максимальной остротой проявляются известные сложности управления манипулятором при наличии существенной подвижности основания [2, 3]. В целом, различные алгоритмы управления летающим роботом, не учитывающие специфики, связанной с осуществлением процессов сборки КК, предлагались и исследовались во многих работах. Несомненно, результаты этих работ могут быть использованы как исходные при синтезе специализированных алгоритмов управления космическими роботами-сборщиками КК.

4. Оптимизация вектора управления с учетом избыточности числа управляющих воздействий, формируемых исполнительными органами подсистем управления движениями КРМ и приводами манипуляторов и имеющих возможность принимать участие в процессе присоединения строительных элементов к уже собранной части КК.

5. Проблема управления поступательным движением робота в процессе перемещения полезного груза с помощью манипулятора. В этом режиме изменяющаяся конфигурация КРМ (рис. 1) приводит к смещению центра масс системы относительно фиксированной точки приложения управляющих сил. При этом возникает возмущающий момент, дестабилизирующий угловое положение объекта, что требует особого рассмотрения при синтезе управления полным движением КРМ [2].

### **3. Специальные вопросы взаимодействия КРМ и КК в процессе сборки на орбите**

До настоящего времени не уделено достаточного внимания некоторым специальным вопросам управления взаимодействующими в процессе сборки космическими объектами типа КРМ и КК:

1. Обеспечение условий безопасного функционирования КРМ в непосредственной близости к собираемой им КК. Одним из возможных средств реализации условий безопасности является, например, использование предельно низких («ползучих») скоростей при сближении КРМ с КК и при манипуляционных перемещениях присоединяемых к КК строительных элементов. Использование режима «зависания» КРМ над местом установки детали (бесконтактный метод сборки) [2] также повышает степень безопасного взаимодействия участников сборочного процесса.

2. Использование «технологических» разворотов КК к приближающемуся роботу с грузом, позволяющих исключить процедуру облета КК и одновременно снизить затраты топлива, необходимого для управления траекторным движением КРМ.

3. Синтез алгоритмов согласованного управления взаимодействующими в процессе сборки объектами при решении общей для них задачи вида  $\Delta r, \Delta \gamma \rightarrow 0$  (рис. 1).

4. Исследование проблемы возмущений вектора координат, которые соответствуют упругим компонентам КК, вызываемых ударными воздействиями присоединяемых с помощью КРМ строительных элементов.

## **Заключение**

Проведенный в работе анализ современного состояния проблемы применения свободно летающих КРМ для орбитальной сборки КК показывает, что, несмотря на сравнительно большой объем исследований, выполненных в области теории и систем управления движением каждого из рассмотренных типов объектов в отдельности, в целом задача сборки КК указанным способом остается нерешенной. Тем не менее, полученные к настоящему времени результаты могут быть приняты за основу для успешного решения рассматриваемой проблемы. Анализ этих результатов позволяет сформулировать одну из возможных концепций комплексного подхода к решению проблемы роботизированной сборки КК на орбите, заключающуюся в осуществлении синтеза алгоритмов всех подсистем объектов, участвующих в сборочном процессе, с учетом выполнения основных требований, которые позволяют обеспечить гарантированную безопасность взаимодействия объектов в процессе сборки, высокую результирующую точность и надежность функционирования обоих участников процесса при выполнении каждого

этапа сборки, минимальные суммарные затраты расходуемого запаса рабочего тела на реализацию управления объектами до окончательного завершения сборки КК.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00073).

#### **Библиографический список**

1. <http://assemblingonspace.ru>
2. Васильев С.Н. Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники: монография [Текст]/ Васильев С.Н. и др.; под ред. акад. РАН С.Н. Васильева. – М.: Машиностроение, – 2015. – 519 с.
3. Глумов В.М. Обеспечение захвата цели манипулятором свободнолетающего космического робота [Текст] / В.М. Глумов, В.М. Суханов. – Самара: Издательство СНЦ РАН. – 2018. – 145 с.
4. Глумов В.М. Метод формирования траектории орбитальной сборки большой космической конструкции на основе алгоритмов оптимизации на графах [Текст] / В.М. Глумов, И.Н. Крутова, В.М. Суханов // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 9. – С. 12-26.
5. Ермилов А.С. Оценивание ненаблюдаемых координат упругих колебаний больших космических конструкций с гиросиловым приводом [Текст] / А.С. Ермилов, Т.В. Ермилова // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 9. – С. 143-156.
6. Рутковский В.Ю. Комбинированное релейно-адаптивное управление ориентацией деформируемого космического аппарата [Текст] / В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 12. – С. 124-136.
7. Силаев А.В. Методы оценивания огибающей упругих колебаний деформируемого космического аппарата [Текст] / А.В. Силаев, В.М. Суханов // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 4. – С.76-90.
8. Глумов В.М. Некоторые особенности компьютерного вывода уравнений движения связки механических систем и их декомпозиции [Текст] / Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 5. – С. 83-96.
9. Богомолов В.П. Проектирование оптимальной механической структуры свободнолетающего космического робототехнического модуля как объекта автоматического управления. I, II [Текст] / В.П. Богомолов, В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 5. – С. 27-40. – № 6. – С. 75-86.

10. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических устройств: Учеб. пособие. [Текст] / С.А. Воротников. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 384 с.