

**Динамика системы управления космическим манипуляционным роботом с активным отображением сил и моментов.**

ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, [vyatoslavdm@gmail.com](mailto:vyatoslavdm@gmail.com), 2012

Космические манипуляционные роботы (КМР) позволяют реализовать новые технологии на борту и вне космических аппаратов (КА), сократить затраты на ремонт и обслуживание КА, повысить эффективность и безопасность работ в открытом космосе.

В настоящее время наибольшее развитие получили системы управления КМР, в которых не предусматривается отображение оператору сил и моментов взаимодействия с внешней средой, а именно :

- управление с использованием рукояток вращательного и поступательного движения; этот способ применяется, главным образом, при управлении по вектору скорости.
- управление с использованием виртуальных пультов, формируемых на дисплеях ЭВМ.

Применение таких систем для выполнения монтажных и сборочных операций, а также операций обслуживания, при которых возникает механический контакт между КМР и объектами внешней среды, крайне затруднено.

Эффективность КМР при выполнении контактных операций значительно повышается при управлении с использованием средств отображения оператору сил и моментов контактного взаимодействия [1]. В докладе рассматриваются структуры подобных систем и способы их реализации с использованием штатных образцов манипуляционных роботов.

Структурная схема такой системы приведена на рисунке 1.

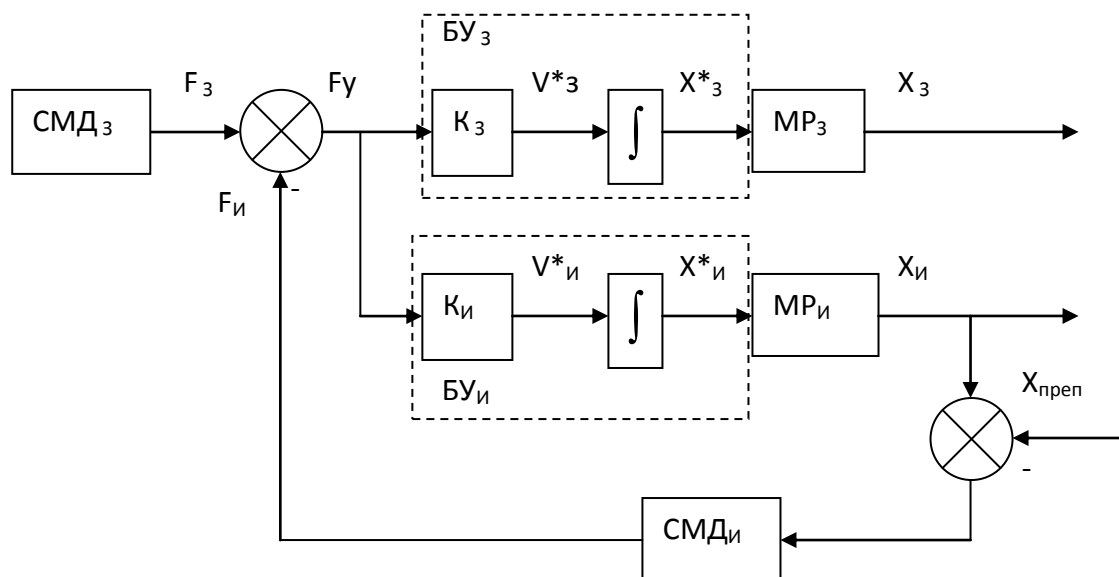


Рисунок 1 – Структурная схема

На рисунке приняты следующие обозначения:

СМДз – силомоментный датчик задающего МР

СМДи – силомоментный датчик исполнительного МР

БУз – блок управления задающим МР

БУи – блок управления исполнительным МР

$K_z$  – передаточная функция блока управления МРз

$K_{и}$  – передаточная функция блока управления МРи

МРз – задающий МР

МРи – исполнительный МР

$F_z$  – вектор сил и моментов, регистрируемых на СМДз

$F_{и}$  – вектор сил и моментов, регистрируемых на СМДи

$F_y$  – ошибка по силам и моментам

$V^*_{z}$  – плановые скорости МРз

$V^*_{и}$  – плановые скорости МРи

$X^*_{z}$  – плановые координаты МРз

$X^*_{и}$  – плановые координаты МРи

$X_z$  – реальные координаты МРз

$X_{и}$  – реальные координаты МРи

$X_{преп}$  – координаты препятствия.

Работа системы подчинена следующему алгоритму. Оператор воздействует на рукоятку, размещенную на 6-компонентном силомоментном датчике (СМДз). СМДз закреплен на захватном устройстве одного из манипуляторов. Это манипулятор обозначен МРз и используется в качестве задающего устройства. Датчик регистрирует силы и моменты оператора и передает их в блоки управления задающим и исполнительным манипуляторами БУз и БУи, соответственно. Блоки управления рассчитывают в зависимости от сил и моментов по заданному закону (линейному, либо нелинейному) линейные и угловые скорости схватов задающего и исполнительного манипуляторов и интегрируют их, тем самым формируя траектории движения МР. Таким образом, осуществляется движение задающего и исполнительного роботов так, что исполнительный робот копирует движение задающего в некотором масштабе.

ЗУМ исполнительного МР также оборудован силомоментным датчиком СМДи. Датчик СМДи регистрирует силы и моменты контактного взаимодействия КМР с внешними объектами. Эти силы и моменты возникают, когда координаты МРи совпадают с координатами препятствия  $X_{преп}$ .

Система обладает свойствами обратимости. Так, перемещение и задающего и исполнительного МР будет осуществляться при воздействии как на СМДз, так и СМДи. Благодаря этому происходит отображение оператору сил и моментов взаимодействия КМР с внешней средой.

Реализация описанной системы выполнена на базе стенда, включающего промышленные роботы Kawasaki FS20N и Kawasaki FS03N, силомоментные датчики SCHUNK FT-Delta SI-330-30. Программное обеспечение стенда создано на основе Robot Operating System (ROS).

ROS предоставляет:

- Наборы готовых драйверов для различных робототехнических систем (массовые образцы промышленных роботов, захватных устройств)
- Наборы драйверов для различных датчиков и сенсоров (например, для Microsoft Xbox Kinect)
- Широкий спектр программного обеспечения, направленного на облегчение разработки и проектирования РТС, системы моделирования РТС

Фото подсистем стенда приведены на рисунке 2.

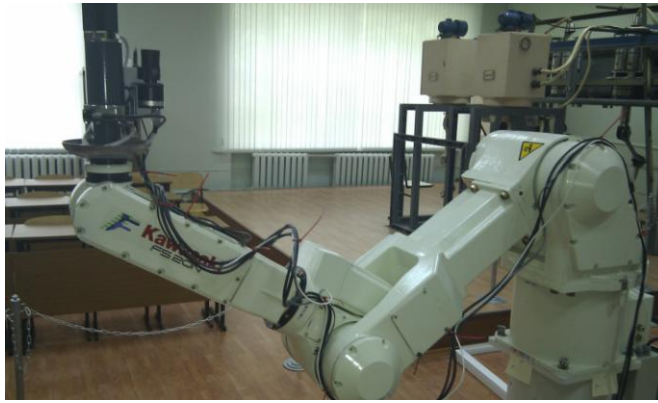


Рисунок 2а



Рисунок 2б

Рисунок 2 – Манипуляторы эксперимента (а – исполнительный МР, б – задающий МР)

Математическую основу исследований составляют методы моделирования и анализа динамики КМР как многомерных динамических систем [2,3]. Основу моделей динамики роботов составляют уравнения в форме блочных матриц [4]. Эти уравнения имеют вид

$$A\ddot{q} + b = \mu d + C^T M v + D^T F v,$$

где

$q$  –  $n$ -мерный вектор координат сочленений ИМ,

$b$  –  $n$ -мерный вектор центробежных и кориолисовых сил,

$M v$  –  $3n$ -мерный блочный вектор внешних моментов, действующих на звенья,

$F v$  –  $3n$ -мерный блочный вектор приложенных к звеньям внешних сил,

$C, D$  –  $3n \times n$ -мерные блочные матрицы, связывающие блочные векторы угловых и линейных скоростей звеньев в декартовом пространстве и вектор производных координат сочленений,

$A$  –  $n \times n$  – матрица инерционных коэффициентов,

$$A = c^T J c + D^T M D,$$

$J$  –  $3n \times 3n$  – блочная матрица, составленная из тензоров инерции в системах координат звеньев,

$M$  –  $3n \times 3n$  – блочная матрица, составленная из масс звеньев.

Применение блочных матриц существенно сокращает аналитические выражения и позволяет строить быстродействующие вычислительные алгоритмы в виде так называемых «прямых» и «обратных» соотношений [4] и в виде «косых сумм» (алгоритм «косынка») [5].

Эти уравнения дополняются соотношениями для решения прямых и обратных задач кинематики, а также уравнениями динамики приводов сочленений.

При моделировании контактных операций уравнения динамики представляются в операторной форме с использованием матричных передаточных функций (МПФ).

Эти уравнения имеют вид

$$X_z = K_z(p) W_z(p) (F_z - F_i)$$

$$X_i = K_i(p) W_i(p) (F_z - F_i)$$

$$F_i = X_i - X_{\text{преп}},$$

Где

$W_z(p)$  – МПФ задающего устройства,

Wi(p) – МПФ функция исполнительного устройства,

Kз(p) – МПФ контроллера задающего устройства,

Kи(p) – МПФ контроллера исполнительного устройства.

Особенностью системы является наличие в исполнительной системе контура обратной связи. Коэффициент передачи в этом контуре определяется деформацией объектов в зоне контакта, которые включают деформации, собственно, объектов манипулирования и СМД. Учитывая, что это деформации являются малыми, коэффициент передачи достигает больших значений. Последнее отрицательно сказывается на запасах устойчивости системы.

В докладе для анализа устойчивости системы предлагается использовать критерий Найквиста для многомерных систем [6] в интерпретации [5]. Приводятся примеры аналитических исследований динамических свойств системы и результаты экспериментов на базе представленного выше стенда.

1. Кулешов В.С., Лакота Н.А. (Ред.) Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. М.: Машиностроение, 1986., 328 с.
2. Лесков А.Г., Илларионов В.В., Лескова С.М., Полухин В.И. Разработка функционально-моделирующих стендов для подготовки операторов космических манипуляционных роботов. Звездный городок, тез. докл. 6-й МНТК «Пилотируемые полеты в космос», 2005, С.179-180.
3. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. – М.:Наука, 1978. – 416 с.
4. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – М.:Мир, 1989. – 624 с.
5. Лесков А.Г., Ющенко А.С. Моделирование и анализ робототехнических систем. – М.:Машиностроение, 1992. – 80 с.
6. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. - 3-е изд.,перераб.и доп. - М. : Наука, 1992. - 576 с.