

Управление связанным движением двуруких космических манипуляционных роботов.

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

Для двуруких роботов характерными являются операции, при которых «руки» МР (обозначим их как МР1 и МР2) образуют замкнутую кинематическую цепь. К таким операциям относятся операции удержания объекта на весу или при размещении объекта на некоторой опорной поверхности, операции переноса и кантования объектов и др. операции.

Для обеспечения согласованного движения рук применяют различные методы. В одном из них вводят в рассмотрение систему координат (СК), жестко связанную с объектом (в дальнейшем – «общая» СК). При этом управление системой «двурукий МР – объект» строится по стандартной для МР схеме, включающей планирование траектории движения начала общей СК и ориентации ее осей относительно неподвижной СК с последующим решением обратных кинематических задач (ОКЗ) для каждой из рук [1,2]. Решение ОКЗ осуществляют контроллеры МР1 и МР2. При этом должны быть заданы координаты инструментальных СК каждой из рук в их собственных базовых СК. Функционально контроллеры МР представляют тактический уровень управления МР (тактические системы управления – ТСУ). Результаты решения ОКЗ – законы изменения координат сочленений обрабатываются приводами сочленений (исполнительные системы управления – ИСУ МР). Общая структурная схема системы управления (СУ) двурукого МР представлена на рисунке 1. На ней показаны ТСУ и ИСУ МР1 и МР2, а также блок (ТСУ двурукого МР), осуществляющий планирование траектории СК и расчет координат МР1 и МР2.

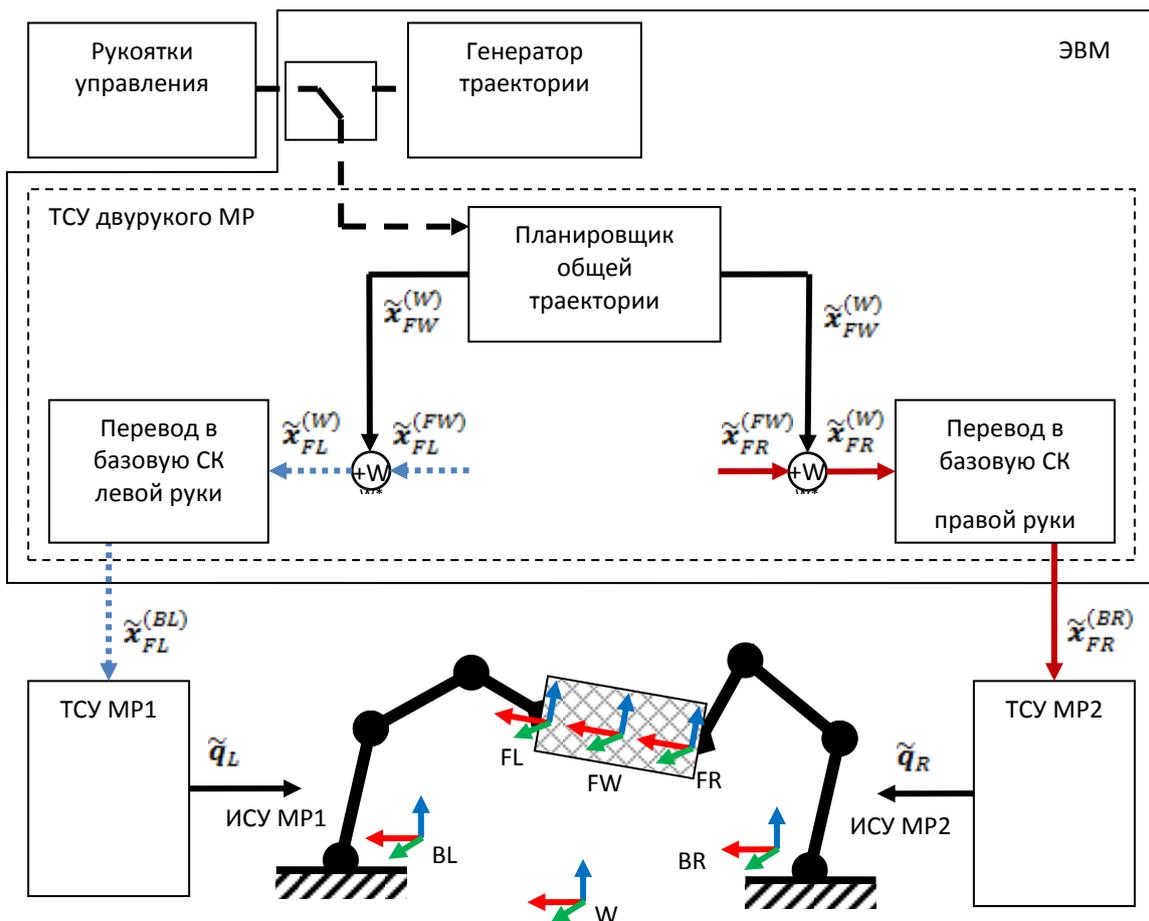


Рисунок 1 – Структура системы управления двурукого МР

На рисунке 1 обозначено:

$\tilde{x}_{FW}^{(W)}$  – плановые декартовы координаты начала общей (FW) СК двурукого МР в мировой (W) СК;

$\tilde{x}_{FL}^{(FW)}$ ,  $\tilde{x}_{FR}^{(FW)}$  – плановые координаты начал инструментальных СК рук (FL, FR) относительно СК FW, заданные в СК FW;

$\tilde{x}_{FL}^{(W)}$ ,  $\tilde{x}_{FR}^{(W)}$  – плановые координаты начал СК FL,FR в СК W;

$\tilde{x}_{FL}^{(BL)}$ ,  $\tilde{x}_{FR}^{(BR)}$  – плановые координаты рук в собственных базовых СК (BL и BR);

$\tilde{q}_L$ ,  $\tilde{q}_R$  – плановые координаты шарниров.

Соотношения для расчета параметров траектории левой руки имеют вид

$$\begin{cases} \tau_{FL,BL} = \tau_{FL,FW} \cdot \tau_{FW,W} \cdot \tau_{W,BL} \\ \mathbf{l}_{BL,FL}^{(BL)} = \tau_{W,BL}^T \cdot \left( \tau_{FW,W}^T \cdot \mathbf{l}_{FW,FL}^{(FW)} + \mathbf{l}_{W,FW}^{(W)} \right) + \mathbf{l}_{BL,W}^{(BL)}, \end{cases}$$

где

$\tau_{FL,FW}$  – матрица перехода от общей СК двурукого робота к инструментальной СК левой руки;

$\tau_{FW,W}$  – матрица перехода от мировой СК к рабочей СК двурукого робота, определяется траекторией движения объекта;

$\tau_{W,BL}$  – матрица перехода от мировой СК к базовой СК левой руки;

$\mathbf{l}_{FW,FL}^{(FW)}$  – смещение начала координат инструментальной СК левой руки относительно рабочей СК двурукого;

$\mathbf{l}_{W,FW}^{(W)}$  – смещение начала координат рабочей СК двурукого относительно мировой СК, определяется траекторией движения объекта;

$\mathbf{l}_{BL,W}^{(BL)}$  – смещение начала координат базовой СК левой руки относительно мировой СК.

Элементы матриц  $\tau_{FL,FW}$ ,  $\tau_{W,BL}$  и векторов  $\mathbf{l}_{FW,FL}^{(FW)}$ ,  $\mathbf{l}_{BL,W}^{(BL)}$  – постоянные величины.

Описанный выше подход удобно применить при выполнении операций, в которых не требуется контролировать возникающие в процессе движения МР силы и моменты реакций. Это могут быть либо манипуляции с объектами, допускающими деформацию, либо движение свободных рук (манипулирование «виртуальным» объектом) и тому подобные операции.

Однако по отношению к целому ряду операций применение этого метода либо ограничено, либо недопустимо. Отсутствие контроля сил и моментов реакций может привести к значительным нагрузкам на руки и переносимый объект и как следствие, - привести к разрушению объекта, срабатыванию систем защиты МР от перегрузки и другим явлениям, делающим выполнение операции невозможным.

Реакцию связей рук можно уменьшить, перейдя к управлению по методу «ведущий-ведомый» [3,4]. В этом методе одна из рук (ведущая) движется по плановой траектории, а другая (ведомая) – в направлении минимизации сил и моментов реакции.

В этом случае устанавливается соотношение, связывающее приведенные к общему центру (центру податливости) силы и моменты реакции связи и скорости, которые должен развить МР для их компенсации. Это соотношение имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_c^* \\ \boldsymbol{\omega}_c^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_t & C_c \\ C_c^T & C_o \end{pmatrix} \cdot \mathbf{h}_g^c,$$

где

$\mathbf{v}_c^*, \boldsymbol{\omega}_c^*$  – требуемые угловая и линейная скорости корректирующего движения;

$C$  – матрица податливости (6x6),

$\mathbf{h}_g^c$  – приведенный вектор сил и моментов реакций связи, действующих на схват манипулятора.

$\mathbf{h}_g^c$  целесообразно определить из соотношения:

$$\mathbf{h}_g^c = \mathbf{h}_{TFS}^c - \frac{1}{2} \mathbf{h}_G^c$$

Здесь

$\mathbf{h}_{TFS}^c$  – вектор сил и моментов, полученный от силомоментного датчика ведомой руки,

$\mathbf{h}_G^c$  – вектор сил и моментов от действия гравитационных сил на объект, полученный на основе его массогабаритных параметров.

Структура системы управления «ведущий-ведомый» двурукого МР представлена на рисунке 2. На рисунке обозначено:

$\mathbf{h}_{TFS}$  – силы и моменты, поступающие от СМД, установленного на запястье ведомой руки.

С целью исследования свойств рассмотренных выше алгоритмов выполнена серия экспериментов по управлению двуруким МР при связанном движении. Базу исследований составил полунатурный функционально-моделирующий стенд. Внешний вид экспериментального стенда представлен на рисунке 3.

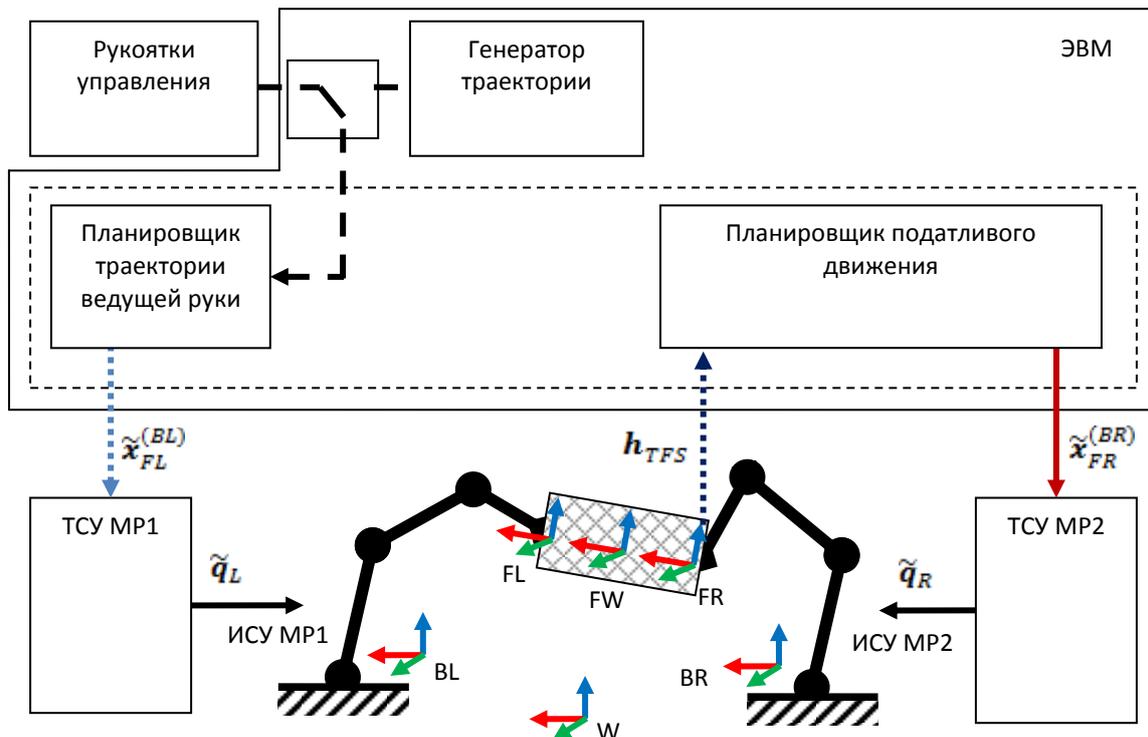


Рисунок 2 – Структура системы управления двурукого МР

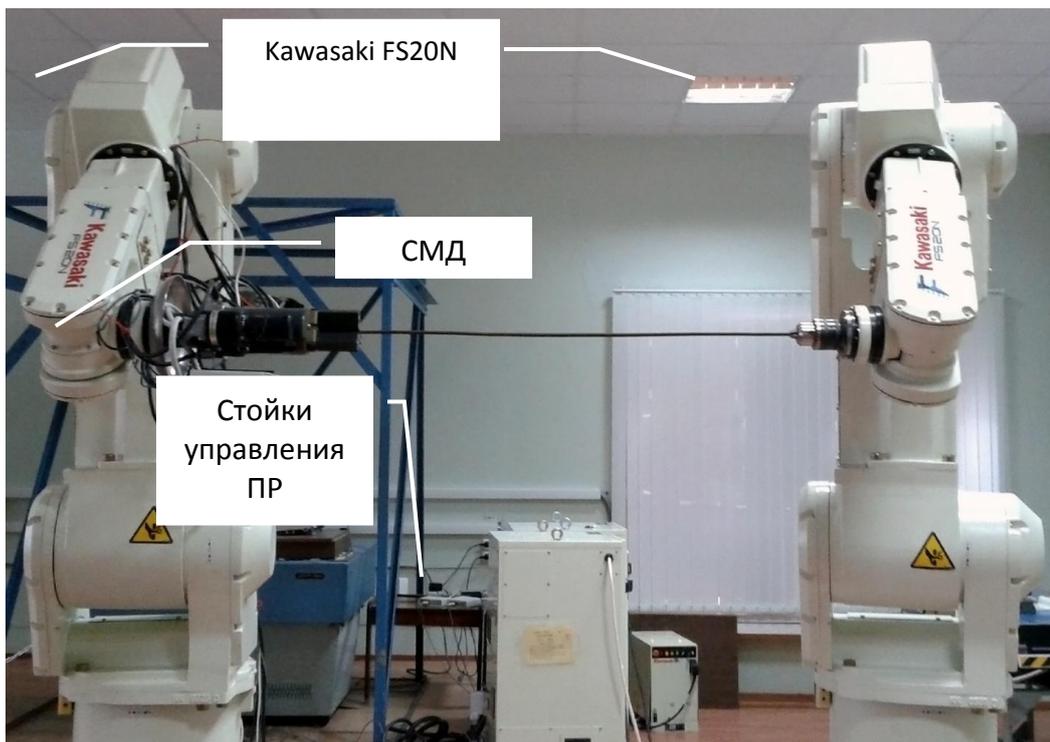


Рисунок 3 – Экспериментальный стенд «двурукий робот»

На рисунке 4 представлены процессы, зарегистрированные при движении одной из рук в свободном пространстве. На графике показаны плановая траектория движения рабочей точки ПР по одной из координат, реальная траектория, точки которой получены от ТСУ ПР, и измеренная ошибка.

Координата  $x$ , мм

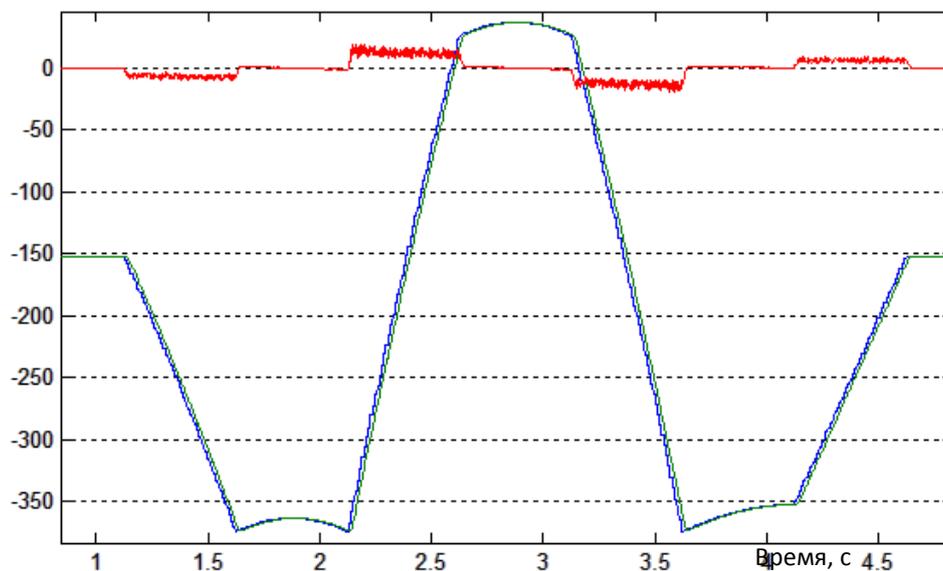


Рисунок 4 – Плановая (синий) и реальная (зеленый) траектории движения, ошибка (красный) при независимом движении ПР в свободном пространстве

МР обрабатывает плановую траекторию. Однако при этом наблюдается ошибка позиционирования, зависящая от скорости движения МР.

В следующем эксперименте оба ПР двигались согласованно (первый алгоритм), так, как будто они захватили «виртуальный» объект. Траектории движения общей СК, связанной с объектом, и каждой руки представлены на рисунке 5, серыми линиями связаны точки, соответствующие одному моменту времени.

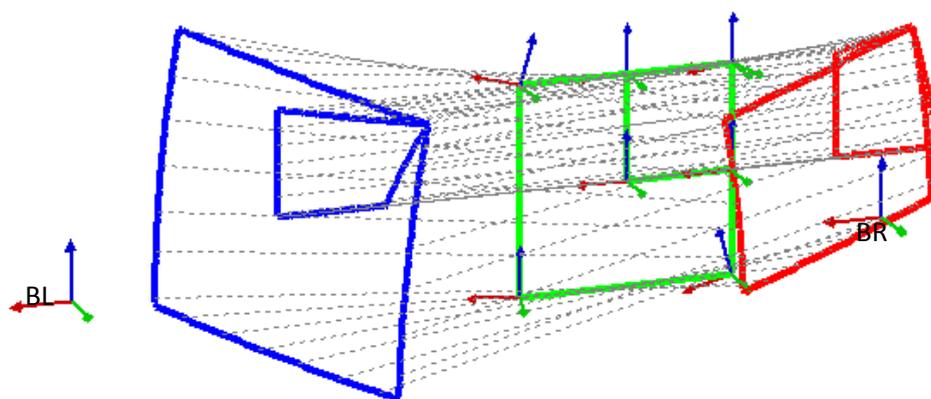


Рисунок 5 – Траектории рабочей СК (зеленый) левой (синий) и правой (красный) рук двурукого МР

На рисунке видна разница между траекториями движения МР1 и МР2 в абсолютном пространстве, что естественно в силу свойств алгоритма. Вместе с тем движение общей СК по плановой траектории обеспечивается.

В следующем эксперименте ПР были связаны гибкой металлической трубкой. Управление движением МР осуществлялось в соответствии с первым алгоритмом. В этом случае возникают силы и моменты реакции. Эти силы и моменты регистрировались с помощью СМД, установленном на схвате одного из МР. На рисунке 6 представлены соответствующие процессы. На графиках видно, что при

реализации первого алгоритма имеет место практически полное совпадение траекторий движения обеих рук. Однако при этом возникают значительные силы и моменты реакции связей.

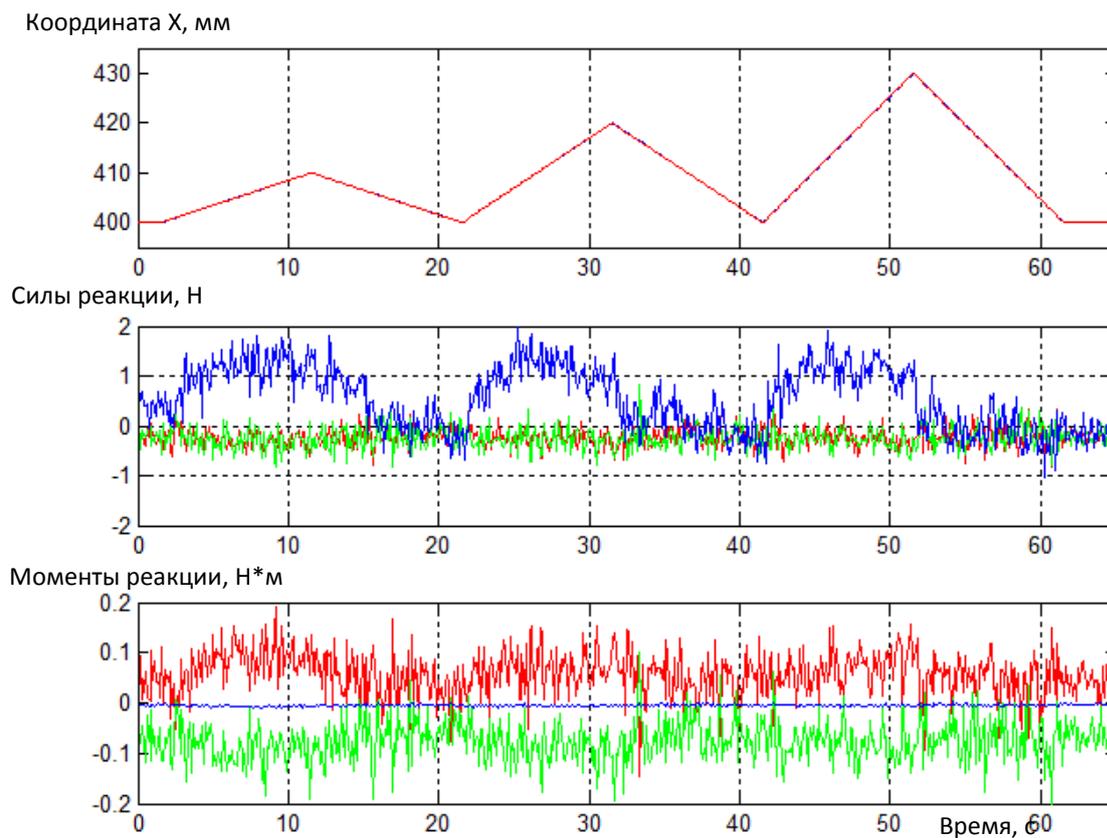


Рисунок 6 – Координаты рук (синий - ведущая, красный - ведомая) и силы и моменты реакции при связанном движении (красный – x , зеленый – y, синий – z)

В следующем эксперименте руки также были связаны гибкой трубкой, однако одна из рук была ведомой (второй алгоритм «ведущий-ведомый»). Движение осуществлялось по той же траектории, что и в предыдущем эксперименте. Силы и моменты реакции связей фиксировались с помощью силомоментного датчика. На рисунке 7 представлены соответствующие процессы. На верхнем графике представлены траектории ведущей и ведомой рук, где красным показана податливая траектория ведомой руки. Сравнивая результаты данного эксперимента с предыдущим, можно видеть, что за счет введения искусственной податливости удалось снизить силы и моменты реакции связи, однако траектория ведущей руки отличается от желаемой.

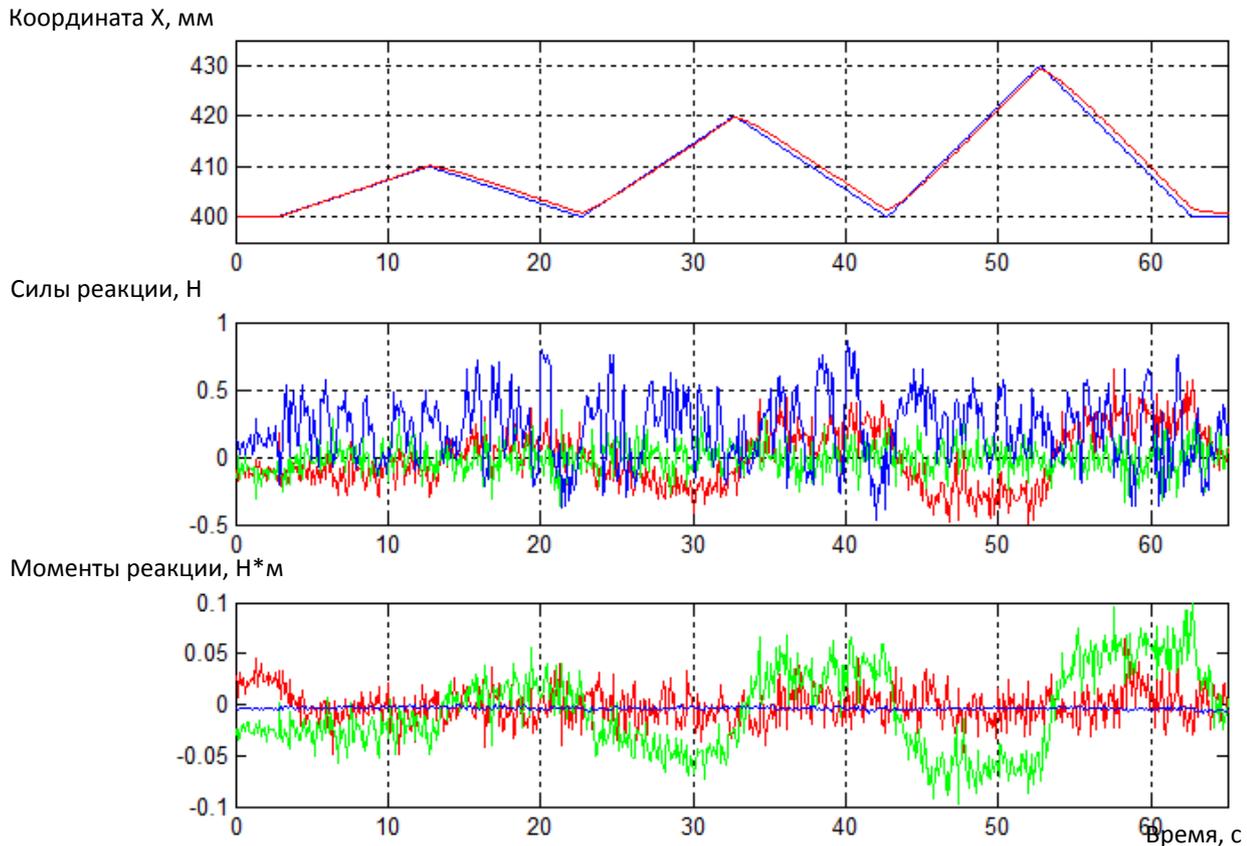


Рисунок 7 – Координаты рук (синий - ведущая, красный - ведомая) и силы и моменты реакции при связанном движении (красный – x , зеленый – y, синий – z)

Проведенная серия экспериментов выявила особенности двух алгоритмов управления согласованным движением двурукого МР – управления «общей СК» и управление в режиме «ведущий – ведомый».

Первый алгоритм удобно применять при выполнении операций, в которых не требуется контролировать возникающие в процессе движения МР силы и моменты реакции. Это могут быть либо манипуляции с объектами, допускающими деформацию, либо движение свободных рук (манипулирование «виртуальным» объектом) и тому подобные операции. При этом обеспечивается достаточно высокая точность слежения за общей траекторией. Особенностью этого алгоритма является возможность повышения точности позиционирования рук одной относительно другой по сравнению с точностью позиционирования каждой из рук относительно мировой СК.

Второй алгоритм позволяет снизить силы и моменты реакции связей. Однако возможности алгоритма ограничены в случае жесткой связи между руками (например, при манипулировании недеформируемым объектом). Динамика относительного движения рабочих органов рук и запаздывания в каналах управления могут привести к потере устойчивости.

В этой связи рациональным представляется применение комбинированных алгоритмов управления, сочетающих возможности каждого из алгоритмов: высокой точности относительного движения алгоритма «общей СК» и уменьшения сил и моментов реакции связей при управлении по алгоритму «ведущий-ведомый».

1. P. Chiacchio, S. Chiaverini, B. Siciliano: Direct and inverse kinematics for coordinated motion tasks of a two-manipulator system, ASME J. Dyn. Syst. Meas. Contr. 118, 691–697 (1996)
2. F. Caccavale, P. Chiacchio, S. Chiaverini: Task-Space regulation of cooperative manipulators, Automatica 36, 879–887 (2000)
3. E. Nakano, S. Ozaki, T. Ishida, I. Kato: Cooperational control of the anthropomorphous manipulator 'MELARM', Proc. 4th Int. Symp. Ind. Robots (Tokyo 1974) pp. 251–260
4. J.Y.S. Luh, Y.F. Zheng: Constrained relations between two coordinated industrial robots for motion control, Int. J. Robot. Res. 6, 60–70 (1987)