

УДК 621.865:004.896

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ РОБОТАМИ ДВУСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ

А.Г. Лесков, С.Д. Морошкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
e-mail: agleskov@rambler.ru; svyatoslavdm@gmail.com

*Рассмотрены системы управления манипуляционными роботами двустороннего действия. В составе манипуляционного робота два манипулятора, каждый из которых оснащен шестикомпонентным силомоментным датчиком, размещенным на запястье. Векторы управляющих воздействий на входах систем управления каждого манипулятора формируются в виде разности интегралов сигналов силомоментного датчика. Система управления манипуляторами является системой симметричного типа. Представлены математические модели системы двустороннего действия как многомерной динамической системы с учетом взаимовлияния приводов. Предложен способ исследования и обеспечения устойчивости таких систем на основе рассмотрения функции Найквиста. Приведены соотношения для функции Найквиста при движении манипуляторов в свободной зоне, взаимодействия одного или обоих манипуляторов с внешней средой. Обоснована возможность исследования устойчивости системы двустороннего действия на основе рассмотрения свойств годографа функции Найквиста только для одного манипулятора. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие теоретические положения. Эксперименты выполнены на полунатурном моделирующем стенде, построенном на базе двух промышленных роботов.*

**Ключевые слова:** активное отображение сил и моментов, системы управления двустороннего действия, контактные операции.

## STUDYING DYNAMICS OF MANIPULATION ROBOT CONTROL SYSTEM WITH FORCE FEEDBACK TELEPRESENCE

A.G. Leskov, S.D. Moroshkin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
e-mail: agleskov@rambler.ru; svyatoslavdm@gmail.com

*Systems for force feedback telepresence control of manipulation robots are considered. A manipulation robot includes two manipulators, each equipped with a six-component force-torque sensor arranged on the wrist. Vectors of control actions are formed at inputs of the control system of each manipulator in the form of a difference of integrals of signals from the force-torque sensor. A manipulator control system is a symmetric type system. Mathematical models of the force feedback telepresence system as the multidimensional dynamical system with consideration for mutual influence of drives are presented. A method is offered for studying and ensuring stability of these systems based on consideration of the Nyquist function. The relationships are given for the Nyquist function in case of the manipulator motion*

*in a free zone, the interaction of one of them or both manipulators with environment. A possibility of studying the stability of the force feedback telepresence system on the basis of consideration of properties of the Nyquist function hodograph for a single manipulator alone is substantiated. The experimental investigation results are given which confirm the theoretical statements. The experiments are performed at the semi-full-scale modeling test bench constructed on the basis of two industrial robots.*

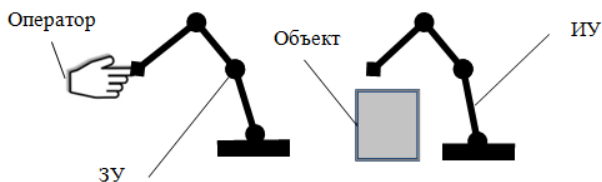
**Keywords:** force reflecting telepresence, force feedback telepresence, contact tasks.

В настоящее время дистанционное управление с участием человека-оператора рассматривается как один из основных способов управления манипуляционными роботами (МР) в экстремальных условиях. Особенно часто такой способ применяется при выполнении операций, в ходе которых возникает механический контакт МР с внешней средой.

Необходимым условием обеспечения эффективного и качественного управления МР при выполнении подобных операций является отображение сил и моментов оператору. Одна из разновидностей систем управления МР с отображением сил и моментов – система двустороннего действия (ДСД) [1]. Исследования в области систем ДСД привлекают внимание многих российских и зарубежных исследователей, например [1–7]. В приведенных источниках значительное внимание уделяется общим вопросам систем ДСД – математическому описанию (на уровне отдельных приводов и в виде многомерной системы), достоверности отображаемой человеку-оператору информации и т.д. В то же время такой важный вопрос, как обеспечение устойчивости процессов управления в системах ДСД, особенно при их рассмотрении как многомерных динамических систем, не нашел достаточного отражения в литературе. Кроме того, в известных работах не всегда приводятся результаты экспериментальных исследований. С целью восполнить этот пробел и предлагается материал настоящей статьи.

**Структурная схема системы.** Принцип работы системы ДСД показан на рис. 1. Система ДСД состоит из двух манипуляционных устройств, одно из которых играет роль задающего устройства (ЗУ), а другое – исполнительного устройства (ИУ).

Рассмотрим систему ДСД, построенную на базе двух однотипных серийных МР. На схватах МР размещены 6-компонентные датчики сил



**Рис. 1.** Схема системы ДСД

и моментов (СМД). Один из МР используется как ЗУ (задающий МР), а другой — как ИУ (исполнительный МР). Оператор управляет системой, воздействуя на схват задающего МР. Сигналы датчиков используются в системе управления для формирования управляющих воздействий на ЗУ и ИУ таким образом, что обеспечивается двусторонняя передача сил и моментов.

Законы формирования управляющих воздействий могут быть различными [4]. В данном случае рассматривается структура, в которой сигналы СМД ЗУ и ИУ подвергаются интегрированию, что соответствует реализации скоростного алгоритма управления на исполнитель-ной и задающей сторонах. Для реализации такого алгоритма должны быть доступны сравнительно большие объемы рабочей зоны на обеих сторонах. Достоинством алгоритма является обеспечение кинемати-ческого подобия перемещений задающего и исполнительного МР. Это делает управление МР достаточно удобным и контролируемым даже в случае потери зрительного контакта оператора с исполнительным МР. Последнее особенно важно при дистанционном управлении, когда имеет место значительное запаздывание сигналов в каналах передачи информации.

Структурная схема рассматриваемой системы приведена на рис. 2, на котором обозначено:  $x_{оп}^*$ ,  $x_{пр}^*$  — декартовы координаты (положение в пространстве) руки оператора и объекта манипулирования;  $x_m^*$ ,  $x_s^*$  — текущие декартовы координаты схватов задающего и исполни-тельного роботов;  $W_{имм}(s)$ ,  $W_{имс}(s)$  — матричные передаточные функции задающего и исполнительного МР;  $c_m$ ,  $c_s$  — матрицы коэффициентов жесткости руки оператора и объекта;  $\chi_m$ ,  $\chi_s$  — матрицы коэффи-циентов демпфирования руки оператора и объекта;  $k_{СМД}$  — матрица коэф-фициентов передачи одного из СМД (СМД на задающем и исполни-тельном МР полагаются идентичными);  $k_m$ ,  $k_s$  — матрицы коэффи-циентов интегрирования сил и моментов задающего и исполнительного

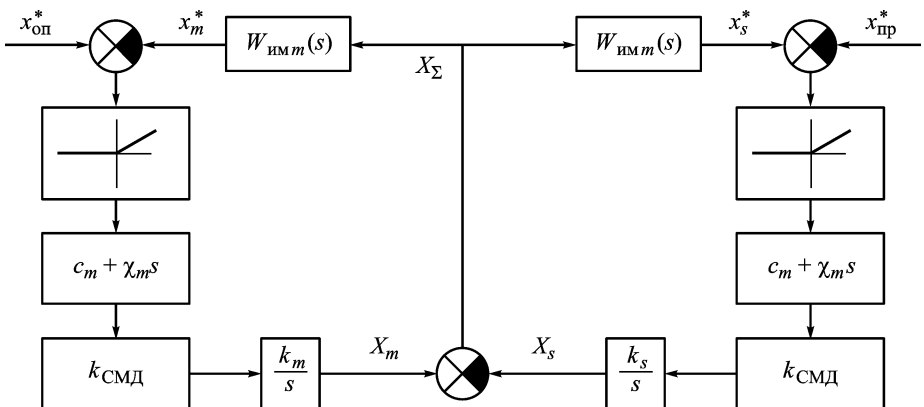


Рис. 2. Структурная схема системы

МР;  $X_m, X_s$  — векторы сигналов на выходе интеграторов задающего и исполнительного МР;  $X_\Sigma$  — вектор сигналов на входах задающего и исполнительного МР.

В представленной системе векторы  $X_m, X_s$  получаются путем интегрирования сигналов СМД. Матрицы  $c_m$  и  $\chi_m$  определяются эмпирически.

Система содержит два контура управления: контур, связывающий положение руки оператора и схвата задающего МР (контур задающего МР), а также контур, связывающий координаты объекта и схвата исполнительного МР (контур исполнительного МР). Эти контуры являются взаимосвязанными.

Характерными для контактных операций МР являются чередование фаз движений в свободной зоне (свободное движение) и в зоне контакта с внешними объектами (связанное движение). Поэтому в структурную схему ДСД (см. рис. 2) введены нелинейности, назначение которых ясно из приведенных далее принципов работы рассматриваемой ДСД.

Можно выделить три режима работы системы.

1. Ни один из роботов не контактирует с внешней средой. В этом случае на входах нелинейностей действуют сигналы отрицательной полярности, на выходах нелинейностей — сигналы равны нулю; задающий и исполнительный МР находятся в неподвижном состоянии.

2. Возникает механический контакт схвата одного робота с внешней средой (задающего МР — с рукой оператора, исполнительного МР — с объектом манипулирования); на выходе одной из нелинейностей появляется сигнал, который после интегрирования поступает непосредственно на входы задающего и исполнительного МР и заставляет их перемещаться соответственно сигналам  $x_{оп}^*, x_{пр}^*$ .

3. Оба МР контактируют с внешней средой. Движение осуществляется и задающим и исполнительным МР до тех пор, пока не установятся приближенные соотношения  $x_{оп}^* = x_m^*, x_{пр}^* = x_s^*$ .

На первом режиме оба контура системы ДСД остаются разомкнутыми. Динамика такой системы полностью соответствует независимой работе обоих МР в свободном пространстве. Свойства таких систем подробно рассмотрены в работе [3].

На втором режиме работы происходит замыкание одного из контуров.

На третьем — замыкаются оба контура управления.

Появление замкнутых контуров делает вопрос устойчивости системы ДСД одним из центральных.

Одним из факторов, влияющих на устойчивость системы, является жесткость внешней среды (коэффициенты матриц  $c_m, c_s$ ). На исполнительной стороне коэффициенты матрицы  $c_s$  зависят от особенностей

конструкции объекта манипулирования и используемых материалов и могут изменяться в широких пределах. Так, в космических МР [2] при выполнении операции установки объекта часто применяют пружинные замки, что приводит к уменьшению коэффициентов матрицы  $c_m$ . В то же время при выполнении монтажных операций и операций обслуживания МР взаимодействует непосредственно с объектом. В этом случае значения коэффициентов матриц жесткости определяются жесткостью материала объектов и могут иметь большие числовые значения.

На задающей стороне коэффициенты матрицы  $c_s$  зависят от моторики человека-оператора и также могут изменяться в широких пределах.

**Устойчивость системы.** Обозначим

$$W_3(s) = W_{имм}(s)k_mk_{СМД}(c_m + \chi_ms)/s;$$

$$W_и(s) = W_{имс}(s)k_s k_{СМД}(c_s + \chi_s s)/s$$

– матричные передаточные функции разомкнутых контуров системы ДСД, связывающие сигналы на выходах нелинейностей с координатами схватов задающего и исполнительного МР.

В случае замыкания контура задающего МР его уравнение движения в операторной форме будет иметь вид

$$W_3^{-1}(s)x_m^* = x_{оп}^* - x_m^* - X_s.$$

Аналогично получим уравнение контура исполнительного МР при его замыкании

$$W_и^{-1}(s)x_s^* = x_{пр}^* - x_s^* - X_m.$$

Матрицы  $W_3$ ,  $W_и$  представим в виде:

$$W_3(s) = N_3^{-1}(s)M_3(s);$$

$$W_и(s) = N_и^{-1}(s)M_и(s),$$

где  $N_3(s)$ ,  $M_3(s)$ ,  $N_и(s)$ ,  $M_и(s)$  – полиномиальные матрицы.

Характеристический определитель системы ДСД в разомкнутом состоянии имеет вид

$$\Delta_p(s) = \det N_3(s) \det N_и(s).$$

При замыкании контура задающего МР выражение для характеристического определителя принимает вид

$$\Delta_3(s) = \Delta_p(s) \det(E + W_3(s));$$

при замыкании контура исполнительного МР –

$$\Delta_и(s) = \Delta_p(s) \det(E + W_и(s));$$

при замыкании обоих контуров —

$$\Delta(s) = \Delta_p(s) \det(E + W_3(s) + W_n(s)).$$

Составим функции Найквиста для второго и третьего режимов:

$$\Delta_3(s)/\Delta_p(s) - 1 = \det(E + W_3(s)) - 1;$$

$$\Delta(s)/\Delta_p(s) - 1 = \det(E + W_3(s) + W_n(s)) - 1.$$

Тогда, если в системе ДСД асимптотически устойчивы в разомкнутом состоянии задающая и исполнительная части, то для устойчивости системы при замыкании контуров только задающего (или только исполнительного) МР или при замыкании обоих контуров необходимо и достаточно, чтобы годограф функции  $\det(E + W_3(j\omega)) - 1$  (годограф  $\det(E + W_n(j\omega)) - 1$ ) на втором режиме или  $\det(E + W_3(j\omega) + W_n(j\omega)) - 1$  на третьем режиме при изменении  $\omega$  от  $-\infty$  до  $\infty$  не охватывал точку  $(-1, j0)$ .

Если задающая и исполнительная части тождественны,  $W_3(s) = W_n(s) = W(s)$ , то функцию Найквиста в третьем режиме можно представить в виде

$$\Delta(s)/\Delta_p(s) - 1 = \det(E + 2W(s)) - 1.$$

Полученные выражения аналогичны рассмотренным в работе [1]. Отличие состоит в том, что система ДСД [1] рассматривалась состоящей только из одного привода и на задающей, и на исполнительной сторонах. В настоящей статье система ДСД рассматривается в виде системы приводов — как многомерная динамическая система.

Из приведенных соотношений вытекает следующая последовательность действий при исследовании динамики системы ДСД. Предполагается, что система управления ДСД устойчива на первом режиме.

Для определения устойчивости на втором режиме выполняется построение годографа функции

$$\Delta_3(j\omega)/\Delta_p(j\omega) - 1 = \det(E + W_3(j\omega)) - 1.$$

Для третьего режима рассматривается следующий годограф

$$\Delta(j\omega)/\Delta_p(j\omega) - 1 = \det(E + W_3(j\omega) + W_n(j\omega)) - 1.$$

Рассмотрим частный случай, когда матрицы  $c_m$ ,  $\chi_m$ ,  $k_{\text{СМД}}$ ,  $k_m$ ,  $W_{\text{ИМ}m}$  постоянны, матрицы  $c_m$ ,  $\chi_m$ ,  $k_{\text{СМД}}$ ,  $k_m$ , имеют диагональный вид, причем

$$c_m = c_s, \quad \chi_m = \chi_s, \quad k_m = k_s, \quad W_{\text{ИМ}m}(s) = W_{\text{ИМ}s}(s).$$

В этом случае функция Найквиста принимает вид

$$Q(s) = \det[E + 2W_{\text{ИМ}m}(s)k_mk_{\text{СМД}}(c_m + \chi_ms)/s] - 1.$$

Диагональный вид матриц  $c_m$ ,  $\chi_m$ ,  $k_{\text{СМД}}$ ,  $k_m$  соответствует точечным контактам задающего и исполнительного МР с внешними объектами.

Из последнего выражения следует, что в этом случае нет необходимости проводить расчеты устойчивости системы для третьего режима и для обеспечения устойчивости системы ДСД достаточно надлежащим образом выбрать коэффициенты  $k_m$  для второго режима, а после этого уменьшить каждый из них вдвое.

В самом деле, полагая в последнем выражении новое значение

$$k'm = k_m/2,$$

получаем

$$Q(s) = \det[E + W_{\text{имм}}(s)k'mk_{\text{СМД}}(c_m + \chi_ms)/s] - 1,$$

что соответствует выражению функции Найквиста для второго режима работы системы ДСД при значении  $k'm = km/2$ .

**Эксперименты.** Для исследования свойств рассмотренной системы была поставлена серия экспериментов. Базой для ее проведения послужил робототехнический комплекс Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В качестве МР использовались два промышленных 6-степенных манипулятора Kawasaki FS20N [8]. Каждый робот оснащен собственной стойкой управления ( $D$ -контроллер), в которой реализованы функции тактической системы управления (ТСУ). Для управления промышленным роботом (ПР) от ЭВМ разработан шлюз, состоящий из сервера, размещенного в памяти контроллера ПР, и клиентской части, размещенной на ЭВМ, которые обмениваются данными по сети Ethernet по протоколу TCP/IP. На запястье каждого ПР установлен 6-компонентный СМД фирмы Schunk. Схема эксперимента представлена на рис. 3, на рис. 4 приведен внешний вид комплекса.

На рис. 3 введены следующие обозначения:  $F_{\text{оп}}$ ,  $N$  — 6-мерный вектор сил и моментов воздействия оператора на задающий МР и 6-мерный вектор сил и моментов реакции, возникающих на ведомом МР;  $F_m$ ,  $F_s$  — 6-компонентные векторы сил и моментов, полученные на СМД ведущего и ведомого МР;  $q_m$ ,  $q_s$  — векторы плановых (поступающих в исполнительную систему управления) значений углов шарниров задающего и исполнительного МР;  $x_m^*$ ,  $x_s^*$  — управляющие сигналы, формируемые на основе векторов сил и моментов, возникающих на ведущем и ведомом МР;  $W_m(s)$ ,  $W_s(s)$  — матричные передаточные функции блоков управления ведущего и ведомого МР.

Датчики регистрируют силы и моменты, действующие на захватные устройства задающего и исполнительного МР. Векторы сил и моментов МР преобразуются в соответствующие управляющие сигналы:

$$x_m^* = W_m(s)F_m;$$

$$x_s^* = W_s(s)F_s.$$

Матричные передаточные функции  $W_m$  и  $W_s$  имеют вид:

$$W_m(s) = k_m/s;$$

$$W_s(s) = k_s/s,$$

где  $k_m, k_s$  – матрицы коэффициентов.

Таким образом, заданные линейные и угловые скорости схватов МР пропорциональны действующим на задающий и исполнительный МР силам и моментам.

В экспериментах рассматривалась работа системы при управлении только по одной декартовой координате, соответствующей движению

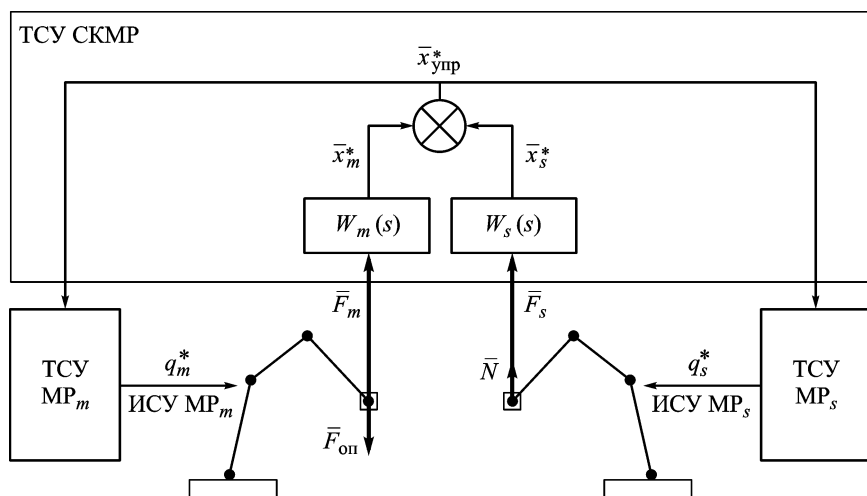


Рис. 3. Структурная схема системы ДСД

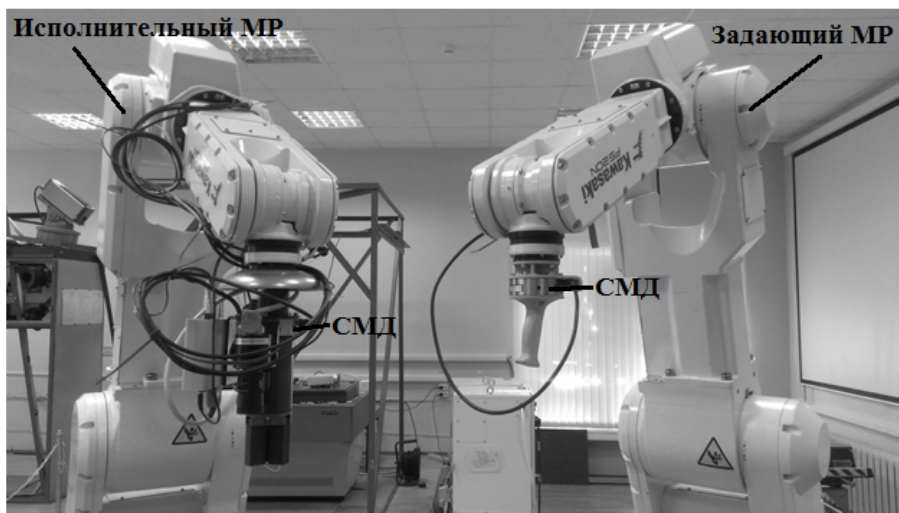
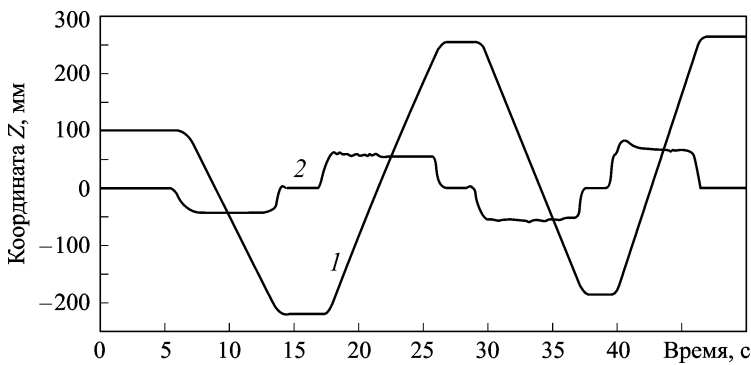


Рис. 4. Внешний вид экспериментального стенда





**Рис. 5.** Траектории движения схватов задающего и исполнительного МР (“горки”) и силы, регистрируемые СМД задающего (1) и исполнительного (2) МР

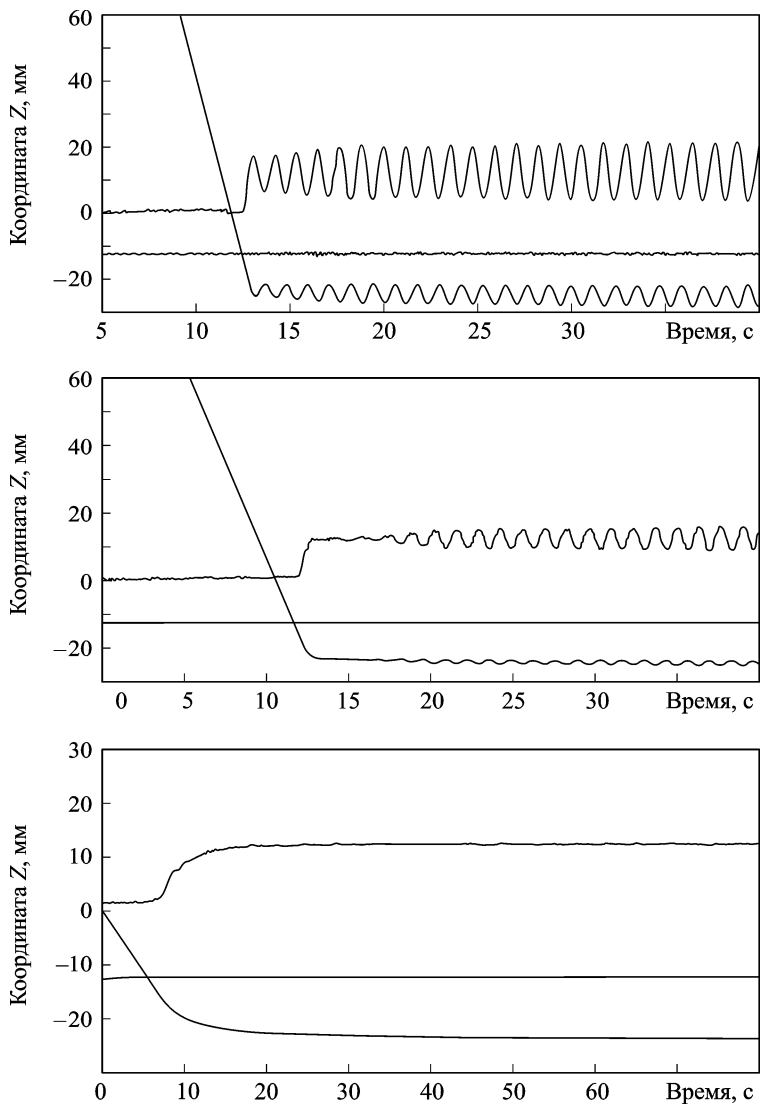
МР вдоль вертикальной прямой. В этом случае матрицы  $W_m$ ,  $W_s$ ,  $k_m$ ,  $k_s$  одномерны.

Первый эксперимент проводился, когда обе системы разомкнуты (т.е. ни на задающей части, ни на исполнительной нет контакта с оператором или средой). К каждому МР поочередно подвешивался груз, и система совершала движение в соответствующем направлении. Графики эксперимента приведены на рис. 5.

На графиках видно, что система устойчива, а ее динамика полностью определяется свойствами задающего и исполнительного МР.

Следующая серия экспериментов демонстрирует работу системы, когда замыкается система управления исполнительным МР (по сигналам СМД). Для нее входным воздействием являются координаты объекта манипулирования. В начале эксперимента оба манипулятора ни с чем не соприкасаются. Затем к задающему манипулятору подвешивается груз, создающий постоянную силу. Препятствия на пути перемещения задающего МР отсутствуют, поэтому система управления задающего МР остается разомкнутой. Задающий и исполнительный МР совершают движение до тех пор, пока исполнительный МР не встретит препятствие. В этом случае либо оба МР останавливаются, либо в системе возникают автоколебания. Было проведено несколько экспериментов с различными значениями  $k_m$  и  $k_s$ . На рис. 6, а приведены графики, полученные по результатам трех экспериментов со значениями  $k_m = k_s = 4, 1$  и  $0,4$ . По графикам можно судить, что исполнительный контур системы устойчив при  $k_m = k_s = 0,4$ . Эксперименты показали, что это значение является граничным, при больших значениях устойчивость теряется.

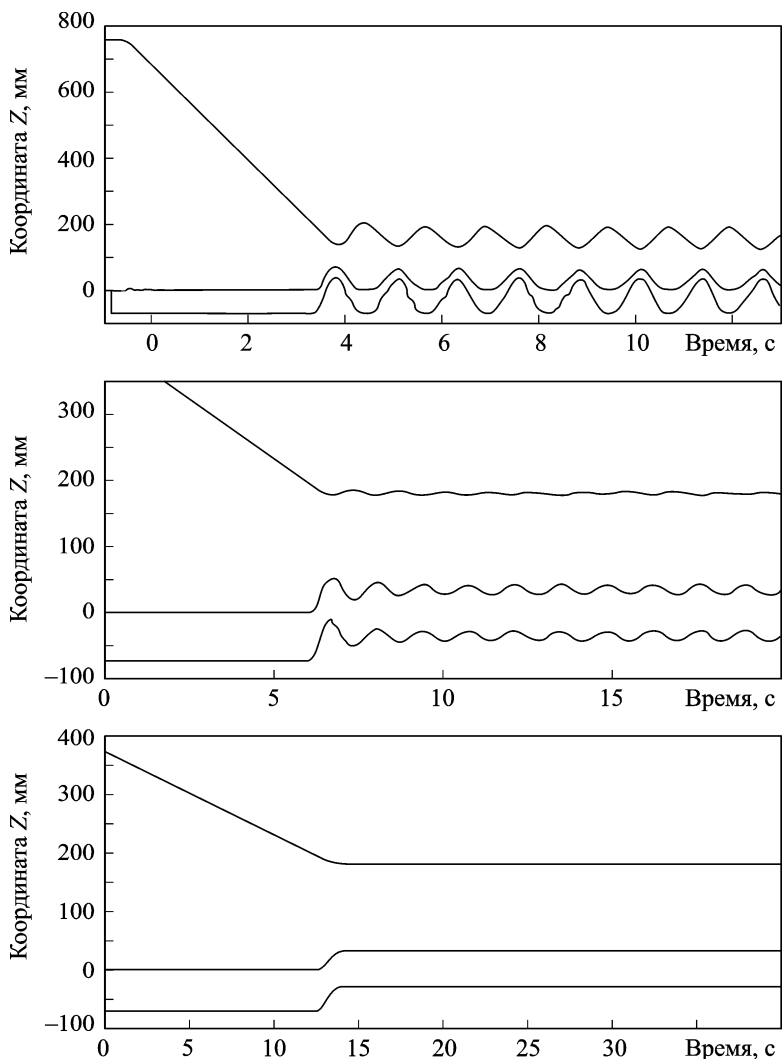
Третья серия экспериментов соответствует случаю замыкания обоих контуров. На пути перемещения задающего МР также было размещено препятствие. Затем по аналогии с предыдущим случаем была



**Рис. 6.** Изменение координат (верхняя линия) схватов ведущего и ведомого манипуляторов при контакте с объектом, а также силы, регистрируемые СМД ведущего (средняя линия) и ведомого (нижняя линия) роботов, при  $k_m = k_s = 4, 1$  и  $0,4$

приложена сила, приводящая систему в движение. Роботы движутся до тех пор, пока не встретятся с препятствиями. Устойчивость системы в этом случае обеспечивается при значениях коэффициентов усиления, вдвое меньших, чем в предыдущем случае.

На рис. 7 приведены результаты трех экспериментов при  $k_m = k_s = 2, 0,5$  и  $0,2$ , подтверждающие высказанное ранее предположение о необходимости снижения в 2 раза коэффициентов усиления. При  $k_m = k_s = 2$  и  $0,5$  система неустойчива и входит в автоколебания, при  $k_m = k_s = 0,2$  процесс устойчив.



**Рис. 7.** Изменение координат (верхняя линия) схватов ведущего и ведомого манипуляторов при контакте с объектом, а также силы, регистрируемые СМД ведущего (средняя линия) и ведомого (нижняя линия) роботов, при  $k_m = k_s = 2; 0,5$  и  $0,2$

В экспериментах задающий и исполнительный МР перемещались в широком диапазоне. Благодаря кинематическому подобию задающего и исполнительного МР, оператор мог решать задачи перемещения МР в заданное положение, даже не наблюдая исполнительного МР.

Тот факт, что показатели устойчивости системы при размыкании хотя бы одного контура увеличиваются по сравнению с полностью замкнутой системой целесообразно использовать на практике. Так, в случае возникновения колебательного процесса оператору следует высвободить задающий МР (“бросить” задающий МР), что обеспечит увеличение запасов устойчивости всей системы.

**Выводы.** Рассмотрены вопросы динамики многомерных систем ДСД. Получены выражения для функций Найквиста, позволяющие исследовать устойчивость многомерной системы ДСД на различных режимах работы.

Проведенные эксперименты показали работоспособность системы управления МР с рассмотренной структурной схемой. На динамику системы ДСД существенно влияют параметры внешней среды и значения коэффициентов матриц при интеграторах. При выборе этих коэффициентов следует учитывать наличие двухсторонних связей между задающим и исполнительным МР. В случае, когда матричные передаточные функции задающего и исполнительного МР одинаковы, выбирать коэффициенты при интеграторах можно, ограничиваясь рассмотрением свойств только одного МР (задающего или исполнительного).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кулешиов В.С., Лакота Н.А. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. М.: Машиностроение, 1986.
2. Лесков А.Г., Илларионов В.В., Лескова С.М., Полухин В.И. Разработка функционально-моделирующих стендов для подготовки операторов космических манипуляционных роботов // Тез. докл. 6-й МНТК "Пилотируемые полеты в космос", Звездный городок, 2005. С. 179–180.
3. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. М.: Наука, 1978.
4. Егоров И.Н., Жигалов Б.А., Кулешиов В.С. Проектирование следящих систем двустороннего действия. М.: Машиностроение, 1980.
5. Nohmi M., Bock T. Contact task by force feedback teleoperation under communication time delay. Human-robot interaction. Ed. by Nilanjan Sarkar, Itech Education and Publishing, Vienna, Austria, 2007. P. 522.
6. Алферов Г.В., Кулаков Ф.М., Нечаев А.И., Чернакова С.Э. Информационные системы виртуальной реальности в мехатронике и робототехнике. СПб.: СОЛЮ, 2006.
7. Казмиренко В.Ф., Лесков А.Г., Введенский В.А. Системы следящих приводов. М.: Энергоатомиздат, 1993.
8. Лесков А.Г., Калеватых И.А. Экспериментальные исследования алгоритмов управления связанным движением двурукого манипуляционного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. № 4. 2012. С. 33–43.

## REFERENCES

1. Kuleshov V.S., Lakota N.A. Distantionno upravlyaemye roboty i manipulyatory [Remote-controlled robots and manipulators]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 328 p.
2. Leskov A.G., Illarionov V.V., Leskova S.M., Polukhin V.I. The development of functional modeling stands for training operators of space robotic manipulators. *Trudy 6 Mezhdunar. Nauchno-Prakt. Konf. "Pilotiruemye polety v kosmos"* [Proc. 6th Int. Sci. Pract. Conf. "Manned space flights"], Moscow, 2005, pp. 179–180 (in Russ.).

3. *Medvedev V.S., Leskov A.G., Yushchenko A.S.* Sistemy upravleniya manipulyatsionnykh robotov [Robotic manipulator control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 416 p.
4. *Egorov I.N., Zhigalov B.A., Kuleshov V.S.* Proektirovanie sledyashchikh sistem dvustoronnego deystviya [Design of double-acting servo systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 300 p.
5. *Nohmi M., Bock T.* Contact task by force feedback teleoperation under communication time delay. Human-robot interaction. Vienna, Itech. Educ. Publ., 2007. 522 p.
6. *Alferov G.V., Kulakov F.M., Nechaev A.I., Chernakova S.E.* Informatsionnye sistemy virtual'noy real'nosti v mekhatronike i robototekhnike [Information systems of virtual reality in mechatronics and robotics]. St. Petersburg, SOLO Publ., 2006. 146 p.
7. *Kazmirenko V.F., Leskov A.G., Vvedenskiy V.A.* Sistemy sledyashchikh privodov [Servo drive systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1993. 303 p.
8. *Leskov A.G., Kalevatykh I.A.* Experimental study of control algorithms for two-armed robot manipulator restricted movement. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Ser. Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ. Ser. Instrum. Eng.], 2012, no. 4, pp. 33–43 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.11.2012

Алексей Григорьевич Лесков — д-р техн. наук, профессор кафедры “Специальная робототехника и мехатроника” МГТУ им. Н.Э. Баумана, директор Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области робототехники.

Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 141801, п. Орево, Дмитровский р-н, Московская обл.

A.G. Leskov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Special Robotics and Mechatronics” department of the Bauman Moscow State Technical University, director of the Dmitrov Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of robotics.

Dmitrov Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Orevo, Moscow region, 141801 Russia.

Святослав Дмитриевич Морошкин — инженер учебной лаборатории Ц-8 Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 141801, п. Орево, Дмитровский р-н, Московская обл.

S.D. Moroshkin — engineer of training laboratory Ts-8 of the Dmitrov Branch of the Bauman Moscow State Technical University.

Dmitrov Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Orevo, Moscow region, 141801 Russia.