

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.7

УДК 681.51

С.Ф. Бурдаков, О.Б. Шагниева

МОДЕЛИ МЕХАНИКИ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ РОБОТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОФИЛЯ

S.F. Burdakov, O.B. Shagniev

MECHANICS MODELS IN THE CONTROL PROBLEM OF THE FORCE INTERACTION BETWEEN A ROBOT AND A FREE-FORMED SURFACE

На примере задачи управления силовым взаимодействием осязательного робота с поверхностью неопределенного профиля показана решающая роль моделей механики при стремлении получить высокое качество отработки желаемых движений. Адекватные модели механики необходимы как при согласовании инерционных и жесткостных характеристик робота и силового датчика, так и при выборе структуры и настроек системы позиционно-силового управления, а также при выборе реализуемых желаемых движений. Рассмотрены режим позиционирования с выходом робота на контакт с поверхностью и режим управления силовым взаимодействием робота с поверхностью. Исследованы алгоритмы позиционно-силового управления с ПИД-регулятором и интегральным компенсатором. Показана возможность дополнительного повышения качества управления с помощью коррекции желаемых движений методом обучения.

РОБОТ; ПОВЕРХНОСТЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОФИЛЯ; СИЛОВОЕ ОЧУВСТВЛЕНИЕ; МОДЕЛИ МЕХАНИКИ; ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ; ОБУЧЕНИЕ.

The example of the problem of controlling the force interaction of a robot with a free-formed surface shows the crucial role of mechanics models in obtaining high-quality implementations of the desired motions. Adequate mechanics models are needed both for coordinating the inertial and stiffness characteristics of the robot and the force sensor, and for choosing the structure and configuration of the position-force control, as well as when selecting the implemented desired motions. The article describes a positioning mode with the release of the robot to contact the surface and a force control mode of the robot interacting with surface. We investigated the algorithms of position-force control with a PID-controller and an integral compensator. The article shows the possibility of further enhancing the quality of control by correcting the required motion by learning.

ROBOT; FREE-FORMED SURFACE; FORCE SENSING; MECHANICS MODELS; POSITION-FORCE CONTROL; LEARNING.

Проблема силомоментного осязательного управления при управлении движением роботов продолжает оставаться одной из актуальных в современной робототехнике, т. к. силомоментное осязательное управление является важным этапом создания искусственного интеллекта роботов [1]. Несмотря на большие достижения робототехники, круг задач, в которых роботы с силомоментным осязательным управлением могли бы заменить человека-оператора все

еще остается достаточно широким. Прежде всего это относится к роботам для экстремальных условий, для целого ряда технических задач (обработка деталей, сборка и т. п.), а также к медицинским роботам [2–4].

Фундаментальные аспекты использования информации об усилиях при управлении роботами рассмотрены в работе [5]. Наиболее распространенный на практике метод связанного (гибридного) позиционно-

силового управления, когда управление перемещениями происходит в функции от силы взаимодействия, рассмотрен в [6]. На основе этого метода в [7] предложен алгоритм связанного позиционно-силового управления с сохранением базового контура управления по положению. Этот алгоритм позволил после некоторой модернизации (установки датчика сил и моментов) использовать серийные роботы для решения задач управления силомоментным взаимодействием роботов с внешними объектами. Это не только существенно расширяет области применения серийных роботов [3, 8], но и приводит к появлению новых областей, например, в медицине [9]. Однако при подобном оцувствлении возникает проблема правильного согласования механических характеристик робота и силомоментного датчика с настройками системы управления и выбором желаемых движений. Эта проблема не может быть решена без адекватных моделей механики.

Вопрос о создании робота-массажера с использованием информации об усилиях взаимодействия впервые был поставлен российскими учеными на Втором симпозиуме по медицинской робототехнике в Гейдельберге в 1997 г. В работах [4, 9] представлена реализация робота-массажера, в алгоритме управления которого важную роль играет механическая модель взаимодействия робота с мягкими тканями и суставами.

Результаты научных исследований и примеры практического применения робо-

тов с силомоментным оцувствлением показывают, что достижение высокого качества выполнения роботом контактных операций возможно только с помощью алгоритмов управления, основанных на адекватных моделях механики [5, 10]. В целях повышения качества связанного позиционно-силового управления в настоящей работе анализируются рациональные соотношения механических характеристик робота и датчика силы со структурой и настройками системы управления, а также с желаемыми движениями робота, выполняющего контактные операции.

Постановка задачи

Рассматривается робот с тремя взаимно перпендикулярными степенями подвижности, оснащенный силовым датчиком. Робот предназначен для выполнения технологических операций, требующих обеспечения заданного силового взаимодействия с поверхностью, профиль которой заранее не определен. Примерами могут служить робот-шлифовщик турбинных лопаток, робот-массажер для восстановительной медицины и т. п. Отсутствие динамического взаимовлияния движений по разным степеням подвижности позволяет свести задачу к одномерной (рис. 1).

Робот имеет два основных режима движения: позиционирование с выходом на контакт с поверхностью (рис. 1 а) и позиционно-силовой режим с поддержанием заданной силы взаимодействия с поверхностью (рис. 1 б). Профиль поверхности

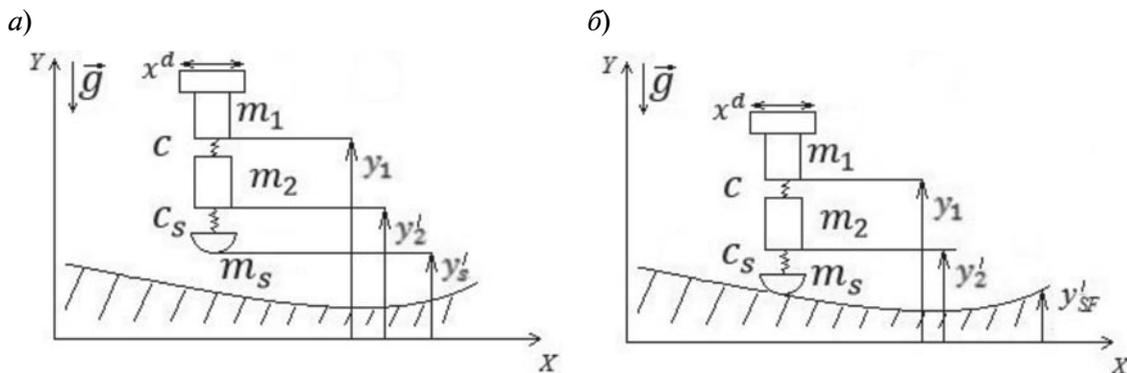


Рис. 1. Расчетные схемы робота в режиме без контакта (а) и с контактом (б)

является гладким, но заранее не определен. Поверхность не деформируема.

На рис. 1 введены следующие обозначения: m_1 и m_2 – приведенная масса двигателя и масса руки робота; c – эквивалентная жесткость робота; y_1 и y_2 – координаты двигателя и руки робота; m_s и c_s – масса и жесткость датчика силы; y_s – координата датчика силы; $y_{SF}(x)$ – координата поверхности.

В режиме позиционирования (рис. 1 а) математическая модель оцувствленного робота как объекта управления имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + \\ + c(y_1 - y_2) = F - m_1 g, \\ m_2 \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c(y_2 - y_1) + \\ + b_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_s) + c_s(y_2 - y_s) = -m_2 g, \\ m_s \ddot{y}_s + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_2) + c_s(y_s - y_2) = -m_s g, \end{aligned} \quad (1)$$

где F – сила, развиваемая двигателем робота; $m_1 g$, $m_2 g$, $m_s g$ – силы тяжести; b , b_1 , b_2 , b_s – коэффициенты вязкого трения.

В отличие от координат y_2 и y_s (рис. 1 а), координаты y_1 и y_s в уравнениях (1) учитывают конструктивные размеры робота и датчика силы, а также статические удлинения упругих элементов c и c_s .

Переход к позиционно-силовому режиму управления происходит при безотрывном контакте датчика силы с поверхностью:

$$y_s = y^*, \quad F_s \geq \bar{F}_s, \quad (2)$$

где $F_s = b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_2) + c_s(y_s - y_2)$ – показание датчика силы ($F_s > 0$ соответствует сжатию упругого элемента датчика); \bar{F}_s – величина, характеризующая зону переходных процессов по силе F_s при переходе от режима позиционирования к позиционно-силовому режиму; $y^*(t) = y_{SF}(x)|_{x=x^d(t)}$ – не определенная заранее координата поверхности при условии, что движение по координате x происходит по желаемому закону $x^d(t)$ (рис. 1 б).

Математическая модель робота в позиционно-силовом режиме имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + \\ + c(y_1 - y_2) = F - m_1 g, \\ m_2 \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c(y_2 - y_1) + \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} + b_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_s) + c_s(y_2 - y_s) = -m_2 g, \\ y_s = y^*(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Считается, что помимо датчика силы робот оснащен датчиком положения, измеряющим координату двигателя робота y_1 . Такой набор датчиков является стандартным для роботов рассматриваемого типа.

Будем также считать, что в режиме позиционирования обратная связь формируется только по измерениям датчика положения, а датчик силы используется в индикаторном режиме для определения момента времени перехода к позиционно-силовому режиму. В позиционно-силовом режиме обратная связь формируется по измерениям обоих датчиков.

Задающим воздействием для режима позиционирования является $y^d(t)$, а для позиционно-силового режима – $F_s^d(t)$. Возмущающим воздействием для позиционно-силового режима является $y^*(t)$. Дополнительно вводится требование о недопустимости нарушения контакта робота с поверхностью после его установления.

В дальнейшем при компьютерном моделировании будут использоваться следующие значения параметров робота:

$$\begin{aligned} m_1 = m_2 = 1 \text{ кг}, \quad m_s = 0,2 \text{ кг}, \quad c = 2,2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}, \\ c_s = 10^4 \text{ Н/м}, \quad b = 10 \text{ Нс/м}, \\ b_1 = b_2 = 20 \text{ Нс/м}, \quad b_s = 5 \text{ Нс/м}. \end{aligned}$$

По этим параметрам могут быть получены оценки механических характеристик оцувствленного робота:

- для режима позиционирования

$$T_M \cong \frac{m_1 + m_2 + m_s}{b_1 + b_2} \cong (0,05 \div 0,1) \text{ с} \text{ – механическая постоянная времени,}$$

$$\omega_1 \cong \left(\frac{c_s}{m_1 + m_2} + \frac{c_s}{m_s} \right)^{1/2} \cong (30 \div 35) \text{ Гц} \text{ –}$$

первая собственная частота,

$$\omega_2 \cong \left(\frac{c}{m_1} + \frac{c}{m_2 + m_s} \right)^{1/2} \cong 100 \text{ Гц} \text{ – вторая}$$

собственная частота;

- для позиционно-силового режима

$$\omega_1 \cong \left(\frac{c_s}{m_1 + m_2} \right)^{1/2} \cong (10 \div 12) \text{ Гц} \text{ – первая}$$

собственная частота,

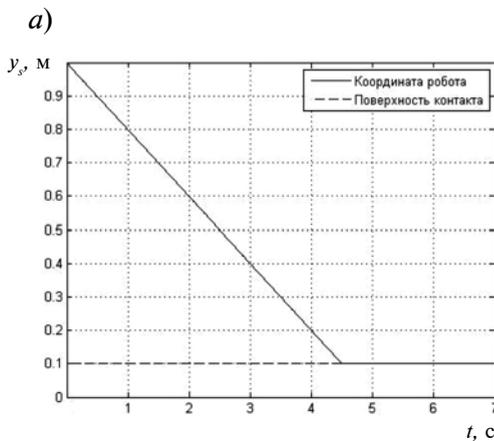
$$\omega_2 \cong \left(\frac{c}{m_1} + \frac{c}{m_2} \right)^{1/2} \cong 100 \text{ Гц} - \text{вторая собственная частота.}$$

Видно, что в позиционно-силовом режиме движения первая собственная частота оцувствленного робота как объекта управления существенно меньше, чем в режиме позиционирования. Вторая собственная частота увеличивается, но незначительно. Подобные соотношения механических характеристик могут служить ориентиром как при выборе силомоментного датчика, так и при формировании обоснованных требований к динамическим характеристикам замкнутых систем управления в основных режимах движения.

Режим выхода робота на контакт с поверхностью

В рассматриваемом режиме объектом управления является многомассовая система (см. рис. 1 а). Требуется перевести ее из начального положения y_{10} в сторону поверхности $y^*(t)$ до контакта с ней силового датчика. Для решения этой задачи при одном датчике обратной связи, измеряющем координату y_1 , можно использовать ПИД-регулятор, т. е. сформировать управляющую силу F по закону:

$$F = \left(k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{p}} \right) (y^d - y_1), \quad (4)$$



где k_p, k_i, k_d – коэффициенты обратных связей; N – параметр дифференцирующего фильтра.

Замкнутая система (1), (4) обладает астатизмом второго порядка, поэтому задание для режима позиционирования целесообразно выбрать в следующем виде:

$$y^d(t) = y_0^d - V_y t, \quad 0 \leq y^d(t) < y_0^d, \quad (5)$$

где $y_0^d = y_{10}$ – начальное значение задания, согласованное с начальным положением робота; V_y – варьируемая скорость убывания задания.

Настройка в Matlab ПИД-регулятора на максимум полосы рабочих частот замкнутой системы при принятых выше значениях параметров объекта управления дает $k_p = 9,58 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$; $k_i = 1,63 \cdot 10^4 \text{ Н/мс}$; $k_d = 4,71 \cdot 10^2 \text{ Нс/м}$; $N = 3,69 \cdot 10^2 \text{ 1/с}$.

Выбранная настройка ПИД-регулятора в режиме позиционирования согласована с механическими характеристиками оцувствленного робота так, что $\omega_c \approx 10T_M^{-1}$, $\omega_1 \leq \omega_c < \omega_2$, где ω_c – частота среза частотной характеристики замкнутой системы от входа y^d до выхода y_1 .

Начало отсчета для координаты поверхности $0 \leq y^*(t) < y_0^d$ соответствует рис. 1 а. Учитывая, что координата поверхности $y^*(t)$ заранее не определена, выход робота на контакт с поверхностью может произойти в любой момент времени t^*

$$0 < t^* \leq y_0^d / V_y.$$

Задание (5) с ограниченной скоростью убывания V_y позволяет установить при-

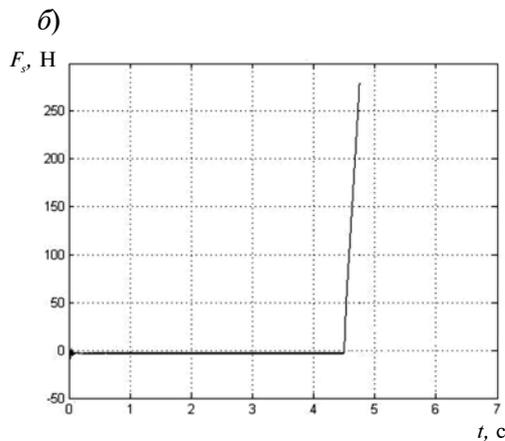


Рис. 2. Графики процессов $y_s(t)$ (а) и $F_s(t)$ (б) в режиме позиционирования

емлемый уровень $\bar{F}_s = \sup_{t \in [0, t^*]} F_s$ показаний датчика силы, который можно принять за индикатор установления безотрывного контакта робота с поверхностью. Заметим, что в режиме позиционирования датчик силы работает только как индикатор перехода к позиционно-силовому режиму управления. Уровень $\bar{F}_s > 0$ устанавливается путем компьютерного моделирования или экспериментально.

На рис. 2 приведены графики процессов $y_s(t)$ и $F_s(t)$ в режиме позиционирования при $y_0^d = y_{10} = y_{20} = y_{s0} = 1$ м и $V_y = 0,2$ м/с. Поверхность постоянного профиля находилась на уровне $y^* = 0,1$ м. Видно, что контакт робота с поверхностью происходит через $t^* \cong 4,5$ с. По переходным процессам при $t \leq t^*$ находим $\bar{F}_s = \sup_{t \in [0, t^*]} F_s = 5$ Н. При $t > t^*$ упругая сила $F_s = c_s(y_s - y_2)$ быстро нарастает, т. к. при контакте $y_s = y^* = 0,1 = \text{const}$, а координата y_2 про-

должает уменьшаться в соответствии с заданием (5).

Чтобы предотвратить поломку робота или повреждение поверхности необходимо перейти при $t \geq t^*$ к управлению силовым взаимодействием робота с поверхностью.

Режим позиционно-силового управления

В соответствии с концепцией связанного позиционно-силового управления [6, 7] контур обратной связи по положению (4) сохраняется без изменения. Однако вместо задания y^d при выполнении условия (2) автоматически вводится новое задание \tilde{y}^d , которое операторным образом зависит от измерений датчика силы F_s :

$$\tilde{y}^d = W(p)(F_s^d - F_s), \quad (6)$$

где F_s^d – задание по силе взаимодействия с поверхностью, которое должен обрабатывать робот; $W(p)$ – передаточная функция регулятора силы.

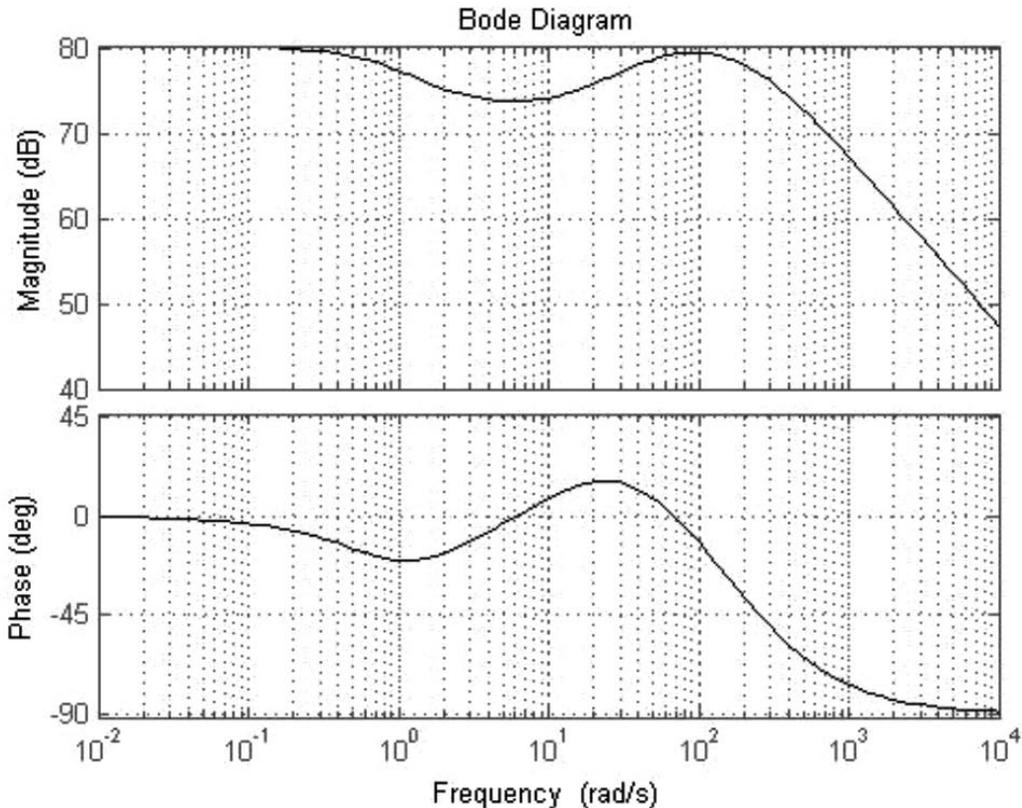


Рис. 3. Частотные характеристики базового контура от задания \tilde{y}^d до показаний датчика силы $F_s(t)$

Таким образом, в режиме позиционно-силового управления вводится еще одна обратная связь. При этом базовый контур с обратной связью по положению (3), (4) является для нее объектом управления. Базовый контур положения из-за контакта робота с поверхностью существенно меняет свои динамические свойства по сравнению с тем, что было в режиме позиционирования. На рис. 3 приведены частотные характеристики базового контура от задания \tilde{y}^d до показаний датчика силы F_s . Видно, что в диапазоне рабочих частот $0 \leq \omega < \omega_c$, который был достигнут при позиционировании, из-за контакта робота с поверхностью происходят изменения частотных характеристик, требующие существенной коррекции замкнутой системы в сторону расширения диапазона рабочих частот. Если пренебречь высокочастотной динамикой, обусловленной упругой податливостью робота, то соответствующая передаточная функция базового контура будет иметь вид:

$$S(p) \cong \frac{c_s(k_d p^2 + k_p p + k_i)}{m p^3 + (b + k_d) p^2 + (c_s + k_p) p + k_i}. \quad (7)$$

При этом базовый контур положения приобретает доминирующую низкочастотную динамику с полюсом $p_1 = \frac{k_i}{c_s + k_p} = -0,83 \text{ 1/с}$.

Структурная схема замкнутой системы (6), (7) приведена на рис. 4.

Рассмотрим некоторые способы реализации обратной связи по силе [5, 7, 11].

Управление при помощи второго ПИД-регулятора

$$W(p) = w_p + w_i \frac{1}{p} + w_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{p}}. \quad (8)$$

Настройка в Matlab регулятора (8) при принятых выше значениях параметров на максимальный диапазон рабочих частот замкнутой системы (рис. 4) дает:

$$w_p = 3,93 \cdot 10^{-5} \text{ м/Н}, \quad w_i = 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ м/сН},$$

$$w_d = -1,11 \cdot 10^{-7} \text{ мс/Н}, \quad N = 3,55 \cdot 10^2 \text{ 1/с}.$$

Управление при помощи интегрального

компенсатора

$$W(p) = \frac{k}{p} \hat{S}^{-1}(p),$$

где k – коэффициент усиления; $\hat{S}^{-1}(p)$ – физически реализуемое приближение оператора $S^{-1}(p)$, обратного к $S(p)$.

Идея этого метода состоит в том, что при полной компенсации динамики объекта управления, т. е. при $\hat{S}^{-1}(p) = S^{-1}(p)$, передаточная функция замкнутой системы (рис. 4) приобретает вид:

$$H(p) = \frac{W(p)S(p)}{1 + W(p)S(p)} = \frac{k}{p + k}.$$

Это значит, что при увеличении коэффициента усиления k можно обеспечить желаемую динамику замкнутой системы с требуемым диапазоном рабочих частот. Однако оператор $S^{-1}(p)$ физически не реализуем. Поэтому возможна лишь приближенная компенсация. Для объекта управления (7) с доминирующей низкочастотной динамикой хорошим приближением обратного оператора может быть $\hat{S}^{-1}(p) = \frac{(c_s + k_p)p + k_i}{c_s(k_d p^2 + k_p p + k_i)}$.

Приближенная компенсация не допускает неограниченного роста коэффициента усиления k из-за потери устойчивости замкнутой системы (6), (7). Диапазон приемлемых значений при принятых выше значениях параметров составляет $k = (30 \div 100) \text{ 1/с}$.

Замкнутая система (6), (7) обладает свойством астатизма, поэтому целесообразно выбрать задание F_s^d по силе F_s с варьируемой скоростью V_F :

$$F_s^d = \bar{F}_s + V_F(t - t^*), \quad t \in [t^*, t^{**}],$$

где $t^{**} = t^* + \frac{F_s^* - \bar{F}_s}{V_F}$ – время выхода задания F_s^d на требуемый уровень F_s^* .

На рис. 5 приведены графики переходных процессов выхода робота на контакт с поверхностью $y^* = 0,1 \text{ м}$ и установления силового взаимодействия робота с поверхностью на уровне $F_s^* = 40 \text{ Н}$. Рисунок 5 а соответствует варианту со вторым ПИД-

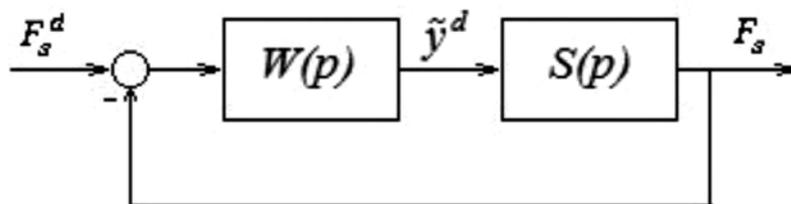


Рис. 4. Структурная схема замкнутой системы в позиционно-силовом режиме управления

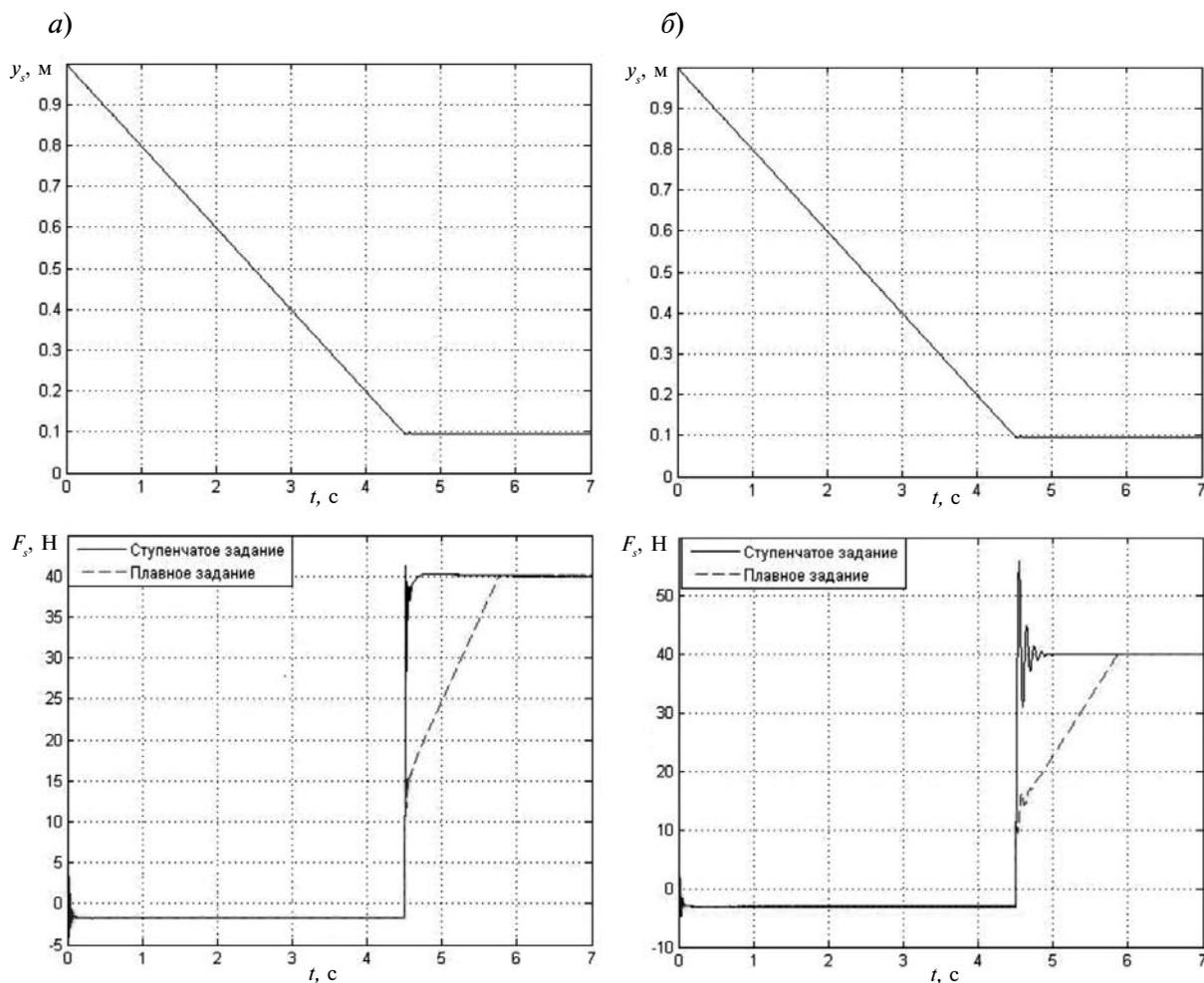


Рис. 5. Графики переходных процессов при использовании второго ПИД-регулятора (а) и интегрального компенсатора (б)

регулятором. Рисунок 5 б соответствует варианту с интегральным компенсатором.

Оба варианта дают вполне приемлемые результаты. Сплошные линии на графиках $F_s(t)$ соответствуют ступенча-

тому заданию. Пунктирные линии соответствуют заданию с конечной скоростью $V_F = 40 \text{ Н/с}$. Плавное задание почти полностью снимает перерегулирование по силе F_s .

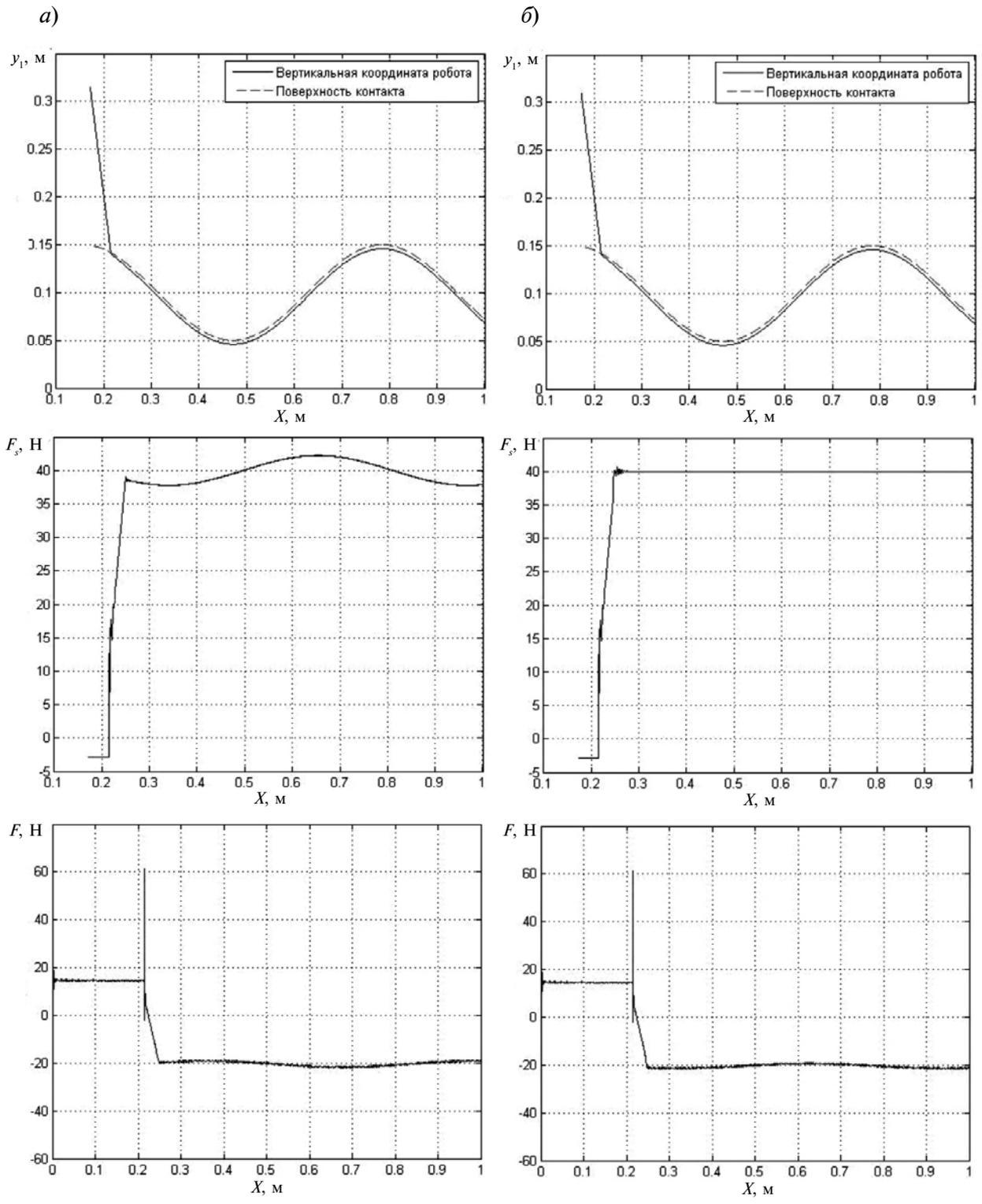


Рис. 6. Графики координаты робота, показаний датчика силы и управляющей силы без обучения (а) и с обучением (б)

Обучение роботов перед выполнением циклических операций

Для оучувствленных роботов, выполняющих циклические операции, имеется дополнительный ресурс повышения точности поддержания требуемого уровня F_s^* силы F_s с помощью процедуры обучения на пробных циклах движения [12, 13].

На (рис. 6 а) приведены графики вертикальной координаты робота $y_1(t)$, показаний датчика силы $F_s(t)$ и управляющей силы $F(t)$ в случае гармонического профиля $y^*(t) = 0,1 + 0,05 \sin 10x|_{x=x^d(t)}$. Хорошо видно, что ошибка обработки задания по силе взаимодействия $e_F = F_s - F_s^*$ тоже меняется по гармоническому закону с амплитудой порядка 2 Н. Такая точность может оказаться недостаточной. В целях повышения точности будем использовать итеративную процедуру обучения с низкочастотным фильтром [13]:

$$F_s^{*(k+1)} = F_s^{*(k)} - \gamma e_F^{(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (9)$$

где $\gamma \leq 1$ — настраиваемый весовой коэффициент.

В соответствии с (9) для каждого $(k+1)$ -го цикла движения коррекция задания производится после завершения k -го цикла по сохраненной в памяти системы управления ошибке e_F .

На рис. 6 б приведены графики про-

цессов после выполнения одной корректирующей итерации. Точность поддержания силы F_s на уровне 40 Н существенно повысилась. Низкочастотный фильтр для ошибки $e_F^{(k)}$ понадобился для исключения из процедуры обучения высокочастотных составляющих переходных процессов, обусловленных упругой податливостью руки робота.

В настоящей статье на примере связанного позиционно-силового управления движением робота показана важная роль моделей механики при выборе рациональных соотношений инерционных и жесткостных характеристик робота и датчика силы, а также структуры и настроек системы управления и задающих воздействий. Стремление повысить точность обработки желаемых движений приводит к необходимости дальнейшего уточнения моделей механики и учета факторов, которые раньше считались второстепенными. В дальнейших исследованиях речь будет идти об учете моделей взаимодействия робота с поверхностью в зоне контакта, которые существенным образом зависят от функционального назначения робота. Только этот путь позволяет получить высокие, но в то же время принципиально реализуемые требования к замкнутой системе управления и желаемым движениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юревич Е.И. Интеллектуальные роботы. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
2. Попов А.В., Юревич Е.И. Позиционно-силовое управление манипуляторами: состояние и перспективы // Мехатроника, автоматизация и управление. 2008. № 5. Приложение. С. 2–6.
3. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010. 191 с.
4. Головин А.Ф., Архипов М.В., Журавлев В.В. Проблемы развития робототехники в восстановительной медицине // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 49–53.
5. Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю. Управление манипуляционными системами на основании информации об усилиях. М.: Физматлит, 1994. 368 с.
6. Hogan N. Impedance control: an approach to manipulation // ASME J. Dynamic Systems, Measr. and Control. 1985. Vol. 107. Pp. 1–24.
7. Lawrence D., Stronghton R.M. Position-based impedance control: Achieving stability in practice // Proc. AIAA Cont. on Guidance, Navigation and Control. 1997. Pp. 221–226.
8. Обработка турбинной лопатки [электронный ресурс]/ URL: www.youtube.com.
9. Головин А.Ф., Архипов М.В., Журавлев В.В. Метод силового обучения при планировании траекторий робота для восстановительной медицины // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 10. С. 29–30.
10. An C., Hollerbach J. The role of dynamic models in cartesian force control of manipulators // Int. J. of Robotics Res. 1989. Vol. 8(4). Pp. 51–72.
11. Rocco P., Ferretti G., Magnani G. Implicit force control for industrial robots in contact with



stiff surfaces // Proc. of the 13th Triennial World Congress. San Francisco, 1996. Pp. 355–360.

12. **Первозванский А.А.** Обучаемое управление и его приложения // Автоматика и телемеханика. 1995. № 11, 12.

13. **Бурдаков С.Ф., Смирнова Н.А.** Обучаемое управление упругим манипулятором при выполнении циклических операций // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2002. № 4. С. 142–149.

REFERENCES

1. **Yurevich Ye.I.** *Intellektualnyye roboty [Intelligent robots]*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2007, 360 p. (rus)

2. **Popov A.V., Yurevich Ye.I.** Pozitsionno-silovoye upravleniye manipulyatorami: sostoyaniye i perspektivy [Position-force control of manipulators: Status and Prospects]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravleniye [Mechatronics, automation and control]*, 2008, No. 5, Pp. 2–6. (rus)

3. **Yegorov I.N.** *Pozitsionno-silovoye upravleniye robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami. [Position-force control of robotic and mechatronic devices]*, Vladimir: VGU Publ., 2010, 191 p. (rus)

4. **Golovin A.F., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V.** Problemy razvitiya robototekhniki v vosstanovitelnoy meditsine [Problems of development of robotics in rehabilitation medicine]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye [Mechatronics, automation and control]*, 2009, No. 9, Pp. 49–53. (rus)

5. **Gorinevskiy D.M., Formalskiy A.M., Shneyder A.Yu.** *Upravleniye manipulyatsionnymi sistemami na osnovanii informatsii ob usilyakh [Office handling systems on the basis of information on efforts]*. Moscow: Fizmatlit Publ., 1994, 368 p. (rus)

6. **Hogan N.** Impedance control: an approach to manipulation. *ASME J. Dynamic Systems, Measr. and Control*, 1985, Vol. 107, Pp. 1–24.

7. **Lawrence D., Stronghton R.M.** Position-based impedance control: Achieving stability in

practice. *Proc. AIAA Cont. on Guidance, Navigation and Control*, 1997, Pp. 221–226.

8. *Obrabotka turbinnoy lopatki [Processing turbine blade]*. Available: www.youtube.com (rus)

9. **Golovin A.F., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V.** Metod silovogo obucheniya pri planirovani trayektoriy robota dlya vosstanovitelnoy meditsiny [The method of power training in the planning of robot trajectories for regenerative medicine]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye [Mechatronics, automation and control]*, 2009, No. 10, Pp. 29–30. (rus)

10. **An C., Hollerbach J.** The role of dynamic models in cartesian force control of manipulators, *Int. J. of Robotics Res.*, 1989, Vol. 8(4), Pp. 51–72.

11. **Rocco P., Ferretti G., Magnani G.** Implicit force control for industrial robots in contact with stiff surfaces. *Proc. of the 13th Triennial World Congress*, San Francisco, 1996, Pp. 355–360.

12. **Pervozvanskiy A.A.** Obuchayemoye upravleniye i yego prilozheniya [Educational management and its application]. *Automatica i telemechanika [Automatics and telemechanics]*, 1995, No. 11, 12. (rus)

13. **Burdaков S.F., Smirnova N.A.** Obuchayemoye upravleniye uprugim manipulyatorom pri vypolnenii tsiklicheskih operatsiy [Educational Management resilient arm when the cyclic operations]. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Izvestia RAS. Theory and control systems]*, 2002, No. 4, Pp. 142–149. (rus)

БУРДАКОВ Сергей Федорович – профессор кафедры механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: burdakov.s@yandex.ru

BURDAKOV Sergey F. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: burdakov.s@yandex.ru

ШАГНИЕВ Олег Булатович – инженер 2 категории кафедры механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: shagnoleg@yandex.ru

SHAGNIEV Oleg B. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: shagnoleg@yandex.ru