

DOI: 10.5862/JCSTCS.252.4

УДК 681.51

*С.Ф. Бурдаков, Т.А. Байдина, О.Б. Шагниеф*

**УПРАВЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫМ СОСТОЯНИЕМ РОБОТА  
ПРИ СИЛОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ШЕРОХОВАТОЙ  
ПОВЕРХНОСТЬЮ НЕОПРЕДЕЛЁННОГО ПРОФИЛЯ**

*S.F. Burdakov, T.A. Baydina, O.B. Shagniev*

**CONTROL OF VIBRATIONAL STATE OF A ROBOT INTERACTING  
WITH A ROUGH FREE-FORMED SURFACE**

Рассмотрена задача позиционно-силового управления движением робота с силовым датчиком обратной связи в режиме контактного взаимодействия с поверхностью неопределенного профиля. Считается, что поверхность может быть шероховатой, а робот, в соответствии с технологической задачей, движется с некоторой скоростью вдоль поверхности с заданным прижатием к ней. В этом случае шероховатость может стать причиной возбуждения колебаний робота, близких к резонансным. В настоящей статье показано, при каких условиях этот эффект возможен и как при этом управлять вибрационным состоянием робота. Проведен сравнительный анализ вибрационного состояния робота при жестком и активном креплении силового сенсора к руке робота. Показано, что при активном креплении силового сенсора можно существенно снизить уровень вибраций руки робота. Исследованы возможности дополнительной обратной связи по сигналу акселерометра, установленного на руке робота, и динамического гашения колебаний при активном креплении силового сенсора.

**РОБОТ; СИЛОВОЕ ОЧУВСТВЛЕНИЕ; ЖЕСТКОЕ И АКТИВНОЕ КРЕПЛЕНИЕ СИЛОВОГО СЕНСОРА; ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ; ШЕРОХОВАТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОФИЛЯ; КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ; УРОВЕНЬ ВИБРАЦИЙ РУКИ РОБОТА; ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО УСКОРЕНИЮ.**

The article considers the problem of position-force control of robot movement with a force feedback sensor in the mode of contact with a free-formed surface. The surface is assumed to be rough; the robot, according to the technological task, moves with a certain speed along the surface and maintains the predetermined level of contact force. In this case the surface roughness may cause the excitation oscillation of the robot close to resonance. The article shows in what case this effect is possible and how to control the vibration of the robot. We made a comparative analysis of the vibration state of the robot with a hard and active mount of the sensor to the robot arm. It is shown that the active mounting of the force sensor can significantly reduce the level of robot arm vibration. The article investigates the possibilities of further signal feedback using the accelerometer mounted on the robot arm, and the dynamic absorbing effect with active mounting of the force sensor.

**ROBOT; FORCE SENSING; HARD AND ACTIVE MOUNT OF FORCE SENSOR; POSITION-FORCE CONTROL; FREE-FORMED ROUGH SURFACE; CONTACT INTERACTION; LEVEL OF ROBOT ARM VIBRATION; ACCELERATION FEEDBACK.**

Очувствление роботов с помощью силомоментных сенсоров является одной из актуальных задач робототехники [1, 2]. Силомоментные сенсоры обычно устанавливаются на руке робота в районе схвата (рабочего инструмента) для определения реактивных сил и моментов, возникающих при контактных взаимодействиях робота с внешними объектами. В робототехнике задачи с контактным взаимодействием занимают значительное место. Сюда относятся задачи роботизации сборки, механообработки и т. д. [3, 4]. Контактные задачи возникают при использовании роботов в экстремальных условиях, например, в космосе, а также в медицине [5, 6]. Несмотря на большое количество публикаций по данной проблематике, отражающих достижения робототехники, всё ещё остаётся ряд вопросов, без решения которых не обеспечить высоких показателей качества выполнения указанных выше практических задач.

В частности, обращаясь к задаче механообработки, можно отметить, что отработанных технологий автоматической шлифовки турбинных лопаток с помощью роботов до сих пор нет. Во многих случаях эта операция осуществляется вручную [3, 7]. Причина такого положения дел в отрасли определяется не только высокими требованиями к качеству и производительности при выполнении данной операции, но и её сложностью для автоматизации из-за высокого уровня неопределённости контактных операций. Одна и та же система по существу должна работать в разных режимах, обеспечивая:

- быстрое позиционирование;
- безударный выход на контакт;
- рабочий режим (шлифовку без заклиниваний);
- безударный сход с контакта.

Ситуация осложняется тем, что очувствление робота обычно связано с увеличением его механической податливости, вследствие чего во всех режимах работы появляется необходимость учёта дополнительных динамических эффектов, вибраций и т. п., приводящих к снижению качества выполнения контактных операций [4, 8].

Так, в работе [9] при синтезе законов связанного позиционно-силового управления роботом с силовым датчиком обратной связи установлен факт существенного уменьшения низшей собственной частоты робота при переходе с режима позиционирования на рабочий режим контактного взаимодействия с поверхностью неопределённого профиля. Учитывая, что поверхность может быть шероховатой, а робот, в соответствии с технологической задачей, движется с некоторой скоростью вдоль поверхности с заданным прижатием к ней, шероховатость может стать причиной возбуждения колебаний робота, близких к резонансным. В настоящей статье описывается, при каких условиях этот эффект возможен и как при этом управлять вибрационным состоянием робота.

### Жесткое крепление силового сенсора

Будем рассматривать рабочий режим контактного взаимодействия робота с поверхностью, считая, что настройки позиционного и силового регуляторов осуществлялись в соответствии с процедурой, изложенной в [9, 10]. Особенностью рассмотренной в этих работах системы управления является то, что для ее работы не требуется заранее задавать профиль поверхности, как это, например, делается в [11, 12]. Профиль может быть произвольным, но достаточно гладким, чтобы исключить заклинивание.

На рис. 1 показаны два варианта установки силового сенсора на руке робота: с жестким креплением фланца сенсора  $m'_s$  к руке робота (рис. 1 а) и с активным (управляемым) креплением (рис. 1 б).

Математическая модель робота в режиме управляемого контактного взаимодействия с поверхностью при жестком креплении сенсора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c(y_1 - y_2) &= F - m_1 g, \\ (m_2 + m'_s) \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + \\ + c(y_2 - y_1) + b_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_*(t)) + c_s(y_2 - y_*(t)) &= \\ = - (m_2 + m'_s) g, \end{aligned} \quad (1)$$

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

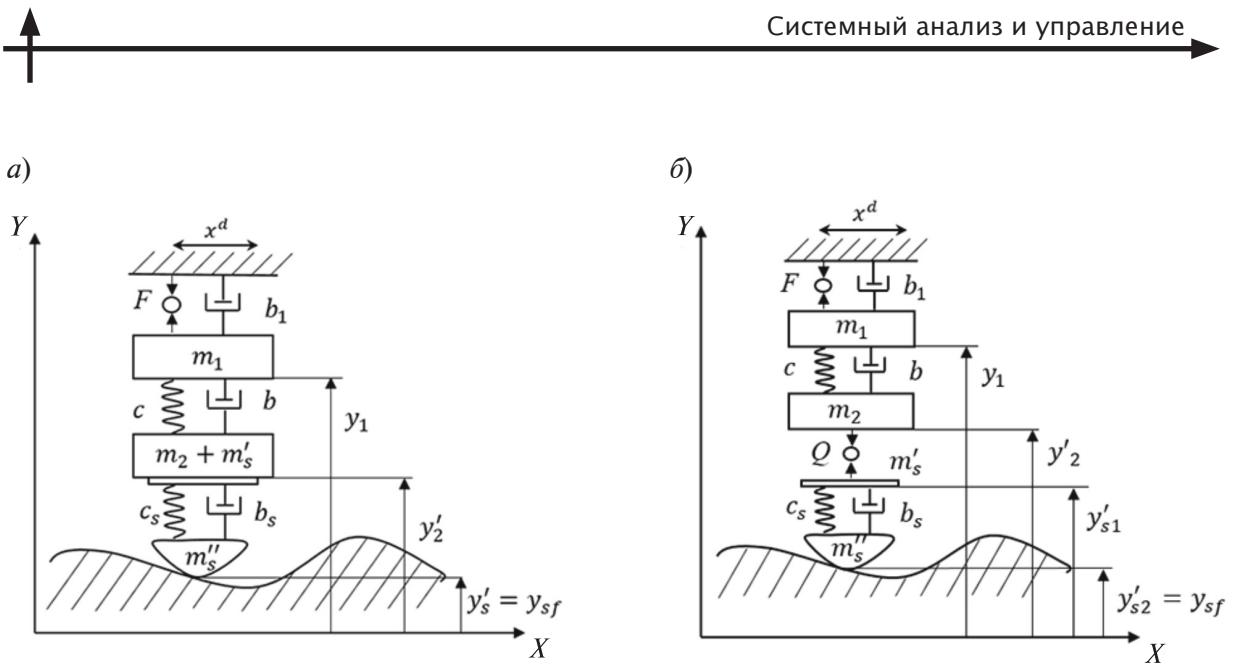


Рис. 1. Расчетные схемы руки робота с силовым очувствлением

$$\tilde{y}^d = \left( \theta_p + \theta_i \frac{1}{p} + \theta_d \frac{N}{1 + N/p} \right) (F^d - F_s). \quad (1)$$

Для руки робота принята двух-массовая расчетная схема с характерными параметрами:  $m_1 = m_2 = 1$  кг,  $c = 30\,000$  Н/м,  $b = 20$  Нс/м. Силовой сенсор характеризуется следующими параметрами:  $m'_1 = m'_2 = 0,1$  кг,  $c_s = 5000$  Н/м,  $b_s = 5$  Нс/м. С помощью него формируется информация о силе прижатия робота к поверхности:

$$F_s = b_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_*(t)) + c_s(y_2 - y_*(t)),$$

$$y_*(t) = y_{sf}(x) \Big|_{x=x^d(t)},$$

где  $y_{sf}(x)$  – вертикальная координата поверхности;  $x = x^d(t)$  – координата, характеризующая программное движение робота вдоль поверхности (при движении с постоянной скоростью  $x^d(t) = V_x t$ ).

Считается, что помимо силового сенсора робот оснащен датчиком положения по координате  $y_1$ . В рамках принятой структуры системы управления роботом (1) допускаются и другие варианты установки датчика положения. Возможен также вариант замены контура позиционирования на контур скорости.

Формирование усилия  $F$ , развиваемого приводным двигателем робота в режиме контактного взаимодействия, осуществля-

ется в соответствии с концепцией связанного позиционно-силового управления, согласно которой контур обратной связи по положению в рабочем режиме контактного взаимодействия сохраняется без изменений по сравнению с режимом позиционирования. При этом желаемая вертикальная координата робота  $\tilde{y}^d$  не задается заранее, а автоматически формируется в процессе движения робота вдоль поверхности с помощью PID-регулятора силой прижатия. В работе [9] показано, что такая двухконтурная структура системы управления позволяет устанавливать требуемое контактное взаимодействие робота с поверхностью неопределённого профиля.

В системе (1) два внешних воздействия: программное задание  $F^d$  по силе прижатия робота к поверхности и возмущающее воздействие  $y_*(t)$ . Будем считать, что оно содержит константу и две переменные составляющие  $y_*(t) = h + y'_*(t) + y''_*(t)$ . Константа  $h$  зависит от  $\inf y_{sf}(x)$  и может варьироваться. Первая медленно меняющаяся составляющая  $y'_*(t)$  определяется профилем поверхности и скоростью движения робота вдоль нее, а вторая быстро меняющаяся составляющая  $y''_*(t)$  – шероховатостью поверхности. Предполагается, что в рабочем режиме контактного взаимодействия робота с поверхностью сила прижатия  $F_s > 0$ , то есть отрыва не происходит.

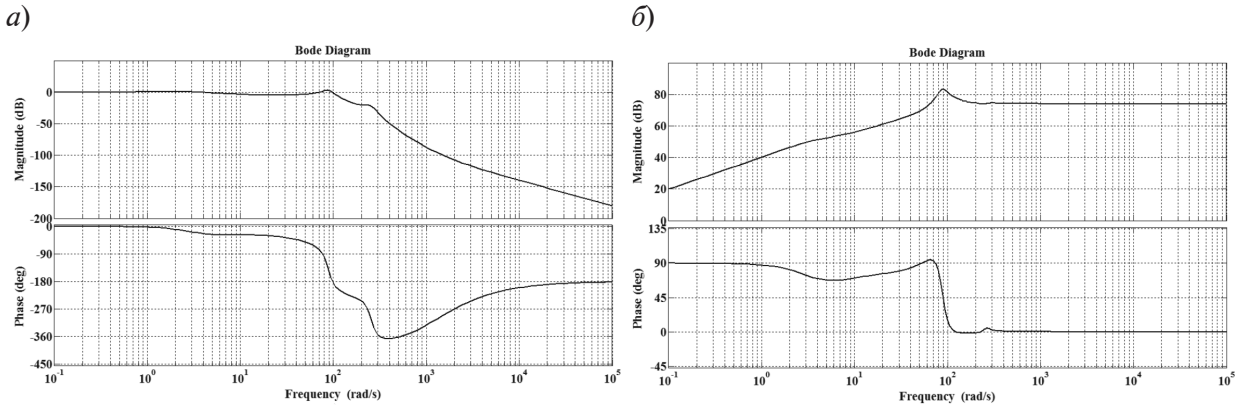


Рис. 2. Диаграммы Бode при жестком креплении сенсора

Замкнутая система (1) имеет восьмой порядок и после настроек обоих регуляторов при принятых выше числовых значениях параметров робота и силового сенсора имеет следующие корни характеристического полинома:

$$p_1 = -44,98; p_2 = -67,65; p_{3,4} = -2,57 \pm 1,82i; p_{5,6} = -11,98 \pm 87,02i; p_{7,8} = -32,2 \pm 253,18i.$$

Диаграммы Бode системы (1) от  $F^d$  к  $F_s$  приведены на рис. 2 а и от  $y_*$  к  $F_s$  — на рис 2 б.

Корни  $p_{5,6}$  обусловлены податливостью силового сенсора, а корни  $p_{7,8}$  — податливостью руки робота. Заметим, что в режиме позиционирования, т. е. без контура обратной связи по силе прижатия, соответствующие корни были

$$p_{5,6} = -25,97 \pm 217,25i; p_{7,8} = -32,1 \pm 264,14i. \quad (2)$$

Видно, что в режиме контактного взаимодействия робота с поверхностью произошло заметное смещение первой собственной частоты в диапазон более низких частот со значения 34,53 Гц до значения 13,85 Гц. Вторая собственная частота осталась практически без изменений в районе 40 Гц. Такое снижение первой собственной частоты резко повышает вероятность возникновения резонансных режимов, обусловленных воздействием  $y_*''(t)$ .

Смоделируем влияние поверхности контакта на робот суперпозицией двух синусов (рис. 3):

$$y_*(t) = h + A \sin(2\pi V_x/L)t + a \sin(2\pi V_x/l)t,$$

где  $A, L/V_x$  — амплитуда и характерный период профиля поверхности;  $a, l/V_x$  — амплитуда и характерный период шероховатости поверхности;  $V_x$  — скорость движения робота вдоль поверхности.

Пусть  $A = 0,05$  м,  $L = 1$  м,  $a = 0,001$  м,  $l = 0,003$  м,  $V_x = 0,1$  м/с,  $h = 0,1$  м. Тогда частота воздействия  $y_*'(t)$  составляет  $2\pi V_x/L = 0,628$  1/с, а воздействия  $y_*''(t)$  составляет  $2\pi V_x/l = 209,33$  1/с.

Таким образом, воздействие  $y_*''(t)$  имеет частоту порядка 33,33 Гц, т. е. при принятых выше характерных параметрах робота и силового сенсора эта частота находится в диапазоне рабочих частот (см. рис. 2). В принципе для современных роботов малой и средней грузоподъемности резонансная область составляет примерно 10...40 Гц. Поэтому периодическое воздействие типа  $y_*''(t)$  может привести к заметному ухудшению вибрационного состояния робота.

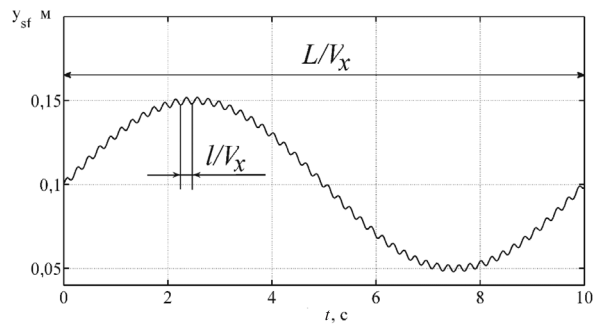


Рис. 3. Профиль поверхности контакта

### Активное крепление силового сенсора

Математическая модель робота в режиме управляемого контактного взаимодействия с поверхностью при активном креплении сенсора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c(y_1 - y_2) &= \\
 &= F - m_1 g, \\
 m_2 \ddot{y}_2 + b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c(y_2 - y_1) &= \\
 &= -Q - m_2 g, \\
 m'_s \ddot{y}_{s1} + b_s(\dot{y}_{s1} - \dot{y}^*(t)) + c_s(y_{s1} - y^*(t)) &= \\
 &= Q - m'_s g, \quad (3) \\
 F &= \left( k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \frac{N}{1 + N/p} \right) (\tilde{y}^d - y_1), \\
 \tilde{y}^d &= \left( \theta_p + \theta_i \frac{1}{p} + \theta_d \frac{N}{1 + N/p} \right) (F^d - F_s).
 \end{aligned}$$

В системе (3) закон управления силой  $F$ , развиваемой приводным двигателем робота, формируется так же, как в (1). Вместе с тем, из-за активного крепления сенсора появляются дополнительные степень свободы и управление  $Q$ . Актуатор, соответствующий управлению  $Q$ , может представлять собой пьезопривод [13,14]. В дальнейшем влияние актуатора будем описывать усредненной упруго-вязкой характеристикой  $Q = \alpha(y_2 - y_{s1}) + \beta(\dot{y}_2 - \dot{y}_{s1})$  с настраиваемыми параметрами  $\alpha$  и  $\beta$ .

Система (3) имеет десятый порядок. Ее свойства (корни характеристического полинома и диаграммы Боде) будут зависеть не только от настроек регуляторов положения и силы прижатия, но и от настроек актуатора  $\alpha$  и  $\beta$ . Дополнительные настройки  $\alpha$  и  $\beta$  могут использоваться для снижения уровня вибраций робота, обусловленных шероховатостью поверхности. Кроме того, в некоторых случаях можно рекомендовать известные практические приемы снижения уровня вибраций. Например, можно использовать фланец сенсора  $m'_s$  в качестве динамического гасителя [15], для повышения эффективности которого система (3) может быть охвачена дополнительной обратной связью по сигналу  $\ddot{y}_2$  акселерометра, установленного на руке робота  $m_2$  [16, 17]. В этом случае дополнительное управление

примет вид  $Q = \alpha(y_2 - y_{s1}) + \beta(\dot{y}_2 - \dot{y}_{s1}) + \gamma \ddot{y}_2$ .

### Результаты моделирования

Проведем сравнительный анализ вибрационного состояния робота при жестком и активном креплениях силового сенсора к руке робота.

Для варианта активного крепления силового сенсора настройки регуляторов положения и силы прижатия

$$\begin{aligned}
 k_p &= 1188,23 \text{ Н/м}, \quad k_i = 2378,14 \text{ Н/мс}, \\
 k_d &= 120 \text{ Нс/м} \\
 \theta_p &= 2,35 \cdot 10^{-5} \text{ м/Н}, \quad \theta_i = 0,01 \text{ м/сН}, \\
 \theta_d &= -2,89 \cdot 10^{-7} \text{ мс/Н}
 \end{aligned}$$

не менялись по сравнению с вариантом жесткого крепления силового сенсора. Рекомендуемые настройки дополнительного актуатора имеют значения  $\alpha = 8000 \text{ Н/м}$ ,  $\beta = 20 \text{ Нс/м}$ .

Для коэффициента дополнительной обратной связи по сигналу акселерометра установлено значение  $\gamma = 5 \text{ Нс}^2/\text{м}$ .

Во всех случаях настройки осуществлялись по комплексу прямых показателей качества выполнения целевой функции робота, таких как быстродействие, перерегулирование, колебательность, добротность, уровень вибраций и т. п. Контур положения настраивался как подчиненный для контура управления силой прижатия. Настройка дополнительного актуатора осуществлялась при настроенных регуляторах положения и силы прижатия. Всего настраивалось девять коэффициентов обратных связей.

Рассмотрим более подробно рабочий режим контактного взаимодействия робота с поверхностью при активном креплении силового сенсора. При указанных выше настройках корни характеристического полинома замкнутой системы имеют вид:

– при отсутствии дополнительной обратной связи по сигналу акселерометра ( $\gamma = 0$ )

$$\begin{aligned}
 p_1 &= -41,28, \quad p_2 = -57,92, \quad p_{3,4} = -2,53 \pm 1,81i, \\
 p_{5,6} &= -18,86 \pm 78,37i, \quad p_{7,8} = -32,78 \pm 252,93i, \\
 p_{9,10} &= -132,96 \pm 344,99i;
 \end{aligned}$$

– при наличии обратной связи по сигналу акселерометра ( $\gamma = 5 \text{ Нс}^2/\text{м}$ )



$$p_1 = -47,39, p_2 = -63,96, p_{3,4} = -2,52 \pm 1,8i, \\ p_{5,6} = -4,34 \pm 35,77i, p_{7,8} = -31,32 \pm 210,33i, \\ p_{9,10} = -126,21 \pm 338,96i.$$

Диаграммы Боде при активном креплении силового сенсора по сравнению с диаграммами Боде, представленными на рис. 2, показывают заметное смещение в низкочастотную область собственной частоты, обусловленной податливостью силового сенсора (корни  $p_{5,6}$ ). Это смещение можно уменьшить отрицательной обратной связью по ускорению  $\ddot{y}_2$ . Однако при этом немного снижается эффективность активного крепления силового сенсора с точки зрения снижения уровня вибрации руки робота. Заметим, что при положительной обратной

связи по ускорению область устойчивости замкнутой системы заметно меньше, чем при отрицательной обратной связи.

На рис. 4 приведены графики установившихся процессов силы прижатия  $F_s(t)$  и координаты руки робота  $y_2(t)$  для вариантов жесткого крепления силового сенсора (рис. 4 а), активного крепления силового сенсора при  $\gamma = 0$  (рис. 4 б) и активного крепления силового сенсора с дополнительной обратной связью по сигналу акселерометра при  $\gamma = 5 \text{ Нс}^2/\text{М}$  (рис. 4 в).

На рис. 5 приведены графики установившихся процессов ускорения руки робота  $\ddot{y}_2(t)$  для тех же вариантов крепления силового сенсора к руке робота.

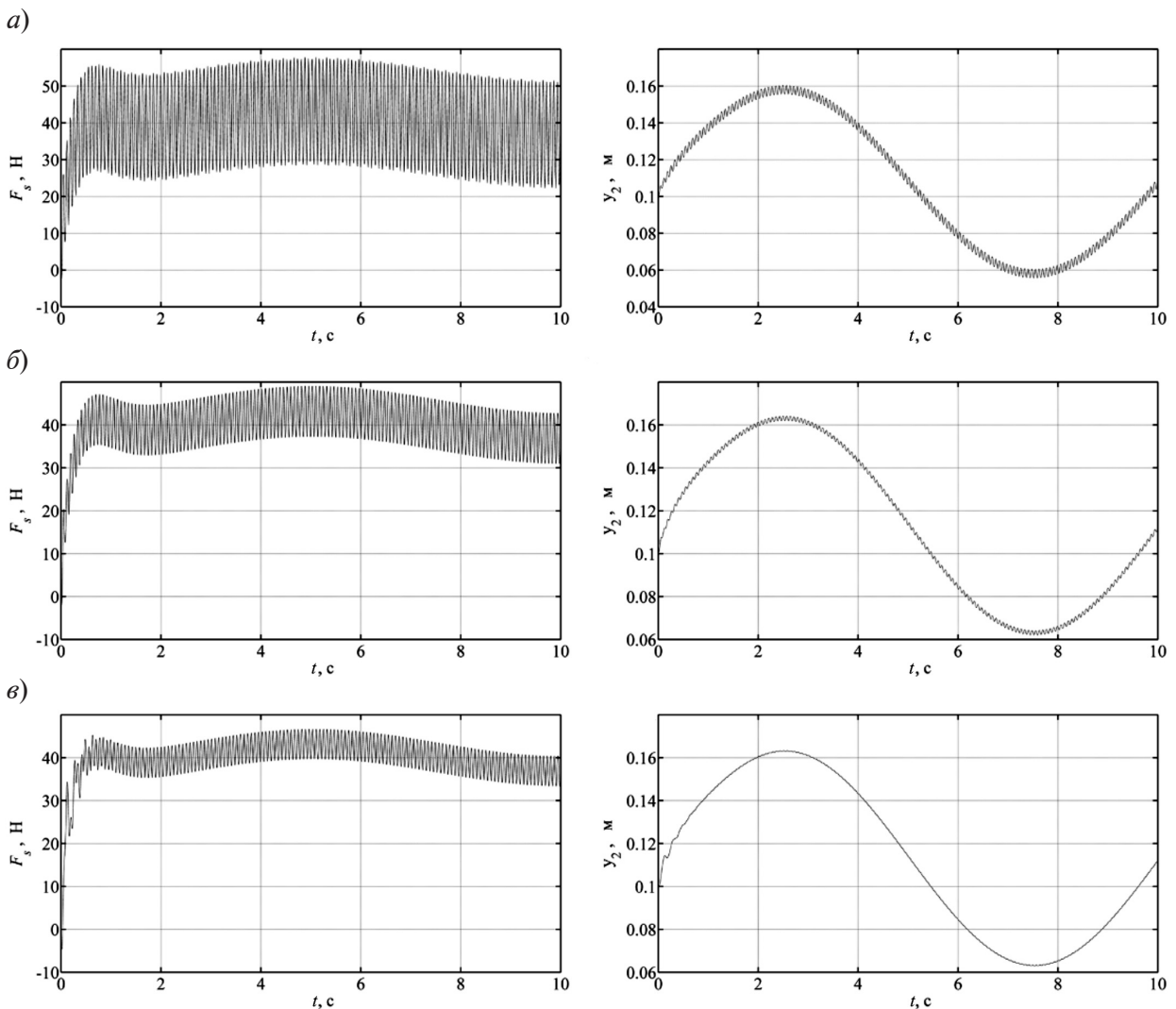


Рис. 4. Установившиеся процессы силы прижатия и координаты руки робота

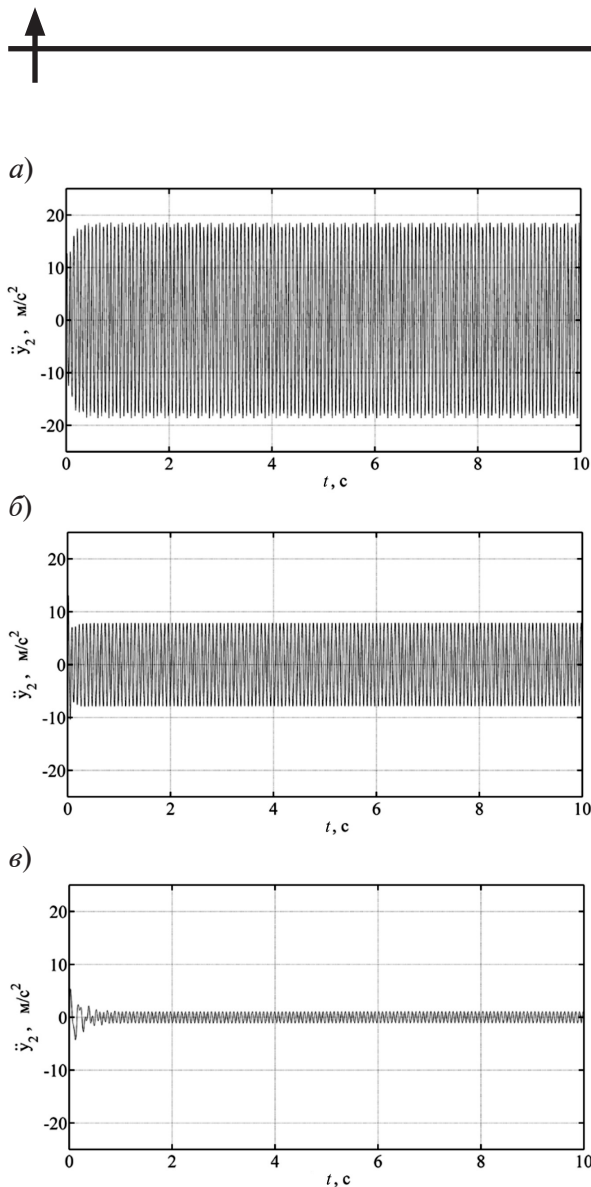


Рис. 5. Установившиеся процессы ускорения руки робота

В таблице приведены амплитудные значения отклонений от программных значений при установившихся вынужденных ко-

лебаниях для соответствующих процессов.

Программное значение силы прижатия робота к поверхности принималось равным 40 Н. Программное значение координаты руки робота соответствовало профилю поверхности. Частота кинематического возмущения  $y_*(t)$ , обусловленного шероховатостью поверхности, составляла  $2\pi V_x/l = 87$  1/с, то есть соответствовала первой собственной частоте робота при жестком креплении сенсора.

Видно, что при активном креплении силового сенсора к руке робота и дополнительной обратной связи по сигналу акселерометра отклонение силы прижатия робота к поверхности  $F_s$  от заданного значения  $F^d = 40$  Н не превышает  $\pm 8,75$  %. В то время как при жестком креплении силового сенсора, т. е. при резонансе, достигало  $\pm 35$  %. При этом амплитудное значение ускорения руки робота уменьшилось почти в 20 раз.

Обратим внимание на то, что параметры робота были выбраны так, что наиболее податливым элементом является силовой сенсор  $c_s^{-1}$ , далее следует податливость крепления фланца силового сенсора к руке робота  $\alpha^{-1}$  и, наконец, податливость руки робота  $c^{-1}$ . Такое соотношение, на наш взгляд, наиболее предпочтительное для силового очувствления роботов.

В заключение заметим, что попытка использования при активном креплении силового сенсора фланца  $m'_s$  в качестве динамического гасителя при принятых параметрах робота привела лишь к небольшому снижению уровня вибра-

Амплитудные значения отклонений от программных значений

Крепление сенсора	Сила прижатия $F_s$ , Н	Координата руки робота $y_2$ , мм	Ускорение руки робота $\ddot{y}_2$ , м/с <sup>2</sup>
Жесткое	14	2,25	20
Активное	6	1	8
Активное с дополнительной обратной связью	3,5	0,15	1

ций руки робота, т. к. частота гашения  $\omega_c = \sqrt{\frac{c_s + \alpha}{m'_s}}$  оказалась около 50 Гц, т. е. за пределами диапазона рабочих частот, там, где происходит естественное для динамических систем снижение уровня вибраций.

Результаты моделирования показали высокую эффективность активного крепления силового сенсора к руке робота по сравнению с жестким креплением с точки зрения снижения уровня ее вибраций, возникающих при движении вдоль контактной поверхности с шероховатостью периодического характера.

Дополнительная податливость робота, обусловленная силовым очувствлением с активным креплением силового сенсора, требует согласованной настройки регуляторов позиционного и силового контуров управления, обеспечивающей эффективное гашение упругих колебаний в диапазоне рабочих частот.

В дальнейшем будут исследованы возможности практической реализации активного крепления силового сенсора с помощью пьезоприводов, а также осуществлено развитие предложенного в статье подхода к позиционно-силовому управлению роботами с пространственной кинематической схемой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G.** Robotics: Modeling, Planning and Control. London: Springer, 2009.
2. **Егоров И.Н.** Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010.
3. **Рассказчиков Н.Г.** Управление промышленными роботами для абразивной зачистки с использованием силомоментной адаптации // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. [Электронный ресурс]/ URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16772>
4. **Попов А.В., Юревич Е.И.** Позиционно-силовое управление манипуляторами: состояние и перспективы // Мехатроника, автоматизация и управление. 2008. № 5. Приложение. С. 2–6.
5. [Электронный ресурс]/ URL: [www.robo geek.ru/kosmicheskije-roboty](http://www.robo geek.ru/kosmicheskije-roboty)
6. **Головин А.Ф., Архипов М.В., Журавлёв В.В.** Проблемы развития робототехники в восстановительной медицине // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 49–53.
7. [Электронный ресурс]/ URL: [www.youtube.com/шлифовка турбинных лопаток роботами](http://www.youtube.com/шлифовка турбинных лопаток роботами)
8. **Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П.** Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука, 2011.
9. **Бурдаков С.Ф., Шагниева О.Б.** Модели механики в задаче управления силовым взаимодействием робота с поверхностью неопределенного профиля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 4(224). С. 68–79.
10. **Шагниева О.Б., Бурдаков С.Ф.** Стабилизация силового взаимодействия робота с поверхностью неопределенного профиля // Неделя науки СПбГПУ: матер. науч.-практ. конф. Ин-т прикладной математики и механики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 70–72.
11. **Mills J.K., Goldenberg A.A.** Force and Position Control of Manipulators During Constrained Motion Tasks // IEEE Transaction on Robotics and Automation. 1989. Vol. 5. No. 1. Pp. 30–46.
12. **Fisher W.D., Mujtaba M.S.** Hybrid position/force control: a correct formulation // Robotics research. 1992. Vol. 11. No. 4. Pp. 299–311.
13. **Жуков С.А.** О пьезокерамике и перспективах её применения // Компоненты и технологии. 2001. № 1. С. 50–54.
14. **Самарин А.** Миниатюрные линейные пьезоэлектрические двигатели // Компоненты и технологии. 2006. № 10.
15. **Бабаков И.М.** Теория колебаний. М.: Наука, 1968.
16. **Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю.** Управление манипуляционными системами на основании информации об усилиях. М.: Физматлит, 1994.
17. **Градецкий А.В., Рыбак Л.А., Синев А.В., Пашков А.И.** Построение управляющих регуляторов активной системы виброизоляции кинематического принципа действия // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 3. С. 88–93.



## REFERENCES

1. **Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G.** *Robotics: Modeling, Planning and Control*. London: Springer, 2009.
2. **Yegorov I.N.** *Pozitsionno-silovoye upravleniye robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami [Position-force control of robotic and mechatronic devices]*. Vladimir: Vladimir. Gos. Un-t Publ., 2010. [rus]
3. **Rasskazchikov N.G.** Upravleniye promyshlennymi robotami dlya abrazivnoy zachistki s ispolzovaniyem silomomentnoy adaptatsii [Control of industrial robots for abrasive cleaning using force-moment adaptation]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]*, 2014, No. 6. Available: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16772> [rus]
4. **Popov A.V., Yurevich Ye.I.** Pozitsionno-silovoye upravleniye manipulyatorami: sostoyaniye i perspektivy [Positional-Power Control by Manipulators: State and Perspectives]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravleniye [Mechatronics, Automation, Control]*, 2008, No. 5, Pp. 2–6. [rus]
5. Available: [www.robogeeek.ru/kosmicheskieroboty](http://www.robogeeek.ru/kosmicheskieroboty) [rus]
6. **Golovin A.F., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V.** Problemy razvitiya robototekhniki v vosstanovitelnoy meditsine [The Development Problems of Robotics for Restorative Medicine]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye [Mechatronics, Automation, Control]*, 2009, No. 9, Pp. 49–53. [rus]
7. Available: [www.youtube.com/shlifovka\\_turbinykh\\_lopatok\\_robotami](http://www.youtube.com/shlifovka_turbinykh_lopatok_robotami) [rus]
8. **Yeliseyev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P.** *Mekhatronnyye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatelnykh system [Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical vibration systems]*. Novosibirsk: Nauka Publ., 2011. [rus]
9. **Burdakov S.F., Shagniyev O.B.** Modeli mekhaniki v zadache upravleniya silovym vzaimodeystviyem robota s poverkhnostyu neopredelennogo profilya [Mechanics Models in the Control Problem of the Force Interaction between a Robot and a Free-Formed Surface]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2015, No. 4(224), Pp. 68–79. [rus]
10. **Shagniyev O.B., Burdakov S.F.** Stabilizatsiya silovogo vzaimodeystviya robota s poverkhnostyu neopredelennogo profilya [The stabilization force interaction with the surface of the robot indefinite profile]. *Nedelya nauki SPbGPU: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Institut prikladnoy matematiki i mekhaniki*. St Petersburg: Politekh. Un-t Publ., 2014, Pp. 70–72. [rus]
11. **Mills J.K., Goldenberg A.A.** Force and Position Control of Manipulators During Constrained Motion Tasks. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1989, Vol. 5, No. 1, Pp. 30–46.
12. **Fisher W.D., Mujtaba M.S.** Hybrid position/force control: a correct formulation. *Robotics research*, 1992, Vol. 11, No. 4, Pp. 299–311.
13. **Zhukov S.A.** O pyezokeramike i perspektivakh yeye primeneniya [About piezoceramic and prospects of its application]. *Komponenty i tekhnologii [Components & Technologies]*, 2001, No. 1, Pp. 50–54. [rus]
14. **Samarin A.** Miniaturnyye lineynyye pyezoelektricheskiye dvigateli [Miniature linear piezoelectric motors]. *Komponenty i tekhnologii [Components & Technologies]*, 2006, No. 10. [rus]
15. **Babakov I.M.** *Teoriya kolebaniy [Theory of oscillations]*. Moscow: Nauka Publ., 1968. [rus]
16. **Gorinevskiy D.M., Formalskiy A.M., Shneyder A.Yu.** *Upravleniye manipulyatsionnymi sistemami na osnovanii informatsii ob usilyakh [Manipulation systems management based on information on the efforts]*. Moscow: Fizmatlit Publ., 1994. [rus]
17. **Gradetskiy A.V., Rybak L.A., Sinev A.V., Pashkov A.I.** Postroyeniye upravlyayushchikh regulyatorov aktivnoy sistemy vibroizolyatsii kinemacheskogo printsipa deystviya [The Design of Control Regulators of an Active Vibration-Proof Insulation System of the Kinematic Action Principle]. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Journal of Computer and Systems Sciences International]*, 1996, No. 3, Pp. 88–93. [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

**БАЙДИНА Татьяна Александровна** – магистрант 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: baydinatanya2401@gmail.com

**BAYDINA Tatiana A.** *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: baydinatanya2401@gmail.com

**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