

DOI: 10.18721/JCSTCS.111106

УДК 681.51

УПРАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯМИ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РОБОТА С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНОГО ТРЕНИЯ

Т.А. Байдина, С.Ф. Бурдаков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена задача позиционно-силового управления движением системы «робот – инструмент – деталь», характерным для операций механообработки. Инструмент установлен в упругом подвесе, обеспечивающем силовое ощущение робота. Робот, в соответствии с технологической задачей, движется с некоторой скоростью вдоль поверхности с заданным прижатием к ней. В этом случае между инструментом и деталью возникают силы трения, нелинейный характер которых, в условиях упругого подвеса инструмента, может стать причиной возникновения в системе «робот – инструмент – деталь» на малых (ползучих) скоростях движения робота вдоль поверхности фрикционных автоколебаний. В результате появляется неравномерность движения с кратковременными остановками инструмента. В статье методами математического и компьютерного моделирования показано, при каких условиях возникает этот эффект и как при этом с помощью вибрационного (импульсного) сглаживания подавить фрикционные автоколебания. Показано как, оставаясь в рамках штатной системы управления, сделать этот процесс адаптивным с помощью логического переключающего устройства. Намечены перспективы использования для этих целей искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: система «робот – инструмент – деталь»; силовое ощущение; позиционно-силовое управление; контактное взаимодействие; нелинейное трение; Штрибек-эффект; ползучая скорость; автоколебания; импульсное сглаживание; адаптация.

Ссылка при цитировании: Байдина Т.А., Бурдаков С.Ф. Управление автоколебаниями при контактном взаимодействии робота с обрабатываемой поверхностью в условиях нелинейного трения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 1. С. 65–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.111106

CONTROL OF SELF-OSCILLATIONS IN CONTACT INTERACTION OF A ROBOT WITH A TREATED SURFACE UNDER NONLINEAR FRICTION

T.A. Baidina, S.F. Burdakov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The article considers the problem of position-force control of the «robot – tool – detail» system movement, which is typical for machining operations. The tool is installed in elastic suspension, which provides force sensing of the robot. The robot, in accordance with the technological task, moves at a certain speed along the surface with a predetermined pressure to it. The non-linear nature of friction under elastic suspension of the tool and a small (creeping) speed of movement of the robot along the surface can cause frictional self-oscillations in the system. This can lead to a non-uniform motion with short-term stops of the tool. In this article, we have investigated the conditions under which this effect occurs by use of mathematical and computer simulation methods. Furthermore, it is shown how the frictional self-oscillations can be suppressed by another nonlinear effect, vibrational (pulse) smoothing. The way of making this process adaptive within the framework of a regular control system by use of a logical switching device is proposed. In the future it is planned to use artificial neural networks for these purposes.

Keywords: system «robot – tool – detail»; force sensing; position-force control; contact interaction; nonlinear friction; Stribeck effect; creeping speed; self-oscillations; pulse smoothing; adaptation.

Citation: Baidina T.A., Burdakov S.F. Control of self-oscillations in contact interaction of a robot with a treated surface under nonlinear friction. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 1, Pp. 65–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.11106

Введение

Задачи управления контактным взаимодействием роботов с обрабатываемой поверхностью актуальны для автоматизации процессов механообработки, шлифовки турбинных лопаток, лопастей гребных валов и т. п. [1, 2]. До настоящего времени в силу ряда причин некоторые процессы даже при массовом производстве все еще выполняются вручную [3]. Одна из причин связана с тем, что в зависимости от технологических требований приходится рассматривать очень широкий спектр режимов взаимодействия [4]. При этом стремление к повышению точности процессов часто приводит к нарушению их стабильности [4, 5]. Речь идет о возникновении в упругой системе «робот – инструмент – деталь» нежелательных резонансных явлений, автоколебаний, высокочастотных вибраций, которые в свою очередь приводят к нарушению технологических требований обработки деталей, а также к быстрому износу и поломкам инструмента [5, 6]. Все это неизбежно обуславливает необходимость введения в штатную систему управления робота различных контуров адаптации и подсистем искусственного интеллекта [7, 8].

В настоящей статье основной акцент делается на подавлении фрикционных ав-

токолебаний, возникающих на ползучих скоростях движения робота вдоль обрабатываемой поверхности с заданным прижатием к ней.

Постановка задачи

Предполагается, что робот имеет три взаимно перпендикулярные степени подвижности. На роботе в упругом подвесе установлен рабочий инструмент. Упругий подвес обеспечивает силовое очувствление робота по трем осям. Деталь закреплена на подвижном основании. Ориентирующие степени подвижности основания позволяют обеспечить совпадение инструментальной оси и главной нормали к поверхности обрабатываемой детали. При таких предположениях динамическая взаимосвязь степеней подвижности робота проявляется только через силы трения в режиме контактного взаимодействия с деталью. При этом штатная система управления робота должна обеспечивать по вертикальной координате требуемое прижатие инструмента к поверхности детали, а по горизонтальным координатам – требуемое движение вдоль поверхности. При движении вдоль поверхности между инструментом и поверхностью детали возникают силы трения, препятствующие движению, характер которых

зависит от свойств пар трения, относительных скоростей горизонтального движения и от силы прижатия инструмента к поверхности детали.

Экспериментально установлено [9], что в подобных ситуациях при малых (ползучих) скоростях движения инструмента вдоль поверхности могут возникнуть фрикционные автоколебания, представляющие собой периодическое движение с кратковременными остановками инструмента. В то же время, при тех же условиях, но при относительно больших скоростях движения автоколебания не возникают.

Задача данной статьи состоит в том, чтобы выбрать адекватную модель трения, позволяющую правильно описать наблюдаемые на практике фрикционные автоколебания и обеспечить их подавление с помощью контура адаптации, дополняющего штатную систему управления [9, 10].

На рис. 1 приведена упрощенная расчетная схема контактного взаимодействия робота с поверхностью неопределенного профиля.

Учитывается вертикальная степень подвижности робота y и одна из горизонтальных степеней подвижности робота x . Такая расчетная схема позволяет правильно учесть характер взаимодействия робота

с поверхностью обрабатываемой детали. Штатная система управления в этом случае имеет два канала: позиционно-силовой по вертикальной координате, обеспечивающий требуемое прижатие F_y^d инструмента к поверхности детали, и скоростной канал по горизонтальной координате, обеспечивающий заданную скорость движения V_x^d инструмента вдоль поверхности [11]. Считается, что робот оснащен датчиком положения по координате y и датчиком скорости по координате x . Соответствующие координаты инструмента обозначим y_s и x_s . Кроме того, при управлении роботом используется информация с датчиков силы, которая характеризует состояние упругого подвеса инструмента $R_x = K_x(x - x_s)$, $R_y = K_y(y - y_s^*)$, где K_x , K_y – жесткости упругого подвеса инструмента по координатам x и y .

Будем считать, что контакт инструмента с поверхностью обрабатываемой детали установлен, и сила прижатия достигла требуемого значения F_y^d . В этот момент времени начинается движение робота по горизонтальной координате с поддержанием требуемого прижатия F_y^d . Математическая модель такого движения со штатной системой управления имеет следующий вид [12, 13]:

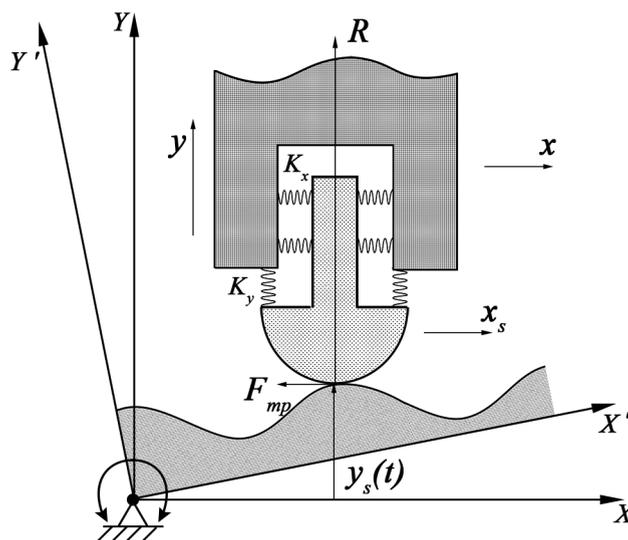


Рис. 1. Расчетная схема системы «робот – инструмент – деталь»

Fig. 1. The calculation scheme of the «robot-tool-detail» system

$$\begin{aligned} M_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + K_y (y - y_s^*) &= F_y - M_y g, \\ M_x \ddot{x} + b_x \dot{x} + K_x (x - x_s) &= F_x, \\ m_x \ddot{x}_s + b_{xs} \dot{x}_s + K_x (x_s - x) &= -F_f. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F_y &= \left(k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \frac{N}{1 + Np^{-1}} \right) (\tilde{y}^d - y), \\ \tilde{y}^d &= \left(\theta_p + \theta_i \frac{1}{p} + \theta_d \frac{N}{1 + Np^{-1}} \right) (F_y^d - R_y), \\ F_x &= \left(\xi_p + \xi_i \frac{1}{p} + \xi_d \frac{N}{1 + Np^{-1}} \right) (V_x^d - \dot{x}). \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (1) дают описание объекта управления, а уравнения (2) – штатного закона управления, состоящего из двух ПИД-регуляторов по вертикальной координате y и силе прижатия R_y и одного ПИД-регулятора по горизонтальной скорости \dot{x} . В математической модели (1), (2) введены следующие обозначения: M_x , M_y – приведенные массы руки робота; m_x – приведенная масса инструмента; K_x , K_y – жесткости упругого подвеса инструмента; b_x , b_y , b_{xs} – коэффициенты вязкого трения; F_x , F_y – силы, развиваемые двигателями робота; F_f – сила трения в области контакта инструмента с поверхностью.

Модели трения и фрикционные автоколебания

Математическая модель (1), (2) описывает режимы движения робота без потери контакта между инструментом и поверхностью детали. При этом взаимовлияние по трем независимым координатам x , y , x_s

происходит только через силу трения F_f . Покажем, что при адекватном выборе модели трения расчетная схема (см. рис. 1) и математическая модель (1), (2) позволяют получить автоколебательные процессы, наблюдаемые на практике.

Рассмотрим модель трения, учитывающую вязкое трение, сухое (кулоново) трение, и трение с учетом Штрибек-эффекта:

$$F_f = \left(a_0 + a_1 \exp \left(- \left(\frac{V_{xs}}{V_{x0}} \right)^2 \right) \right) \text{sign} V_{xs} + a_2 V_{xs}, \quad (3)$$

где $a_0 + a_1$ – уровень максимальной силы трения покоя; $a_0 = \mu R$ – величина силы трения при движении, зависящая от вертикальной реакции поверхности R и коэффициента трения μ ; a_2 – коэффициент вязкого трения; V_{x0} – параметр Штрибек-эффекта (рис. 2) [11, 14].

Рассмотрим возможные варианты модели трения (3): $a_0 = 0$, $a_1 = 0$ – вязкое трение; $a_1 = 0$, $a_2 = 0$ – сухое (кулоново) трение; $a_2 = 0$ – сухое трение с учетом Штрибек-эффекта. Из модели (3) видно, что при вязком трении $F_f = a_2 V_{xs}$ уравнения по координатам x и y динамически не связаны. При сухом трении и трении со Штрибек-эффектом движение по координате y через нормальную реакцию поверхности R влияет на F_f и далее на движение по координате x . Обратное влияние при этом отсутствует. С помощью компьютерного моделирования рассмотрим более подробно варианты с сухим трением и трением со Штрибек-эффектом. Примем следующие значения параметров: $M_x = M_y = 2$ кг,

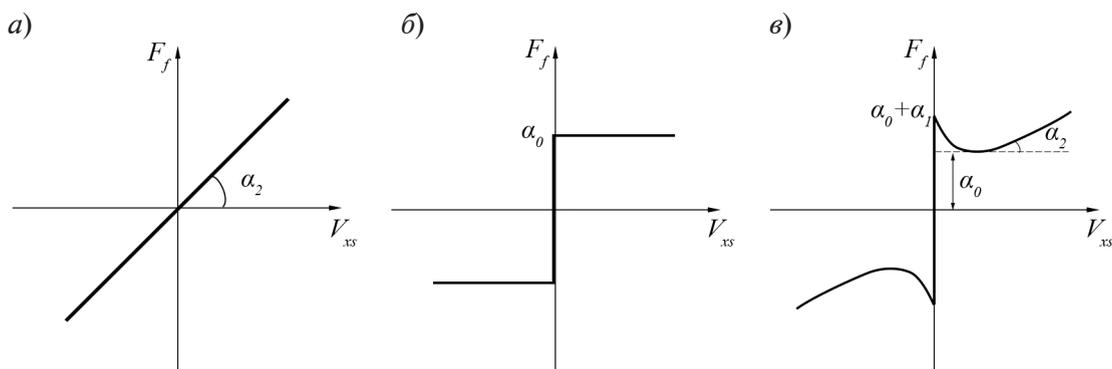


Рис. 2. Модели трения в зоне контакта инструмента и детали
Fig. 2. Model of friction in the contact area of the tool and the part

$m_x = 0,5$ кг, $K_x = 3000$ Н/м, $K_y = 4000$ Н/м, $b_x = b_y = 25$ Н·см, $F_y^d = 40$ Н, $a_0 + a_1 = 5$ Н, $\mu = 0,1$, $V_{x0} = V_x^d = 0,01$ м/с. При таких значениях параметров собственные частоты объекта управления по координатам x и y определяются следующим образом: $\omega_x \cong (K_x/M_x + K_x/m_x)^{1/2} = 86,6$ рад/с (13,8 Гц), $\omega_y \cong (K_y/M_y)^{1/2} = 44,7$ рад/с (7,1 Гц).

Настройка штатных ПИД-регуляторов (2) для всех вариантов моделей трения была одна и та же. Она осуществлялась стандар-

тно с помощью пакета Matlab для варианта с вязким трением по прямым показателям качества переходных процессов.

На рис. 3 приведены графики процессов движения робота по горизонтальной координате для разных моделей трения. Переходные процессы по вертикальной координате с выходом на требуемое прижатие F_y^d завершаются за время чуть менее 1 с. С этого момента начинается движение по горизонтальной координате. Видно, что при вязком трении (рис. 3 а) движение быстро переходит в установившийся режим.

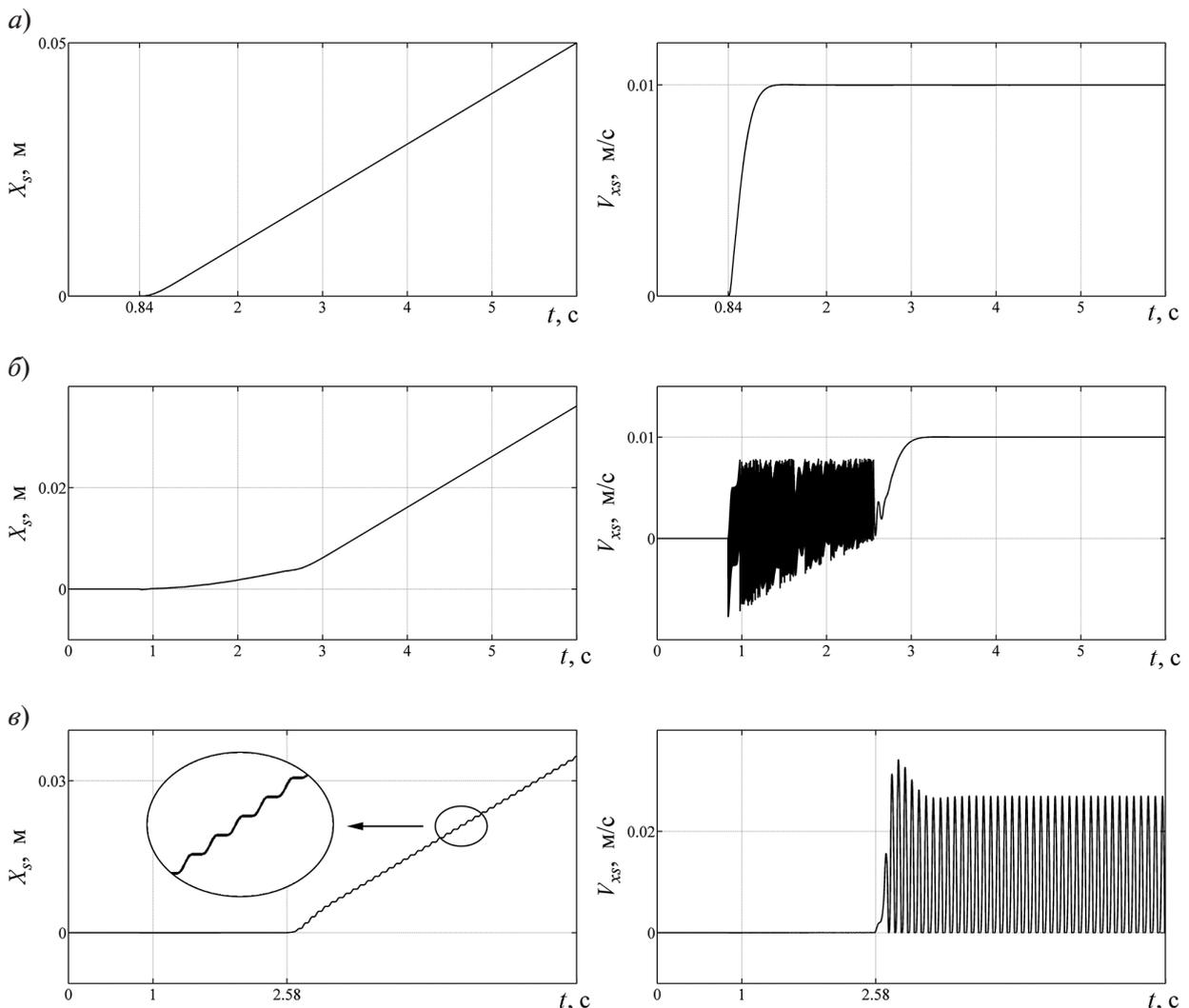


Рис. 3. Процессы в системе на ползучей скорости $V_x^d = 0,01$ м/с:
а – при вязком трении; б – при сухом трении; в – при трении со Штрибек-эффектом

Fig. 3. Processes in the system at creeping speed $V_x^d = 0.01$ m/s:
а – with viscous friction; б – with dry friction; в – with friction with Stribeck effect

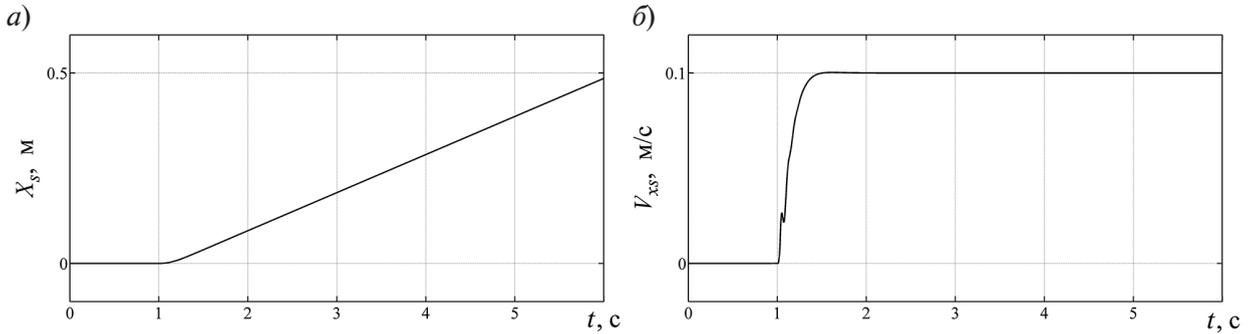


Рис. 4. Процессы в системе при трении со Штрибек-эффектом на скорости
Fig. 4. Processes in the system in friction with the Stribeck effect at speed

При кулоновом трении (рис. 3 б) движение инструмента начинается примерно через 1,3 с и после переходного процесса скорость V_{xs} выходит на требуемый уровень 0,01 м/с. При модели трения со Штрибек-эффектом примерно через 2,5 с возникают устойчивые автоколебания с частотой $\omega_A \cong 12$ Гц и амплитудой по скорости $A = 0,012$ м/с.

Автоколебания проявляются в нарушении равномерности движения по координате инструмента x_s . Инструмент в этом случае движется с кратковременными остановками так, как это наблюдается на практике (рис. 3 в).

На рис. 4 приведены графики процессов движения робота по горизонтальной координате для модели трения со Штрибек-эффектом при относительно большой скорости $V_x^d = 0,1$ м/с. Видно, что в этом случае автоколебания не воз-

никают, и после непродолжительного переходного процесса скорость V_{xs} выходит на установившийся уровень $V_x^d = 0,1$ м/с. Эта ситуация тоже соответствует наблюдаемой на практике.

Импульсное сглаживание и адаптация

Эффективным способом подавления автоколебаний на малых (ползучих) скоростях движения может стать эффект вибрационного (импульсного) сглаживания нелинейного трения, которое вместе с упругой податливостью по координате x , является главной причиной возникновения автоколебаний в системе «робот – инструмент – деталь» (1), (2) [10, 14]. Для подавления автоколебаний предлагается вводить в контур горизонтального движения (рис. 5) дополнительное внешнее импульсное воздействие

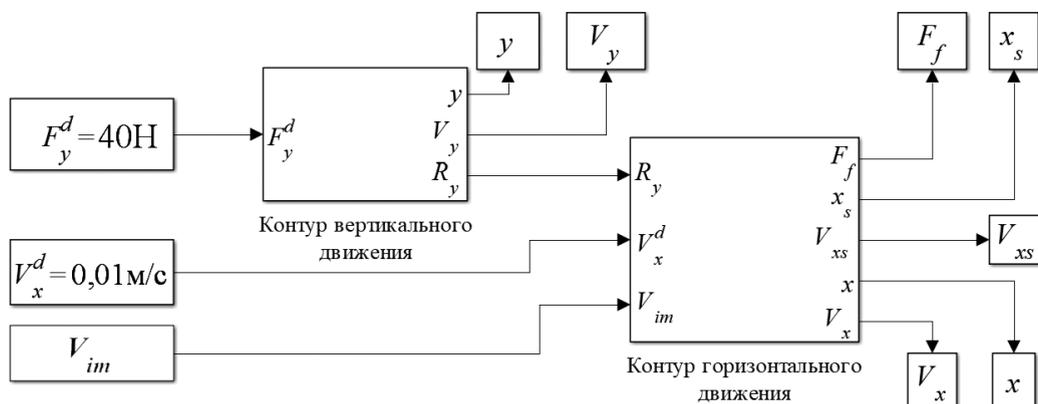


Рис. 5. Модель системы (1), (2) в Matlab (Simulink)
Fig. 5. The system model (1), (2) in Matlab (Simulink)

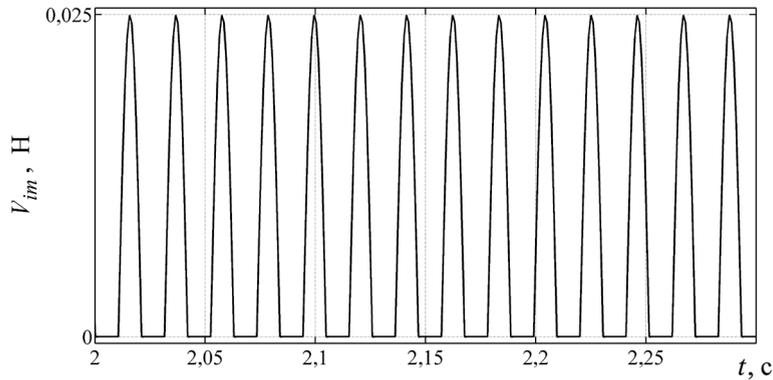


Рис. 6. Внешнее импульсное воздействие

Fig. 6. External Impulse

$$V_{im}(t) = \begin{cases} B \sin(\omega_B t), & V_{im} > 0 \\ 0, & V_{im} \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

амплитуду B и частоту ω_B которого можно варьировать при условии $\omega_B \gg \omega_A$ (рис. 6).

На рис. 7 приведены графики процессов с импульсным сглаживанием при $B = 0,025$ м/с, $\omega_B = 300$ рад/с. Видно, что в этом случае на ползучей скорости автоколебания не возникают, и после небольшого переходного процесса скорость инструмента устанавливается на некотором уровне, превышающем V_x^d . Это превышение обусловлено ненулевым средним значением импульсного воздействия (4). Поэтому при варьировании амплитуды B следует ориентироваться на минимальное эффективное значение.

Таким образом, принципиальная возможность подавления автоколебаний в системе «робот – инструмент – деталь» с по-

мощью внешнего импульсного воздействия установлена. Чтобы этот процесс сделать адаптивным, необходимо online определять момент времени включения (выключения) импульсного воздействия, выбирать его амплитуду B и частоту ω_B , а также поддерживать установившуюся скорость V_{xs} на требуемом уровне V_x^d .

Решить эту задачу удалось с помощью введения в штатную систему управления дополнительного логического переключающего устройства (ЛПУ), предназначенного для включения (выключения) внешнего импульсного воздействия [15]. Для его формирования проанализируем процессы в системе «робот – инструмент – деталь» непосредственно перед возникновением автоколебаний. На рис. 8 приведены процессы с датчиков обратных связей по горизонтальной координате x . Видно, что характер процессов позволяет с помощью

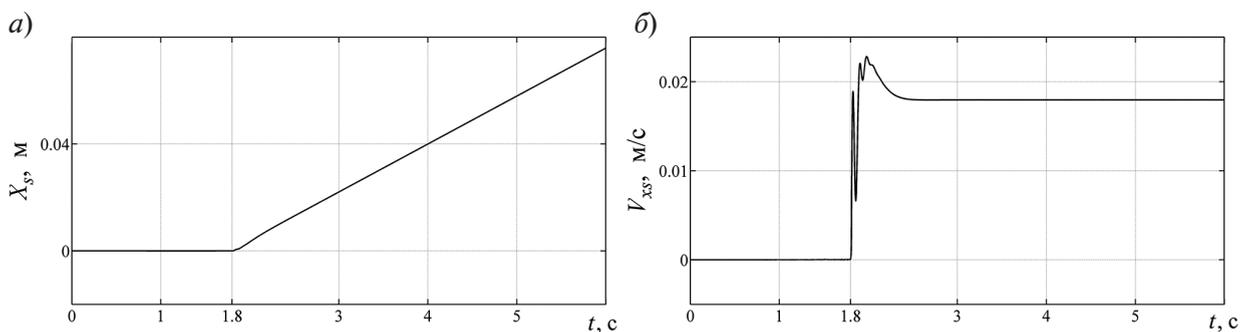


Рис. 7. Процессы в системе при трении со Штрибек-эффектом на ползучей скорости в условиях импульсного сглаживания

Fig. 7. Processes in the system in friction with the Stribeck effect at creeping speed under conditions of pulsed smoothing

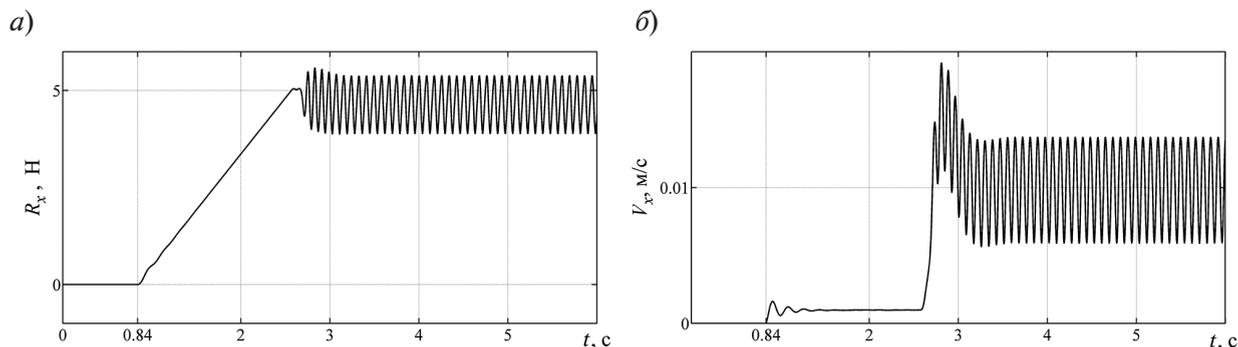


Рис. 8. Процессы с датчиков обратных связей по горизонтальной координате

Fig. 8. Processes with feedback sensors on the horizontal coordinate

фильтра верхних частот однозначно определять момент времени возникновения автоколебаний. Амплитуда B и частота ω_B дополнительного импульсного воздействия корректируются путем обучения ЛПУ на нескольких пробных движениях системы «робот – инструмент – деталь». В условиях массового производства это вполне допустимо. При выбранной амплитуде B можно скорректировать установившуюся скорость V_{xs} до значений, при которых автоколебания не возникают. Необходимость обучения ЛПУ связана с тем, что в реальных условиях заранее установить все параметры характеристики трения не представляется

возможным в силу многих причин, в том числе и причин случайного характера [9].

Заключение

В заключении заметим, что любая модель трения дает лишь приближенное представление о реальном трении в системе, поэтому, наряду с адаптацией с помощью ЛПУ перспективным направлением дальнейших исследований является переход к искусственным нейронным сетям, позволяющим использовать обучение не только на пробных движениях до перехода к массовому производству, но и online в процессе массового производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рассказчиков Н.Г.** Управление промышленными роботами для абразивной зачистки с использованием силомоментной адаптации // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6 // URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16772>
2. **Егоров И.Н.** Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010. 192 с.
3. **Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И., Шпилёв А.М., Бурков А.А.** Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием. Владивосток: Дальнаука, 2000. 195 с.
4. **Крагельский И.В., Гитис Н.В.** Фрикционные автоколебания. М.: Наука, 1987. 181 с.
5. **Гайворонский Е.Г., Кеглин Б.Г.** Особенности фрикционных автоколебаний в непрерывной системе // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 11. С. 3–9.
6. **Бурдаков С.Ф., Байдина Т.А., Шагни-**

- ев О.Б.** Управление вибрационным состоянием робота при силовом взаимодействии с шероховатой поверхностью неопределенного профиля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2016. № 4. С. 43–52. DOI: 10.5862/JCSTCS.252.4
7. **Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Биленко С.В.** Адаптивное управление технологическими системами механообработки на основе искусственного интеллекта // Технология машиностроения. 2004. № 6. С. 46–48.
8. **Lischinsky P., Canudas-de-Wit C., Morel G.** Friction compensation for an industrial hydraulic robot // IEEE Control System. 1999. No. 2. Pp. 25–32.
9. **Попов В.Л.** Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.
10. **Первозванский А.А.** Трение – сила знакомая, но таинственная // Соросовский образова-

тельный журнал. 1998. № 2. С. 129–134.

11. **Canudas-de-Wit C., Olsson H., Estrum K.J., Lischinsky P.** A new model for control of system with friction // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1995. Vol. 40. No. 3. Pp. 419–425.

12. **Бурдаков С.Ф., Шагниев О.Б.** Модели механики в задаче управления силовым взаимодействием робота с поверхностью неопределенного профиля // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2015. № 4. С. 68–79. DOI: 10.5862/JCSTCS.224.7

13. **Байдина Т.А., Шагниев О.Б., Бурдаков С.Ф.** Контактное взаимодействие робота с по-

Статья поступила в редакцию 06.02.2018.

REFERENCES

1. **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 problemi nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2014, No. 6. (rus) Available: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16772>

2. **Yegorov I.N.** Pozitsionno-silovoye upravleniye robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami [Position-power control of robotic and mechatronic devices]. Vladimir: Vladimirsii gos. universitet Publ., 2010, 192 p. (rus)

3. **Kabaldin Yu.G., Oleynikov A.I., Shpilev A.M., Burkov A.A.** Matematicheskoye modelirovaniye samoorganizuyushchikhsya protsessov v tekhnologicheskikh sistemakh obrabotki rezaniyem [Mathematical modeling of self-organizing processes in technological systems of processing by cutting]. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2000, 195 p. (rus)

4. **Kragelskiy I.V., Gitis N.V.** Friksionnyeya vtokolebaniya [Frictional self-oscillations]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 181 p. (rus)

5. **Gayvoronskiy Ye.G., Keglina B.G.** The features of frictional self-oscillations in a continuous system. *Friction & Lubrication in Machines and Mechanisms*, 2010, No. 11, Pp. 3–9. (rus)

6. **Burdakov S.F., Baydina T.A., Shagniyev O.B.** Control of vibrational state of a robot interacting with a rough free-formed surface. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2016, No. 4, Pp. 43–52. (rus) DOI: 10.5862/JCSTCS.252.4

7. **Kabaldin Yu.G., Seryy S.V., Bilenko S.V.** Adaptivnoye upravleniye tekhnologicheskimi sistemami mekhanooobrotki na osnove iskusstvennogo intellekta [Adaptive control of technological systems of machining based on artificial intelligence]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* [Technology of Mechanical Engineering], 2004,

верхностью неопределенного профиля при активном креплении силового сенсора // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с международным участием. Ин-т прикладной математики и механики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 44–47.

14. **Ле Су Ань.** Динамика систем с кулоновым трением. СПб.: Нестор, 1999. 299 с.

16. **Байдина Т.А., Бурдаков С.Ф.** Управление роботом при контактных операциях с поверхностью неопределенного профиля в условиях трения // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с международным участием. Ин-т прикладной математики и механики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 100–103.

No. 6, Pp. 46–48. (rus)

8. **Lischinsky P., Canudas-de-Wit C., Morel G.** Friction compensation for an industrial hydraulic robot. *IEEE Control System*, 1999, No. 2, Pp. 25–32.

9. **Popov V.L.** Mekhanika kontaktного vzaimodeystviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletryaseniy [Mechanics of contact interaction and physics of friction. From nanotribology to earthquake dynamics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2013, 352 p. (rus)

10. **Pervozvanskiy A.A.** Treniye — sila znakomaya, no tainstvennaya [Friction is a familiar force, but mysterious]. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal* [Soros Educational Journal], 1998, No. 2, Pp. 129–134. (rus)

11. **Canudas-de-Wit C., Olsson H., Estrum K.J., Lischinsky P.** A new model for control of system with friction. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, Vol. 40, No. 3, Pp. 419–425.

12. **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, Pp. 68–79. (rus) DOI: 10.5862/JCSTCS.224.7

13. **Baydina T.A., Shagniyev O.B., Burdakov S.F.** Kontaktnoye vzaimodeystviye robota s poverkhnostyu neopredelennogo profilya pri aktivnom krepnenii silovogo sensora [Contact interaction of a robot with a surface of an undefined profile with an active fastening of a power sensor]. *Week of Science SPbPU: materials of a scientific conference with international participation. Institute of Applied Mathematics and Mechanics*. St. Petersburg: Politechn. University Publ., 2016, Pp. 44–47. (rus)

15. **Le Su An.** Dinamika sistem s kulonovym

treniyem [Dynamics of systems with Coulomb friction].
St. Petersburg: Nestor Publ., 1999, 299 p. (rus)

16. **Baydina T.A., Burdakov S.F.** Upravleniye robotom pri kontaknykh operatsiyakh s poverkhnostyu neopredelennogo profilya v usloviyakh treniya [Robot control in contact operations with

a surface of an undefined profile under friction conditions]. *Week of Science SPbPU: materials of a scientific conference with international participation. Institute of Applied Mathematics and Mechanics.* St. Petersburg: Politechn. University Publ., 2017, Pp. 100–103. (rus)

Received 06.02.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

БАЙДИНА Татьяна Александровна

BAIDINA Tatyana A.

E-mail: baydinatanya2401@gmail.com

БУРДАКОВ Сергей Федорович

BURDAKOV Sergey F.

E-mail: burdakov.s@yandex.ru