

УДК: 621.865.8; 004.896.621

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СХВАТОМ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА  
ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ОСНОВЕ  
СИЛОМОМЕНТОЙ СИСТЕМЫ ОЧУВСТВЛЕНИЯ**

**THE CONTROL SYSTEM OF THE GRIP OF THE MANIPULATING ROBOT  
FOR WORKING IN EXTREME SITUATIONS BASED  
ON THE FORCE-BASED SENSING SYSTEM**

*Канд. техн. наук К.С. Кулаков<sup>1</sup>, Д.В. Новицкая<sup>2</sup>, Д.Н. Захаров<sup>1,2</sup>*

*Ph.D. K.S. Kulakov, D.V. Novitckaia, D.N. Zakharov*

*<sup>1</sup>АО «НПО Спецматериалов»*

*<sup>2</sup>БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»*

В статье рассмотрены проблемы и особенности очувствления захватного устройства манипулятора. Выявлены три метода управления подобными устройствами с использованием информации об усилиях. На основе рассмотренных методов был выбран оптимальный метод управления для малогабаритных манипуляторов. Разработаны структурные схемы системы управления манипулятором для контроля усилия сжатия захватного устройства и для контроля развиваемых звеньями манипулятора усилий. Построена упрощенная математическая модель работы захватного устройства манипулятора с помощью среды MATLAB Simulink, представляющая собой совокупность механической части (конструкция схвата), системы очувствления (блоки определения контактной ситуации) и системы управления (задающее устройство и регулятор).

**Ключевые слова:** силомоментное очувствление, система управления, обратная связь, управление по обратной связи.

This article discusses the problems and features of the manipulator gripper sensitivity. Three methods of controlling such devices using information about forces are identified. Based on the considered methods, the optimal method for controlling small-sized manipulators has been selected. Structural schemes of the manipulator control system have been developed to control the force of the gripper and to control the forces in manipulator's joints. Consequently, a simple mathematical model of the manipulator gripper control using force-torque sensing has been built using the MATLAB Simulink environment, which is a combination of the mechanical part (gripper design), sensing system (blocks for determining the contact situation) and control system (desired values and controller).

**Keywords:** force-torque sensing, control system, feedback, feedback control.

### **Вводная часть**

Особенности назначения роботов предполагают их развитое взаимодействие с внешней средой путем выполнения различных действий с её объектами. Основным средством для этого служат манипуляторы.

В общем случае, для управления манипуляторами необходимо использовать два вида информации — о положении рабочего органа и о его силе взаимодействия с объектами внешней среды [1].

Даже для выполнения самой простой операции взятия и переноса какого-либо предмета,

необходимо, помимо координат схвата манипулятора, контролировать усилие захвата, чтобы, с одной стороны, не повредить, а с другой — не отпустить этот предмет. Соответственно, очень важна информация об усилии для выполнения более сложных силовых операций.

В ходе развития современной робототехники и появления осязаемых роботов с адаптивным управлением наступила очередь их силового осязания для освоения в автоматическом режиме различных операций, требующих приложения усилия или просто контроля его величины. Кроме того, силовое осязание манипуляторов необходимо при осязании предметов и для предотвращения ударов о препятствия. Особенно это касается элементов с высокими требованиями к ограничению внешних нагрузок [2].

Для управления манипуляторами необходима наиболее сложная силовая информация в силу того, что здесь может потребоваться осязание по большому числу степеней подвижности рабочего органа манипулятора. В самом общем случае это три составляющих вектора силы и три момента по углам ориентации [3]. Поэтому часто применяется термин «силомоментное» осязание.

### Основная часть

Основными видами управления манипуляционными роботами, учитывающими информацию об усилиях, являются: виды с использованием переменных движения  $X(t)$  и силовых переменных  $F(t)$ . Они могут вводиться в систему как задаваемые или как сигналы обратных связей. По их переходным процессам определяется устойчивость системы — основной критерий её работоспособности [4].

Выделяют несколько видов управления в манипуляционных системах: позиционное, податливое и гибридное.

В системах позиционного управления задаваемыми и измеряемыми являются переменные движения  $X(t)$ . Целью управления является синтез такого закона управления  $X(t) \rightarrow X_0(t)$ , который обеспечит приближение реального движения  $X(t)$  к запланированному  $X_0(t)$ , а вектор управляющих моментов является функцией только обобщённых координат (но не усилий):

$$\bar{\mathbf{F}} = f(q_0(t), q(t), \dot{q}(t)).$$

Податливое управление может рассматриваться как улучшенное позиционное управление [4]. Оно имеет ту же цель  $X(t) \rightarrow X_0(t)$ , и схожий вектор управления:

$$\bar{\mathbf{F}} = f(q_0(t), q(t), \dot{q}(t), F(t)).$$

В системах податливого управления не предусматривается обеспечение необходимого усилия  $F(t) \rightarrow F_0(t)$ , но обратная связь по усилию корректирует позиционную ошибку:

$$e(t) = X_0(t) - X(t),$$

путём удержания отношения усилия и положения (реже скорости).

Передаточная функция системы будет иметь вид:

$$\frac{F(s)}{E(s)} = \mathbf{M}s^2 + \mathbf{B}s + \mathbf{K},$$

где  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{K}$  — матрицы, описывающие инерционные, демпфирующие и упругие свойства системы.

В отличие от податливого управления, при гибридном необходимо одновременное выполнение двух целевых условий:

$$X(t) \rightarrow X_0(t) \text{ и } F(t) \rightarrow F_0(t),$$

$$\bar{\mathbf{F}} = f(q_0(t), q(t), \dot{q}(t), F_0(t), F(t)).$$

На планируемой траектории  $X_0(t)$  должны развиваться планируемые усилия:

$$F_0(t) \equiv f(q_0(t), \dot{q}_0(t)).$$

В случае, когда контролируется усилие  $F(t)$ , перемещение от этого усилия будет находиться в зависимости от силы:

$$X(t) = M^{-1} \iint F(t_1, t_2) dt_1 dt_2,$$

поэтому обеспечивать контроль этих перемещений не имеет смысла.

Схематически [5] позиционное, податливое и гибридное управление соответственно может быть представлено, как показано на рис. 1.

Учитывая, что переменные движения и усилия одновременно в одном направлении контро-

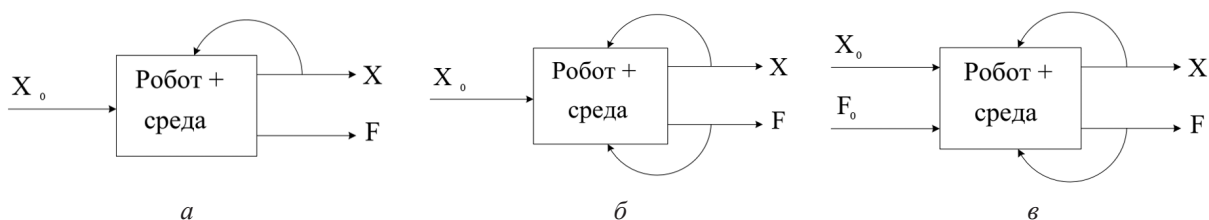


Рис. 1. Схемы учета информации в различных видах управления:  
 а — схема позиционного управления; б — схема податливого управления;  
 в — схема гибридного управления

лироваться не могут [2], предлагаются системы либо с приоритетом движения, либо приоритетом усилия, либо с разделением контролируемых переменных в ортогональных направлениях, либо (что используют чаще всего) переключенные между системами с приоритетом движения и приоритетом усилия.

Здесь стоит отметить преимущества податливого управления: регулятор этого типа не меняет скачкообразно свою структуру, что позволяет исключить множественные переключения и автоколебания в системе управления, а также он подразумевает возможность изменения траектории движения под действием внешних сил, что делает систему нежёсткой и позволяет ей адаптироваться под внешние нагрузки, то есть действовать в неопределённой среде [5, 6].

### Разработка системы управления схватом манипуляционного робота, учитывающей информацию об усилиях

В ходе создания системы силомоментного управления [2] были разработаны следующие структурные схемы: контроля усилия сжатия захватного устройства, изображенная на рис. 2 и контроля развиваемых звеньями манипулятора усилий, изображенная на рис. 3.

На рис. 2 использованы следующие сокращения:

СУ — система управления;

ДП — датчик положения;

ТД — тактильный датчик;

$N$  — количество «пальцев» захватного устройства. Это значение зависит от конфигурации захвата манипуляционного робота.

Схват подходящей конфигурации с  $N$ -ным количеством пальцев оснащается тактильными датчиками (чаще всего резистивными, ёмкостными или оптическими), при этом число датчи-

ков напрямую зависит от числа пальцев схвата, а также от количества фаланг на них. Каждый палец (или каждая фаланга — зависит от конфигурации схвата) имеет датчик положения. Таким образом обеспечивается техническая часть системы с податливым управлением: устройства получения обратных связей по положению и силе. Центральная система управления в виде микроконтроллера формирует закон управления схватом по желаемому движению, и производит коррекцию позиционной ошибки по обратной связи от датчика силы [7, 8].

Таким образом, принцип действия схемы заключается в следующем: захватное устройство сжимает объект до тех пор, пока не будет достигнуто желаемое положение пальцев/фаланг схвата (контролируется с помощью датчиков положения), либо пока сила действия элементов схвата на объект не превысит установленное пороговое значение (контролируется с помощью тактильных датчиков).

На рис. 3 использованы следующие сокращения:

СУ — система управления;

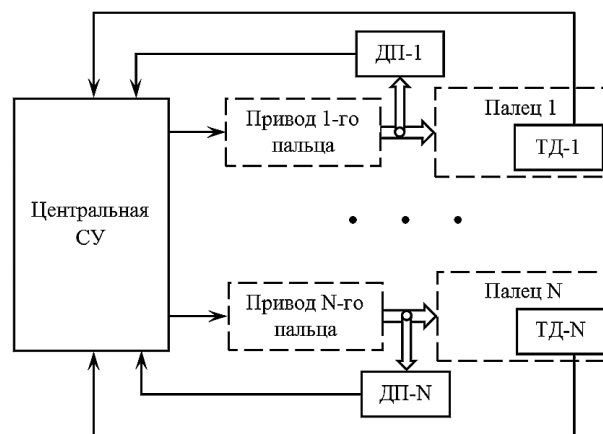


Рис. 2. Структурная схема контроля усилия сжатия захватного устройства

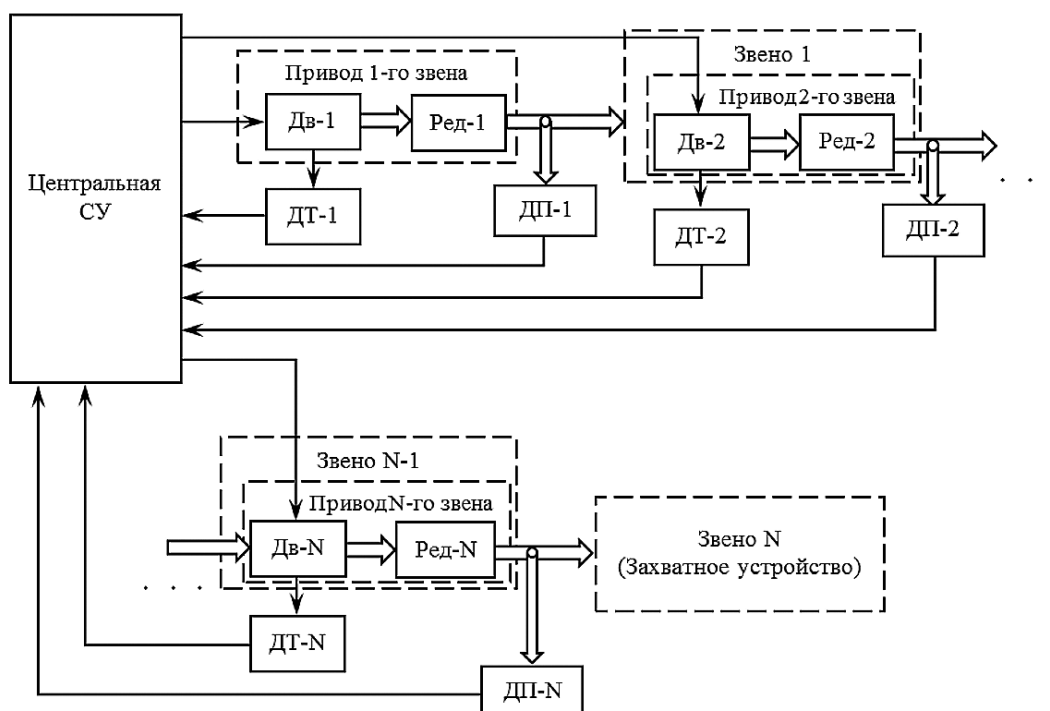


Рис. 3. Структурная схема контроля развиваемых звеньями манипулятора усилий

- ДП — датчик положения;
- Дв — двигатель;
- Ред — редуктор;
- ДТ — датчик тока.

Данная схема позволяет оценивать момент, развиваемый приводами сочленений: по информации, полученной от датчиков тока, система управления будет вычислять крутящий момент двигателя  $M = C_M \cdot \Phi \cdot I$ . Центральная система управления будет формировать закон управления в соответствии с желаемым движением, и будет производить коррекцию позиционной ошибки по обратной связи от датчиков тока [9].

Таким образом, принцип действия схемы заключается в следующем: звенья манипулятора будут двигаться до тех пор, пока не будет достигнуто их желаемое положение (контролируется с помощью датчиков положения), либо пока развиваемые двигателями моменты не превысят установленные пороговые значения (контролируются с помощью датчиков тока).

### Компьютерное моделирование системы управления схватом манипулятора

С помощью прикладной программы MATLAB Simulink была смоделирована система

контроля сжатия для простейшей модели захватного устройства. Разработанная система является идеализированной и линеаризованной, также она не учитывает возмущающие воздействия на систему. Смоделированная система контроля усилия сжатия захватного устройства манипуляционного робота представлена на рис. 4.

Система управления схватом построена на основе упрощенных твердотельных моделей груза, расположенного на поверхности, и пальцев схвата. Объект управления и пальцы схвата представлены на рис. 5. Данные модели обладают инерционными свойствами и имеют определенную жесткость. Массу груза выберем исходя из классификации роботизированных манипуляторов по полезной нагрузке. Масса груза для малогабаритных роботизированных манипуляторов составляет 20 кг. Трения между пальцами схвата, поверхностью и грузом не учитываются [10].

Система обеспечивает контроль воздействия «пальцев» схвата на объект управления с помощью обратных связей по положению и по усилию [5]. Входным параметром системы является сила, воздействующая на оба пальца схвата. С помощью пользовательской библиотеки «Simscape Multibody Contact Forces», позволяющей моделировать кон-

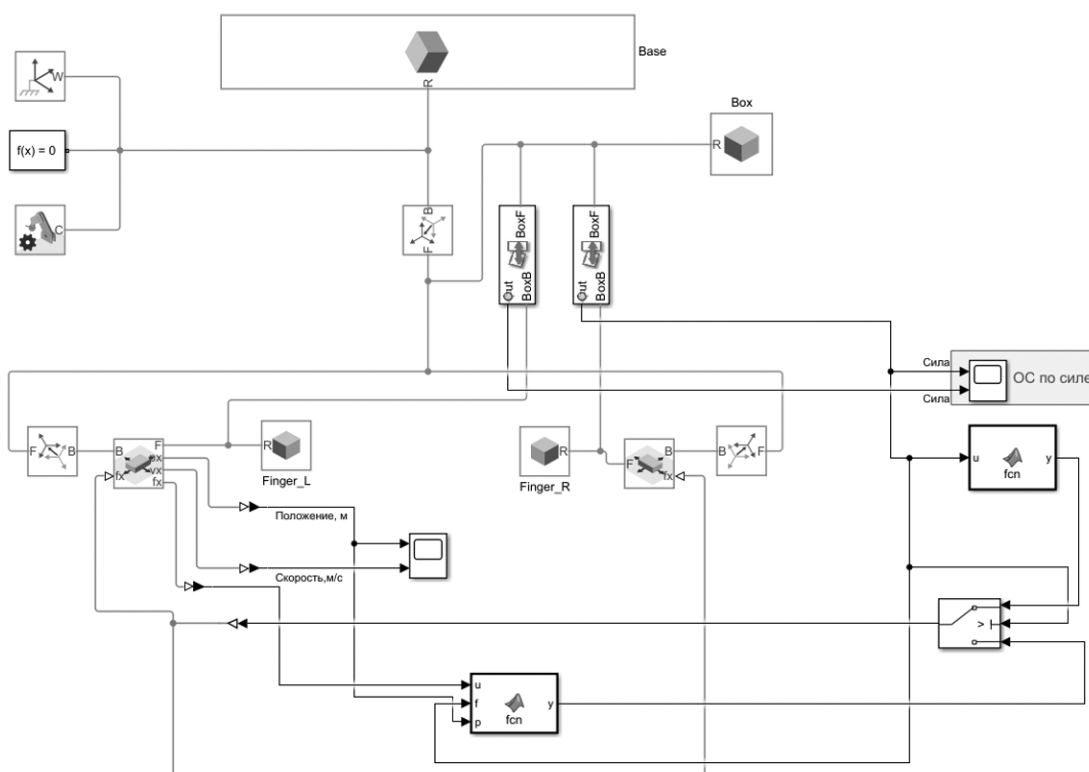


Рис. 4. Схема контроля усилия сжатия захватного устройства в программе MATLAB Simulink

тактные ситуации и учитывать силы контакта, была учтена обратная связь по силе сжатия груза губками схвата. До момента касания схватом груза система управляется по первому регулятору, обеспечивающему плавность движения. В момент касания схватом груза происходит переключения на второй регулятор, который обеспечивает сжатие груза, необходимое для удержания и последующих манипуляций. Переключение происходит по сигналу обратной связи от датчика силы [11].

Регулятор, отвечающий за перемещение пальцев схвата, работает на основе информации

об их положении относительно груза. В данной модели это упрощено, т.к. нам известны геометрические размеры груза и расстояние между пальцами схвата. На практике могут применяться лазерные дальномеры.

Регулятор, обеспечивающий удержание груза, получает сигнал от датчика силы и корректирует задающее воздействие на основе полученных данных.

На рис. 6 и 7 представлены графики положения и скорости пальцев схвата.

По представленным графикам видно, что палец схвата проходит расстояние до объекта управления, далее происходит удар (сжатие груза парой пальцев). Удар провоцирует небольшое перерегулирование, которое не существенно в пределах коридора целевого значения функции управления. Далее происходит небольшая деформация объекта управления. Пальцы схвата сжимают груз, проходя дополнительные 0,0002 м. Это значение не превышает 0,7 % от габаритов объекта управления при симметричном сжатии груза.

На рис. 8 представлен график силы, действующей на объект управления со стороны пальца схвата.

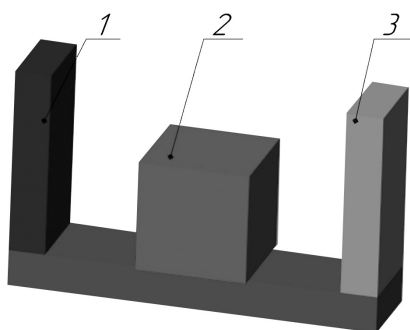


Рис. 5. Упрощенное представление груза и пальцев схвата в среде MATLAB Simulink:

1 — губка схвата; 2 — груз; 3 — губка схвата

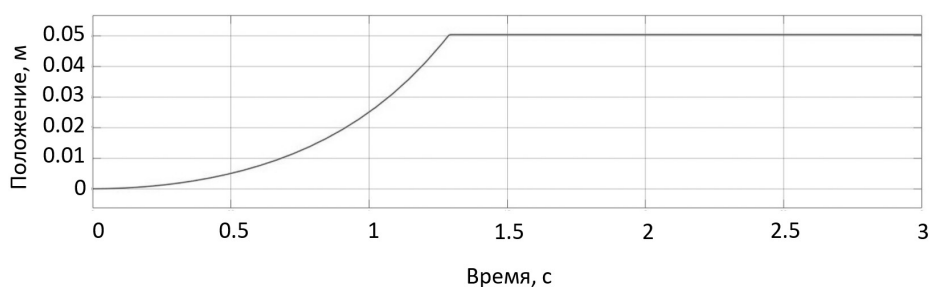


Рис. 6. График положения пальца схвата при сжатии груза

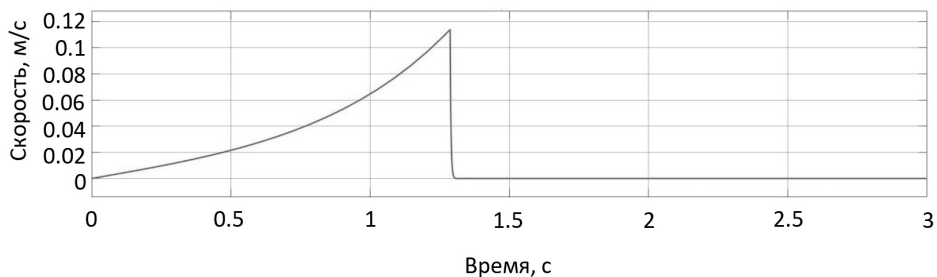


Рис. 7. График скорости пальца схвата при сжатии груза

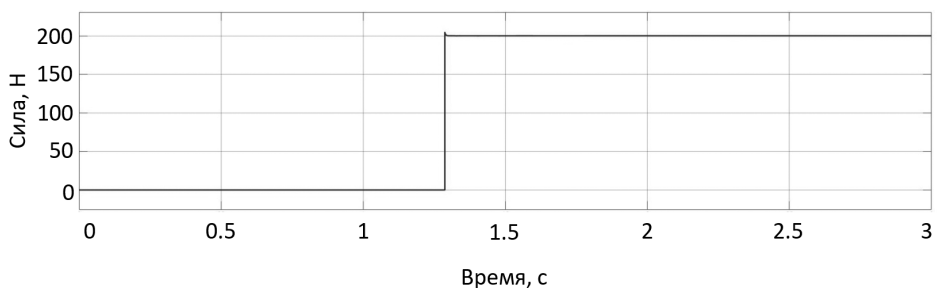


Рис. 8. График силы, действующей на объект управления со стороны пальцев схвата

На графике виден момент переключения регулятора. Сила удара об объект управления не превышает 2,5 % от желаемой силы сжатия груза.

### Выводы

В ходе работы было проведено исследование существующих методов управления в манипуляционных системах и выявлено три конкретных вида: позиционное, податливое и гибридное. На основе анализа достоинств и недостатков перечисленных видов лучшим для решения поставленной задачи выбран метод податливого управления, вследствие чего в работе он рассмотрен более детально. Далее, с использованием информации об этом методе, были разработаны структурные схемы системы контроля усилия сжатия захватного устройства и системы контроля развиваемых звеньями манипулятора усилий.

Кроме того, на основе полученных знаний о методе податливого управления и разработанной структурной схемы, с помощью программы MATLAB Simulink была создана простейшая модель захватного устройства с реализованной системой контроля сжатия пальцев схвата. Результаты моделирования представлены в данной работе.

В дальнейшем планируется провести исследование в нескольких направлениях: уточнение структуры созданной модели для приближения результатов моделирования к реальным (замена упрощенной модели на модель реального захватного устройства, учёт данных о жёсткости, демпфировании и трениях, моделирование привода системы на основе шагового двигателя), а также разработка системы податливого контроля развиваемых звеньями манипулятора усилий на основе уже имеющейся структурной схемы. Также рассматривается дальнейшее применение

ние возможностей пользовательской библиотеки «Simscape Multibody Contact Forces Library» программы MATLAB Simulink для регистрации различных контактных ситуаций.

### Литература

1. Юревич Е.И. Сенсорные системы в робототехнике: учеб. пособие / Е.И. Юревич. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та. 2013. 100 с.
2. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2005. 384 с.; ил. (Робототехника / Под ред. С.Л. Зенкевича, А.С. Ющенко).
3. Серебрянный В.В., Бошляков А.А., Огородник А.И. Импедансное позиционно-силовое управление в роботах и механизмах с кинематическими замкнутыми цепями // Технологии аддитивного производства. 2019. Т. 1. № 1. С. 24–35.
4. Головин В.Ф., Лесков А.Г., Архипов М.В., Рачков М.Ю., Леготин С.Д. Обучение робота показом движения с учетом деформирования среды / Известия Южного федерального университета. Технические науки. 10 выпуск. 2015. № 10. С. 214–228.
5. Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation // 1984 American control conference. IEEE. 1984. P. 304–313.
6. Siciliano B., Khatib O. (ed.). Springer handbook of robotics. Springer. 2016.
7. Park M. et al. Recent advances in tactile sensing technology // Micromachines. 2018. Vol. 9. № 7. 321 p.
8. Siciliano B. et al. Robotics: modelling, planning and control. Springer Science & Business Media. 2010.
9. Schmucker U., Rusin V., Konyev M. Contact Processing in the Simulation of the Multi-body Systems // Proc. of 6 th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation. — Ljubljana, Slovenia. 2007.
10. Титов В.В. Алгоритм управления податливым движением манипулятора с упругими элементами в шарнирных сочленениях // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 11. С. 29–33.

11. Perumal S.K., Ganesan S. Physical Interaction and Control of Robotic Systems Using Hardware-in-the-Loop Simulation // Becoming Human with Humanoid-From Physical Interaction to Social Intelligence. IntechOpen. 2019.

### References

1. Yurevich E.I. Sensor systems in robotics: Textbook. allowance. — St. Petersburg: Publishing house Polytechnic. Univ. 2013. 100 p.
2. Vоротnikov S.A. Information devices of robotic systems. — Moscow: BMSTU. 2005. 384 p.
3. Serebrennyj V.V., Boshlyakov A.A., Ogorodnik A.I. Impedance position-force control in robots and mechanisms with kinematic closed chains. Additive Fabrication Technology. 2019. Vol. 1. № 1. P. 24–35.
4. Golovin V.F., Leskov A.G., Arkhipov M.V., Rachkov M.Yu., Legotin S.D. Robot training by movement showing and considering environment deforming / Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2015. № 10. P. 214–228.
5. Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation // American control conference. IEEE. 1984. P. 304–313.
6. Siciliano B., Khatib O. (ed.). Springer handbook of robotics. Springer. 2016.
7. Park M. et al. Recent advances in tactile sensing technology // Micromachines. 2018. Vol. 9. № 7. 321 p.
8. Siciliano B. et al. Robotics: modelling, planning and control. Springer Science & Business Media. 2010.
9. Schmucker U., Rusin V., Konyev M. Contact Processing in the Simulation of the Multi-body Systems // Proc. of 6 th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation. — Ljubljana, Slovenia. 2007.
10. Titov V.V. Compliant motion control algorithm for flexible joint manipulator with partial dynamic compensation // Journal of Instrument Engineering. 2012. Vol. 55. № 11. P. 29–33.
11. Perumal S.K., Ganesan S. Physical Interaction and Control of Robotic Systems Using Hardware-in-the-Loop Simulation // Becoming Human with Humanoid-From Physical Interaction to Social Intelligence. IntechOpen. 2019.