

МЕХАНИЗМЫ ОСНОВНЫХ МОДУЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Чихачева О.А., Лукьянов А.С., Дмитриева Л.А.

Московский политехнический университет, г. Москва

Ключевые слова: схемы передач, модули, режимы работы, динамические нагрузки, передаточные числа, подбор двигателя, промышленные роботы.

Аннотация. В промышленной робототехнике широко используется принцип модульного построения механизмов, используются различные механические передачи. Число степеней подвижности определяет количество модулей, вид передач и, в целом, компоновку промышленных роботов (ПР). Приведены рекомендации по определению передаточных чисел, подбору электродвигателей для разных механизмов ПР, ряд типовых модульных схем.

MECHANISMS OF THE MAIN MODULES OF INDUSTRIAL ROBOTS

Chihacheva O.A., Lukyanov A.S., Dmitrieva L.A.

Moscow Polytechnic University, Moscow

Keywords: transmission schemes, modules, operating modes, dynamic loads, gear ratios, engine selection, industrial robots.

Abstract. In industrial robotics (IR) the principle of modular construction of mechanisms is widely used, various mechanical gears are used. The number of degrees of mobility determines the number of modules, the type of gears and, in general, layout IR. Recommendations are given on determining gear ratios, selecting electric motors for different IR mechanisms, and a number of typical modular schemes are given.

Промышленная робототехника в настоящее время развивается, в основном, по двум направлениям – создание узкоспециализированных и универсальных промышленных роботов (ПР), которые должны обладать технологической гибкостью, быстрой переналаживаемостью и минимальными габаритами. Разрабатываются ПР агрегатного типа на базе типовых конструкций модулей вращательного и поступательного перемещений, разрабатываются гаммы модификаций различного назначения, используя принцип агрегатно-модульных конструкций.

Развитие систем автоматизированного управления (САУ), оставляло практически неизменными конструкции механизмов ПР основных перемещений: главный подъем, главный поворот, механизмы качания, выдвижения (радиальный ход и поперечный), механизмы ориентации кисти и схвата. Ведущие мировые фирмы, например: «KUKA» (рис. 1), «ASEA» (рис. 2), «Unimate-nokia» (рис. 3), «Kawasaki», «MNU-Senior», «Electrolux», «Felss» и др. разработали агрегатно-модульные конструкции разных типоразмеров одного вида, образующих «семейство», что позволило снизить затраты на их производство [1].

Применяя различные схемы структур механизмов-модулей возможно упростить некоторые задачи САУ, используя многовариантность схем привода, высокооборотные и высокомоментные двигатели и современные типовые узлы, например ШВП (шарико-винтовые передачи) или шариковые направляющие прямолинейного перемещения, которые изготавливаются серийно профильными

фирмами (рис. 4, 5). Такие фирмы, как например «КУКА», разрабатывают линейку различной грузоподъемности, сохраняя преемственность структурных схем - модульное построение. Модуль-это механизм перемещения одной степени подвижности по одной координате, который часто встраивается в корпуса других механизмов, его параметры определяет компоновка механизмов всего ПР.

Число модулей и структуру механизмов ПР обычно определяет заданное число степеней подвижности и траектория движения конечного звена, при этом необходимо учитывать:

- 1) размер зоны обслуживания и расположение оси – вертикальное или горизонтальное, например, шпинделя станка;
- 2) грузоподъемность (при $Q > 10$ кг нецелесообразно применять сдвоенный схват);
- 3) траектория движения (необходимо «кантовать» деталь или наоборот, нельзя «пролить»);
- 4) скорость или ускорение по координатам, которые могут ограничиваться видом технологического процесса (гальванопокрытие, сварка и т.д.), а для транспортных ПР они еще и определяют производительность всего ПР.

Внешний вид руки ПР фирмы «КУКА» имеет характерный вид линейки ПР – три двигателя, в задней части конструкции, обеспечивающих движения схвата по осям (α, β, γ) (рис. 1, 3) [2].

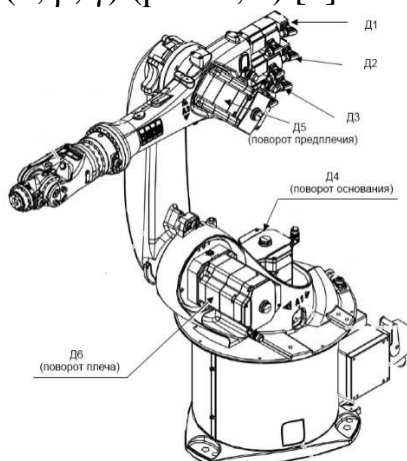


Рис. 1. Общий вид ПР фирмы «КУКА»

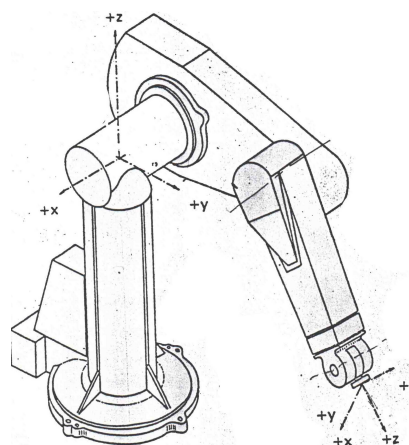


Рис. 2. Общий вид ПР фирмы «Unimate-nokia»

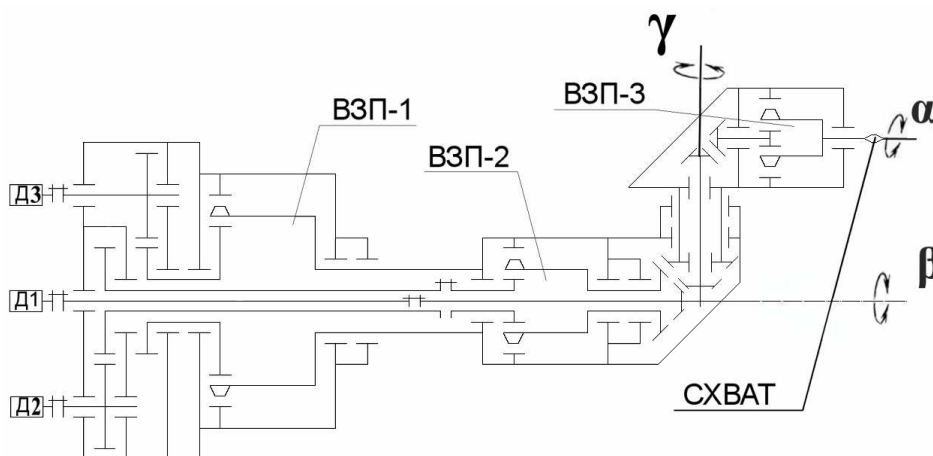


Рис. 3. Кинематическая схема механизмов схвата фирмы «КУКА»

Механизмы движения двух рук ПР фирмы «Unimate-nokia», включают ряд цилиндрических передач, используя принцип конструирования – монокок, когда производятся движения «обката» одного звена относительно другого.

На рис. 3 представлена кинематическая схема механизмов ориентации кисти (головки схвата или инструмента) ПР фирмы «KUKA».

В конструкциях механизмов ПР фирмы «ASEA» широко используются шарико-винтовые и ременно-зубчатые передачи (рис. 4, рис. 5).

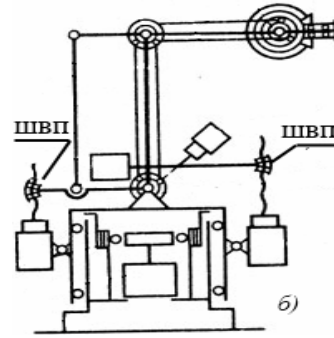
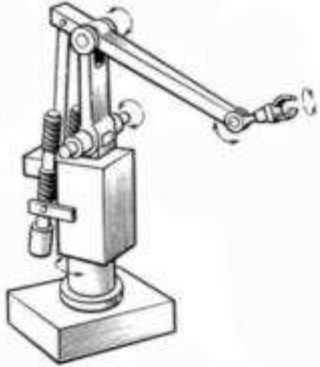


Рис. 4. Общий вид ПР фирмы «ASEA» Рис. 5. Схема ПР фирмы «ASEA»

Схема и общий вид узла механизма качания руки ПР с использованием серийно изготавливаемой шарико-винтовой передачи (ШВП) (рис. 6, 7) [5].

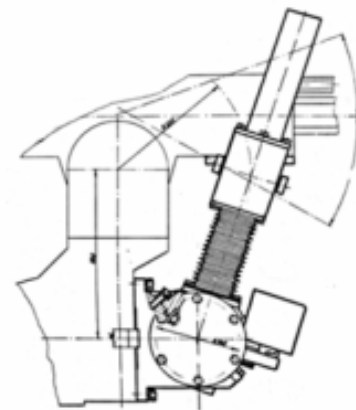
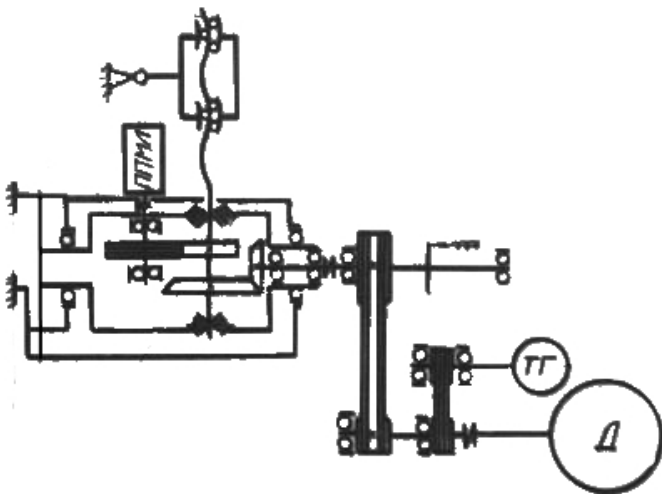


Рис. 6. Схема механизма качания руки ПР с шарико-винтовой передачей (ШВП)

Рис. 7. Пример общего вида узла механизма качания руки ПР с ШВП

На производстве распространены ПР с 3-4 степенями подвижности, для сравнения – число степеней подвижности руки человека $n = 24$. Применяя разный набор передач при равном числе степеней подвижности ПР можно получить разный размер зоны обслуживания. Характеристиками ПР являются коэффициент сервиса θ и телесный угол ψ , в пределах которого схват может подойти к заданной точке рабочей зоны обслуживания. Недостаток ПР – неодинаковое положение схвата (или инструмента) в разных концах зоны обслуживания, и наличие «мертвой зоны», что необходимо учитывать при проектировании.

Электродвигатели механизмов ПР работают в режиме непрерывных пуск–торможение–реверс, т.к. режим работы этих механизмов – резко выраженный повторно-кратковременный (до 3000 включений в час или 50 включений в минуту). При этом время пауз цикла работы очень мало, что создает значительные динамические нагрузки, поэтому используются в основном специальные высокомоментные электродвигатели – т.е. способные развивать при малых частотах вращения в период пуска, большой крутящий момент. Необходимо также учитывать, что собственный момент инерции груза значительно меньше, чем момент инерции самого ПР, например при повороте всего ПР, грузоподъемность, вылет руки (радиус вращения) , и величина заданных ускорений при движении по координате существенно влияют на величину инерционных нагрузок , что необходимо учитывать при расчетах, для этого рекомендуется изучение переходных процессов (периоды разгона–торможения), в многоступенчатых механических системах по системам дифференциальных уравнений [3].

Главной задачей при решении многофункциональных систем является определение операции максимального цикла (наибольшей длительности по времени), которую берут за основу для дальнейших расчетов, т.к. другие операции будут длиться меньше по времени, динамические нагрузки на механизмы при таком подходе будут меньше. Как правило, самыми нагруженными считаются: главный механизм поворота ПР и главный механизм подъема ПР. Наибольший динамический инерционный момент определяется при крайних положениях на максимальном вылете, тогда время перемещения по этим координатам – максимальное.

Порядок расчета привода ПР.

Т.к. обычно известны полезные нагрузки и исходные данные ведомого звена (схвата) приведенные в техническом задании, то расчет привода начинают от ведомого звена (схвата). Скорости и ускорения назначаются в долях от «г». Рекомендуется $a_{\max}=(0.3\dots1.0)\cdot9.8\text{м/с}^2$ с последующим уточнением и время выполнения основных движений (рис. 6).

Сначала предварительно определяют усилие зажатия схвата $F_{\text{схв}}$ и ускорение a_{\max} (рис. 8)

$$F_{\text{схв}} = m \cdot (a_{\max} + g) \cdot \frac{1}{f_{\text{мп}}} \cdot K, \quad (1)$$

где $F_{\text{схв}}$ – усилие зажатия детали; $K = 1,5$ – коэффициент запаса; $f_{\text{мп}} = 0,1\dots0,15$ – коэффициент трения.

Задаются трапецеидальным законом изменения скорости для получения оптимального закона движения, при котором пуск и торможение цикла происходят с равновеликим ускорением при разгоне и торможении.

$$M = M_{\text{дв}} + M_{\text{н}}. \quad (2)$$

Определяется инерционная нагрузка на механизм:

$$I_{\text{н}} = I_r + I_M, \quad (3)$$

где $I_r = mR^2$ – момент инерции груза на максимальном радиусе вылета R ,

I_M – суммарный момент инерции для собственных подвижных частей ПР.

При этом величина перемещения по координате при «пуске-торможении» не превышает $s/2$ или $\varphi/2$ – полный путь перемещения по координате поступательного или вращательного движения (рис. 9). При таком характере движения получаем в общем виде для поступательного и вращательного движения:

$$V_{\max} = a \cdot t_p; \quad S_p = \frac{a \cdot t_p^2}{2}; \quad \omega = \varepsilon \cdot t_p; \quad \varphi = \frac{\varepsilon \cdot t_p^2}{2};$$

где $a = (0,3...1)g$; $\varepsilon = a/r_{\max}$; r_{\max} – максимальный радиус поворота.

$$t_{\Sigma} = t_p + t_T = 2t_p. \tag{4}$$

Для поступательного движения

$$t_{\Sigma} = 2t_p + \left(S - 2 \cdot \frac{a \cdot t_p^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{V}, \tag{5}$$

и вращательного движения

$$t_{\Sigma} = 2t_p + \left(\kappa - 2 \cdot \frac{\varepsilon \cdot t_p^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{\omega}. \tag{6}$$

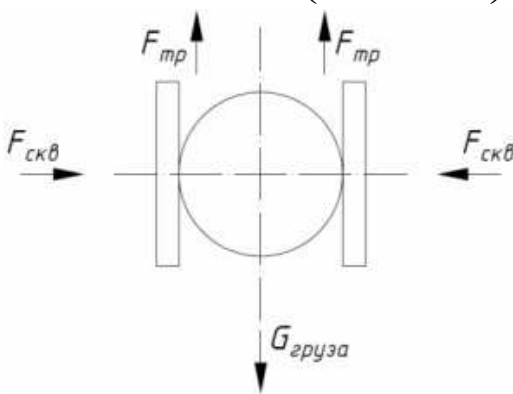


Рис. 8. Расчетная схема схвата

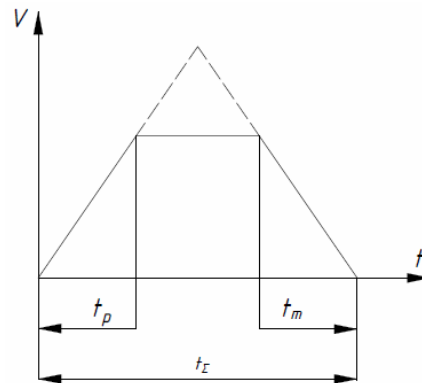


Рис. 9. Расчетная схема скоростей

На первом этапе, когда не известны радиусы расположения центра тяжести, масса и габариты каждого звена, их центра тяжести и т.д., рекомендуется, используя опыт, накопленный в роботостроении, назначать их в долях от массы груза, пользуясь таблицами, приведенными в справочниках. Радиус инерции следует взять наибольшим для определения максимальных динамических нагрузок, чтобы оценить требуемую мощность двигателя.

Для предварительных расчетов принято собственную массу любого механизма (модуля) рассчитывать в зависимости от грузоподъемности ПР и расположения механизма (вблизи основания или вблизи схвата) с помощью коэффициентов конструкций, которые подбираются из справочников с учетом расположения конкретного механизма относительно неподвижного основания ($K_i=1.9...2.1$) или, наоборот, удаленного от него, например, ориентирующие кисть – $K_i = 1.2...1.4$. Масса механизма (модуля) в общем виде зависит от K_i – коэффициент конструкции, m_i – масса полезного груза, переносимого любым модулем, является сумма масс груза плюс масса всех предыдущих модулей (Σ); число слагаемых этой суммы зависит от конкретной конструкции ПР и числа степеней подвижности

$$m_i = \frac{1}{g} \cdot (G_{zp} + \sum_1^{i-1} G_{zp} \cdot K_i), \quad (7)$$

где G_{zp} – грузоподъемность ПР, (Н), K_i – коэффициент конструкции.

Главной особенностью подбора электродвигателей является то, что это производится с учетом момента M (Нм), определяющегося как сумма динамического момента $M_{ИН}$ в период разгона и момента M_H , возникающего при перемещении по координате от груза и других неуравновешенных масс

$$M = M_{ИН} + M_H,$$

где $M_{ИН} = K_2 \cdot J \cdot \varepsilon = K_2 \cdot J_{zp} \cdot \frac{a}{r}$; $M_H = K_3 \cdot m \cdot g \cdot r \cdot \sin \alpha$, α – угол наклона руки (для механизмов качания). Мощность P определяется:

$$P = \frac{\omega}{\eta} \cdot (M_{ИН} + M_H) \cdot 10^{-3} \text{ [кВт]}, \quad (8)$$

где $\omega = 2\pi n_{исп.звена} \text{ [с}^{-1}\text{]}$.

Передаточное число: $i = \frac{M_H}{M_{\deltaв} \eta}$, где M_H – динамический момент груза (M_H),

$M_{\deltaв}$ – момент неуравновешенных собственных подвижных частей ($M_{ИН}$), приведенных к валу двигателя [5,6].

Разброс значений i может быть достаточно большим, поэтому необходимо назначать i_{opt} таким, чтобы цикл работы данного механизма был минимальным. Расчеты показывают, что при значительных динамических нагрузках i увеличивается, и уменьшается время разгона-торможения и, также, уменьшается приведенный к валу двигателя момент $M_{\deltaв}$. При уменьшении i увеличивается время разгона-торможения и т.д. Окончательно назначают i_{opt} , зная полное время $t_{ц}$ цикла перемещения механизма, в котором $t_{разг} = t_{торм}$ и приведенный к валу двигателя момент инерции нагрузки I_H :

$$i_{opt} = \sqrt[3]{\frac{2\omega_{\deltaв}^2 I_H}{\phi M_{\deltaв} \eta}}, \quad (9)$$

если $I_{H прив}$ больше $I_{\deltaв}$, тогда $i = \sqrt{\frac{I_{H прив}}{I_{\deltaв}}}$.

Окончательно:

$$P = \frac{V}{\eta} \cdot (F_{ИН} + F_H) \cdot 10^{-3} \text{ [кВт]} \text{ – для линейных перемещений,} \quad (10)$$

$$P = \omega / \eta \cdot (M_{ИН} + M_H) \cdot 10^{-3} \text{ [кВт]},$$

где $\omega = 2\pi n \text{ (с}^{-1}\text{)}$ – для механизмов вращения

На рис. 10 можно проследить передачу силовых потоков механизмов α , β , γ , многозвенной руки «КУКА». Показано, что:

– для обеспечения вращения схвата по оси α движение передается от электродвигателя Д1 прямо через две конические передачи на ВЗП-3, которая вращает схват вокруг собственной продольной оси;

– для обеспечения вращения схвата по оси β , движение передается от электродвигателя Д3 через цилиндрическую передачу на ВЗП-1, которая вращает головку схвата вокруг горизонтальной оси;

– для обеспечения вращения схвата по оси γ движение передается от электродвигателя Д2 через другую цилиндрическую передачу на ВЗП-2 и на еще одну коническую передачу, которая вращает головку схвата вокруг вертикальной оси.

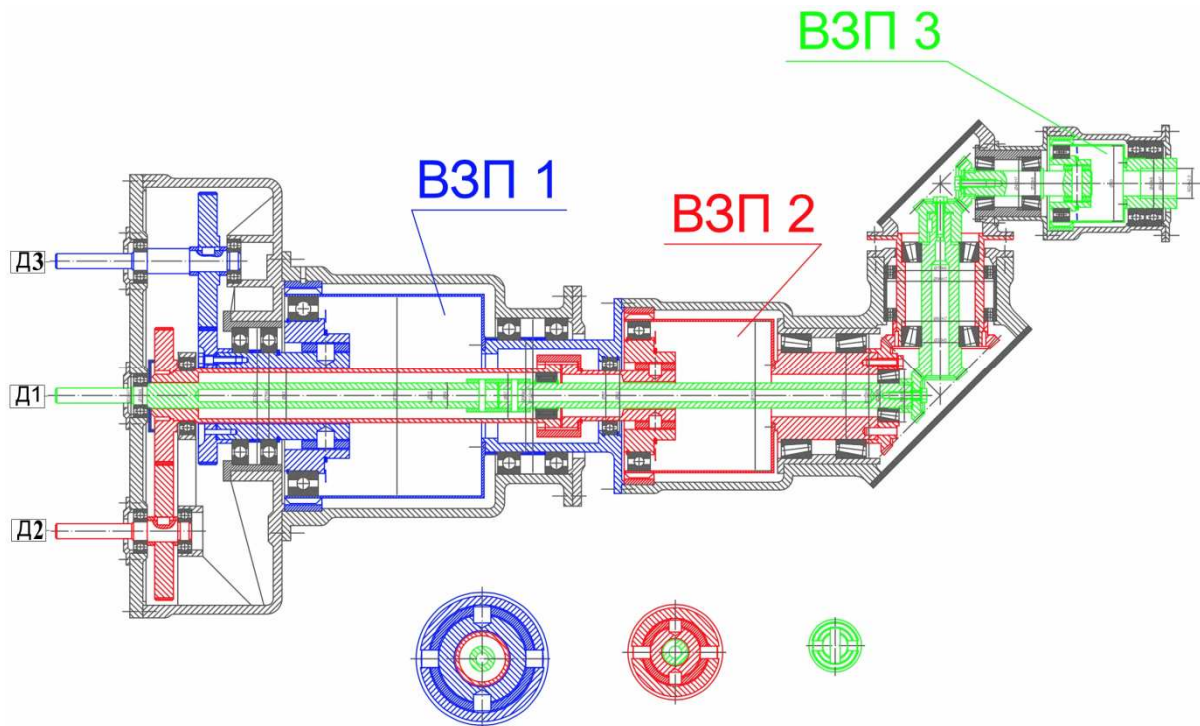


Рис. 10. Конструкторская проработка структурной схемы привода кисти (схвата) ПР фирмы «КУКА»

Для всех типов семейства ПР фирмы «КУКА», характерно наличие трех двигателей в задней части конструкции руки, обеспечивающих движения головки схвата по осям (α , β , γ) (рис. 3).

Назначение ПР, заданные режимы работы, параметры работы (скорости, величины перемещения, грузоподъемность и т.д.) существенно меняют структуру привода, так как меняется набор механических передач, также возможно изменение величины зоны обслуживания и размеров самого ПР.

Список литературы

1. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988. 392 с.
2. Чихачева О.А. Агрегатно-модульная конструкция многозвенной руки промышленных роботов / О.А. Чихачева, Л.А. Дмитриева, Д.А. Кузнецов, Д.Ю. Фомин // Научные достижения. Сборник статей международной научной конференции. Москва, 2016. С. 57-63.
3. Фомин Д.Ю. Анализ структуры передач механизмов промышленных роботов / Д.Ю. Фомин, О.А. Чихачева // XXIX Международная конференция «Машиноведение и инновации. Конференция молодых ученых и студентов «(МИКМУС – 2017): Материалы конференции (Москва, 6-8 декабря 2017). М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2018. С. 341-344.
4. Чихачева О.А. Особенности выбора структуры и расчета механизмов промышленных роботов / О.А. Чихачева, Л.А. Дмитриева, Р.А. Каверин // Аллея науки. 2018. Т.6, №4(20). С. 192-203.

5. Бабич А.В. Промышленная робототехника / А.В. Бабич, А.Г. Баранов, И.В. Калабин и др., под ред. Шифрина Я.А. – М.: Машиностроение, 1982. – 415 с.
6. Воробьев Е.И. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа / Е.И. Воробьев, Ю.Г. Козырев, В.И. Царенко; Под. ред. Ю.Г. Козырева. М.: Машиностроение, 1988. 239 с.

Сведения об авторах:

Чихачева Ольга Анатольевна – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Техническая механика», Московский Политех, г.Москва;

Лукьянов Александр Сергеевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Техническая механика» Московский Политех, г.Москва;

Дмитриева Людмила Александровна – старший преподаватель кафедры «Техническая механика» Московский Политех, г.Москва.