

Определение величины коэффициента трения с использованием силомоментного датчика при роботизированной сборке нежесткого вала с жесткой втулкой*

Вартанов М.В., Нгуен Ван Линь
Московский Политехнический Университет
г. Москва, Российская Федерация

m.v.vartanov@mospolytech.ru, nguyenlinh.hvktqs@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрено определение величины коэффициента трения при установке нежесткого вала во втулку и получены экспериментальные зависимости коэффициента трения от глубины сопряжения деталей и величины сборочного усилия. С использованием выходных сигналов силомоментного датчика построена математическая модель для определения коэффициента трения на основе анализа двухточечного контактного взаимодействия деталей. Полученные значения позволяют определять значения силы трения в процессе сопряжения нежестких детали с жесткой втулкой. Эксперимент выполнен на промышленном роботе IRB-140, оснащенный силомоментным датчиком фирмы «Schunk».

Ключевые слова: роботизированная сборка, коэффициент трения, силомоментный датчик, нежесткие детали.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс выполнения цилиндрических соединений является типовой задачей в процессах сборки. Известен ряд методов роботизированной сборки соединений типа «вал-втулка». В работах [1-4] приведены результаты экспериментальных исследований собираемости соединения типа «вал-втулка» при роботизированной сборке на основе сигналов с силомоментного датчика. Исследования обычно выполнялись на деталях, которые являются абсолютно жесткими. Установка жесткой детали в отверстие втулки является весьма распространенной в машиностроении. Однако в последние годы в различных механизмах машин используется все больше гибких и нежестких деталей. Коэффициент трения оказывает большое влияние на процесс сборки, а значение коэффициента трения выбирается на основе справочных данных. В связи с этим, для повышения точности расчетов, связанных с совмещением нежесткого вала и жесткой втулки, актуальной является задача определения коэффициента трения, соответствующего конкретным деталям и их материалам.

Предлагается методика определения коэффициента трения с помощью силомоментного датчика в процессе сборки. В работе [5] представлено определение коэффициента трения абсолютно жестких деталей при сборке. Однако для нежестких деталей необходимость учета деформации детали (стержня) из-за ее малой жесткости значительно усложняет решение задачи определения коэффициента трения при автоматическом сопряжении.

Определение коэффициента трения необходимо для последующего создания алгоритмов позиционно-силового управления сборочным роботом.

В качестве детали рассматривается упругий цилиндрический вал круглого сечения с постоянной изгибной жесткостью, выполненный из пластика (литейный полиуретан SKU 7Л), длина которого существенно больше диаметра. В процессе установки нежесткого вала в жесткую втулку, естественно, рассмотреть три последовательные стадии (рис. 1):

- начальная стадия (контакт по фаскам);
- одноточечный контакт;
- двухточечный контакт.

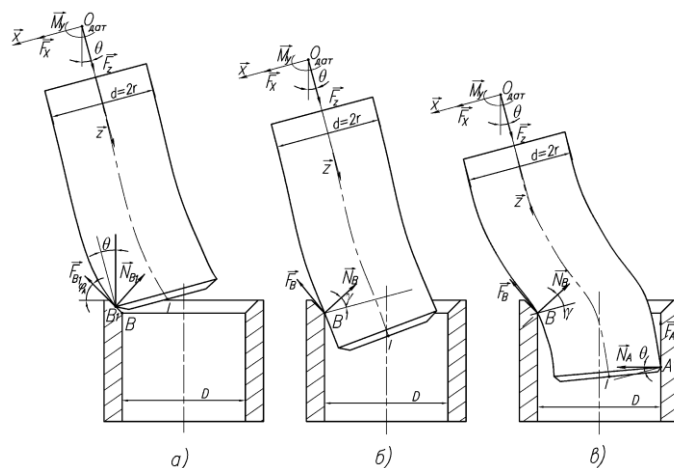


Рис. 1. Основные этапы сопряжения при сборке:
а – контакт по фаскам; б – одноточечный контакт;
в – двухточечный контакт

Коэффициент трения зависит от качества поверхности деталей и характера их контакта. Знание коэффициента трения необходимо для определения величин сил взаимодействия деталей при сборке [6, 7]. В работе [8-10] изучались эффекты трения с учетом геометрических параметров вала и втулки в процессе установки и сопутствующего явления заедания.

Для абсолютно жестких деталей принято рассматривать критерий заедания Симоновича [8,9]:

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

$$\frac{l}{2r} \geq \mu + C \left(\frac{1 + \mu^2}{\mu} \right) \quad (1)$$

где $C = \frac{R-r}{R}$ – отношение зазора к диаметру, r – радиус вала; μ – коэффициент трения; R – радиус отверстия; l – длина сопряжения деталей

Рассмотрим задачу определения величины коэффициента трения при роботизированной сборке для двухточечного контакта в квазистатической постановке.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ СБОРКЕ

В момент начала сопряжения нежесткого вала и жесткой втулки вал подвергается воздействию продольной сжимающей силы, приложенной со стороны схвата робота, а на другом торце - воздействию поперечных сил реакции, что приводит в общем случае к продольно-поперечному изгибу вала (рис. 2).

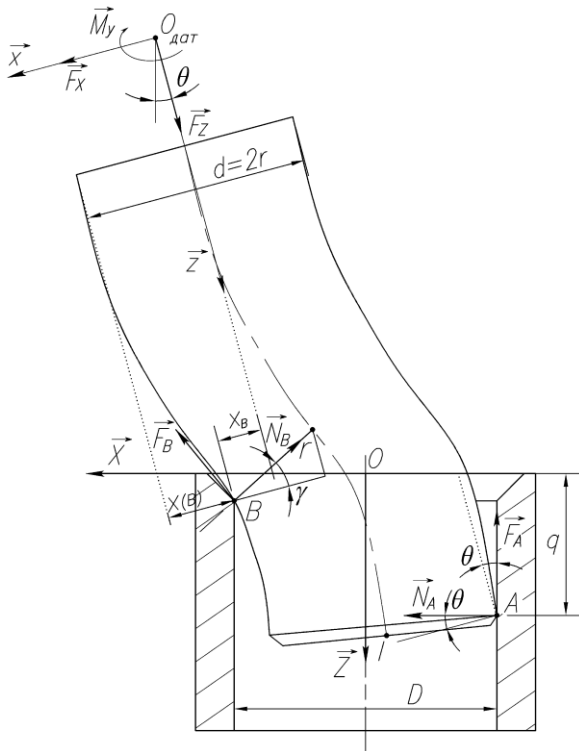


Рис. 2. Схема действия сил на вал при двухточечном контакте

Пусть точка А определяет контакт торца вала и стенки втулки, а точка В является верхней точкой контакта (фаски втулки и цилиндрической поверхности вала). В точке контакта А приложена нормальная сила \vec{N}_A и сила трения \vec{F}_A . В точке контакта В приложены нормальная сила \vec{N}_B и сила трения \vec{F}_B . Силы формируют сборочные усилия F_x, F_z и момент M_y в центре подвижной системы координат $O_{дат}$. Силы реакции определяются из условий равновесия по теореме о сходящихся силах [11].

Как показано на рис. 2, начало подвижной (локальной) системы координат совпадает с центральной точкой схва-

та $O_{дат}$, ось $O_{дат}z$ совпадает с продольной осью схвата, а $O_{дат}x$ выбирается так, чтобы вал и втулка были симметричны относительно плоскости $O_{дат}xz$.

Связь между координатами точек контакта А и В в локальной $[R_1]$ и глобальной $[R]$ системах координат может быть определена в виде:

$$\begin{aligned} A[R_1] &= (x_A; z_A), A[R] = (X_A; Z_A); \\ B[R_1] &= (x_B; z_B), B[R] = (X_B; Z_B); I[R_1] = (x_I; z_I) \end{aligned} \quad (2)$$

В принятой стратегии сборки пластиковый вал всегда имеет контакт в точке В, которая является фиксированной точкой отверстия. Корректировки и расчеты выполнены для фиксированной точки В.

Точка В является фиксированной точкой в глобальной системе координат $OXYZ$. В общем случае, если предположить, что θ мал, то получим

$$\begin{aligned} X_B &= X_{O_{дат}} + x_B \cos \theta - z_B \sin \theta \\ \Rightarrow X_B &= X_{O_{дат}} + x_B - z_B \theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Z_B &= Z_{O_{дат}} + x_B \sin \theta + z_B \cos \theta \\ \Rightarrow Z_B &= Z_{O_{дат}} + x_B \theta + z_B \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение упругой линии изогнутого стержня окончательно запишется в виде [12]:

$$x(z) = -\frac{M_y}{F_z} (1 - \cos(kz)) + \frac{F_x}{F_z} \left(z - \frac{\sin(kz)}{k} \right) \quad (5)$$

Угол поворота поперечного сечения в зависимости от z определяется выражением вида:

$$\gamma = \frac{dx(z)}{dz} = -\frac{M_y}{F_z} k \sin(kz) + \frac{F_x}{F_z} (1 - \cos(kz)) \quad (6)$$

Уравнения мгновенного (квазистатического) равновесия деформированного вала под действием приложенных к нему внешних сил и сил реакции в случае двухточечного контакта (в точках А и В) имеют вид:

$$\sum F_{kz} = -F_A \cos \theta - N_A \sin \theta - N_B \sin \gamma - F_B \cos \gamma + F_z = 0 \quad (7)$$

$$\sum F_{kx} = -F_A \sin \theta + N_A \cos \theta - N_B \cos \gamma + F_B \sin \gamma + F_x = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum M_{O_{дат}}(F_k) &= F_A (z_A \sin \theta + x_A \cos \theta) - \\ &- N_A (z_A \cos \theta - x_A \sin \theta) + N_B (z_B \cos \gamma - x_B \sin \gamma) - \\ &- F_B (z_B \sin \gamma + x_B \cos \gamma) - M_y = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Сила трения в точке А и В, определится соотношением вида:

$$F_B = \mu N_B; F_A = \mu N_A \quad (10)$$

где μ – коэффициент трения пары материалов «втулка – вал».

Следовательно, θ и γ предполагаются малыми:

$$\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1, \sin \gamma \approx \gamma, \cos \gamma \approx 1.$$

$$\sum F_{kz} = -F_A - N_A \theta - N_B \gamma - F_B + F_z = 0 \quad (11)$$

$$\sum F_{kx} = -F_A \theta + N_A - N_B + F_B \gamma + F_x = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sum M_{O_{дат}}(F_k) &= F_A (z_A \theta + x_A) - N_A (z_A - x_A \theta) + \\ &+ N_B (z_B - x_B \gamma) - F_B (z_B \gamma + x_B) - M_y = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Решая первые два уравнения (11), (12), находим значения реакций N_A и N_B :

$$N_B = \frac{F_x(\mu + \theta) + F_z(1 - \mu\theta)}{(\theta + \mu)(1 - \mu\gamma) + (\mu + \gamma)(1 - \mu\theta)} \quad (14)$$

$$N_A = -\frac{F_x(\gamma + \mu) - F_z(1 - \mu\gamma)}{(\theta + \mu)(1 - \mu\gamma) + (\mu + \gamma)(1 - \mu\theta)} \quad (15)$$

Вал подвергается деформации из-за контактных сил. С помощью законов сопротивления материалов, получаем

$$\gamma_B = -\frac{M_y}{F_z} k \sin(kz_B) + \frac{F_x}{F_z} [1 - \cos(kz_B)] \quad (16)$$

$$x_B = r - \frac{M_y}{F_z} (1 - \cos kz_B) + \frac{F_x}{F_z} \left(z_B - \frac{\sin kz_B}{k} \right) \quad (17)$$

Для следующего шага неизвестные z_B, x_B, θ будут найдены путем решения уравнений (3) и (16)

$$\theta = \frac{X_{O_{\text{дат}}} - X_B + r - \frac{M_y}{F_z} (1 - \cos kz_B) + \frac{F_x}{F_z} \left(z_B - \frac{\sin kz_B}{k} \right)}{z_B} \quad (18)$$

Преобразуя уравнения (4) и (17), получим

$$z_B^2 + (Z_{O_{\text{дат}}} - Z_B)z_B + (X_{O_{\text{дат}}} - X_B)x_B + x_B^2 = 0 \quad (19)$$

Уравнение (19) - квадратное алгебраическое уравнение относительно z_B , точное решение которого имеет вид:

$$(z_B)_{1,2} = \frac{Z_B - Z_{O_{\text{дат}}} \pm \sqrt{\Delta}}{2} \quad (20)$$

где $\Delta = (Z_{O_{\text{дат}}} - Z_B)^2 - 4[(X_{O_{\text{дат}}} - X_B)x_B + x_B^2]$ - дискриминант уравнения.

Пусть X_A - координаты точки А в абсолютной системе координат. Во время подстановки X_A является константой. Таким образом,

$$X_A = X_{O_{\text{дат}}} + x_A - z_A\theta \quad (21)$$

$$D = X_B - X_A; X_A = -\frac{D}{2} \quad (22)$$

где D - диаметр втулки.

Уравнения (21) и (22) дают

$$x_A = z_A\theta + X_B - D - X_{O_{\text{дат}}} \quad (23)$$

Из геометрических соотношений (рис. 2), получаем координаты точки В

$$z_A \approx \frac{q}{\cos \theta} + z_B \approx \frac{q}{\theta} + \frac{Z_B - Z_{O_{\text{дат}}} \pm \sqrt{\Delta}}{2} \quad (24)$$

Подставляя значения $x_B, z_B, \gamma, \theta, x_A, z_A$, в уравнения (13), (14), (15) получаем коэффициент трения.

Однако, при использовании силомоментного датчика показания снимаются в виде сил и моментов, направленных вдоль трех осей координат: ось Oz_1 направлена вдоль оси вала, а оси Ox_1 и Oy_1 ей перпендикулярны и лежат в плоскости поперечного сечения вала [14]. Значения сил и моментов преобразуются следующим образом

$$F_x = \sqrt{F_{x1}^2 + F_{y1}^2} \quad (25)$$

$$M_y = \sqrt{M_{x1}^2 + M_{y1}^2}$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментов создана экспериментальная установка, оснащенная силомоментным датчиком (рис. 3). Установка смонтирована на базе промышленного робота IRB-140 с контроллером IRC5. Сопрягаемые цилиндрические детали вал и втулка жёстко базируются в схвате робота (4) и сборочном приспособлении (6). Информация о возникающих в зоне сборки силах и моментах поступает в систему управления промышленным роботом, а также регистрируется персональным компьютером (1).

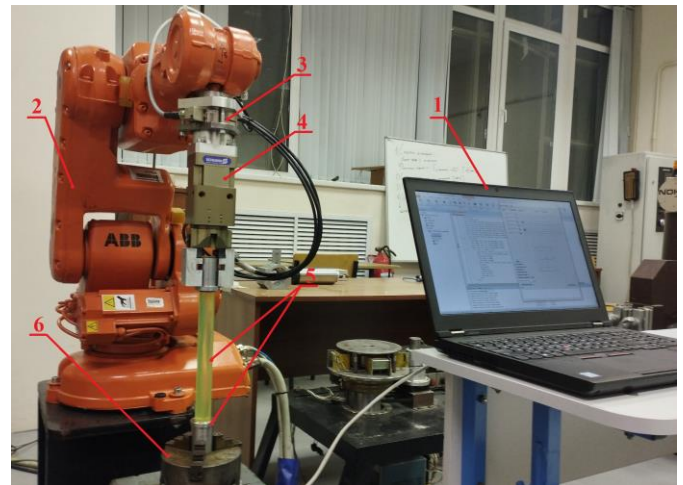


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки:

1 – персональный компьютер; 2 – промышленный робот ABB IRB 140; 3 – силомоментный датчик; 4 – захватное устройство; 5 – экспериментальные образцы; 6 – базовое приспособление;

ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для определения коэффициента трения нежесткий вал устанавливался во втулку, при этом вал двигался вниз до глубины сопряжения $q = 21 - 40$ мм. Вал изготавливался из пластика (литьевой полиуретан СКУ 7Л). Втулка изготавливались из стали Ст45. Коэффициент трения определялся при различных глубинах сопряжения вала и втулки.

Таблица 1

Экспериментальные результаты и рассчитанный коэффициент трения

N	F_{x1} [N]	F_{y1} [N]	F_{z1} [N]	M_{x1} [Nm]	M_{y1} [Nm]	M_{z1} [Nm]	q [mm]	μ
1	-0.06	-1.73	6.02	-0.06	0.16	-0.06	21	0.153
2	0.16	-1.37	10.5	-0.05	0.31	-0.08	23	0.196
3	0.18	-1.48	12.8	-0.06	0.38	-0.07	25	0.261
4	0.21	-1.79	13.6	-0.06	0.41	-0.07	27	0.275
5	0.29	-1.47	16.5	-0.06	0.43	-0.07	30	0.282
6	0.29	-1.49	16.8	-0.06	0.48	-0.07	32	0.284
7	0.25	-1.47	18.0	-0.06	0.56	-0.09	34	0.274
8	1.08	-2.11	21.2	-0.07	0.61	-0.08	36	0.277
9	1.08	-2.14	22.8	-0.07	0.68	-0.08	38	0.289
10	1.09	-2.55	24.7	-0.07	0.72	-0.08	40	0.282

В табл. 1 приведены значения составляющих сил и моментов F_{x1} , F_{y1} , F_{z1} , M_{x1} , M_{y1} , M_{z1} , полученных с силомоментного датчика и рассчитанный теоретически коэффициент трения μ с помощью MatLab из уравнений (13), (14) и (15). По результатам расчетов в таблице 1, принято среднее значение коэффициента трения «полиуретан-сталь» равно 0,28. Значение коэффициента трения «полиуретан-сталь», приведенное в работе [15, 16], составляет 0,15-0,4. Полученные результаты полностью согласуются с ранее выполненными исследованиями.

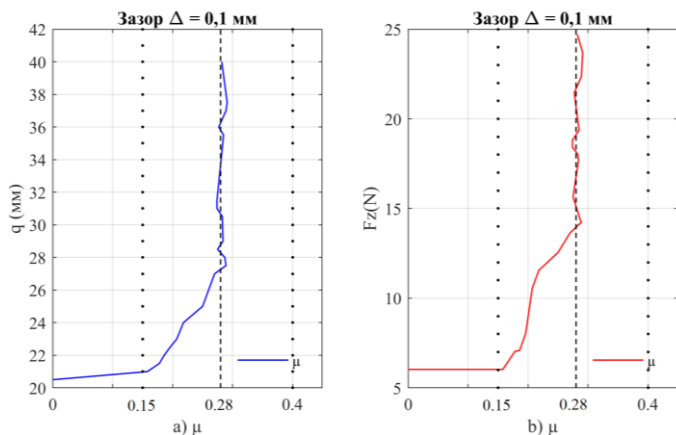


Рис. 4. Определение изменения коэффициента трения: *a* – зависимость коэффициента трения от глубины сопряжения деталей; *b* – зависимость коэффициента трения от величины сборочного усилия F_z

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в процессе сборки нежестких деталей коэффициент трения зависит от сборочного усилия. При увеличении F_z , коэффициент трения значительно увеличивается при нагружении до 25Н. Далее он практически не изменяется: находится сосредоточен в диапазоне 0,27-0,29 (рис. 4). Следовательно, экспериментальное определение коэффициента трения позволяет найти граничные условия, соответствующие переходу «трение скольжения – трение покоя». В целом полученные результаты коррелируют с результатами других исследователей, изучавших условия заклинивания и соответствуют критической переходной точке [8, 13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Hägele M. Industrial robotics, Springer handbook of robotics / M. Hägele, K. Nilsson, J.N. Pires, R. Bischoff. – Springer, Cham, 2016. – P. 1385-1422.
2. Wang Y. Contact Force/Torque Prediction and Analysis Model for Large Length-diameter Ratio Peg-in-hole Assembly / Y. Wang, et al. // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – 2018. – P. 2285-2290.
3. R. Johansson. Sensor integration in task-level programming and industrial robotic task execution control // Industrial Robot. – vol. 31, no. 3. – 2004. – P. 284-296.

4. Tang T. Autonomous alignment of peg and hole by force/torque measurement for robotic assembly / T. Tang, H. Lin, Yu Zhao, Wenjie Chen, M. Tomizuka // 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). – 2016. – P. 162-167.

5. Vartanov M.V. Determination of Changing Friction Coefficient Using Force Torque Sensor During Robotic Assembly of Cylindrical Connection with Clearance / M.V. Vartanov, Nguyen Van Dung, Tran Dinh Van // 2020 International Russian Automation Conference. – 2020. – P. 977-981.

6. Крагельский И.В. Коэффициенты трения. / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова // Справочное пособие. Изд. 2-е перераб. и доп. – Москва. – 1962. – 217 с.

7. Крагельский И.В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп. - М.: Изд-во Машиностроение. – 1986. – 480 с.

8. Simunovic. Force Information in assembly processes, 5th ISIR Chicago. – 1975. – P. 415-431.

9. Шахинпур М. Курс робототехники: пер. с англ. – М., Мир, 1990. – 527 с.

10. Ноф Ш. Справочник по промышленной робототехнике, том 2. – М.: Мир. – 1990. – 480 с.

11. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах, Том 1. Статика и Кинематика / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон; под ред. Г.Ю. Джанелидзе, Д.Р. Меркина. – М.: Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы. – 1967. – 512 с.

12. Вартанов М.В. Модель поведения нежесткой детали при роботизированной сборке/ М.В. Вартанов, Е.А. Коган, Нгуен Ван Линь // Международный научный симпозиум технологов машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий». – Ростов-на-Дону. – 2022. – С. 91-96.

13. Whitney D.E. Part mating in assembly // Handbook on Industrial Robots. – New York: Pergamon Press. – 1985, P. 1084-1116.

14. Vartanov M.V. Mathematical Model of the Coupling Process of the “Shaft-Sleeve” Connection Using an Active Adaptation Tool for Three-Point Contact / M.V. Vartanov, Nguyen Van Dung, Nguyen Van Linh // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. Cham. – P. 674-683.

15. Коршак В.В. Технологии пластических масс. 3-е издание. – 1985. – 562 с.

16. Керча Ю.Ю. Физическая химия полиуретанов. Киев, Наукова думка. – 1979. – 220 с.

Determination of the Friction Coefficient Using a Force Torque Sensor During the Robotic Assembly of a Non-Rigid Shaft with a Rigid Sleeve

Vartanov M.V., Van Linh Nguyen

Moscow Polytechnic University
Moscow, Russian Federation

natalia.vartanova@bk.ru, nguyenlinh.hvktqs@gmail.com

Abstract. The article considers the determination of the friction coefficient when installing a non-rigid shaft in the sleeve and the experimental dependences of the friction coefficient on the depth of coupling of parts and the values of measured assembly force. Using the output signals of a force torque sensor, a mathematical model is constructed to determine the friction coefficient based on the analysis of two-point contact interaction of parts. The results allow us to determine the values of the friction force

during the coupling of a non-rigid shaft with a rigid sleeve. The experiment was performed on an industrial robot ABB IRB-140 with an IRC5 controller, equipped with a force torque sensor from the company "Schunk".

Keywords: industrial robot, force torque sensor, friction coefficient, automatic assembly, non-rigid parts.

Библиографическое описание статьи

Вартанов М.В. Определение величины коэффициента трения с использованием силомоментного датчика при роботизированной сборке нежесткого вала с жесткой втулкой / М.В. Вартанов, Нгуен Ван Линь // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т.10, №1. – С. 9-13. DOI: 10.24892/RIJIE/20230102

Reference to article

Vartanov M.V., Van Linh Nguyen. Determination of the friction coefficient using a force torque sensor during the robotic assembly of a non-rigid shaft with a rigid sleeve, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.1, pp. 9-13. DOI: 10.24892/RIJIE/20230102