

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ СОБИРАЕМОСТИ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКЕ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОМОМЕНТНОГО ДАТЧИКА

*Experimental research of assembly capability conditions with robotized assembly  
based on application of force-torque sensor*

*Eksperymentalne badania warunków montowalności w zrobotyzowanym montażu  
z zastosowaniem czujnika siły i momentu*

M.W. Wartanow, W.K. Pietroń, M.W. Archipow, M.S. Miszczenko

---

**А н н о т а ц и я:** В статье рассматривается модель двухточечного контакта при роботизированной сборке в квазистатической постановке. Приводится описание экспериментальной установки с роботом, дооснащенным силомоментным датчиком. Обсуждается согласованность аналитического решения и результатов физического эксперимента.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** Роботизированная сборка, силомоментный датчик, модель сопряжения, позиционно-силовое управление

**A b s t r a c t:** The article considers a two-point contact model with a robotic assembly in a quasi-static position. A description of the experimental setup with a robot, an upgraded with force-torque transducer. The consistency of the analytical solution and the results of the physical experiment is discussed.

**K e y w o r d s:** robotic assembly, force-torque transducer, assembly model, position-force control

**S t r e s z c z e n i e:** W artykule przedstawiono model dwupunktowego styku przy zrobotyzowanym montażu w postaci kwazystatycznej. Przytoczono opis eksperymentalnego urządzenia z robotem wyposażonym w czujniki pomiaru siły. Przeanalizowano zgodność rozwiązania analitycznego i wyników fizycznego eksperymentu.

**S ł o w a k l u c z o w e:** montaż zrobotyzowany, czujnik siły, model łączenia, sterowanie pozycyjno-siłowe

---

## Введение

Из теории автоматической сборки и промышленной практики известно, что обеспечение условий собираемости является весьма сложной задачей при жестком базировании деталей. Условия сборки усложняются в связи с постоянным ростом точности деталей машин и их соединений. Даже современные промышленные роботы, имеющие точность позиционирования 0,03...0,07 мм, не обеспечивают достаточную технологическую надежность процесса.

Целью работы является повышение технологической надежности роботизированной сборки прецизионных соединений на основе применения активной адаптации.

Для достижения данной цели и реализации способа сборки с активной адаптацией необходимо решить задачу создания обратной связи в системе управления промышленным роботом и разработать адаптивный алгоритм управления. Сенсорное устройство, которое реализует обратную связь в системе

управления – шестикомпонентный датчик сил и моментов.

Метод решения поставленной задачи основан на исследовании условий собираемости как основы для разработки алгоритма позиционно-силового управления сборочным роботом. В качестве теоретической базы выступают основные положения технологии машиностроения, теории автоматического управления, теоретической и аналитической механики, а также робототехники.

Получен ряд математических зависимостей, определяющих возникновение условий заклинивания деталей при роботизированной сборке [1].

## Экспериментальная установка

Приведем описание структуры и алгоритм функционирования экспериментальной установки для исследования роботизированной сборки, дооснащенной адаптивным захватным устройством (приложение 1). Установка собрана на базе промышленного робота

ABB IRB 140 (1) с контроллером IRC5. Собираемые детали (3) цилиндрические вал и втулка жёстко базируются в адаптивном захватном устройстве (2) и трехкулачковом самоцентрирующемся патроне (4) соответственно. Информация о возникающих в зоне сборки силах и моментах поступает в систему управления промышленным роботом, а также регистрируется персональным компьютером (5).

На данном этапе проводится экспериментальное исследование сил и моментов, возникающих в зоне сборки. Управление установкой осуществляется в ручном режиме, при помощи стандартного модуля FlexPendant. Вал фиксируется в захватном устройстве, далее производится подвод детали в зону сборки, затем выполняется имитация операции сборки.

Зазор в соединении вал-втулка составляет порядка 0,01 мм. Так как точность позиционирования манипулятора, находится в пределах 0,03...0,07 мм возникает перекос осей, собираемых деталей. Вследствие перекоса осей вала и втулки, происходит контакт по сопрягаемым поверхностям. В точках контакта, возникают реакции, которые мешают дальнейшей сборке деталей. Таким образом происходит заклинивание деталей.

В зависимости от значения угла перекоса, возникают различные контактные ситуации. Каждой контактной ситуации соответствует определенный набор силовых реакций, которые напрямую влияют на вектор сил и моментов, регистрируемый силомоментным датчиком [3].

### Адаптивное захватное устройство

Для решения поставленной задачи необходимо разработать захватное устройство, отвечающее требованиям жёсткой фиксации сопрягаемой детали, а также обеспечивающее возможность организации обратной связи в системе управления промышленным роботом. В связи с этим было разработано и изготовлено адаптивное захватное устройство, работающее по принципу активной адаптации (приложение 2).

Основные компоненты адаптивного захватного устройства: силомоментный датчик модели Gamma SI-65-5 фирмы ATI Industrial Automation (1) и пневматический схват Schunk GSM-P 64-E-180 (3), на котором установлены оригинальные призматические губки (4). Для объединения компонентов в единое устройство было спроектировано монтажное приспособление (2), при помощи которого устройство также устанавливается на выходном звене манипулятора.

При подаче сжатого воздуха в пневматический схват, происходит центрирование и закрепление детали в приспособлении. Призматическая форма захватных губок позволяет совместить ось детали и силомоментного датчика. Жёсткое сопряжение всех компонентов захватного устройства даёт возможность измерить, возникающие в зоне сборки силы и моменты, при помощи силомоментного датчика.

### Расчет контактных усилий в сборочных операциях типа «вал-отверстие» при двухточечном контакте с пренебрежением весом вала

При использовании современных промышленных роботов, имеющих точность позиционирования 0,03...0,05 мм трехточечный контакт, не возникает, что подтверждается постановочными экспериментами. В данной работе сделан акцент на двухточечный контакт с точки зрения технологической надежности.

В статье [1] приведен аналогичный расчет в квазистатической постановке. Однако по этому расчету возникают вопросы в связи с целесообразностью использования таких параметров, как длина вала и центр масс вала. Поскольку масса вала не учитывается, эти параметры, являются лишними. Далее приведен расчет, в котором эти параметры не используются.

На рисунке в приложении 3 представлена схема действия сил при двухточечном контакте. Из схемы

$$K_1 H = \frac{2R - 2r}{\varphi} - 2R\varphi$$

$$K_1 E = \frac{2R - 2r}{\varphi}$$

$$q = \frac{2R - 2r}{\varphi}$$

Уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \sum M_{K_1}(F_k) &= (-P \cdot r) + F_{TP2} \cdot 2R - N_2 \cdot K_1 H = 0 \\ \sum M_{K_2}(F_k) &= P \cdot r + F_{TP1} \cdot 2r - N_1 \cdot K_1 E = 0 \\ \sum F_{ky} &= N_1 - N_2 \cdot \cos \varphi + F_{TP2} \cdot \sin \varphi = 0 \end{aligned}$$

Условие заклинивания можно записать как

$$\frac{R - r}{q} \geq \frac{q - f(R - r)}{2R + 2f^2r + fq}$$

Реакции  $N_1$  и  $N_2$  в состоянии предельного равновесия

$$N_1 = \frac{P \cdot r}{2fr + q}$$

$$N_2 = \frac{P \cdot r}{2fr - q + 4R \cdot \frac{q - f(R - r)}{2R + 2f^2r + fq}}$$

Поменяв знак в (1) и помножив левую и правую часть на  $q$ , получаем условие отсутствия заклинивания:

$$R - r \leq \frac{q(q - f(R - r))}{2R + 2f^2r + fq}$$

Решив данное неравенство относительно  $q$  получаем

$$\frac{q}{R - r} \geq f \left( 1 + \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{R + f^2r}{f^2(R - r)}} \right)$$

### Экспериментальные исследования

Проведен эксперимент и получены графики. График на рис. 1 показывает, как изменялись силы, которые возникают в точках контакта в процессе

сопряжения цилиндрических деталей с зазором 0,01 мм. На горизонтальной оси откладываются 15 точек траектории движения вала относительно втулки. Манипулятор обеспечивал поступательное плоскопараллельное движение вала по собственной оси с шагом 5 мм. На вертикальной оси откладываются числовые значения компонент главного вектора силы.

Прохождение всех 15 точек соответствует смещению нижнего торца вала, относительно верхнего торца втулки на 70 мм, что превышает габаритный линейный размер втулки на 30 мм. Это означает, что операция сборки произведена успешно.

Из экспериментов установлено, что возрастание сил в зоне сборки в пределах 20 Н не оказывает влияния на протекание процесса сборки металлических деталей. Сопряжение производилось в толчковом режиме с применением ручной адаптации траектории.

На графике на рис. 2 изображено изменение компонент главного вектора сил в зоне сборки, при сопряжении цилиндрических деталей с зазором 0,01 мм

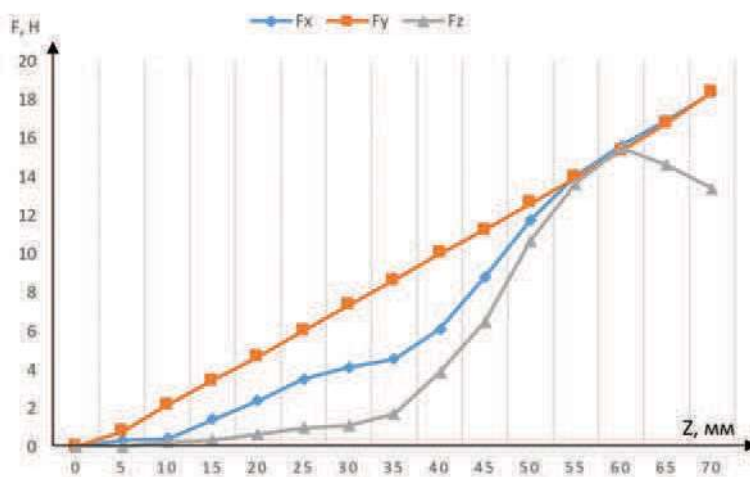


Рис. 1. Изменение компонент главного вектора сил в процессе сопряжения  
Fig. 1. Variation of the components of the principal force vector in the process of conjugation

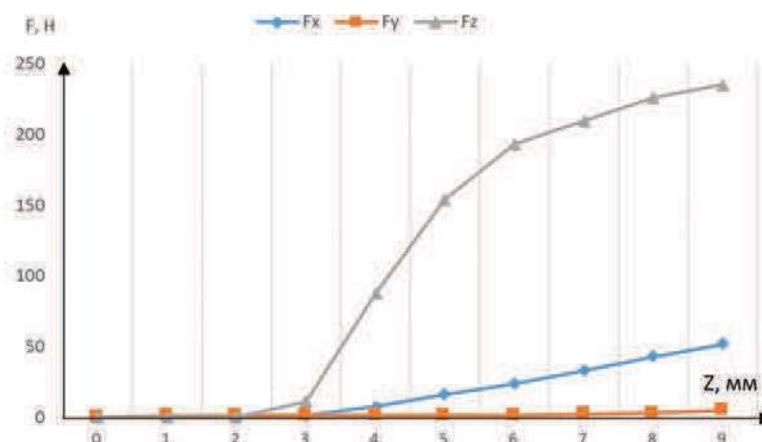


Рис. 2. Изменение компонент главного вектора сил при заклинивании  
Fig. 2. Variation of the components of the main force vector when jammed

с заданным гарантированным перекосом осей. Экспериментально исследовалась ситуация заклинивания, при возникновении которой процесс сборки не может быть завершен.

На горизонтальной оси графика откладываются 10 точек траектории движения вала относительно втулки. Манипулятор сообщает поступательное плоскопараллельное движение вала по собственной оси с шагом 1 мм. В момент возникновения контакта, составляющая главного вектора сил, сила  $F_z$  резко возрастает и продолжает расти относительно других составляющих  $F_x$  и  $F_y$ .

Такое поведение компонент главного вектора сил, дает возможность регистрировать ситуации заклинивания деталей и может быть использовано для обучения алгоритмов коррекции шагов по координатам X, Y при управлении манипулятором для выхода из заклинивания. Разработка данных алгоритмов является предметом дальнейших исследований.

### Заключение

Таким образом при помощи шестикомпонентного силомоментного датчика исследованы граничные ситуации процесса сборки цилиндрических соединений с зазором 0,01 мм. Экспериментально доказано, что на данной установке можно производить сборку деталей такими зазорами.

Однако для решения поставленной в работе задачи необходимо создать такую систему управления, которая будет способна генерировать адаптивную

траекторию движения детали в автоматическом режиме.

Также существует необходимость создания адекватной математической модели сопряжения деталей, решающая пространственную задачу. Полученные экспериментальные данные будут полезны, при составлении такой математической модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Божкова Л.В., Вартанов М.В., Шандров Б.В. Этапы создания алгоритмического обеспечения интеллектуальной роботизированной сборки // Известия Волгоградского государственного технического университета № 21(148) / том 12 / 2014 г.
- [2] Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях/Под. ред. В.С. Гурфинкеля и Е.А. Девянина. – М.: Физмат, 1994. – 368 с. – (Научные основы робототехники).
- [3] Черняховская Л.Б. Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей: Монография / Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 75 с.: 55 ил.

---

УДК 621.865.8

М.В. Вартанов, д-р техн. наук, профессор; В.К. Петров, канд. техн. наук, доцент; М.В. Архипов, канд. техн. наук, доцент; Р.С. Мищенко, аспирант. Московский Государственный Машиностроительный Университет (МАМИ)  
г. Москва, Россия roman.mishchen@gmail.com

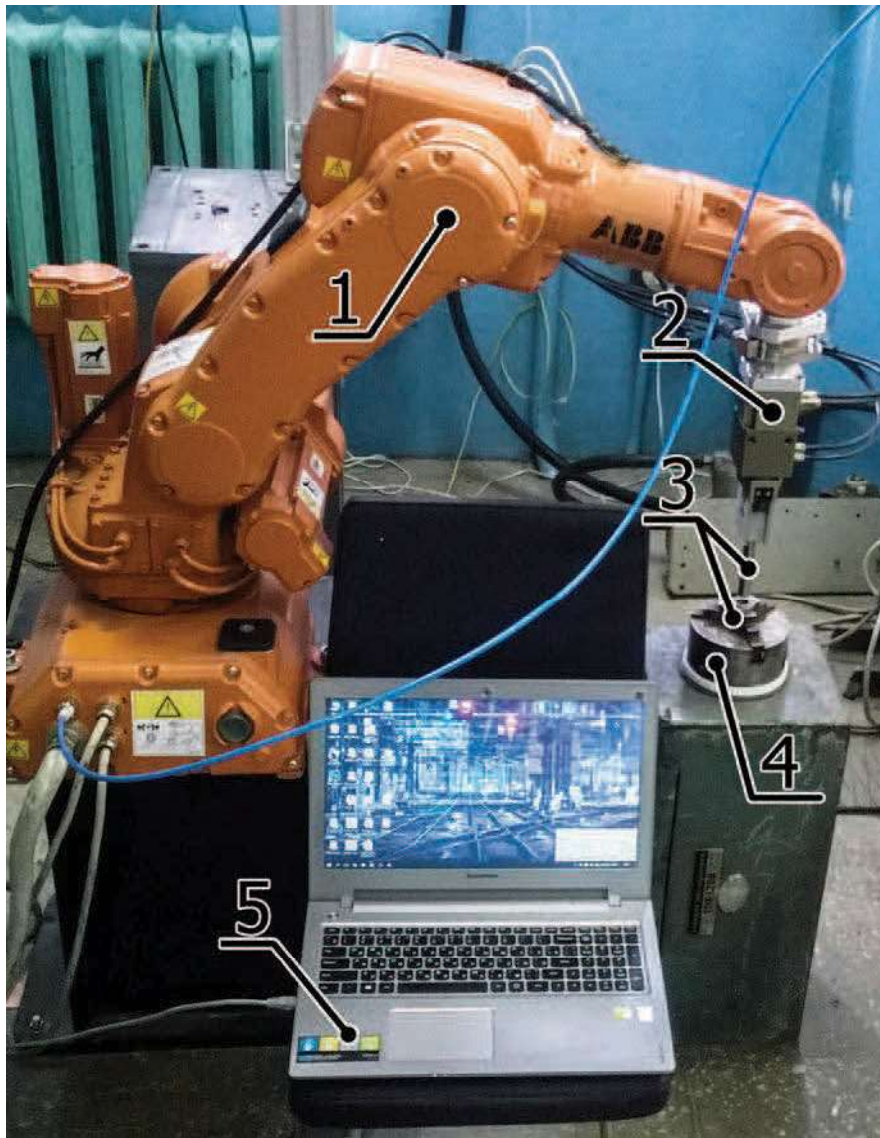


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки с адаптацией: 1 – промышленный робот ABB IRB 140, 2 – адаптивное захватное устройство, 3 – экспериментальные образцы, 4 – трехкулачковый самоцентрирующийся патрон, 5 – персональный компьютер.

Fig. 1. Experimental installation for the robotic assembly study with adaptation: 1 – industrial robot ABB IRB 140, 2 – adaptive gripping device, 3 – experimental samples, 4 – three-jaw self-centering chuck, 5 – personal computer.

## Приложение 2

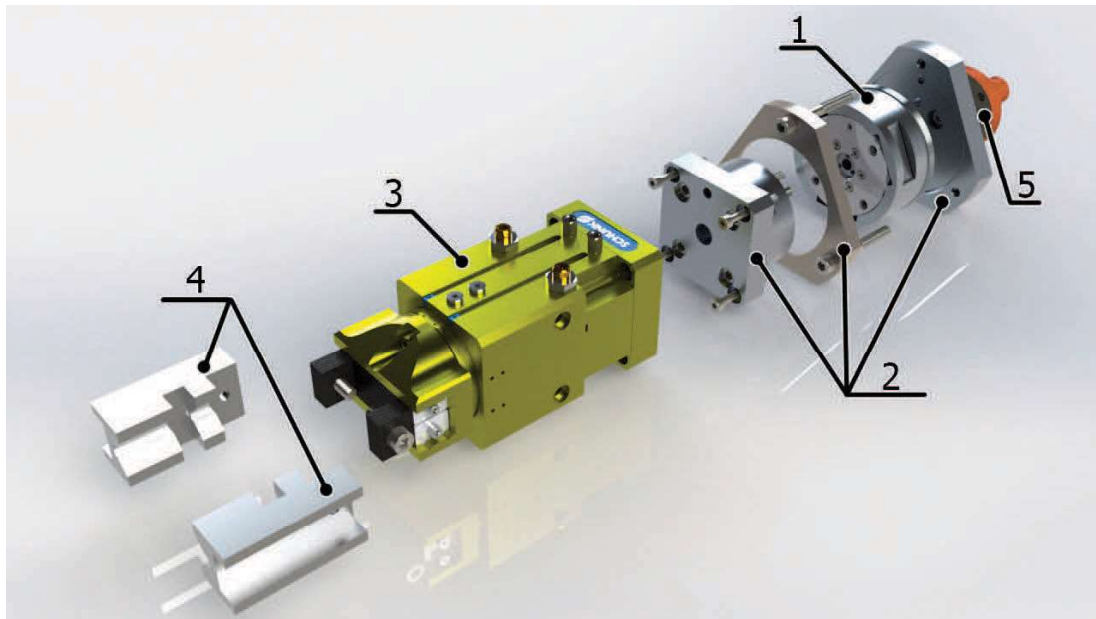


Рис. 2. Адаптивное захватное устройство: 1 – силомоментный датчик Gamma SI-65-5, 2 – монтажное приспособление, 3 – пневматический схват Schunk GSM-P 64-E-180, 4 – призматические губки, 5 – выходное звено манипулятора  
 Fig. 2. Adaptive gripping device: 1 – the Gamma SI-65-5 force transducer, 2 – mounting device, 3 – pneumatic gripper Schunk GSM-P 64-E-180, 4 – prismatic sponges, 5 – output link of the manipulator

## Приложение 3

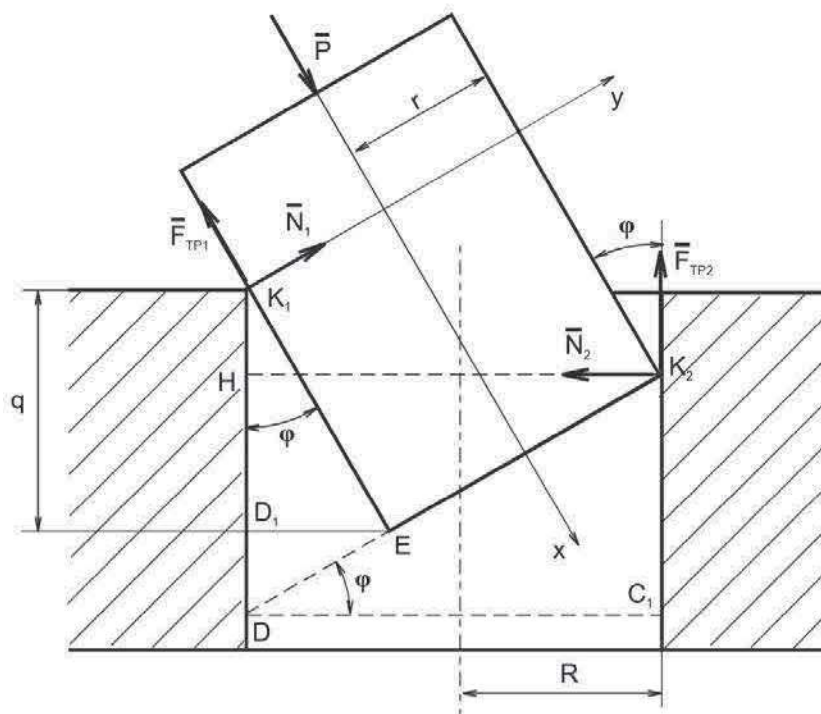


Рис. 3. Схема действия сил при двухточечном контакте  
 Fig. 3. The scheme of the action forces with two-point contact