



## РАСПОЗНАВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧКИ КОНТАКТА ДЕТАЛЕЙ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКЕ С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ

С.В. Кузнецова, А.Л. Симаков

(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)

*Рассмотрены вопросы распознавания положения точки контактного взаимодействия деталей при сборке на основе информации с датчика сил и моментов. Проведен анализ одноточечного контактного взаимодействия деталей. Получены уравнения взаимосвязи сил и моментов, измеренных датчиком, с параметрами, определяющими положение точки контакта деталей. Описаны результаты оценки чувствительности датчика сил и моментов применительно к распознаванию ориентации детали.*

*Ключевые слова: автоматизированная сборка, одноточечный контакт деталей, промышленный робот, силомоментное очувствление, чувствительность датчика.*

### Введение

Вопросам создания робототехнических систем с силомоментным очувствлением посвящены работы отечественных ученых [1, 2, 3]. Силомоментные датчики (датчики усилий) вырабатывают информацию о силовых факторах, действующих на рабочий орган промышленного робота в процессе функционирования (при манипулировании деталями, ощупывании, отслеживании контура изделия и др.). Такие операции как сборка, зачистка отливок, шлифовка, полирование деталей (то есть операции, в которых следует развивать строго дозированное силовое воздействие на объект) могут быть решены на основе информации об усилиях [4, 5].

Низкий уровень автоматизации сборочных операций (по сравнению с формообразующими) свидетельствует о наличии нерешенных задач. Постоянный рост точности деталей машин и их соединений приводит к усложнению условий сборки. Современные промышленные роботы, не обладающие требуемой точностью позиционирования, все больше нуждаются в разработке адаптивных и интеллектуальных алгоритмов управления движением исполнительных органов. Один из вариантов, позволяющих расширить технологические возможности сборочного робота, основывается на построении обратной связи посредством датчика сил и моментов [6]. Известен ряд зарубежных работ по применению силомоментных датчиков при сборке [7]. Вместе с тем алгоритм решения задачи не раскрывается.

В работах [8, 9] поставлена задача создания алгоритма корректировки положения детали по данным силомоментного (шестикомпонентного) датчика (модель Gamma SI-65-5 фирмы ATI Industrial Automation), установленного перед рабочим органом промышлен-

ного робота (манипулятора ABB IRB 140, оснащенного пневматическим схватом Schunk GSM-P-64-E-180). Объект сборки — цилиндрическое соединение с зазором  $< 0,01$  мм.

Трудность решения данной задачи заключается в том, что сигналы с силомоментного сенсора не содержат прямой информации о положении или ориентации соединяемых деталей. Поэтому, возникает необходимость в разработке подхода, позволяющего извлечь эти данные косвенным путем.

### Постановка задачи

Определить положение точки контакта, возникающего при осевом и/или угловом рассогласовании соединяемых деталей при роботизированной сборке по сигналам с датчика сил и моментов. Одноточечный контакт деталей, анализ которого представлен в статье, возникает на начальном этапе сборки, например, при упоре вала о торец втулки или при соприкосновении по фаскам вала и втулки (то есть при неудачной попытке вставить вал в отверстие). Информация о положении точки контакта позволит скорректировать движение рабочего органа робота при выполнении операции сборки.

### Графическое представление контактного взаимодействия деталей при сборке с силомоментным очувствлением

Рассмотрим случай одноточечного контакта. Схематически взаимодействие деталей для самого простого случая контакта в одной точке представлено на рис. 1, 2, 3.

На рис. 1 изображена трехмерная модель для случая контактного взаимодействия присоединяемой и базовой деталей при сборке. Точка А — единственная точка (область) соприкосновения деталей.

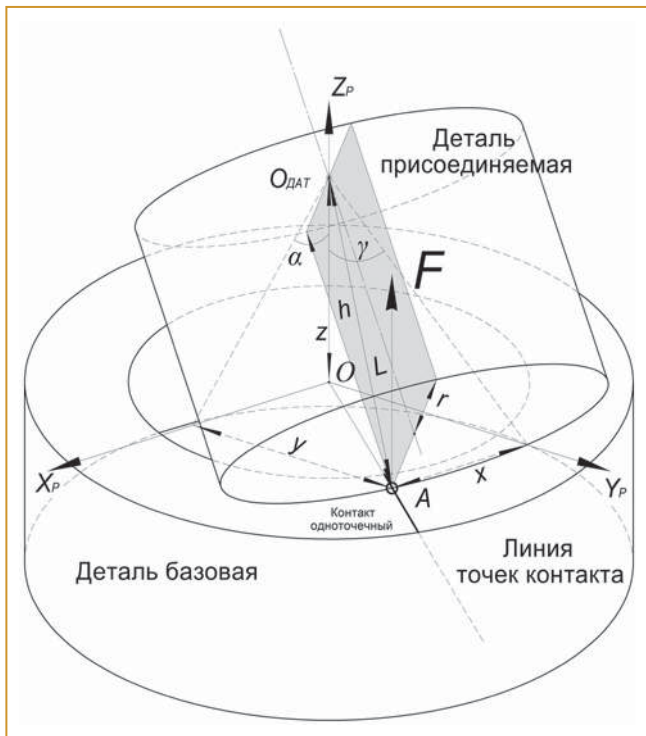


Рис. 1. Трехмерное представление случая единичного контактного взаимодействия деталей при сборке

На рис. 2 представлено сечение деталей плоскостью, нормальной к линии точек контакта деталей при сборке с силомоментным оцувствлением.

На рис. 3 приводятся идентифицируемые параметры — углы  $\alpha$  и  $\lambda$  — позволяющие определить местоположение точки A контакта деталей.

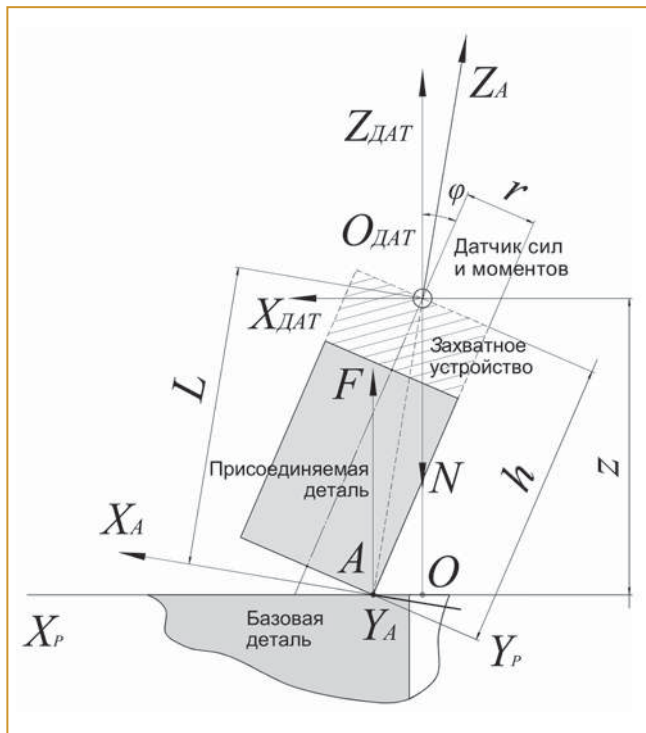


Рис. 2. Сечение деталей плоскостью, нормальной к линии точек контакта

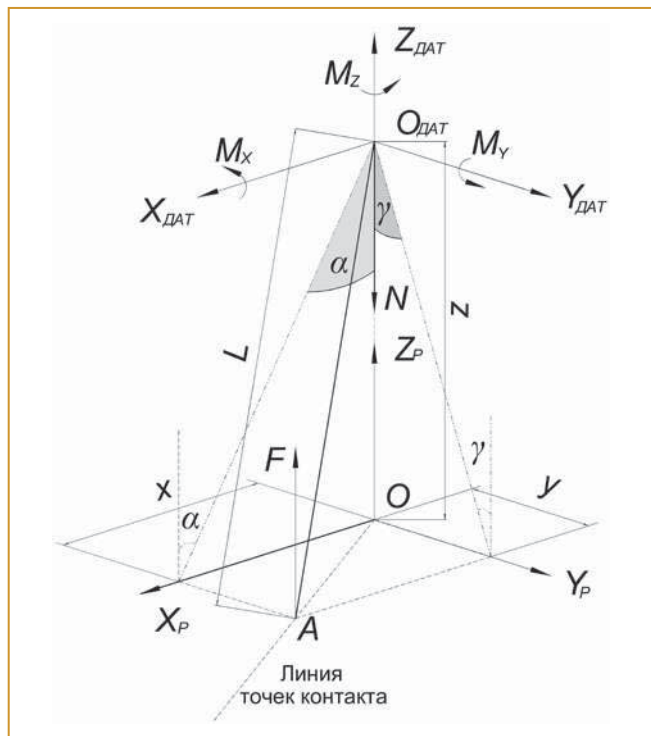


Рис. 3. Идентифицируемые параметры — углы  $\alpha$  и  $\gamma$  — позволяющие определить местоположение точки A контакта деталей

На рис. 1–3 используются следующие обозначения: точка A — геометрическое место контакта деталей;  $OX_pY_pZ_p$  — система координат сборочного робота;  $O_{дат}X_{дат}Y_{дат}Z_{дат}$  — система координат датчика сил и моментов;  $AX_AY_AZ_A$  — система координат, совмещенная с точкой контакта A; F — сила реакции в точке контакта (проекции силы  $F_x, F_y, F_z$  на оси системы координат  $AX_AY_AZ_A$  на рисунках не показаны); N — результирующая сила, измеряемая датчиком (проекции силы  $N_x, N_y, N_z$  на оси координат датчика на рисунках не показаны);  $M_x, M_y, M_z$  — моменты, относительно осей  $X_{дат}, Y_{дат}, Z_{дат}$  соответственно, измеряемые датчиком; x, y, z — плечи моментов силы F контактного взаимодействия деталей; r, h — параметры (радиус, высота), характеризующие геометрию присоединяемой (цилиндрической) детали, расположенной в устройстве захвата;  $\phi$  — угловое рассогласование деталей; L — расстояние от точки A контакта деталей до начала системы координат датчика сил и моментов  $O_{дат}$ ;  $\alpha$  и  $\gamma$  — углы, используемые для определения точки контакта деталей.

**Уравнения взаимосвязи сил и моментов, измеренных датчиком, с параметрами, определяющими положение точки контакта деталей**

Реализован процесс совмещения системы координат в точке контакта A деталей с системой координат силомоментного датчика  $O_{дат}X_{дат}Y_{дат}Z_{дат}$  в однородных координатах. Параметры  $\alpha$  и  $\gamma$  (рис. 4) положены в основу преобразований системы координат, связанной с точкой контакта в систему координат

датчика сил и моментов. Последовательность процесса преобразования системы координат (рис. 3, а) следующая:

$$AX_A Y_A Z_A \xrightarrow{L} O_{ДАТ} X_1 Y_1 Z_1 \xrightarrow{\gamma} O_{ДАТ} X_2 Y_2 Z_2 \xrightarrow{\alpha} O_{ДАТ} X_{ДАТ} Y_{ДАТ} Z_{ДАТ}.$$

Она включает: перемещение системы координат  $X_A Y_A Z_A$  на расстояние  $L$  вдоль оси  $AZ_A$ ; поворот системы координат  $OX_1 Y_1 Z_1$  на угол  $\gamma$  относительно оси  $OX_1$ ; поворот системы координат  $O_{ДАТ} X_2 Y_2 Z_2$  на угол  $\alpha$  относительно оси  $OY_2$ .

Осуществив данные преобразования, была выведена система уравнений, описывающая взаимосвязь сил  $N_x, N_y, N_z$  и моментов  $M_x, M_y, M_z$ , измеряемых датчиком при одноточечном контакте собираемых деталей, с углами  $\alpha$  и  $\gamma$ , позволяющими идентифицировать положение точки контакта в системе координат робота:

$$\begin{cases} N_x = F_x \cos \alpha + \sin \alpha (-F_y \sin \gamma + F_z \cos \gamma) \\ N_y = F_y \cos \gamma + F_z \sin \gamma \\ N_z = -F_x \sin \alpha + \cos \alpha (-F_y \sin \gamma + F_z \cos \gamma), \\ M_x = -F_y L \cos \alpha \cos \gamma + F_z L \sin \gamma \\ M_y = F_x L \cos \alpha \cos \gamma - F_z L \sin \alpha \cos \gamma \\ M_z = -F_x L \sin \gamma + F_y L \sin \alpha \cos \gamma \end{cases} \quad (1)$$

**Идентификация положения точки контакта**

Решение системы (1) позволит идентифицировать положение точки контакта деталей. После преобразований систему (1) можно свести к двум уравнениям, в которых исключены неизвестные силы реакции  $F_x, F_y, F_z$  и геометрический параметр  $L$ :

$$\begin{cases} M_x [N_x \cos(\alpha) - N_z \sin(\alpha)] - M_y [-N_x \sin(\alpha) \sin(\gamma) + N_y \cos(\gamma) - N_z \cos(\alpha) \sin(\gamma)] - \\ - M_z [N_x \sin(\alpha) \cos(\gamma) + N_y \sin(\gamma) + N_z \cos(\alpha) \cos(\gamma)] = 0, \\ \gamma = \arctg \left( -\frac{M_z \cos(\alpha) - M_x \sin(\alpha)}{M_y} \right) \end{cases} \quad (2)$$

Решение для первого уравнения системы (2) возможно получить только численным путем (отыскать угол  $\alpha$ ). Определение второго угла  $\gamma$  не вызывает трудностей.

Для расчета параметров  $\alpha$  и  $\gamma$  воспользовались инструментами системы MATLAB. На основе системы (1) была разработана модель, позволяющая численным методом определить углы  $\alpha$  и  $\gamma$  (а также составляющие силы реакции  $F_x, F_y, F_z$ ) при заданных значениях сил  $N_x, N_y, N_z$  и моментов  $M_x, M_y, M_z$ , измеряемых датчиком усилий.

Таблица. Результаты экспериментов

$M_x$	$M_y$	$\alpha$	$\gamma$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
+	-	+	+	+	+	-
-	-	+	-	+	-	-
-	+	-	-	-	-	-
+	+	-	+	-	+	-

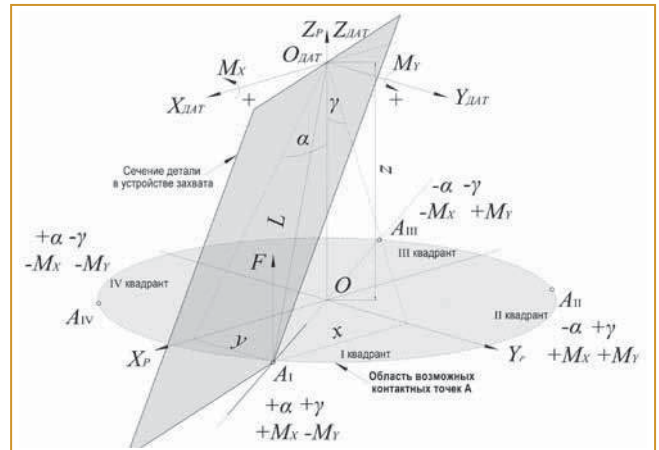


Рис. 4. Сопоставление знаков моментов  $M_x$  и  $M_y$ , измеренных датчиком, со знаками углов  $\alpha$  и  $\gamma$  для различных вариантов расположения точек контакта  $A$

**Анализ результатов вычислительных экспериментов на модели**

Эксперименты на данной компьютерной модели позволили выявить некоторые закономерности (таблица). В таблице приведено сопоставление знаков моментов  $M_x$  и  $M_y$ , измеренных датчиком, со знаками углов  $\alpha$  и  $\gamma$ , а также составляющих силы реакции  $F_x, F_y, F_z$ .

Эти данные могут быть полезны при работе над алгоритмом управления роботом, задачей которого является уменьшение рассогласования между собираемыми деталями, и соответственно сведение к минимуму контактных взаимодействий деталей для предотвращения заклиниваний в процессе сборки.

На основе анализа геометрии контактного взаимодействия (случай, при котором вектор силы реакции  $F$  ориентирован по нормали к поверхности базовой детали  $-N_z=F$ ) (рис. 4) были определены следующие соотношения:

$$-\frac{M_y}{M_x} = \frac{tg \alpha}{tg \gamma}; \quad -\frac{y}{x} = \frac{tg(\gamma)}{tg(\alpha)}$$

Таким образом, имеется возможность определить положение прямой  $OA$ , на которой находится точка контакта деталей. При известном параметре  $z$  и геометрических характеристиках  $r, L$  удастся распознать угловую ориентацию детали.

**Исследование чувствительности датчика сил и моментов к распознаванию положения точки контакта**

Требуется выявить чувствительность датчика сил и моментов к распознаванию углов  $\alpha$  и  $\gamma$ . Это позволит сформулировать требования к датчику сил и моментов роботизированной сборочной системы.

Выражения для оценки чувствительность датчика сил и моментов имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta M_x &= \frac{\partial M_x}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial M_x}{\partial \gamma} \Delta \gamma; \quad \Delta M_y = \frac{\partial M_y}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial M_y}{\partial \gamma} \Delta \gamma; \\ \Delta N_z &= \frac{\partial N_z}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial N_z}{\partial \gamma} \Delta \gamma; \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\frac{\partial M_x}{\partial \alpha}$ ,  $\frac{\partial M_x}{\partial \gamma}$ ,  $\frac{\partial M_y}{\partial \alpha}$ ,  $\frac{\partial M_y}{\partial \gamma}$  — коэффициенты чувстви-

тельности моментов  $M_x$ ,  $M_y$  к углам  $\alpha$  и  $\gamma$  соответственно  $\frac{\partial N_z}{\partial \alpha}$ ;  $\frac{\partial N_z}{\partial \gamma}$ , — коэффициенты чувствительно-

сти силы  $N_z$  к углам  $\alpha$  и  $\gamma$  соответственно;  $\Delta\gamma$ ,  $\Delta\alpha$  — приращения углов  $\alpha$  и  $\gamma$  соответственно;  $\Delta M_x$ ,  $\Delta M_y$ ,  $\Delta N_z$  — приращения моментов  $M_x$ ,  $M_y$  и силы  $N_z$  соответственно, измеряемых датчиком.

Определим коэффициенты чувствительности, используя уравнения системы (1). Примем допущения: углы  $\alpha$  и  $\gamma$  — малые (сборка деталей с малым зазором, следовательно, допустимы незначительные перекосы). При малых угловых рассогласованиях деталей соотношение между составляющими сил реакции следующие:  $F_x \ll F_z$ ,  $F_y \ll F_z$ . Для нахождения приближенных оценок коэффициентов чувствительности было сделано допущение  $N_z \approx F_z$ , а также за малые величины были приняты следующие составляющие силы:  $F_x$ ,  $F_y$ .

Анализ системы (1) позволил заключить, что при наилучших условиях контактного взаимодействия деталей, когда вектор силы реакции направлен перпендикулярно плоскости датчика сил и моментов, сигналы по составляющим  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $M_z$  будут практически нулевые, что не позволяет использовать их для задачи идентификации положения точки контакта деталей. Однако данная информация может быть принята во внимание для калибровки силомоментного датчика (при настройке осей чувствительности датчика  $X_{\text{ДАТ}}$ ,  $Y_{\text{ДАТ}}$ ,  $Z_{\text{ДАТ}}$  относительно системы координат  $Ox_p Y_p Z_p$  робота).

Было установлено, что в случае одноточечного контакта, вызванного перекосом собираемой детали, с поверхностью базовой детали наиболее (информативны) восприимчивы к изменениям идентифицируемых параметров контактного взаимодействия оказались следующие данные с датчика сил и моментов:  $M_x = f(\gamma)$ ,  $M_y = f(\alpha)$  и  $N_z \rightarrow f(F_z)$ . Приближенные зависимости для оценки чувствительности датчика сил и моментов имеют вид:

$$\Delta M_x \approx \frac{\partial M_x}{\partial \gamma} \Delta \gamma \approx F_z L \cdot \Delta \gamma; \Delta M_y \approx \frac{\partial M_y}{\partial \alpha} \Delta \alpha \approx -F_z L \cdot \Delta \alpha. (4)$$

Оценим возможность косвенного определения угловой ориентации детали с помощью датчика сил и моментов. В основу расчетов положены данные экспериментальных исследований [8, 9] показаний с датчика сил и моментов сборочного робота, полученных в процессе сопряжения прецизионных цилиндрических соединений. Исходные данные: цилиндрическое соединение с малым зазором  $\Delta=0,01$  мм; предельная величина составляющей главного вектора сил  $F_z=100$  Н; геометрический параметр, характеризующий расстояние от точки контакта деталей до оси чувствительности датчика  $L=0,05$  м. Перекос осей деталей может принимать значения менее угловой минуты.

На основании зависимостей (4) получены приближенные оценки изменений моментов от углов:

$$\Delta \alpha = 1^\circ \rightarrow \Delta M_y \approx 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}; \Delta \alpha = 1' \rightarrow \Delta M_y \approx 0,001 \text{ Н} \cdot \text{м}; \Delta \alpha = 1'' \rightarrow \Delta M_y \approx 0,00001 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для момента  $M_x$  и угла  $\gamma$  результаты аналогичны.

При исследовании чувствительности датчика сил и моментов применительно к распознаванию ориентации детали не учитывались шумы и уровень нулевого сигнала.

Ссылаясь на результаты экспериментальных исследований [8, 9] можно заключить, что минимальные значения измерений момента  $M_y$  соответствуют диапазону углов  $\Delta \alpha \approx 1^\circ$ . В малых диапазонах углов ( $\Delta \alpha \approx 1'$  и менее) применение датчика сил и моментов проблематично в связи с тем, что изменение моментов и соответственно сигналов с датчика будет иметь очень малую величину.

Для повышения чувствительности силомоментного датчика при идентификации углов ориентации  $\alpha$ ,  $\gamma$ , необходимо увеличить составляющую силы —  $F_z$  (вертикальное давление на деталь). Кроме того, возможно увеличить расстояние  $L$  (детали определенной геометрии).

Следует отметить, что увеличение силы вертикального прижатия деталей в случае двухточечного контактного взаимодействия может только усугубить заклинивание сборочных компонент либо привести к нежелательным деформациям деталей.

#### Заключение

В работе получены уравнения, связывающие параметры положения и ориентации соединяемой детали с информацией, выдаваемой датчиком сил и моментов сборочного робота. Данные зависимости могут быть положены в основу идентификатора контактных ситуаций системы адаптивного управления движением детали. Было выявлено, что при управлении движением детали в ограниченных углах порядка единиц мрад (сборка прецизионных соединений), идентификация ориентации детали по силовым факторам (или их изменениям, вызванным изменениями угловых координат) представляется проблематичной. Если датчик в силу инструментальных или иных погрешностей будет нечувствителен к изменениям углов наклона детали в малых диапазонах, это будет означать потерю наблюдаемости и, следовательно, управляемости системы [10]. Поэтому при реализации силовой обратной связи к датчику должны быть предъявлены серьезные требования по крутизне статической характеристики.

Дальнейшим направлением исследования является распознавание двухточечного и трехточечного контактного взаимодействия деталей при роботизированной сборке по информации, поступающей с датчика сил и моментов. Построение адаптивного алгоритма управления роботом с силомоментным очувствлением, распознающего контактные ситуации, позволит осуществить надежную сборку прецизионных соединений и предотвратить заклинивание деталей при сопряжении.

## Список литературы

1. Гориневский, Д.М. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях / Д.М. Гориневский, А.И. Формальский, А.Ю. Шнейдер; под ред. В.С. Гурфинкеля и Е.А. Девянина. — М.: Физматлит, 1994. — 368 с.
2. Письменный, Г.В. Системы силомоментного оучувствления роботов / Г.В. Письменный, В.И. Солнцев, С.А. Воротников. — М.: Машиностроение, 1990. — 96 с.
3. Управление робототехническими системами с силомоментным оучувствлением: учеб. пособие / И.Н. Егоров [и др.]; под ред. проф. И.Н. Егорова. — Владимир: Издво Владим. гос. ун-та. 2005. — 276 с.
4. Hsu F.Y., Fu L. C. Intelligent robot deburring using adaptive fuzzy hybrid position / force control // IEEE Trans. Robotics and Automation. 2000. — V. 16 (4). — P. 325-335.
5. Xiao D., Gliosli B.K., Xi N. et al. Sensor-based hybrid position /force control of a robot manipulator in an un-calibrated environment // IEEE Trans.Control Systems Technology. 2000. — Vol. 8 (4). — P. 635- 645.
6. Vartanov M.V., Arkhipov M.V., Petrov V.K., Mishchenko R.S. Active adaptation in robotic assembly // Russian engineering research. Allerton Press, Inc. (New York). 2017. V. 3. № 9. P. 814-816.
7. Stolt A., Linderth M., Robertson A., Johansson R. Adaptation of Force Control Parameters in Robotic Assembly // 10th IFAC Symposium on Robot Control, 2012, p. 561-566.
8. Вартанов, М.В. Экспериментальные исследования условий собираемости при активной роботизированной сборке [Текст] / М.В. Вартанов, М.В. Архипов, В.К. Петров, Р.С. Мищенко // Станки и Инструмент. — 2017. — №4. С. 14 -16.
9. Зыгмантович, М.А. Экспериментальная проверка контактных ситуаций в зоне сопряжения при роботизированной сборке прецизионных цилиндрических соединений [Текст] / М.А. Зыгмантович, Р.С. Мищенко, В.К. Петров, М.В. Вартанов // Тр. XXIX междунар. конф. МИКМУС-2017. 2017. С. 279-282.
10. Кузнецова, С.В. Управляемость и наблюдаемость системы автоматизированной сборки / С.В. Кузнецова // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2018. — №4.

*Кузнецова Светлана Владимировна — канд. техн. наук, доцент,  
Симаков Александр Леонидович — д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой “Приборостроение”,  
Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева”.*

*Контактный телефон 8-904-654-83-02.*

*E-mail: svkuznecova@gmail.com*

### Робот YuMi работает на производстве материала для кардиохирургии

С помощью робота YuMi компания Sintech автоматизировала процесс, протекающий в стерильных условиях, по сбору и тестированию stem — компонента центрифуги для сепарации крови, производимых компанией LivaNova.

В последние годы в отрасли здравоохранения происходят значительные изменения. С одной стороны, они обусловлены прорывными изобретениями в диагностике и лечении заболеваний, с другой — поисками ответов на вызовы, касающиеся старения населения, роста затрат и дефицита медперсонала во всем мире. Разработчики роботов активно участвуют в решении этих насущных вопросов, в том числе разрабатывая и внедряя робототехнические системы в медицинской отрасли, способствуя этим уменьшению доли ручного труда, выполняемого медицинским персоналом, повышению точности лабораторных работ и, в конечном счете, улучшению качества обслуживания и безопасности пациентов.

Компания LivaNova искала решение для автоматизации полуручного процесса работы с центрифугой для сепарации крови. Руководителям компании было необходимо не просто упростить процедуру, но и повысить уровень безопасности своих сотрудников.

С помощью коллаборативного робота YuMi компании ABB производство повысило уровень безопасности операторов и продуктивность их работы. Робот YuMi помог автоматизировать процесс без создания каких-либо защитных ограждений. Такое решение позволяет операторам работать рука об руку с роботом.

Робот выполняет сбор и тестирование компонентов центрифуги для сепарации клеток крови.

Заводы компании LivaNova находятся на всех континентах, включая производство в г. Мирандола в провинции Эмилия-Романья (Италия). Завод в Мирандоле — мировой лидер по производству оборудования для кардиохирургии, в основном оксигенаторов, фильтрующих элементов, теплообменных устройств и центрифуг для сепарации клеток крови. Компания LivaNova ежедневно отправляет свои продукты в больницы по всей Европе и миру. Около 2600 центрифуг доставляются каждый день для немедленного использования в операционных при проведении жизненно важных операций на сердце, в основном операций на открытом сердце с искусственным кровообращением: не допускается никаких отклонений в качестве оборудования.

Внедрение двурукого робота YuMi позволило повысить эффективность процесса, автоматизировав процесс и обезопасив операторов, которым больше не нужно дозировать растворители. Роботы ABB сертифицированы для работ в стерильных условиях, их очень легко запрограммировать благодаря удобному интерфейсу и простому выбору точек забора материалов в сравнении с обычными роботами.

В работе YuMi заказчик ценит возможность простого выбора и корректировки точек для забора и размещения материалов, а также малый вес и простоту управления, чего не могут обеспечить другие роботы. Наконец, с программой RobotStudio инженеры компании Sintech могут виртуально запрограммировать весь рабочий цикл процесса с участием робота, смоделировав все движения и проверив выполнимость и продолжительность цикла на каждом устройстве.

[Http://www.abb.ru](http://www.abb.ru)