

УДК 621.757

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ И НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ

М.В. Вартанов, С.Л. Петухов, Чунг Та Чан

*В статье рассматривается метод сборки с использованием эффекта вращательного движения устанавливаемой детали (вала) в сочетании с эффектом вибрации базовой детали (втулки). Основным этапом автоматической сборки является процесс сопряжения деталей. Реализация этапа зависит от многих факторов, влияющих на процесс. Для изучения влияния действующих факторов и проверки математической модели на адекватность был проведен физический эксперимент. Для его проведения была создана экспериментальная установка с использованием промышленного робота ABB IRB140, оснащенного силомоментным датчиком. По результатам проведения физических экспериментов построены зависимости, отражающие влияние варьируемых параметров на величины сборочных сил и моментов.*

**Ключевые слова:** роботизированная сборка, силомоментный датчик, эффект вращения, вибрационное устройство, экспериментальная установка.

### Введение

Сборочные задачи, решаемые с использованием промышленных роботов, постоянно усложняются. Сборка высокоточных соединений вызывает сложности даже при ручном исполнении. Основной проблемой является заклинивание. В случае, когда зазор сопоставим с погрешностью формы, сборка на основе жесткого базирования становится невозможной [1]. Особенно проблемной становится сборка при сопоставимости величины зазора в соединении и погрешности позиционирования робота.

Одним из путей повышения эффективности сборки, особенно при наличии малых зазоров в соединении, являются различные способы уменьшения величины силы трения в зоне сопряжения. Вращательное движение устанавливаемой детали может обеспечить достижение данного эффекта.

Эффективность вращательного движения при обеспечении условий собираемости в роботизированной сборке рассматривалась в работах Холодковой А.Г. [1], Кристаль М.Г. [2], Черняховской Л.Б. [3, 34], Левчука Д.М. [5], Бакхиса Б.П. [6, 7] и других авторов.

Применение вибраций является одним из наиболее перспективных направлений в области автоматической сборки. Это подтверждают результаты теоретических и экспериментальных работ [8–11].

Современный подход к теории эксперимента предполагает необходимость обеспечения требуемого качества исследования, для определения которого нужно создать модель эксперимента [12].

При решении многих инженерных задач возникает необходимость в установлении взаимосвязи между  $n$  независимыми неслучайными переменными  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и зависящей от них случайной величиной  $y$ .

Математическое ожидание  $M(y)$  является функцией  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Выражение  $M(y) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  называют уравнением регрессии математического ожидания случайной величины  $y$  по случайным величинам  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . При этом тип функции может быть линейным или нелинейным.

Регрессионная модель должна аппроксимировать совокупность экспериментальных данных. При обработке результатов много-

факторного эксперимента математическую модель процесса, а именно функцию  $M(y) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  обычно представляют в виде полинома определенной степени [13].

Эффективность моделирования технологических операций при роботизированной сборке и процесса в целом на основе использования статистических методов планирования эксперимента объясняется тем, что позволяет изучить влияние многих характеристик процесса.

Ранее авторами статьи была опубликована математическая модель процесса [14].

Целью данной работы является экспериментальное изучение эффекта вращения устанавливаемой детали и вибраций базовой детали для повышения технологической надежности процесса роботизированной сборки.

### Экспериментальные исследования

#### Определение факторов

Многофакторный эксперимент процесса строился следующим образом: по достижении требуемого режима колебаний осуществлялась подача вала в зону сборки в вертикальном направлении с контактом торцов собираемых деталей. Под воздействием колебательных движений виброопоры вал совмещался со втулкой и происходил процесс сборки. Момент касания торцов собираемых деталей принимался за начало отсчета. Завершение сборки фиксировалось при введении вала на глубину 50 мм. Возникающие величины сил трения принимались в качестве выходного оптимизируемого параметра (отклика) системы при исследовании процесса.

В качестве входных параметров (факторов) при исследовании системы были приняты: круговая частота колебаний виброопоры (рад/с); линейная амплитуда колебаний выходного звена виброопоры (мм); линейная скорость выходного звена робота (мм/с); угловая скорость опоры (рад/с) и зазор в соединении (мм) (табл. 1). Все они отвечают требованиям управляемости и однозначности, предъявляемым используемым методом к входным факторам при планировании эксперимента, а также требованиям совместимости факторов и отсутствия линейной корреляции, предъявляемым к совокупности факторов.

#### Выбор вида модели

Математическое описание компонентов силы трения можно получить, используя стати-

стические методы планирования эксперимента [15].

Величины компонентов силы в зоне контакта измеряются силомоментным датчиком и зависят от входных параметров процесса. Под математической моделью объекта исследования понимаем вид функции отклика, связывающей параметр оптимизации с факторами процесса. Эту функцию в общем виде можно записать так:

$$F = f(X_i), i = 1, \dots, 5. \quad (1)$$

Выбрать модель – значит выбрать вид этой функции, записать ее уравнение. Предположим, что зависимости можно с достаточной точностью аппроксимировать уравнениями сте-

Таблица 1

Входные параметры процесса сборки

Фактор	Обозначение
Круговая частота колебаний виброопоры, рад/с	$X_1$
Линейная амплитуда колебаний выходного звена виброопоры, мм	$X_2$
Линейная скорость выходного звена робота, мм/с	$X_3$
Скорость вращения виброопоры, рад/с	$X_4$
Зазор в соединении, мм	$X_5$

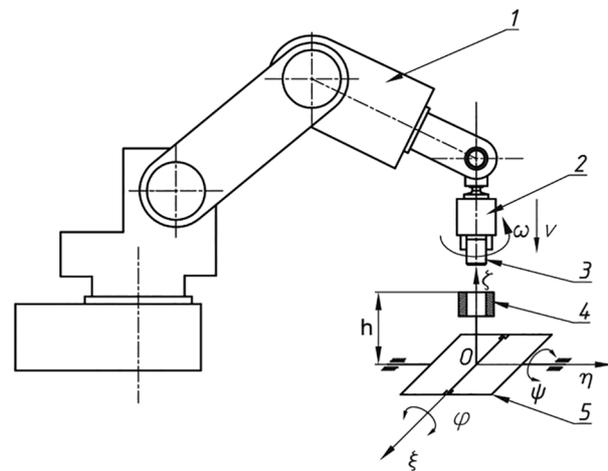


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования роботизированной сборки при наличии вибраций и вращения:

- 1 – промышленный робот ABB IRB 140; 2 – схват с силомоментным датчиком Schunk IT AXIA; 3, 4 – экспериментальные образцы; 5 – виброопора

пенного вида. Так, например, взаимосвязь (1) можно выразить уравнением:

$$F = cX_1^\alpha X_2^\beta X_3^\gamma X_4^\theta X_5^\mu, \quad (2)$$

где  $X_i$  – варьируемые параметры процесса  $i = 1, \dots, 5$ ;  $c, \alpha, \beta, \gamma, \theta, \mu$  – постоянные величины.

После логарифмирования уравнение (2) линеаризуется и принимает вид:

$$\ln(F) = \ln c + \alpha \ln X_1 + \beta \ln X_2 + \gamma \ln X_3 + \theta \ln X_4 + \mu \ln X_5. \quad (3)$$

Возможность аппроксимации зависимостей (2) уравнениями вида (3) устанавливается проверкой гипотезы адекватности линейной модели при выражении результатов эксперимента полиномом. Уравнение регрессии без учета квадратичных эффектов будет иметь вид:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 5} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 5} b_{ij} x_i x_j, \quad (4)$$

где  $y = \ln F_y, \ln F_z, \ln T_x$  или  $\ln T_z$ ,  $x_i$  кодированные значения  $X_i$ .

Кодированное значение фактора:

$$x_i = \frac{2(\ln X_i - \ln X_{i\max})}{\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}} + 1, \quad (i = 1, \dots, 5), \quad (5)$$

где  $X_i$  – натуральное значение;  $X_{i\max}$  и  $X_{i\min}$  – натуральные значения верхнего и нижнего уровней  $i$ -го фактора соответственно.

*Планирование многофакторного эксперимента при поиске оптимальных технологических режимов и конструктивных параметров оборудования*

При проведении эксперимента принимается допущение, проверяемое по результатам опытов, что на рассматриваемом малом интервале функция отклика может быть описана полиномом

первой степени. В связи с линейностью модели факторы варьируются на двух уровнях (табл. 2).

При проведении полнофакторного эксперимента с варьированием факторов на двух уровнях одна его реплика предполагала бы выполнение  $2^5 = 32$  опытов, что при условии выполнения хотя бы трех реплик сделало бы эксперимент достаточно громоздким. Поэтому был выбран дробно-факторный план эксперимента  $N = 2^{5-1}$ , который сокращает число опытов одной реплики до 16 за счет системы смешивания линейных эффектов фактора  $x_3$  с наименее значимыми эффектами взаимодействия, но при этом увеличено число реплик до трех. Все опыты, согласно принципу рандомизации, осуществлялись в случайном порядке. Реализовано по три реплики для всех выбранных условий (табл. 3).

*Описание экспериментальной установки*

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 2. Между схватом 3 и торцом выходного звена промышленного робота установлен силомоментный датчик 2 (*Schunk IT AXIA*). На специальной стойке установлена виброопора 7, которая в центре вибрационного диска имеет жестко закрепленную базовую втулку 6.

Методика проведения эксперимента такова. Устанавливаемый вал 5 удерживается схватом робота. Втулка 6 установлена в центре диска виброопоры. Вибрации опоры обеспечиваются генератором низкочастотных колебаний 11. Частота колебаний контролируется электронным частотомером 10, а фактическая амплитуда колебаний виброопоры отслеживается бесконтактными лазерными датчиками 4. Все сигналы собираются и обрабатываются компьютером. Таким образом, в процессе экспериментов обеспечивается непрерывный контроль текущих значений технологических параметров.

Таблица 2

Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Уровни			Интервал варьирования	Размерность
	-1	0	+1		
$X_1$	14	16	18	2	рад/с
$X_2$	1,8	2,0	2,2	0,2	мм
$X_3$	10	20	30	10	мм/с
$X_4$	0	0,25	0,5	0,25	рад/с
$X_5$	0,01	0,03	0,05	0,02	мм

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента

№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_1x_5$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_2x_5$	$x_3x_4$	$x_3x_5$	$x_4x_5$
1	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-
3	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-
4	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+
5	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-
6	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+
7	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+
8	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-
9	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+
10	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-
11	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-
12	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+
13	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-
14	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+
15	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
16	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-

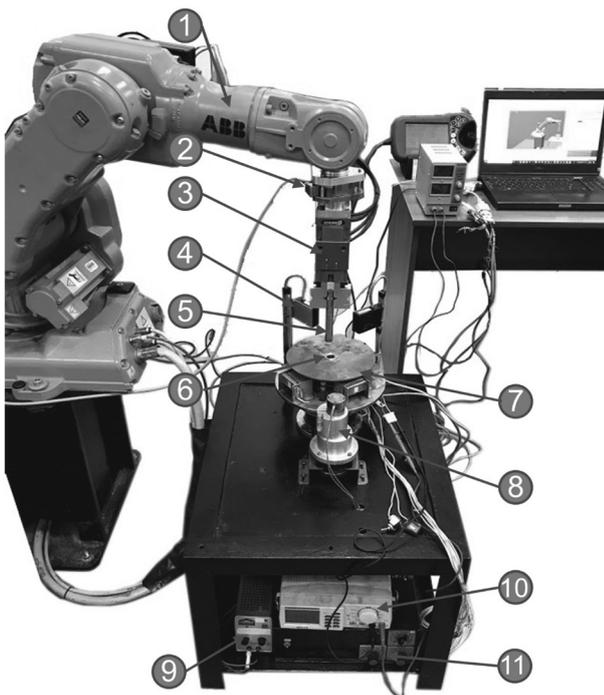


Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки при наличии вибраций и вращения:

- 1 – промышленный робот ABB IRB 140;
- 2 – силомоментный датчик; 3 – схват; 4 – лазерные датчики; 5 – экспериментальный образец (вал);
- 6 – экспериментальный образец (втулка);
- 7 – виброопора; 8 – электродвигатель постоянного тока; 9 – управляемый преобразователь;
- 10 – электронный частотомер; 11 – генератор низкочастотных колебаний

### Анализ результатов

Отсевание грубых наблюдений в параллельных опытах

Для каждой строки матрицы планирования по результатам  $n$ -параллельных опытов находят среднее арифметическое значение параметра оптимизации:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju}, \quad (6)$$

где  $u$  – номер параллельного опыта;  $y_{ju}$  – значение параметра оптимизации в  $u$ -м параллельном опыте  $j$ -й строки матрицы.

С целью оценки отклонений параметра оптимизации от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования вычисляют дисперсию опыта по данным  $n$ -параллельных опытов (табл. 4). Статистической дисперсией называют среднее значение квадрата отклонений случайной величины от ее среднего значения:

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2. \quad (7)$$

### Проверка однородности дисперсий

Проверка однородности двух дисперсий производится с помощью  $F$ -критерия Фишера, который представляет собой отношение большей дисперсии к меньшей:

$$F_p = \frac{s_1^2}{s_2^2}, \quad (8)$$

Таблица 4

Результаты опытов и дисперсии сил  $F_y, F_z$  и моменты  $T_x, T_z$

№	$F_y$		$F_z$		$T_x$		$T_z$	
	$\bar{y}$	$S_{\{y\}}^2$	$\bar{y}$	$S_{\{y\}}^2$	$\bar{y}$	$S_{\{y\}}^2$	$\bar{y}$	$S_{\{y\}}^2$
1	2,442	0,015	1,260	0,007	-1,715	0,00759	4,262	0,002
2	2,297	0,016	1,196	0,009	-1,556	0,00983	4,252	0,002
3	2,722	0,006	1,496	0,004	-1,368	0,00656	4,330	0,006
4	2,735	0,037	1,524	0,004	-1,135	0,00272	4,380	0,001
5	2,400	0,062	1,291	0,002	-1,504	0,01142	4,176	0,004
6	2,373	0,012	1,236	0,012	-1,736	0,00990	4,459	0,005
7	2,745	0,020	1,542	0,019	-1,363	0,01318	4,557	0,003
8	2,913	0,017	1,578	0,017	-1,241	0,00276	4,415	0,003
9	3,341	0,012	1,858	0,002	-0,742	0,00113	3,942	0,004
10	3,075	0,029	1,814	0,001	-0,613	0,01398	4,306	0,002
11	3,204	0,002	1,873	0,003	-0,597	0,00232	4,368	0,001
12	3,557	0,012	1,919	0,002	-0,589	0,00109	4,180	0,001
13	3,321	0,017	1,930	0,001	-0,892	0,00393	4,169	0,006
14	3,240	0,006	1,854	0,004	-0,771	0,00157	4,214	0,003
15	3,684	0,008	2,050	0,009	-0,688	0,00201	4,297	0,011
16	3,543	0,004	2,067	0,009	-0,621	0,00306	4,448	0,001

где  $s_1^2$  и  $s_2^2$  – соответственно максимальное и минимальное значение дисперсии параметра оптимизации в различных опытах.

Если наблюдаемое значение  $F_p < F_T$  ( $F_T$  – табличное значение критерия для соответствующих чисел степеней свободы  $f_1 = n_{\max} - 1 = 2$ ,  $f_2 = n_{\min} - 1 = 2$  и принятого уровня значимости 0,05 [15]), то дисперсии однородны (табл. 5).

При равномерном дублировании опытов однородность ряда дисперсий проверяют с помощью критерия Кохрена, представляющего собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{s_{\max}^2}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_N^2} = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N s_j^2}. \quad (9)$$

Дисперсии однородны, если  $G > G_T$  ( $G_T$  – табличное значение критерия для данных условий: показывает число сравниваемых дисперсий  $N = 16$ , а  $n$  – число параллельных опытов [15]). Если  $G > G_T$  то дисперсии неоднородны,

а это указывает на то, что исследуемая величина  $y$  не подчиняется нормальному закону (табл. 6).

Определение коэффициентов регрессии

По результатам эксперимента вычисляют коэффициенты модели. Коэффициенты регрессии определяют по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j; \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j; \quad b_{il} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} \bar{y}_j, \quad (10)$$

где  $i, l$  – номера факторов;  $x_{ij}, x_{lj}$  – кодированные значения факторов  $i$  и  $l$  в  $j$ -м опыте.

Формулы получены в результате использования метода наименьших квадратов. Проверка значимости каждого коэффициента уравнения регрессии осуществляется по  $t$ -критерию Стьюдента путем сравнения полученных значений с табличными для соответствующих степеней свободы и уровня значимости:

$$t_j = \frac{|b_j|}{s_{(b)}}. \quad (11)$$

Таблица 5

Проверка однородности дисперсий по  $F$ -критерию Фишера

$F_p < F_T = 19,2$							
$F_y$		$F_z$		$T_x$		$T_z$	
14,62876	Да	13,23305	Да	18,30958	Да	12,82161	Да

Таблица 6

**Проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена**

$G < G_T = 0,3346$							
$F_y$		$F_z$		$T_x$		$T_z$	
0,222947	Да	0,211286	Да	0,182417	Да	0,150301	Да

Здесь дисперсия коэффициентов регрессии равна:

$$s_{\{b\}}^2 = \frac{s_y^2}{N \cdot n}. \quad (12)$$

Если дисперсии  $s_j^2$  опытов однородны, то дисперсию  $s_y^2$  воспроизводимости эксперимента вычисляют по выражению

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2. \quad (13)$$

Откуда  $s_{\{b\}} = \left| \sqrt{s_{\{b\}}^2} \right|$ .

Коэффициент значим, если  $t_j > t_j^{\text{крит}}$ ,  $t_j^{\text{крит}}$  – табличное значение критерия при принятом уровне значимости (5 %) и числе степеней свободы равно 32. При равномерном дублировании опытов число степеней свободы находится из соотношения  $f = (n - 1)N$ , где  $N$  – число опытов в матрице планирования, а  $n$  – число па-

раллельных опытов;  $t_j^{\text{крит}} = 2,04$  [15]. Критерий Стьюдента вычисляют для каждого коэффициента регрессии. Статистически незначимые коэффициенты могут быть исключены из уравнения регрессии (4). Результаты проверки сведены в табл. 7.

Уравнения регрессии для рассматриваемых функций отклика  $y_{F_y}$ ,  $y_{F_z}$ ,  $y_{T_x}$ ,  $y_{T_z}$  могут быть записаны на основе данных, приведенных в табл. 7.

*Проверка адекватности модели*

После расчета коэффициентов модели и проверки их значимости определяют дисперсию адекватности. Остаточная дисперсия или дисперсия адекватности характеризует рассеяние эмпирических значений  $y$  относительно расчетных  $y$ , определенных по найденному уравнению регрессии. Дисперсию адекватности определяют по формуле:

Таблица 7

**Значимость каждого коэффициента уравнения регрессии**

$b_i$	$F_y$	$F_z$	$T_x$	$T_z$
$b_0$	2,975	4,297	1,655	-1,071
$b_1$	0	0,035	0	0,038
$b_2$	0,163	0,075	0,101	0,12
$b_3$	0,053	0,045	0,038	-0,031
$b_4$	0,396	-0,057	0,265	0,382
$b_5$	0,045	-0,071	0	0
$b_{12}$	0,057	-0,051	0	0
$b_{13}$	0	0	0	-0,028
$b_{14}$	0	0	0	0
$b_{15}$	0	0	0	0
$b_{23}$	0	0	0	0
$b_{24}$	0	0	-0,044	-0,055
$b_{25}$	0	0	0	-0,034
$b_{34}$	0	0	0	0
$b_{35}$	0	0	0	0,038
$b_{45}$	0,04	0	0	0

$$s_{ад}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{f} = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)}, \quad (14)$$

где  $\bar{y}_j$  – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в  $j$ -м опыте;  $\hat{y}_j$  – значение параметра оптимизации, вычисленное по модели для условий  $j$ -го опыта;  $f$  – число степеней свободы;  $k$  – число факторов.

Последним этапом обработки результатов эксперимента является проверка гипотезы адекватности найденной модели. Проверку гипотезы проводят по критерию Фишера:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2}. \quad (15)$$

Если значение  $F < F_T = 2,1$  для принятого уровня значимости 0,05 и соответствующих чисел степеней свободы ( $F_T$  – табличное значение критерия Фишера для данных условий:  $f_1 = N - (k + 1) = 16 - (5 + 1) = 10$ ,  $f_2 = N(n - 1) = 32$  [15]), то модель считают адекватной. При  $F < F_T$  гипотеза адекватности отвергается (табл. 8).

На основании данных табл. 8, можно сделать вывод о том, что полученная модель удовлетворяет условию адекватности.

Для перехода от кодированных значений факторов к натуральным в уравнение регрессии подставляем значения факторов  $x_i$  по выражениям (5) и после преобразований получаем:

$$\ln F_y = 11,111 - 3,111 \ln X_1 - 10,875 \ln X_2 + 0,096 \ln X_3 + 0,188 \ln X_4 + 0,117 \ln X_5 + 4,521 \ln X_1 \ln X_2 + 0,016 \ln X_4 \ln X_5; \quad (16)$$

$$\ln F_z = -5,322 + 3,062 \ln X_1 + 11,931 \ln X_2 + 0,082 \ln X_3 - 0,018 \ln X_4 - 0,088 \ln X_5 - 4,045 \ln X_1 \ln X_2; \quad (17)$$

$$\ln T_x = 1,458 + 0,470 \ln X_2 + 0,069 \ln X_3 + 0,182 \ln X_4 - 0,141 \ln X_2 \ln X_4; \quad (18)$$

$$\ln T_z = -4,670 + 1,459 \ln X_1 - 1,075 \ln X_2 + 1,392 \ln X_3 + 0,244 \ln X_4 - 0,406 \ln X_1 \ln X_3 - 0,176 \ln X_2 \ln X_4 - 0,421 \ln X_2 \ln X_5 + 0,045 \ln X_5 + 0,086 \ln X_3 \ln X_5. \quad (19)$$

Потенцируя выражения (16)–(19), находим зависимость сил и моментов от исследуемых факторов процесса роботизированной сборки:

$$F_y = \frac{66893,374 X_3^{0,096} X_4^{(0,188+0,016 \ln X_5)} X_5^{0,117} X_1^{4,521 \ln X_2}}{X_1^{3,111} X_2^{10,875}}; \quad (20)$$

$$F_z = \frac{0,005 X_1^{(3,062-4,045 \ln X_2)} X_2^{11,931} X_3^{0,082}}{X_4^{0,018} X_5^{0,088}}; \quad (21)$$

$$T_x = 4,298 X_2^{(0,470-0,141 \ln X_4)} X_3^{0,069} X_4^{0,182}; \quad (22)$$

$$T_z = 0,009 X_1^{(1,459-0,406 \ln X_3)} X_2^{(-1,075-0,176 \ln X_4-0,421 \ln X_5)} \times X_3^{(1,392+0,086 \ln X_5)} X_4^{0,244} X_5^{0,045}. \quad (23)$$

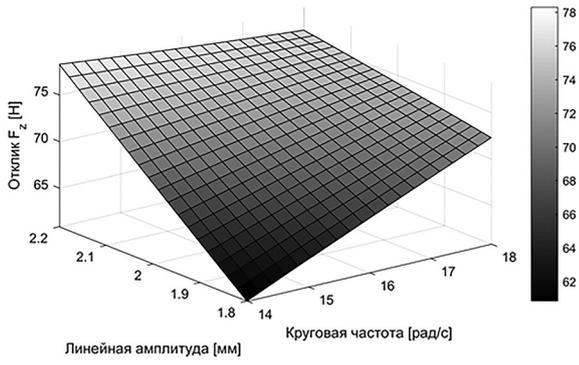
Выражения (20)–(21) позволяют определять компоненты силы, действующие на устанавливаемую деталь в процессе сборки. По уравнениям (20)–(23) могут быть построены номограммы, которые позволят в практических целях определять компоненты силы, действующие на устанавливаемую деталь при выборе параметров процесса роботизированной сборки.

Подходящий отклик для вышеприведенной регрессионной модели  $F_z$  (19) был определен, и были построены номограммы (рис. 3) парными комбинациями этих факторов, в то время как остальные факторы находятся на нулевом уровне.

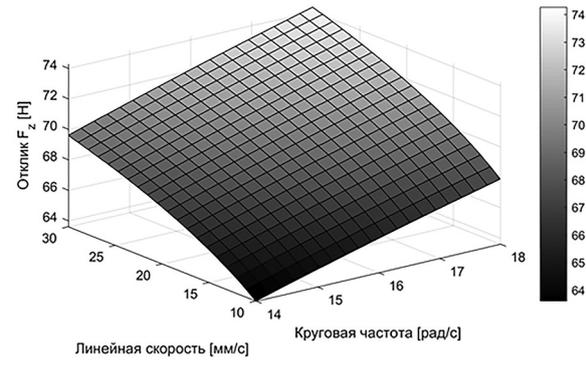
Таблица 8

Результат проверки адекватности модели

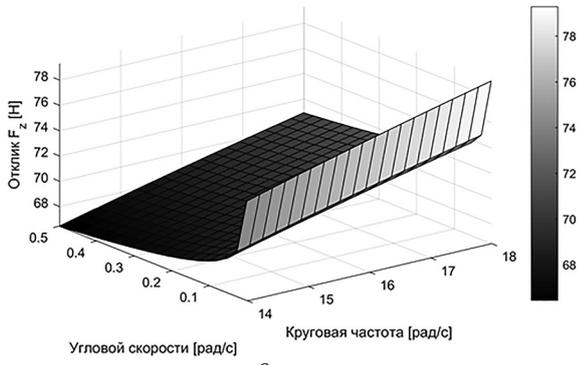
	$F_y$	$F_z$	$T_x$	$T_z$
$s_{ад}^2$	0,021959	0,003026	0,005974	0,008727
$s_y^2$	0,017306	0,003367	0,00647	0,005815
$F$	1,269	0,899	0,923	1,501
$F < F_T$	Да	Да	Да	Да



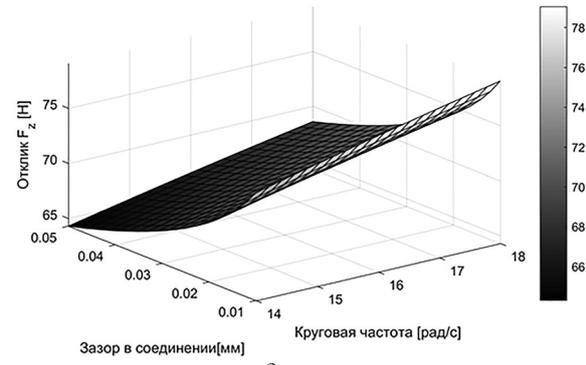
а



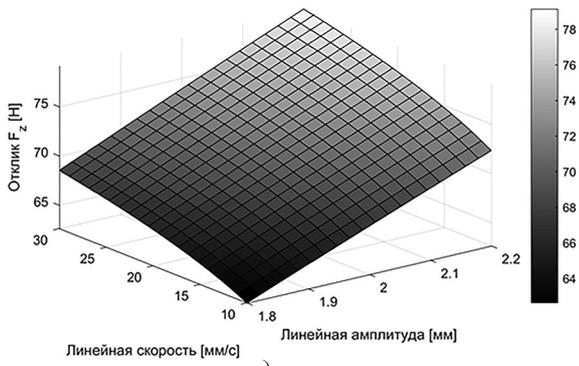
б



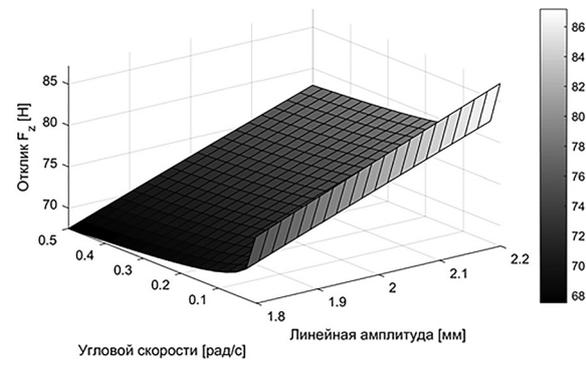
в



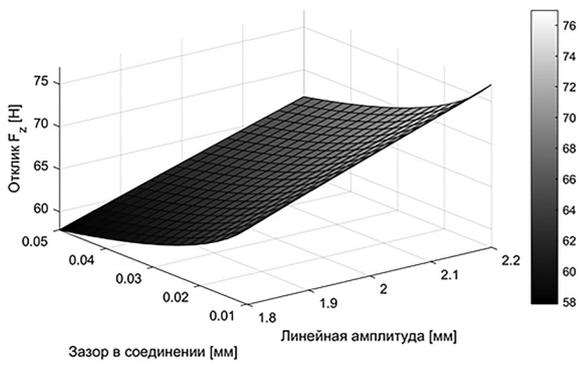
г



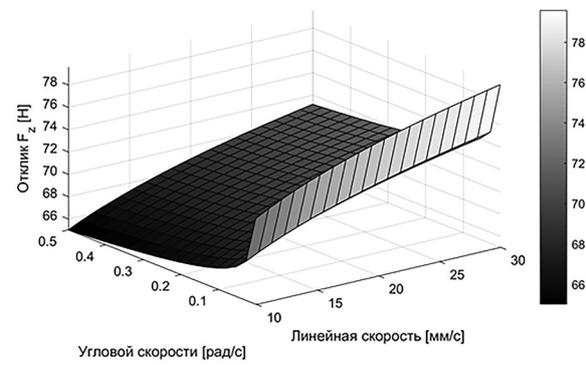
д



е



ж



з

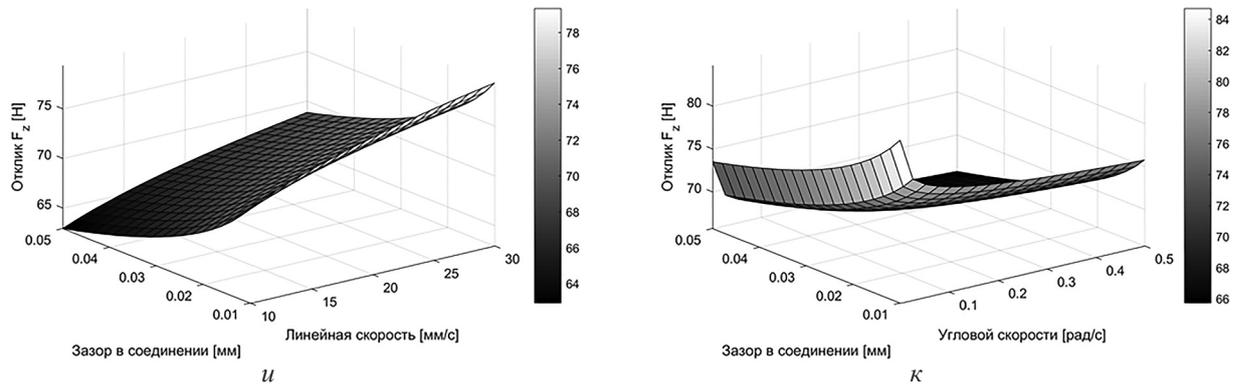


Рис. 3. Трехмерные графики поверхности отклика, показывающие поведение силы в зависимости от параметров процесса сборки:

- а) от частоты и амплитуды; б) от частоты и линейной скорости; в) от частоты и угловой скорости; г) от частоты и зазор в соединении; д) от амплитуды и линейной скорости; е) от амплитуды и угловой скорости; ж) от амплитуды и зазор в соединении; з) от линейной скорости и угловой скорости; и) от линейной скорости и зазор в соединении; к) от угловой скорости и зазор в соединении

### Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить влияние варьируемых параметров на составляющие сборочной силы и момента. Определены экспериментальные зависимости, устанавливающие связь компонентов силы и моментов трения с возмущающими факторами. Доказана адекватность экспериментальной модели. Выявлены эффекты взаимодействия двух факторов. Влияние увеличения скорости сборки на составляющие сборочной силы и момента носит отрицательный характер, что коррелируется с теорией трения. Вместе с тем наибольший эффект снижения сборочной силы достигнут в областях, соответствующих нижним границам интервалов варьирования параметров. В различных экспериментах снижение сборочной силы составило от 14 до 33 %. Наибольшее снижение сборочной силы соответствует большим значениям зазора в соединении, однако его увеличение не имеет технологического смысла.

Проведенные эксперименты доказали наличие эффекта вращения и вибраций на повышение технологической надежности сборочного процесса. Дальнейшие исследования будут связаны с изменением нулевого уровня варьирования входных параметров.

### Список литературы

1. Холодкова А.Г. Особенности автоматического выполнения цилиндрических соединений с малым зазором // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 4. С. 14–18.
2. Кристаль М.Г. Производительность и надежность сборочных автоматов: монография. Волгоград: ВолГТУ, 2011. – 160 с.

3. Черняховская Л.Б. Влияние вращательного движения вала на процесс автоматической сборки цилиндрических деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 6. С. 7–13.
4. Черняховская Л.Б. Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей: монография. Самара: СамГТУ, 2011. – 76 с.
5. Левчук Д.М. Исследование и разработка методов относительного ориентирования сборочных единиц соединения во вращающемся потоке газов при автоматической сборке: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.08. Москва: МАМИ, 1974. – 143 с.
6. Bakšys B., Baskutienė J., Chadarovičius A. Simulation of vibratory alignment of the parts to be assembled under passive compliance // Mechanika. 2013. Vol. 19 (1). P. 33–39.
7. Baksys B., Baskutiene J. The directional motion of the compliant body under vibratory excitation // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2012. Vol. 47. No. 3. P. 129–136.
8. Божкова Л.В., Вартанов М.В., Кольчугин Е.И. Вопросы вибрационной технологии // Межвузовский сборник научных статей «Вопросы вибрационной технологии», 2006, Ростов-на-Дону. С. 62–67.
9. Иванов А.А. Вибрационные сборочные системы // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 5. С. 7–10.
10. Кристаль М.Г., Чувилин И.А. Исследование динамики вибрационного сопряжения с нижней опорой торца охватываемой детали // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 4. С. 13–17.

11. Шуваев В.Г., Паншев В.А. Устройство пространственного ориентирования деталей при автоматической сборке путем формирования сложного колебательного движения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 2. С. 23–25.
12. Khuri A.I., Mukhopadhyay S. Response surface methodology // Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat. 2010. Vol. 2. No. 2. P. 128–149.
13. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry / M.A. Bezerra, R.E. Santelli, E.P. Oliveira, L.S. Villar, L.A. Escalera // Talanta. 2008. Vol. 76. No. 5. P. 965–977.
14. Tran T.T., Vartanov M.V., Arkhipov M.V. Application of the Part Rotation Effect for Reliability of the Robotic Assembly Process // 2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), Dong Hoi, Vietnam, 2019. P. 25–30, doi: 10.1109/ICSSE.2019.8823286.
15. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. Ленинград: Судостроение, 1980. – 384 с.
16. Божкова Л.В., Вартанов М.В., Кольчугин Е.И. Экспериментальная установка для роботизированной сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 1. С. 5–7.

**ВАРТАНОВ  
Михаил Владимирович**

Московский политехнический университет  
E-mail: [m.v.vartanov@mospolytech.ru](mailto:m.v.vartanov@mospolytech.ru)  
Тел.: (495) 276-37-32

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения». Сфера научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов автоматической сборки и отделочной обработки. Автор 170 научных публикаций.

**ПЕТУХОВ  
Сергей Леонидович**

Московский политехнический университет  
E-mail: [p\\_sl@bk.ru](mailto:p_sl@bk.ru)  
Тел.: (495) 276-37-32

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии и оборудование машиностроения». Сфера научных интересов: математическое моделирование в технологии машиностроения. Автор 35 научных публикаций.

**ЧУНГ Та Чан**

Московский политехнический университет  
E-mail: [trungta82@gmail.com](mailto:trungta82@gmail.com)  
Тел.: (905) 531-29-68

Аспирант кафедры «Технологии и оборудование машиностроения». Сфера научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов автоматической сборки. Автор 5 научных публикаций.

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE ROBOTIC ASSEMBLY PROCESS OF CYLINDRICAL JOINTS BASED ON THE ROTATIONAL MOVEMENT AND LOW FREQUENCY VIBRATION

Mikhail V. Vartanov, Sergei L. Petukhov, Trung Ta Tran

*The article deals with the assembly method that uses the rotational movement effect of the installed part (shaft) in combination with the effect of the vibration of the base part (bushing). The main stage of automated assembly is the process of mating parts. At this stage, there are problems related to the probability of jamming parts. The process of mating parts depends on a many factors effecting on the methods applied to operate the assembly. A parameter design experiment was carried out for studying the acting factors and testing the mathematical model for adequacy. Experimental equipment used for the experiment included the ABB IRB140 industrial robot equipped with a force-torque sensor. According to experimental results there were built dependences that show influence of variable parameters on assembly forces and momenta.*

**Keywords:** robotic assembly, a force/torque sensor, the effect of rotation, vibrating device, an experimental installation.

### References

1. Kholodkova A.G. Osobennosti avtomaticheskogo vypolnenia tsylindricheskikh coedinenii s malym zazorom [Features of automatic execution of cylindrical joints with a small gap] // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii [Assembly in Mechanical Engineering, Professional Equipment]. 2004. No. 4. P. 14–18.
2. Kristal M.G. Proizvoditelnost i nadezhnost sborochnykh avtomatov: monografiya [Performance and Reliability of Assembly Machines: a monograph]. Volgograd: VolSTU, 2011. – 160 p.

3. *Chernyakhovskaya L.B.* Vliianie vraschatelnogo dvizheniia vala na protsess avtomaticheskoi sborki tsylindricheskikh detalei [Influence of the shaft rotational movement on the automatic assembly process of cylindrical parts] // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in Mechanical Engineering, Professional Equipment]. 2016. No. 6. P. 7–13.
4. *Chernyakhovskaya L.B.* Kinematicheskii i dinamicheskii analizy avtomaticheskoi sborki tsylindricheskikh detalei: monografia [Kinematic and Dynamic Analyzes of Automatic Assembly of Cylindrical Parts: monograph]. Samara: Samara State Technical University, 2011. – 76 p.
5. *Levchuk D.M.* Issledovanie i razrabotka metodov odnositel'nogo orientirovaniia sborochnykh edinits soedineniia vo vraschaiuschemsiai potoke gazov pri avtomaticheskoi sborke: diss. ... kand. tekhn. nauk [Study and development of methods of relative orientation of assembly units of a connection in a rotating gas flow during automatic assembly]: dissertation of the candidate of technical sciences: 05.02.08. Moscow: MAMI, 1974. – 143 p.
6. *Bakšys B., Baskutienė J., Chadarovičius A.* Simulation of vibratory alignment of the parts to be assembled under passive compliance // *Mechanika*. 2013. Vol. 19 (1). P. 33–39.
7. *Bakšys B., Baskutiene J.* The directional motion of the compliant body under vibratory excitation // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2012. Vol. 47. No. 3. P. 129–136.
8. *Bozhkova L.V., Vartanov M.V., Kolchugin E.I.* Voprosy vibratsyonnoi tekhnologii [Vibration technology issues] // *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh statei "Voprosy vibratsyonnoi tekhnologii"* [Interuniversity proc. of papers titled "Issues of Vibration Technology", Rostov-on-Don, 2006. P. 62–67.
9. *Ivanov A.A.* Vibratsionnye sborochnye sistemy [Vibration assembly systems] // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in Mechanical Engineering, Professional Equipment]. 2013. No. 5. P. 7–10.
10. *Kristal M.G., Chuvilin I.A.* Issledovanie dinamiki vibratsyonnogo sopriazheniia s nizhnei oporoi tortsa okhvatyvaemoi detali [Dynamics studying of vibration mating the enclosed detail with a ground butt support] // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in Mechanical Engineering, Professional Equipment]. 2008. No. 4. P. 13–17.
11. *Shuvaev V.G., Papshev V.A.* Ustroistvo prostranstvennogo orientirovaniia detalei pri avtomaticheskoi sborke putem formirovaniia slozhnogo kolebatelnogo dvizheniia [Spatial orientation unit of details at automation assembly via forming a complex oscillation motion] // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in Mechanical Engineering, Professional Equipment]. 2009. No. 2. P. 23–25.
12. *Khuri A.I., Mukhopadhyay S.* Response surface methodology // *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* 2010. Vol. 2. No. 2. P. 128–149.
13. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry / *M.A. Bezerra, R.E. Santelli, E.P. Oliveira, L.S. Villar, L.A. Escalera* // *Talanta*. 2008. Vol. 76. No. 5. P. 965–977.
14. *Tran T.T., Vartanov M.V., Arkhipov M.V.* Application of the Part Rotation Effect for Reliability of the Robotic Assembly Process // 2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), Dong Hoi, Vietnam, 2019. P. 25–30, doi: 10.1109/ICSSE.2019.8823286.
15. *Montgomery D.C.* Planirovanie Eksperimenta i Analiz Danykh [Design and Analysis Experiment. Leningrad: Sudostroenie, 1980. – 384 p.
16. *Bozhkova L.V., Vartanov M.V., Kolchugin E.I.* Eksperimentalnaia ustanovka dlia robotizirovannoi sborki [Experimental unit for robotic assembly] // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in Mechanical Engineering, Professional Equipment]. 2009. No. 1. C. 5–7.

**Mikhail V. VARTANOV**

Moscow Polytechnic University  
E-mail: [m.v.vartanov@mospolytech.ru](mailto:m.v.vartanov@mospolytech.ru)  
Phone: 7 (495) 276-37-32

Professor, Doctor of Technical Science (habil.), Professor of Technology and Mechanical Engineering Equipment Department. Areas of expertise: theoretic and experimental research of the automatic assembly and finish processes. He authored a total 170 publications.

**Sergei L. PETUKHOV**

Moscow Polytechnic University  
E-mail: [p\\_sl@bk.ru](mailto:p_sl@bk.ru)  
Phone: 7 (495) 276-37-32

Associate Professor, Ph.D. in Technical Science, Associate Professor of Technology and Mechanical Engineering Equipment Department. Areas of expertise: mathematic modelling in Mechanical Engineering Technology. He authored a total 35 publications.

**TRUNG Ta Tran**

Moscow Polytechnic University  
E-mail: [trungta82@gmail.com](mailto:trungta82@gmail.com)  
Phone: 7 (495) 276-37-32

Postgraduate student of Technology and Mechanical Engineering Equipment Department. Areas of expertise: theoretic and experimental research of the automatic assembly processes. He authored 5 publications.