

УДК 621



Д.С. Жуков
Вологодский государственный университет

РАЗРАБОТКА РОБОТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Целью данной статьи является разработка при поддержке гранта «УМНИК» на базе ЦМИТ роботизированного измерительного комплекса для автоматизации контрольно-измерительных операций. В статье рассматриваются решения автоматизации, использующие промышленных роботов для контрольных операций. По аналитическому обзору и по доступному оборудованию был разработан роботизированный комплекс для контроля линейных размеров. Определена систематическая погрешность комплекса. Проведен анализ измерительной системы повторяемости, воспроизводимости и универсальности.

Промышленный робот, роботизированный измерительный комплекс, машиностроение, автоматизация, измерение, цифровой индикатор.

Традиционно контроль размеров изделий, обработанных на станках, выполняется сотрудниками предприятий вручную, с внесением результатов в контрольный лист. Ручное измерение характеризуется низкой производительностью и ошибками.

Получение данных измерений в цифровом виде позволяет манипулировать ими и отображать в разных формах представления для принятия решения о технологическом процессе.

На сегодняшний день промышленные роботы имеют достаточную повторяемость при перемещении в одну и ту же заданную позицию. Это открывает новые возможности для применения в ответственных задачах. Одна из таких задач – выполнение контрольно-измерительных операций изделий, изготавливаемых на обрабатывающих центрах.

По сравнению с координатно-измерительными машинами промышленные роботы имеют большую зону досягаемости, интеграцию со станочным оборудованием, могут использовать разные средства измерения в зависимости от его назначения.

Существующие решения, в которых используется промышленный робот для автоматизации контроля линейных размеров, различаются в зависимости от измерительного прибора, установленного на эффекторе робота. Можно выделить две группы методов: бесконтактные и контактные.

К бесконтактным методам относятся решения, в большинстве использующие оптическое оборудование (3D-сканер, камеры), также имеются разработки на основе ультразвуковых датчиков.

Применение 3D-сканеров – самый распространенный метод контроля изделий. Он заключается в сравнении геометрии отсканированного изделия с

CAD-моделью. Один из таких примеров описан в статье [1]. При сканировании поверхности используется способ триангуляции и создается облако точек. Для реконструкции объекта по облаку точек использовалось программное обеспечение GEOMAGIC. Отклонение значений от координатно-измерительной машины составило 2 мкм. К недостаткам решений можно отнести появление пустых зон отсканированного объекта, повторную калибровку при включении сканера и программное обеспечение.

Примером контактного метода является комплекс с использованием щупа Heidenhain, описанный в статье [2]. Методика основывается на использовании поступающих сигналов от измерительного прибора (координаты измерительного наконечника, углы Эйлера и координаты конфигурации), которые считывает контролер и передает на ПК. Результаты измерения с неопределенностью (с коэффициентом покрытия $k = 2,5$) составляют $100,011 \pm 0,011$, $149,957 \pm 0,019$, $488,645 \pm 0,036$.

Недостатки: возрастание погрешности измерения с увеличением размера и необходимость специального программного обеспечения для преобразования в результат измерения.

Еще одним примером контактного метода можно привести решение с использованием датчика линейного перемещения, описанного в статье [3]. Полученные данные от датчика перемещения передаются в измерительную стойку, где преобразуются модулем аналого-цифрового преобразования и передаются на ПК. Результат расчета среднеквадратичного отклонения после измерения составляет 0,0013 мм. Недостатки системы: ручная калибровка измерительного прибора для нового изделия.

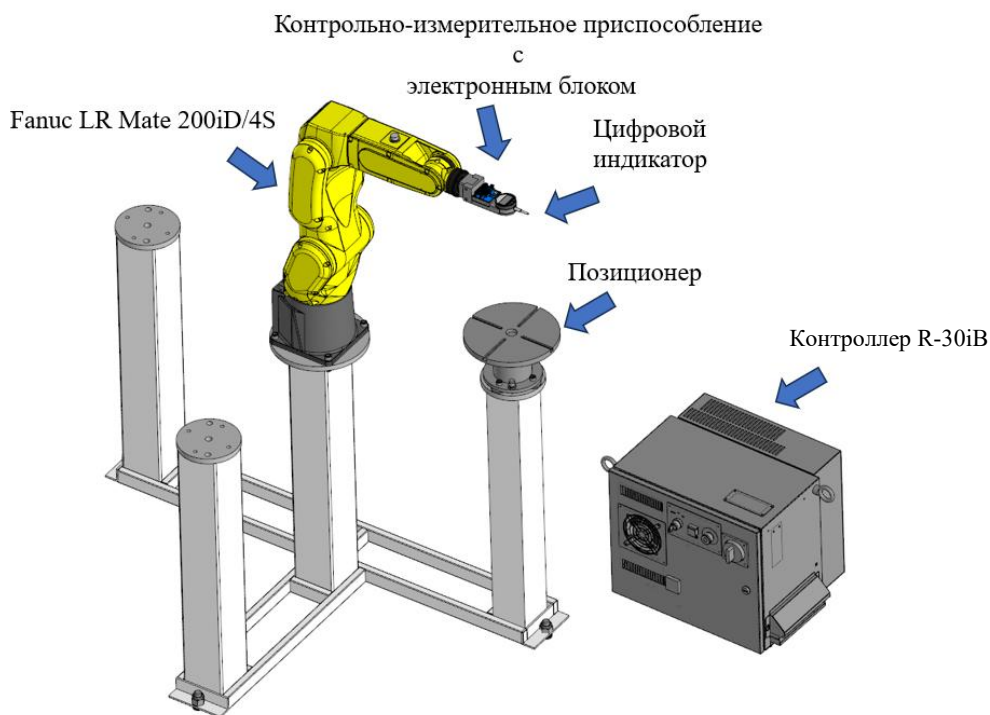


Рис. 1. Роботизированный измерительный комплекс с цифровым индикатором

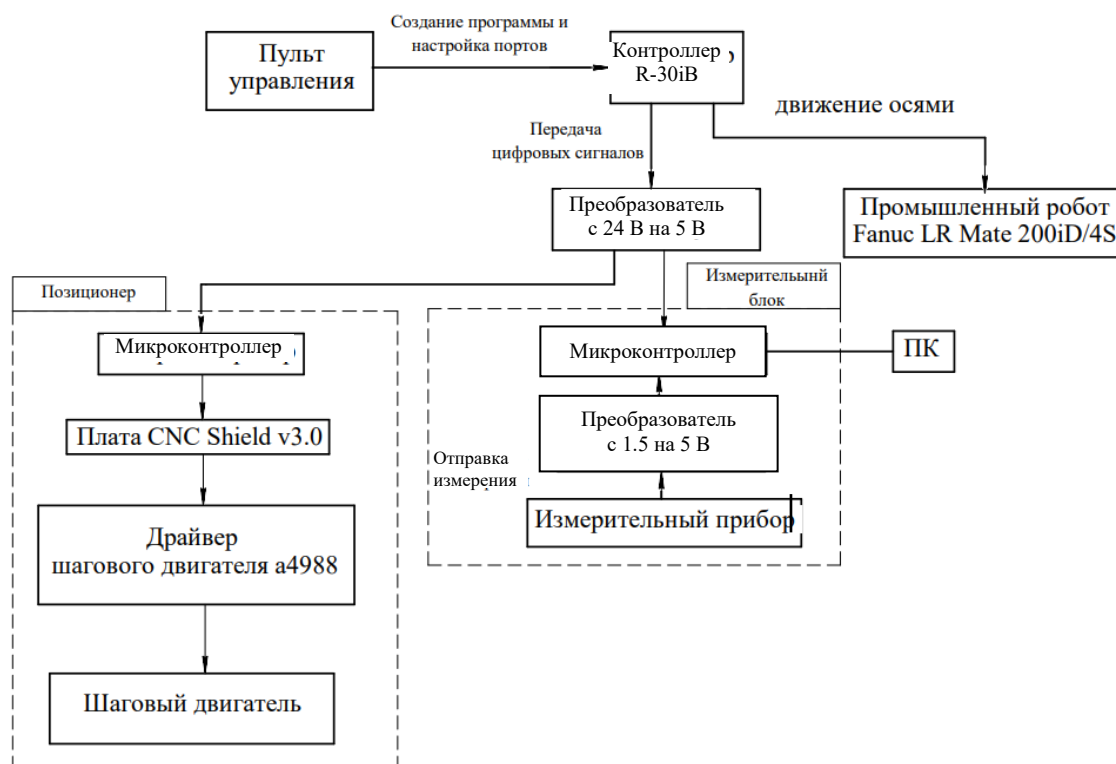


Рис. 2. Функциональная схема роботизированного измерительного комплекса

По результату аналитического обзора и имеющегося оборудования был разработан роботизированный измерительный комплекс, показанный на рисунке 1, состоящий из промышленного робота Fanuc LR Mate 200iD/4S, цифрового индикатора для измерения линейных размеров, контрольно-измерительного приспособления с электронным блоком, промышленного контроллера с пультом управления.

Разработанная контрольно-измерительная система предназначена для автоматизации измерения линейных размеров с диапазоном от 0 до 24,5 мм, корпусных деталей машиностроительного производства до 6 кг, размером 300 мм в длину и 300 мм в ширину. Радиус зоны досягаемости промышленного робота составляет 550 мм по техническому паспорту.

Схема взаимодействия компонентов комплекса показана на рисунке 2. Через пульт управления зада-

ются координаты позиции перемещения промышленного робота для нового изделия, не записанные в памяти контроллера. В местах контроля получения значения с цифрового индикатора оператор задает подачу цифрового сигнала на электронный блок. Для изменения положения угла измеряемого объекта используется позиционер. Контроллер отправляет сигналы в последовательности, написанной в программе. При отправке сигнала с промышленного контроллера в электронный блок выполняется условие для отправки измеренного значения на ПК с цифрового индикатора. Связь между электронным блоком и ПК устанавливается по последовательному порту. Переданные результаты измерения далее обрабатываются.

Для определения возможностей измерения были проанализированы погрешности, влияющие на результат измерения роботизированного измерительного комплекса. К систематическим погрешностям относятся: погрешность цифрового индикатора, повторяемость робота, вращение позиционера, погрешность базирования и закрепления. Случайные погрешности вызываются температурными перепадами и вибрацией.

Повторяемость промышленного робота Fanuc LR Mate 200iD/4S, полученная по методу расчета стандарта ГОСТ Р 60.3.3.1-201, составляет 0,021 мм и ±0,0089 мм для оси Z при скорости в 5 мм/с.

Систематическая погрешность роботизированного измерительного комплекса определяется суммой

всех источников ошибок среднеквадратичным образом по формуле:

$$\Delta_{\text{сист}} = \sqrt{\Delta_{\text{ци}}^2 + \Delta_{\text{пр}}^2 + \Delta_{\text{б}}^2 + \Delta_{\text{з}}^2}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{ци}}$ – погрешность цифрового индикатора, мм;

$\Delta_{\text{пр}}$ – повторяемость робота, мм;

$\Delta_{\text{б}}$ – погрешность базирования объекта, мм;

$\Delta_{\text{з}}$ – погрешность закрепления объекта, мм.

$$\Delta_{\text{сист}} = \sqrt{0,02^2 + 0,0089^2 + 0^2 + 0,006^2} = 0,023, \text{ мм},$$

Методика измерения роботизированным измерительным комплексом следующая: промышленный робот из начального положения на холостых ходах перемещается к базовой плоскости с зазором 1 мм. Далее от этой позиции перемещение по оси Z вниз на расстояние больше измеряемого размера плюс зазор. Потом ожидание 4 секунды для стабильности значения на цифровом индикаторе. Затем робот отходит по оси Z вверх, а после перемещается по координатам X и Y выше места измерения. Далее опускается на ту же координату по Z, которая была при измерении базовой плоскости и ожидает 4 секунды, следом отправляет результаты измерения. Результат измерения рассчитывается как разница значений, отправленных с базовой и измеряемой плоскости. Схема метода измерения показана на рисунке 3.

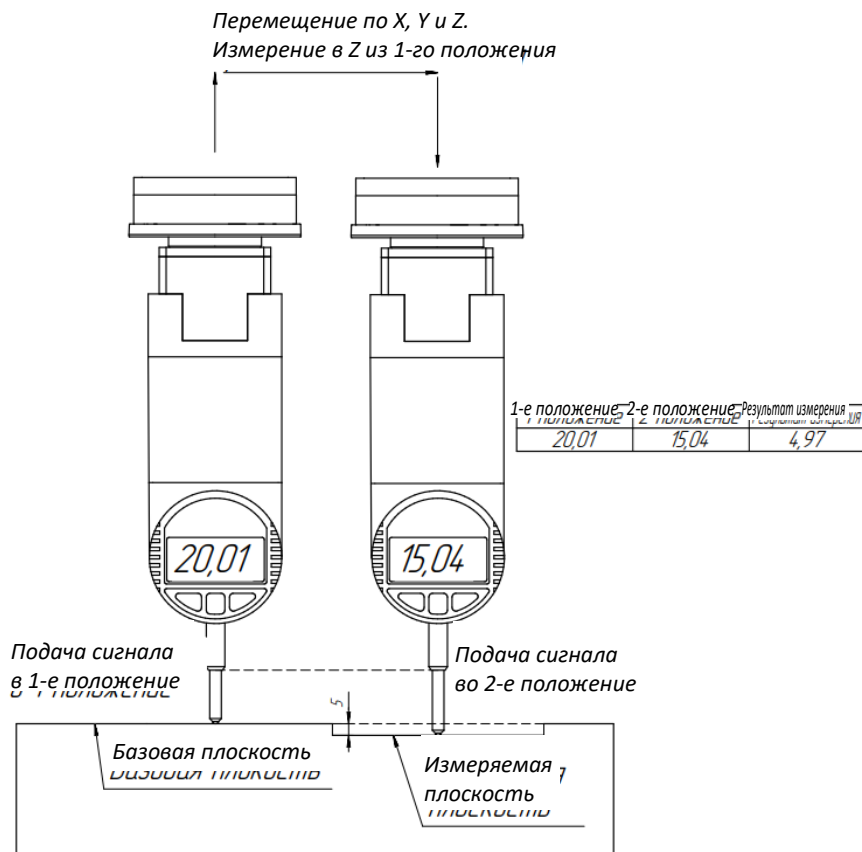


Рис. 3. Методика измерения роботизированным измерительным комплексом

Проведение эксперимента по измерению роботизированным измерительным комплексом проводилось на детали «Корпус» по боковой части элементов пазов размером 7 мм с допуском $\pm 0,2$ мм. Верхнее отклонение составляет 7,2 мм, нижнее – 6,8 мм. Расположение измеряемой детали показано на рисунке 4.



Рис. 4. Расположение измеряемой детали «Корпус»

Было проведено 30 измерений при скорости измерения 5 мм/с и холостых ходах 150 мм/с. Результаты измерений приведены в таблице.

Таблица

Результаты измерения детали «Корпус»

Номер измерения, мм	Значение, мм	Номер измерения, мм	Значение, мм	Номер измерения, мм	Значение, мм
1	6,979	11	6,979	21	6,982
2	6,976	12	6,976	22	6,977
3	6,956	13	6,952	23	6,953
4	6,951	14	6,95	24	6,949
5	6,979	15	6,979	25	6,981
6	6,972	16	6,989	26	6,98
7	6,969	17	6,975	27	6,972
8	6,952	18	6,952	28	6,954
9	6,952	19	6,951	29	6,948
10	6,978	20	6,98	30	6,98

Результат измерения с учетом систематических и случайных погрешностей, определенный по формуле из [4], составляет $6,926 \pm 0,0289$ мм при 99 % вероятности.

Также был проведен анализ измерений роботизированного измерительного комплекса. Рассматриваемыми параметрами являются: повторяемость, воспроизводимость и стабильность измерительной системы.

Для определения параметров повторяемости и точности использовался метод AVONA (Analysis of variance). Метод представляет собой дисперсионный анализ, который определяет отклонение, обнаруженное в наборе данных между средними значениями разных групп.

Критерием вносимых компонентов роботизированного измерительного комплекса, при котором система будет пригодной для использования, является процентный показатель со значением отклонения повторяемости и воспроизводимости (должен составлять менее 1 %). При значениях от 1 до 9 % пригодность системы зависит от области применения и стоимости измерительного прибора [4].

Для общего показателя значение пригодности должно составлять менее 10 % (система является пригодной). От 10 до 30 % – на усмотрение заказчика.

Анализ измерительной системы проводился измерением семи пазов по два раза тремя циклами. Обработка результатов измерения выполнена в программе Minitab (рис. 5, 6).

Variance Components

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,0000115	0,91
Repeatability	0,0000113	0,89
Reproducibility	0,0000002	0,01
Operators	0,0000002	0,01
Part-To-Part	0,0012592	99,09
Total Variation	0,0012707	100,00

Рис. 5. Полученные отклонения, вносимые компонентами измерений

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,0033961	0,020376	9,53	5,09
Repeatability	0,0033680	0,020208	9,45	5,05
Reproducibility	0,0004356	0,002614	1,22	0,65
Operators	0,0004356	0,002614	1,22	0,65
Part-To-Part	0,0354850	0,212910	99,55	53,23
Total Variation	0,0356472	0,213883	100,00	53,47

Number of Distinct Categories = 14

Рис. 6. Общий показатель отклонений

Для оценки воспроизводимой системы используется контрольная карта размаха значений, показанная на рисунке 7. Во втором цикле при измерении второй детали наблюдается неточность воспроизводимости, что требует дальнейшего анализа.

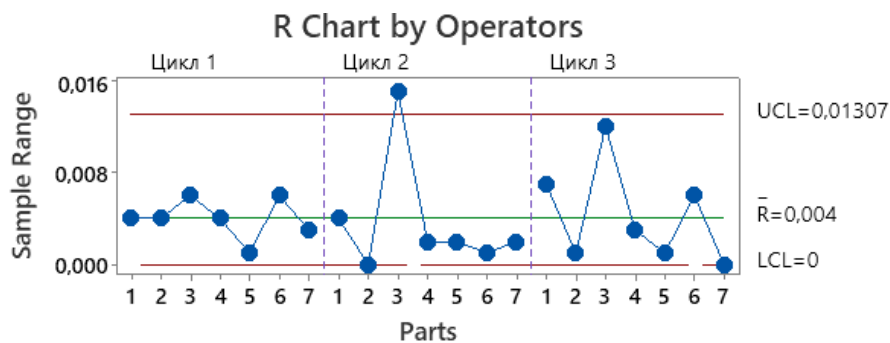


Рис. 7. Контрольная карта размаха значений

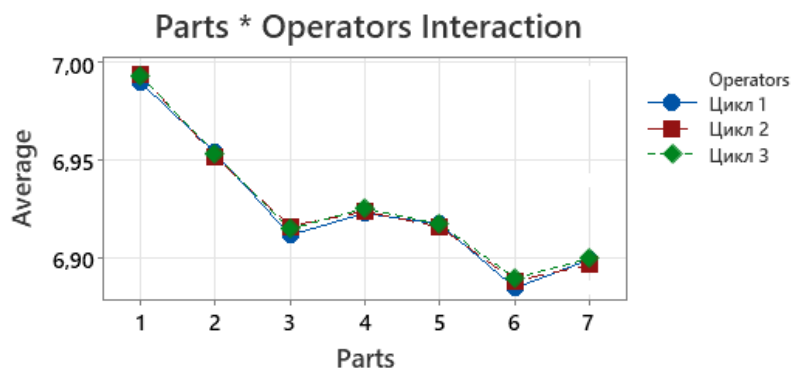


Рис. 8. Визуализация воспроизводимости роботизированного измерительного комплекса

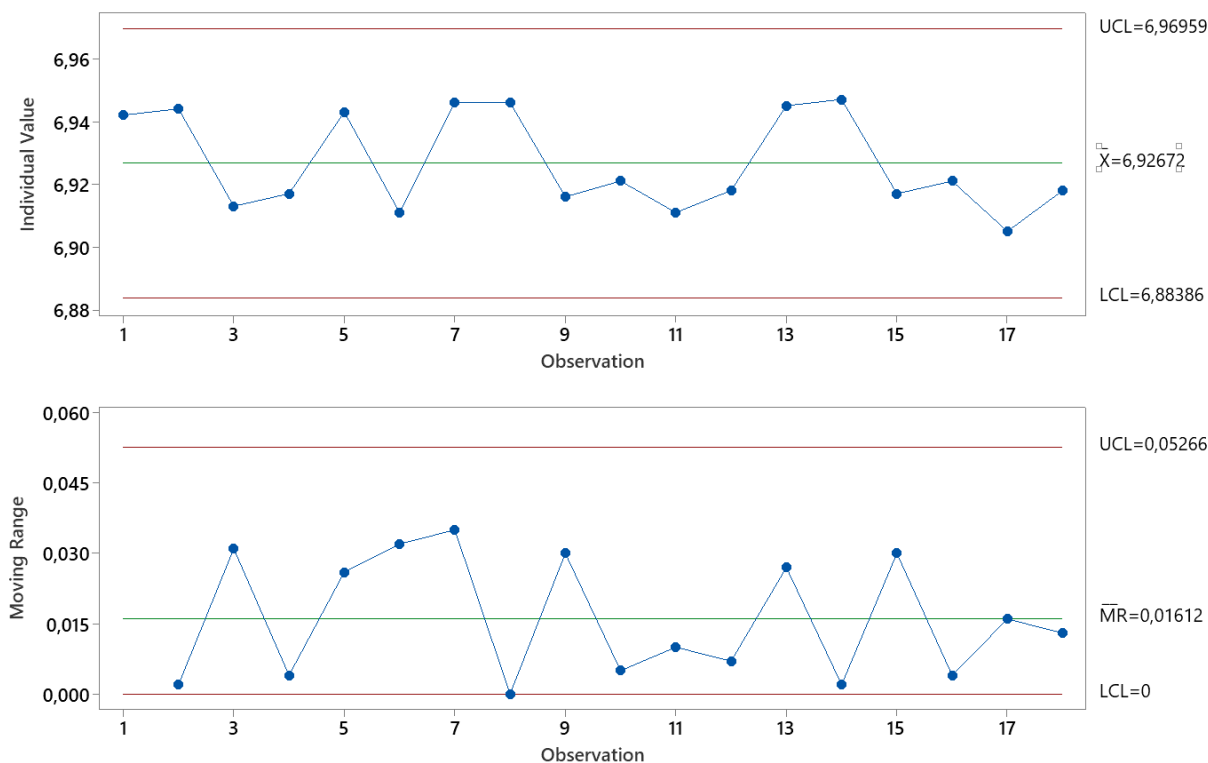


Рис. 9. Контрольная карта I-MR

Визуализация воспроизводимости роботизированного измерительного комплекса показана на рисунке 8. Данный график говорит об отсутствии отклонений, поскольку средние значения точек каждой детали при трех циклах находятся близко. При выполнении операций измерения промышленным роботом результат не подвержен ошибкам, как при ручном методе измерения.

Для оценки параметра стабильности использовалась контрольная карта I-MR, показанная на рисунке 9 [5].

При анализе контрольной карты видно, что значения измерений не выходят за пределы границ UCL и LCL, поэтому процесс измерения является стабильным.

С учетом систематической погрешности разработанный комплекс с данной схемой может измерять с

точностью 10 и 11 качества в зависимости от размера. Проведенный анализ показывает – роботизированный измерительный комплекс пригоден для выполнения контрольно-измерительных операций. Дальнейшие цели работы: интеллектуализация промышленного робота для самостоятельного принятия решений, а также минимизация погрешности измерения с использованием другого измерительного устройства.

Литература

1. Automated industrial robot arm for three-dimensional measurement and reverse engineering / Antonio Dylan Do Rosario Carvalho, A. Vijaya // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2020. – Vol. 10, № 3. – P. 379–390.

2. Application of Industrial Robot as a Measuring

System / K. Ostrowska, R. Kupiec, M. Kowalczyk [et al.] // Cracow University of Technology. – Cracow, 2018. – P. 797–804.

3. Benedito Di Giacomo. Evelopment of an Automated and Dedicated Measuring system for internal diameter inspection / Benedito Di Giacomo, Rodrigo Juliano Silva / School of Engineering of São Carlos. São Carlos. – 2012. – Vol. 5.

4. Митин, И. В. Анализ и обработка экспериментальных данных: учебное пособие / И. В. Митин, В. С. Русаков. – Москва : НЭВЦ ФИПТ, 1998. – 48 с.

5. Интерпретация данных анализа измерительной системы. – URL: <https://quality-one.com/msa/> / (дата обращения 15.09.2023). – Текст : электронный.

6. Стабильность измерительной системы. – URL: https://www.businessstudio.ru/upload/files/notation_idef0.pdf/ (дата обращения 19.10.2023). – Текст : электронный.

D.S. Zhukov

Vologda State University

DEVELOPING ROBOTIC MEASURING COMPLEX FOR CONTROL OF ENGINEERING PARTS LINEAR DIMENSIONS

The purpose of this article is to develop a robotic measuring complex for automation of control and measuring operations on the basis of CMIT with the support of the UMNIK grant. The paper discusses automation solutions that utilize industrial robots for control operations. According to the analytical review and according to the available equipment, a robotic complex for control of linear dimensions was also developed. The systematic error of the complex was determined. The measurement system of repeatability, reproducibility and saliency was analyzed.

Industrial robot, robotic measuring complex, mechanical engineering, automation, measurement, digital indicator.