

УДК 621.9.08

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОГРЕШНОСТИ
ИЗМЕРЕНИЯ ГРУПП ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА ОБОРУДОВАНИИ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ
НА ПРИМЕРЕ ДИСКА ТУРБИНЫ**

© 2014 М.А. Болотов, В.П. Алексеев, Н.Д. Проничев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Разработана методика проведения экспериментальных исследований погрешности измерения групп геометрических параметров на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ) на примере радиально – углового расположения диска турбины. Данная методика состоит из ряда последовательных этапов: анализ детали и групп геометрических параметров; калибровка измерительной системы; привязка к детали; выбор измерительного цикла; разработка управляющей программы для измерений; проведение измерений на оборудовании с ЧПУ и на контрольно-измерительном оборудовании; сравнение результатов измерений; анализ погрешностей, установление причин их возникновения и предложение по их снижению. Для анализа полученных результатов используется статистический метод определения суммарной погрешности. Случайная составляющая оценивалась многократным повторением процесса измерения центрирующих отверстий на оборудовании с ЧПУ и статистической обработкой результатов. Систематическая погрешность оценивалась путём сравнения данных, полученных в результате контроля на оборудовании с ЧПУ, с эталонными значениями. В качестве эталонных данных приняты результаты измерений на координатно-измерительной машине (КИМ) Global Performance 07.10.07. Контроль радиально – углового расположения центрирующих отверстий диска турбины возможен с использованием стандартных измерительных циклов оборудования. Стоит отметить зависимость точности измерения от номинального угла расположения центрирующих отверстий. С увеличением угла увеличивается погрешность измерения. Данная методика является универсальной и применима к измерению многих геометрических параметров различных деталей.

Методика, эксперимент, погрешность измерения, группа геометрических параметров, случайная погрешность, систематическая погрешность, диск турбины, координатно – измерительная машина.

При изготовлении сложных изделий на оборудовании с числовым программным управлением возникает необходимость в межоперационном и внутриоперационном контроле геометрических параметров на их соответствие техническим требованиям, предъявляемым к детали.

Реализация встроенного контроля возможна с помощью аппаратных возможностей станков с ЧПУ [1], а именно измерительных щупов, которые в основном используются для базирования заготовок. Точность измерения щупов достаточна для контроля многих ответственных технологических параметров деталей машиностроения.

Целью работы является разработка методики проведения экспериментальных исследований погрешности измерения групп геометрических параметров деталей газотурбинного двигателя (ГТД) на оборудовании с ЧПУ на примере измерения

радиально – углового расположения центрирующих отверстий диска турбины.

При исследовании точности измерения на станке необходимо определить инструментальную погрешность и погрешность метода измерения.

Экспериментальные исследования проводились на фрезерном обрабатывающем центре Mikron UCP 800 Duro, оснащённом измерительной контактной системой Renishaw. На центре установлена система ЧПУ Heidenhain [2].

Разрабатываемая методика проведения экспериментальных исследований по оценке погрешностей измерений на оборудовании с ЧПУ включает в себя ряд последовательных этапов [1]:

- 1) анализ детали и групп геометрических параметров;
- 2) калибровка измерительной системы;
- 3) привязка к детали, установленной на станке;

- 4) выбор измерительного цикла;
- 5) разработка управляющей программы для измерений;
- 6) проведение измерений на оборудовании с ЧПУ;
- 7) измерение детали на КИМ;
- 8) сравнение результатов измерений, полученных на оборудовании и на КИМ, формирование вывода о возможности внутриоперационного контроля рассматриваемой детали, исходя из требуемой точности измерений;
- 9) анализ погрешностей, установление причин их возникновения и предложение по их снижению.

Исследование процесса измерений на станке требует выбора определённой

детали. В качестве практического примера выберем деталь - диск турбины, к которой предъявляются высокие требования по точности изготовления. Точность изготовления определяется, главным образом, радиально - угловым расположением центрирующих отверстий.

Анализ детали необходим для определения групп измеряемых геометрических параметров, выделения технологических баз для задания системы координат и составления методик выполнения измерений.

Деталь (рис. 1) представляет собой диск сложной формы, имеющий выступ с одного торца и фланец с другого торца. На рис. 2 представлена 3D модель диска турбины.

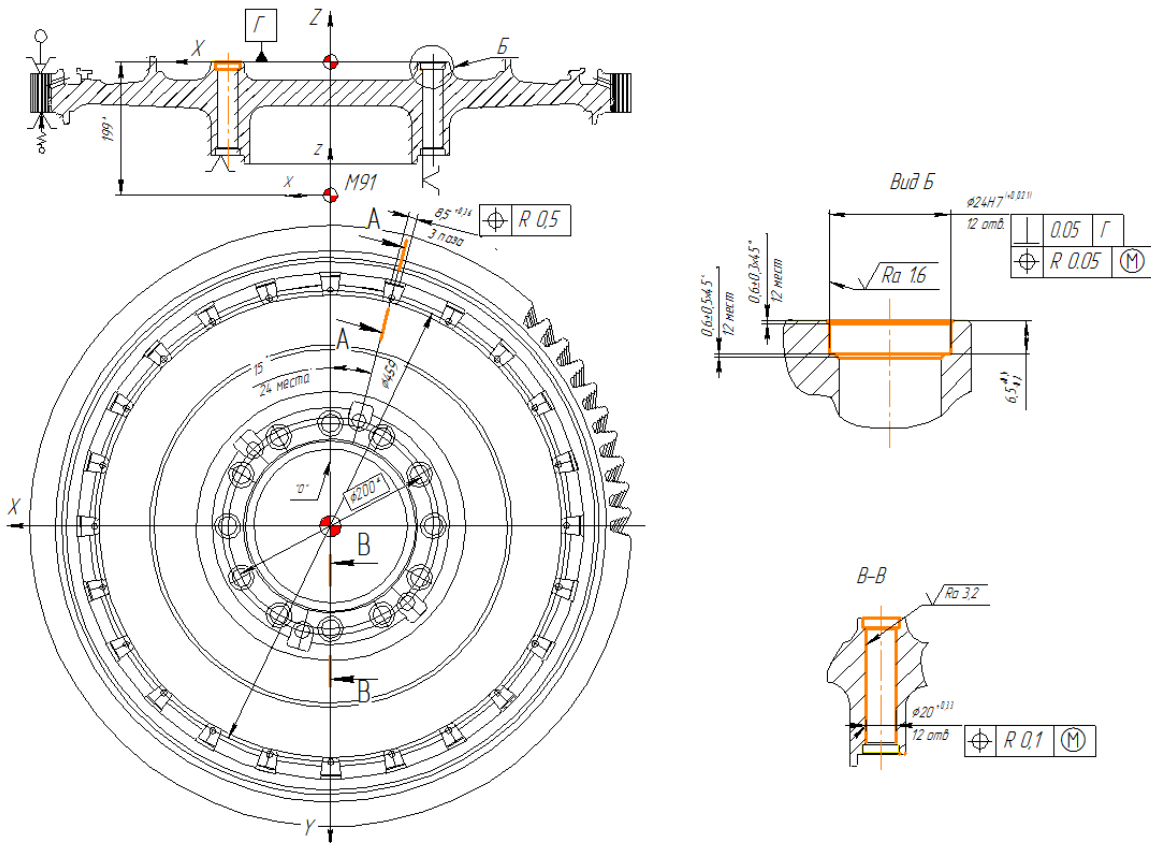


Рис. 1. Чертёж диска турбины

На периферии диска имеются поверхности, на которых располагаются пазы для установки лопаток. На полоте диска имеются 12 равномерно расположенных отверстий $\varnothing 24$. Конструкторские базы детали имеют высокую точность размеров и высокую чистоту поверхности ($Ra =$

1.25). Рабочими поверхностями детали являются поверхности, по которым диск собирается в ротор и поверхности для установки лопаток.

Исходя из технических требований, начало системы координат необходимо положить в центр центрирующего пояса.

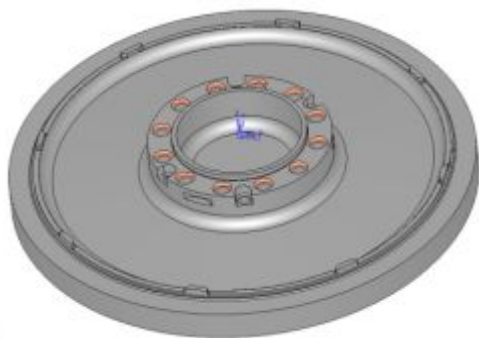


Рис. 2. 3D модель диска турбины

Следующим этапом является калибровка измерительной системы. При исследовании точности измерения на станке необходимо определить инструментальную погрешность и погрешность метода измерения. Погрешности, связанные с точностью формы и размеров детали должны быть сведены к нулю. В связи с этим необходимо выбрать эталонную деталь, которая может использоваться для калибровки или поверки. В качестве детали было выбрано калибровочное кольцо. Диаметр выбранного калибровочного кольца равен 25 мм. Схема замера калибровочного кольца представлена на рис. 3.

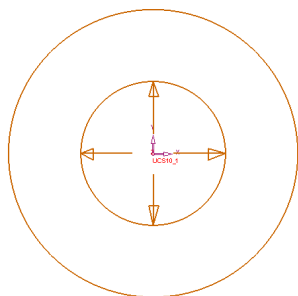
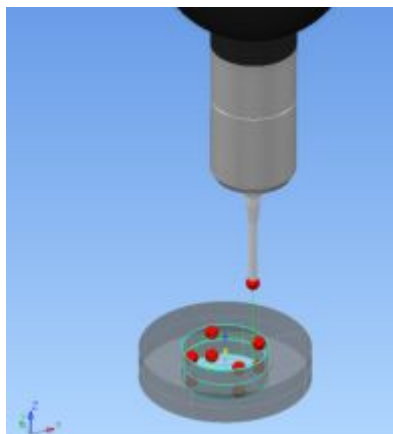


Рис. 3. Схема замера калибровочного кольца

Для более точного определения вылета щупа, радиуса шарика и биения его центра необходимо выполнить несколько повторов калибровочных циклов. Затем определяется среднее арифметическое значение всех параметров и заносится в память системы ЧПУ.

Следующим этапом является базирование заготовки. Базирование применяется, если деталь не обрабатывалась до измерения и её реальное положение в пространстве не совпадает с номинальным, заданным в САI или САМ системе. Такая задача возникает, если деталь возвращается для доработки либо ремонта или отсутствуют приспособления для точного установа. Данную задачу обеспечивают стандартные циклы измерений, заложенные в стойках ЧПУ.

Наклонное положение детали может привести к искажениям результатов измерений, и поэтому его необходимо исключить. Для устранения данного эффекта используется цикл измерительного щупа 405, который определяет угловое смещение между положительной осью Y активной системы координат и осевой линией отверстия, а также угловое смещение между заданным и фактическим положениями центра отверстия. Полученное угловое смещение система ЧПУ компенсирует путём вращения по оси Z. При этом зажим детали на круглом столе может быть любым, однако координата Y отверстия должна быть положительной [2]. Схема измерения представлена на рис. 4.

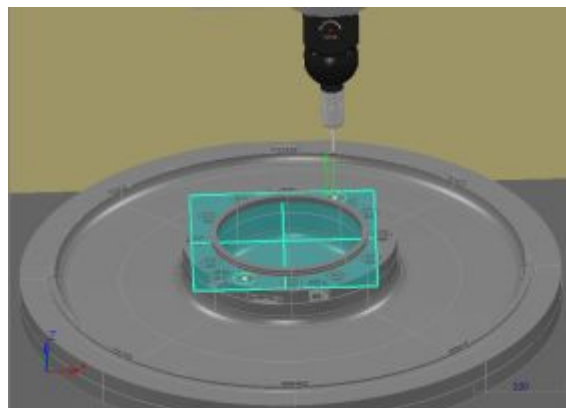


Рис. 4. Схема компенсации наклонного положения детали по двум отверстиям

Далее необходимо определить привязку системы координат детали относительно стола оборудования. Исходя из технических требований, положим систему координат в центр кругового кармана и определим этот центр как базовую точку. Измерение кругового кармана осуществляется с помощью 412 цикла измерительного щупа (рис. 5). На выбор системы ЧПУ может записывать этот центр в таблицу нулевых точек или в таблицу предварительных установок.

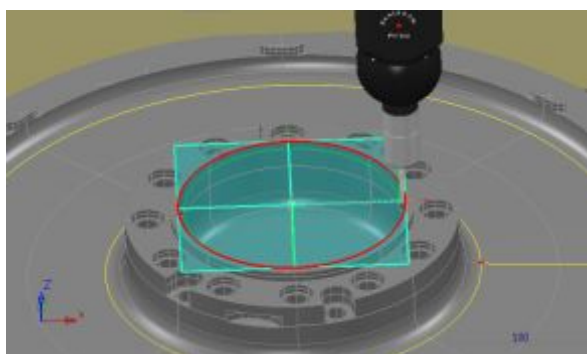


Рис. 5. Измерение центра круглого кармана

Привязка диска турбины по оси Z осуществляется по плоскости торца. Схема измерения плоскости представлена на рис. 6.

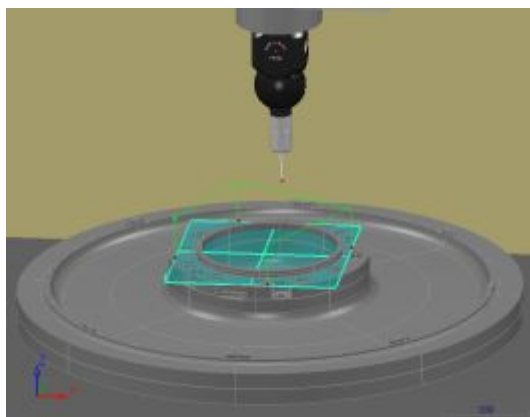


Рис. 6. Измерение торца для определения расположения диска по оси Z

Следующим этапом необходимо произвести автоматическое измерение детали с использованием циклов стойки ЧПУ.

Цикл измерительного щупа 421 определяет центр и диаметр отверстия (рис. 7). В цикле зададим соответствующие значения допуска (-0,033), и ЧПУ осуще-

ствяет сравнение заданного и фактического значения и записывает это отклонение в системных параметрах.

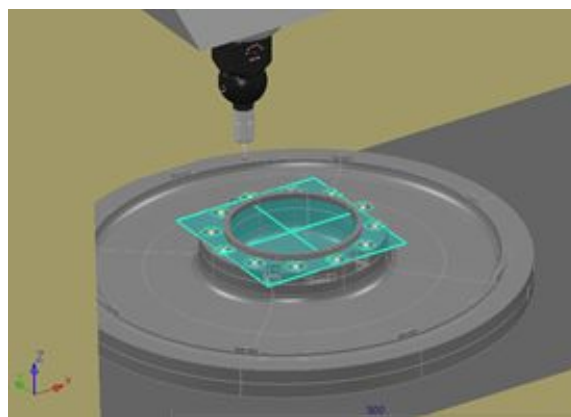


Рис. 7. Измерение центрирующих отверстий диска турбины на оборудовании с ЧПУ

Перед определением цикла должен быть запрограммирован вызов инструмента для определения оси измерительного щупа (рис. 8). Чем меньше запрограммированный угловой шаг, тем менее точно ЧПУ рассчитывает размеры отверстия.



Рис. 8. Вызов измерительного щупа

Результаты измерений записываются в один общий файл, что достаточно удобно для анализа. Вывод результата представлен на рис. 9.

Further measuring results: Center of 1st hole in 1st axis: 77.5064
Center of 1st hole in 2nd axis: 0.0075
Angle of 1st hole : 0.0173
Diameter of 1st hole : 24.0130

Center of 2nd hole in 1st axis: 67.1147
Center of 2nd hole in 2nd axis: 38.7580
Angle of 2nd hole : 30.0062
Diameter of 2nd hole : 24.0170

Center of 3rd hole in 1st axis: 38.7294
Center of 3rd hole in 2nd axis: 67.1359
Angle of 3rd hole : 60.0088
Diameter of 3rd hole : 24.0146

Рис. 9. Фрагмент протокола измерения

На фрагменте данного протокола представлены результаты измерения трёх отверстий. Как видно из протокола, система ЧПУ выводит результаты измерений в виде фактического измеренного значения, что достаточно удобно для сравнения с номинальным значением.

Следующим этапом является измерение детали на координатно – измерительной машине. Данный этап необходим для оценки систематической погрешности измерения. В ходе измерения на оборудовании с ЧПУ и координатно – измерительной машине Global Performance 07.10.07 реализовывалась следующая методика, включающая ряд этапов. На первом этапе осуществляется базирование диска, в ходе которого обеспечивается выстраивание осей детали относительно рабочего пространства КИМ. На втором этапе выполняется измерение рабочих поверхностей, применительно к которым заданы геометрические параметры. На третьем этапе осуществляется синтезирование геометрических элементов в случае необходимости расчёта геометрических параметров и вывод размерной информации в протокол.

Для анализа полученных результатов используется статистический метод определения суммарной погрешности.

При статистическом анализе точности необходимо соблюдение следующих требований:

- для анализа брать детали, изготовленные при стабильных условиях, т.е. од-

ним размерным инструментом до его переточки или при одной наладке станка;

- число деталей в совокупности должно быть значительным, поскольку чем больше взято деталей для анализа, тем с большей достоверностью будут определены характеристики распределения;

- измерение деталей должно выполняться инструментом, цена деления которого должна быть $(1/6-1/10)\delta$, где δ – допуск на измеряемый размер.

Для датчика линейных перемещений указывается интервальная оценка погрешности показаний, применимая ко всей длине перемещений и включающая в себя систематическую и случайную составляющие.

Случайная составляющая оценивалась многократным повторением процесса измерения центрирующих отверстий на оборудовании с ЧПУ и статистической обработкой результатов.

Случайная составляющая погрешности оценивалась по методу моментных характеристик. Вычислялись среднее арифметическое значение размера для совокупности $X_{ср}$, равное 24,012, и среднеквадратическое отклонение, которое составило $\sigma = 0,000452$.

На основании практической выборки и моментных характеристик построена практическая гистограмма распределения (рис. 10). Практическая гистограмма распределения служит для приближённой оценки точности процесса и решения вопроса о выборе теоретического закона для характеристики данного распределения [3].

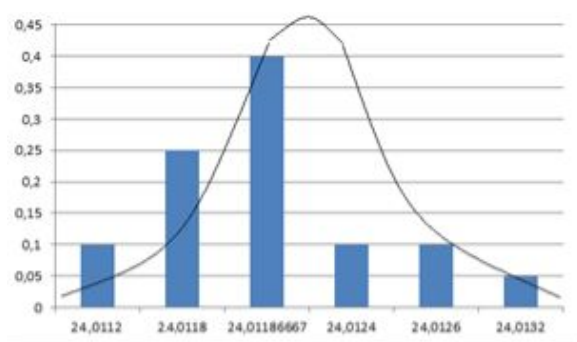


Рис. 10. Практическое и теоретическое распределения по диаметру

На основе оценки погрешности видно, что данный закон достаточно близко соответствует нормальному закону распределения (рис. 10, 11).

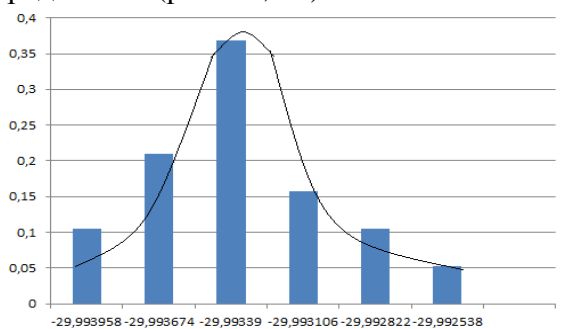


Рис. 11. Практическое и теоретическое распределения по углу

На основании наблюдаемого закона принято поле рассеивания равным шести сигмам, т.е. в рассматриваемом случае $\omega_p = 0,003$ мм.

Систематическая погрешность оценивалась путём сравнения данных, полученных в результате контроля на оборудовании с ЧПУ, с эталонными значениями. В качестве эталонных данных приняты результаты измерений на координатно – измерительной машине Global Performance 07.10.07.

Определение систематической погрешности производят при допущении, что найденное в эксперименте положение кривой распределения является одним из крайних, другое крайнее положение будет зеркальным, симметричным. При этих допущениях:

$$\omega_{n_d} = 2\omega'_n = 2|x_{cp.cm_d} - x_{cp.ким_d}\sigma| = 0,$$

$$\omega_{n_a} = 2\omega'_{n_a} = 2|x_{cp.cm_a} - x_{cp.ким_a}\sigma| = 0,216^\circ,$$

где $x_{cp.cm_d}$, $x_{cp.cm_a}$ – средние значения величин диаметра и угла, замеренных на оборудовании с ЧПУ;

$x_{cp.ким_d}$, $x_{cp.ким_a}$ – средние значения величин диаметра и угла, полученных в результате измерения на координатно – измерительной машине.

Стоит отметить зависимость точности измерения от номинального угла расположения центрирующих отверстий: с увеличением угла увеличивается погрешность измерения.

Суммарная погрешность диаметрального размера использованного в примере метода измерения составляет 0,030 мм. Вычисленная величина не превышает допуск на выполненный размер, равный +0,033 мм.

Выводы

Разработана методика проведения экспериментальных исследований погрешности измерения групп геометрических параметров на оборудовании с ЧПУ на примере радиально – углового расположения диска турбины. Контроль радиально – углового расположения центрирующих отверстий диска турбины возможен с использованием стандартных измерительных циклов оборудования. Данная методика является универсальной и применима к измерению многих геометрических параметров различных деталей. Для контроля геометрических параметров, которые невозможно измерить, необходимо: измерение геометрического параметра с использованием стандартных циклов и осуществление вычислений геометрического параметра по результатам измерений отдельных циклов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 по договору №27/13 от 15.02.2013.

Библиографический список

1. Алексеев В.П., Болотов М.А., Быданов В.В. Разработка методики проведения экспериментальных исследований погрешности измерения групп геометрических параметров деталей ГТД на оборудовании с ЧПУ // Сборник тезисов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2014. С. 28-29.

2. Renishaw Карманный справочник по датчикам для станков с ЧПУ. Спектр ре-

шений для контроля процесса обработки. Выпуск № 1111. 2011. 40 с.

3. Алексеев В.П., Болотов М.А. Экспериментальное исследование погрешностей измерения радиально-углового расположения центрирующих отверстий диска турбины на оборудовании с ЧПУ // Сборник тезисов 40-ой международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». М.: Российский государственный технологический университет, 2014.

Информация об авторах

Болотов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: maikl.bol@gmail.com. Область научных интересов: координатные измерения, математические методы, процессы сборки.

Алексеев Вячеслав Петрович, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский универси-

тет). E-mail: alexeev_v.p@mail.ru. Область научных интересов: механическая обработка и производственный контроль.

Проничев Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pronichev@rambler.ru. Область научных интересов: электрохимическая обработка, современные информационные технологии, механическая обработка, умное производство.

DEVELOPMENT OF METHODS OF CARRYING OUT EXPERIMENTAL RESEARCH OF MEASUREMENT ERRORS FOR SETS OF GEOMETRICAL PARAMETERS ON NC EQUIPMENT AS IN THE CASE OF A TURBINE DISK

© 2014 M.A. Bolotov, V.P. Alexeev, N.D. Pronichev

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The technique of experimental studies of measurement error groups of geometrical parameters on CNC equipment on example radial-angular positions of turbine disk is developed. This technique consists of a series of successive stages: analysis of parts and groups of geometric parameters; calibration of the measurement system; binding to the details; selection of the measurement cycle; development of the control program to be measured; measurements on CNC equipment and KIM; comparison of measurement results; error analysis, the establishment of their causes and the proposal to reduce them. For the analysis of obtained results is used a statistical

method for determining the total error. The random component was evaluated by multiple repetition of the process of measuring the centering holes on CNC equipment and statistical processing of the results. The systematic error was estimated by comparing the data obtained as a result of control on CNC equipment with reference values. As reference data taken measurements on coordinate-measuring machine Global Performance 07.10.07. Control radial-angular arrangement centering holes turbine disk is possible using standard measuring cycle equipment. It is worth noting the dependence of the accuracy of measurement of the nominal angle of the dowel holes. With the increase in the angle measurement error increases. This technique is universally applicable to the measurement of many geometric parameters of the different parts.

The technique of experimental research of measurement error, group geometric parameters, random and systematic error, disks turbine, coordinate - measuring machine, CNC machines.

References

1. Alekseev V.P., Bolotov M.A., Bydanov V.V. Razrabotka metodiki provedeniya eksperimental'nykh issledovaniy pogreshnosti izmereniya grupp geometricheskikh parametrov detalei GTD na oborudovanii s ChPU // Sbornik tezisov mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya». Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2014. P. 28-29. (In Russ.)
2. Renishaw Karmanyi spravochnik po datchikam dlya stankov s ChPU [Pocket Guide to sensors for CNC]. Range of solutions for process control. Issue № 1111. 2011. 40 p.
3. Alekseev V.P., Bolotov M.A. Eksperimental'noe issledovanie pogreshnosti izmereniya radial'no-uglovogo raspolozheniya tsentriruyushchikh otverstii diska turbiny na oborudovanii s ChPU // Sbornik tezisov 40-oy mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Gagarinskie chteniya». Moscow: Russian State Technological University Publ., 2014. (In Russ.)

About the authors

Bolotov Mikhail Aleksandrovich, Candidate of Science (Engineering), Associate professor of the Department production of aircraft engines, Samara State Aerospace University. E – mail: maikl.bol@gmail.com. Area of Research: coordinate measurement, mathematical methods, assembly processes.

Alexeev Vyacheslav Petrovich, Post-graduate Student of the Department production of aircraft engines, Samara State Aerospace University. E – mail: [@](mailto:alexeev.v.p)

mail.ru. Area of Research: machining and production control.

Pronichev Nikolay Dmitrievich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department production of aircraft engines, Samara State Aerospace University. E – mail: pronichev@rambler.ru. Area of Research: electrochemical machining, modern information technology, machining, smart production.