

## Управление точностью обработки на этапе наладки станков с ЧПУ на программную операцию

*Представленный расчет параметров управления точностью формообразования, позволяет формировать траектории перемещения инструмента с применением алгоритмов подналадки, уже на этапе технологической наладки на операцию станка с ЧПУ. Это открывает возможности более широкого использования внутренних алгоритмов современных УЧПУ, не только как программаторов траекторий перемещений, но и формирователей корректирующих смещений на основе опытно-экспериментальных или расчетно-аналитических коэффициентов в математических моделях, разработанных пользователем, учитывающие векторные значения поправок статических и динамических режимов работы станка. Такой подход соответствует требованиям получения научно обоснованной концепции перехода от наладки на операцию окончательной обработки поверхностей детали методом «пробных ходов и промеров» к методу «автоматического получения размеров на предварительно настроенных станках» с программным управлением.*

**Ключевые слова:** векторные погрешности формообразования; наладка станков с ЧПУ; подналадка станков с ЧПУ; резцы со сменными пластинами.

Проблема нивелирования погрешностей формообразования принимает особую актуальность при обработке крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения. В этом случае вероятность решения «отправить заготовку в шихту» должна быть исключена в принципе – например, при обработке валков сортового (рельсового) проката. При этом методы дополнительных проходов, доводка поверхностей детали – именно этот путь, который наиболее часто приводит к получению неисправимого брака. Следует отметить усложнения задачи получения требуемой точности, т. к. суммарная погрешность настройки нескольких инструментов [3] и их подналадки являются входным параметром при определении погрешности взаимного положения поверхностей детали.

**Анализ последних исследований и публикаций** свидетельствует, что погрешности настройки станка с ЧПУ [4], [5] в статике – это фактически погрешность определения в системе координат станка (СКС) положения двух обязательных координатных систем: системы координат детали (СКД) и инструмента (СКИ). Причины статических погрешностей закладываются в процессе технологической наладки станка на программную операцию, которая состоит из двух основных этапов [2, с. 5], [10, с. 660]:

- установки и закрепления заготовки в центрах станка, когда фактически определяется положение СКД относительно базовых узлов станка, а, следовательно, и положения относительно СКС;
- размерной настройки инструментов, когда в память УЧПУ записываются координаты начала каждой СКИ относительно СКС, которые с учетом вылетов инструментов будут пересчитаны программным обеспечением (Про) УЧПУ в траекторию, рассчитанную в СКД и отработанную приводами станка в СКС.

Основа расчета допустимых погрешностей наладки на технологическую операцию - размерная цепь, для которой граничные условия определяют допуски на обрабатываемые поверхности [6]. Примеры анализа размерных цепей такого типа, с учетом изменения скалярных угловых и линейных отклонений можно найти, как построения [1, с. 163], [2, с. 55] с выводами о предельных значениях замыкающего звена на основе частных геометрических соотношений. Вместе с тем решение задач этого типа особенно актуально при формообразовании профилей деталей на станках с ЧПУ, для которых точность получения геометрических элементов детали более взаимосвязана, чем элементы профиля полученного фасонным инструментом. Поэтому в ряде работ [6], [9, с. 5] представлены методы расчета размерных цепей, когда само звено, его угловые и линейные отклонения представлены в векторном виде.

Сокращение простоев оборудования, связанных с подналадкой инструмента, достигается применением режущих пластин и предварительно налаживаемого инструмента. Если смена активной зоны резания режущей пластины приводит к потере точности, то преимущество их применения значительно снижается.

Погрешности могут иметь систематический или случайный характер.

Систематические векторные погрешности могут [2, с. 13] быть постоянного характера или закономерно изменяться с течением времени. Например, если один резцовый блок многократно устанавливается в резцовый адаптер суппорта и под действием усилия зажима постоянного направления закрепляется, то доминирующими факторами, влияющими на точность его положения, будут случайные

отклонения базовых поверхностей блока и адаптера. Вместе с тем анализ статистических данных опытно-промышленного производства показал, что для одного и того же резцового блока теснота стохастической связи [9, 93] указанных отклонений делает коэффициент корреляции близким к 1, т. е. погрешность будет близка к функциональной зависимости. Следовательно, допускается возможность расчета векторного значения погрешности средствами аналитической геометрии.

К случайным векторным погрешностям [2, с. 172] относятся погрешности, которые не подчиняются видимой зависимости, поэтому значения их модуля и направления вероятно – статистическим методом.

**Цель работы** – определение значений детерминированной и стохастической частей отклонений параметров статической наладки (или подналадки), массив значений которых может быть записан на этапе подготовки операции в системную область оперативной памяти УЧПУ станка, как векторы коррекций программных перемещений на участках траектории.

**Изложение основного материала.** Определим векторные значения вылетов резцового блока  $\overline{T}_{II}^x$ ,  $\overline{T}_{II}^z$  (рисунок 1, а) в СКИ  $X_{II}Y_{II}Z_{II}$  и возможные их отклонения  $\overline{\Delta Cx}$ ,  $\overline{\Delta Cz}$  (рисунок 1, в) при установке в адаптере каретки суппорта на этапе наладки на операцию обработки валков на вальцетокарном станке с ЧПУ модели DXW 1250/3 (MAUSEL WITZ, Германия). Измерения вылетов резцового блока, с неплетачиваемыми пластинами круглой формы, выполняется на приборе для настройки инструмента вне станка («TOOLSET 240», точность измерения 0.001 мм). Как геометрическое тело, режущие пластины этого типа (рисунок 1, б) представляют прямой круговой цилиндр радиуса  $r$  (ГОСТ 25003-81), поэтому задний  $\alpha$  и отрицательный передний  $\gamma$  углы реза образуются наклоном опорной поверхности гнезда под пластину в державке реза. Теоретически точное формирование профиля детали будет обеспечено, если управляющая программа задает траекторию перемещения инструмента с учетом эллиптичности проекции круглой пластины на основную плоскость. Векторная параметрическая функция  $\overline{r}(q)$  [7] угловой координаты  $q$  определяет проекции точек режущей кромки пластины радиуса  $r$ , на оси системы координат  $X_{PS}Z_{PS}$ .

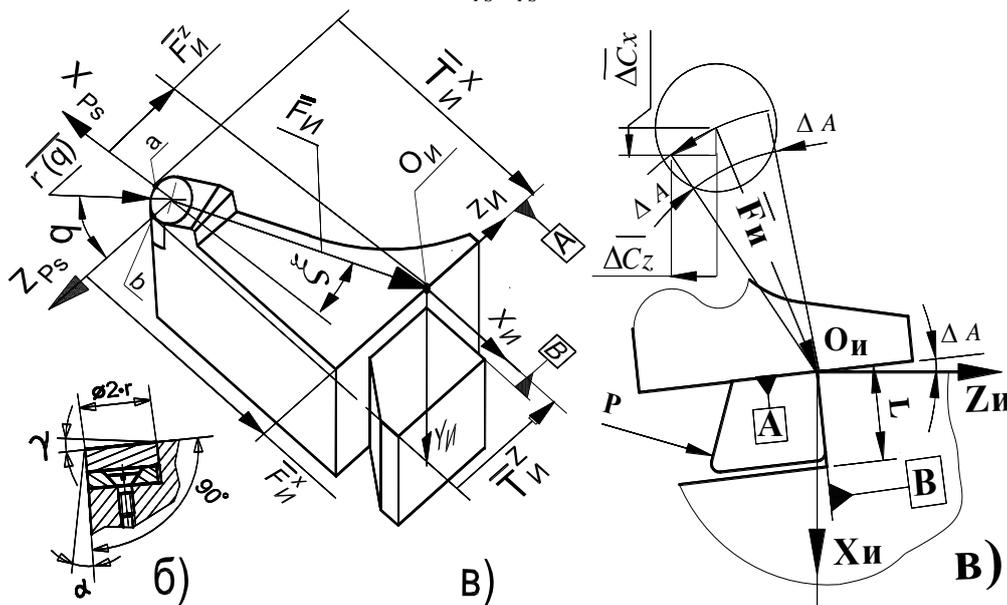


Рис. 1 – Резцовый блок вальцетокарного станка:

а – определение вылетов резцового блока  $\overline{T}_{II}^x$ ,  $\overline{T}_{II}^z$  при размерной наладке,

где  $X_{PS}Z_{PS}$  – координатная система режущей пластины;

б – нормальное сечение режущей пластины;

в – схема расчета погрешностей установки резцового блока  $\overline{\Delta Cx}$ ,  $\overline{\Delta Cz}$

Точки размерной привязки определяются при значении угловой координаты  $q$ :

- для точки «а» (привязка по оси  $X$ , вылет  $\overline{T}_{II}^x$ ) – при значении угла  $q = 0.5 \cdot \pi$ ;
- для точки «б» (привязка по оси  $Z$ , вылет  $\overline{T}_{II}^z$ ) – при значении угла  $q = 0$ .

Угол вектора  $\overline{F}_{II}$ , определяющего положение центра пластины  $\overline{r}(q)$  в СКИ для данного бока равен:

$$\xi = \operatorname{arctg} \left[ \frac{T_{II}^Z - r^Z(0)}{T_{II}^X - r^X(\pi/2)} \right]; \quad (1)$$

В процессе обработки Пр0 системы ЧПУ рассчитывает траекторию перемещения центра пластины, положение которой в системе координат инструмента  $X_{II}Z_{II}$  определяют проекции вектора  $\overline{F_{II}}$  на координатные оси:  $\overline{F_{II}^X} = \overline{T_{II}^X} + \overline{r^X(0.5 \cdot \pi)}$  и  $\overline{F_{II}^Z} = \overline{T_{II}^Z} + \overline{r^Z(0)}$ , где  $\overline{r^X(0.5 \cdot \pi)}$ ,  $\overline{r^Z(0)}$  – радиус-векторы точек «а» и «б», режущей кромки круглой пластины.

При установке блока на станок (базирующие поверхности блока А и В) может возникнуть погрешность от усилия закрепления Р в гнезде адаптера суппорта, при этом реальное положение центра пластины может измениться относительно данных, полученных на приборе вне станка. При заданном по величине и направлению отклонению от перпендикулярности (ГОСТ 24642-81)  $\Delta EPR$  [4] базовых плоскостей адаптера суппорта А и В, выраженному в линейных единицах на длине нормируемого участка L необходимо рассчитать отклонение центра пластины от номинального положения, определенное проекциями вектора  $\overline{F_{II}^X}$ ,  $\overline{F_{II}^Z}$  в радиальном  $\overline{\Delta Cx}$  и осевом  $\overline{\Delta Cz}$  направлениях.

Вследствие отклонения расположения поверхности  $\pm \Delta EPR$  действие усилия зажима Р вызывает «поворот» на угол  $\pm \Delta A = \operatorname{arctg} \left( \frac{\pm \Delta EPR}{L} \right)$  резцового блока относительно точки  $O_{II}$  – начала системы координат инструмента  $X_{II}Z_{II}$  (СКИ), при этом знаки  $\pm$  означает отклонение относительно номинального значения угла  $\xi$ , т. е. «поворот» блока вокруг точки  $O_{II}$  по часовой стрелке или против.

На основании геометрических соотношений получены следующие функции векторных отклонений положения центра режущей пластины в радиальном  $\overline{\Delta Cx(\Delta EPR)}$  и осевом  $\overline{\Delta Cz(\Delta EPR)}$  направлениях, вследствие отклонения от перпендикулярности  $\pm \Delta EPR$  базовых поверхностей резцового блока А и В:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta Cx(\Delta EPR)} &= T_{II}^X - r^X(0.5 \cdot \pi) - \cos \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{\Delta EPR}{L} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{T_{II}^Z - r^Z(0)}{T_{II}^X - r^X(0.5 \cdot \pi)} \right) \right] \cdot \sqrt{(T_{II}^X - r^X(0.5 \cdot \pi))^2 + (T_{II}^Z - r^Z(0))^2} \\ \overline{\Delta Cz(\Delta EPR)} &= (T_{II}^Z - r^Z(0)) \pm \sqrt{(T_{II}^Z - r^Z(0))^2 + 2 \cdot \Delta Cx(\Delta EPR) \cdot (T_{II}^X - r^X(0.5 \cdot \pi)) - \Delta Cx(\Delta EPR)^2}; \end{aligned} \quad (2)$$

При установке резцового блока в гнездо суппорта могут возникнуть погрешности. Поэтому реальное положение центра пластины в системе координат инструмента  $X_{II}Z_{II}$  при необходимости должно корректироваться значениями проекций вектора  $\overline{F_{II}}$  на координатные оси:

$$\overline{F_{II}^X} = \overline{T_{II}^X} + \overline{r^X(0.5 \cdot \pi)} + \overline{\Delta Cx(\pm \Delta EPR)}, \quad \overline{F_{II}^Z} = \overline{T_{II}^Z} + \overline{r^Z(0)} + \overline{\Delta Cz(\pm \Delta EPR)}. \quad (3)$$

**Сравнительный анализ точности статической настройки резцов с пластинами различной формы.** Работоспособность резцов с механическим креплением неперетачиваемых пластин может быть восстановлена по мере их износа путем поворота пластины в гнезде резцовой оправки. В этом случае точность настройки резца на размер будет зависеть от точности повторной установки пластины в гнезде державки резца.

**Теоретическое обоснование возникновения погрешности.** Погрешность установки  $\Delta \varepsilon$  пластины в державке резца (ГОСТ26611-85, ГОСТ26613-85) равна:

$$\Delta \varepsilon = \sqrt{\Delta \varepsilon_B^2 + \Delta \varepsilon_K^2 + \Delta \varepsilon_{PR}^2} \quad (4)$$

$\Delta \varepsilon_B$  – погрешность базирования пластины, при этом точность базирования определяется техническими требованиями к пластинам;

$\Delta \varepsilon_K$  – точность закрепления, зависит от угла наклона опорной плоскости в державке резца и усилия зажима пластины прихватом;

$\Delta \varepsilon_{PR}$  – погрешность изготовления опорных элементов гнезда, державки резца.

Погрешность установки и закрепления круглой (рисунку 2, б) режущей пластины  $\Delta \varepsilon$  можно представить в векторном виде  $\overline{\Delta \varepsilon}$ , как сумму ее проекций в координатной системе пластины  $X_{PS}Z_{PS}$ :

$$\overline{\Delta \varepsilon} = \overline{\Delta \varepsilon_X} + \overline{\Delta \varepsilon_Z}.$$

Вектор  $\overline{\Delta\varepsilon}$  погрешности установки пластины фактически определяет смещение ее центра  $O$  относительно точки центра  $O_1$ , определенной при размерной наладке векторами инструмента  $\overline{T}_{II}^x$  и  $\overline{T}_{II}^z$  (рисунку 1).

Отклонения формы пластины, которые могут иметь доминирующее влияние на точность ее базирования в державке резца, регламентирует ГОСТ 24642-81. Стандартом оговорено допустимое отклонение от параллельности опорных поверхностей пластины  $EPA$  и отклонение от плоскостности  $EFL$  – вогнутость или выпуклость. Проведем эксперимент, цель которого определить, методом статистического анализа граничные значения векторного поля рассеивания погрешности переустановки пластин (подналадки) в державке резца при смене активной зоны ее режущей кромки. Для сравнительного анализа точности статической настройки выбраны резцы (рисунку 2, а) (ГОСТ 21611-85) с двухсторонними шлифованными по опорным плоскостям минералокерамическими пластинами (ГОСТ 25003-81) – круглыми (RNGN Ø12.7 мм) и квадратными (SNGN Ø 12.7 мм).

Погрешность переустановки пластин  $\overline{\Delta\varepsilon_x}$ ,  $\overline{\Delta\varepsilon_z}$ , обуславливает отклонение вылетов инструментов  $\overline{T}_{II}^x$ ,  $\overline{T}_{II}^z$  от значений, полученных на приборе для настройки инструмента вне станка. Для круглых и квадратных режущих пластин измерение векторов вылета инструмента производится без замены державки резца, следовательно, погрешность опорных элементов гнезда державки будет оказывать одинаковое влияние на все пластины, т. е. можно принять значение  $\Delta\varepsilon_{PR} \approx 0$ .

Оборудование и принадлежности для эксперимента.

1. Прибор для настройки инструмента вне станка «TOOLSET 240».
2. Резец (2100–2107) для квадратных пластин (SNGN) и резец (2100–2218) для круглых пластин (RNGN), в которых передний и задний углы образованы за счет наклона опорной плоскости в державке.
3. Комплекты в упаковке двухсторонних квадратных (SNGN) и круглых (RNGN) пластин – по 10 штук каждого типа с одним номером партии и датой выпуска.

Пластины, отобранные для эксперимента, были взяты с отдельных упаковок, в каждой из которых находилось по 10 шт. пластин типа SNGN и RNGN соответственно. Результаты контроля диаметральных размеров пластин показали их отклонение в пределах 2 мкм. Это соответствует предположению, что пластины изготовлены с одной матрицы, поэтому остальные геометрические параметры пластин – высота, углы при вершине, ширина фаски и др., будут одинаковы.

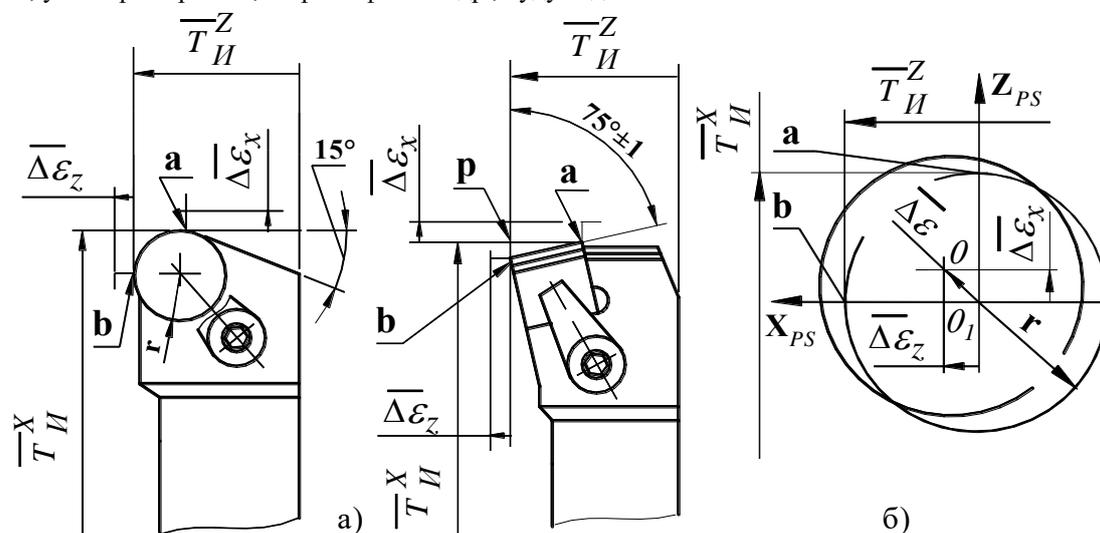


Рис. 2 – Резцы со сменными пластинами:

а – схема формирования погрешностей  $\overline{\Delta\varepsilon_x}$ ,  $\overline{\Delta\varepsilon_z}$  настройки (или подналадки)

резцов с круглыми (RNGN) и квадратными (SNGN) пластинами;

б – формирование вектора  $\overline{\Delta\varepsilon}$  смещения пластины

Резец устанавливается в блок и закрепляется в адаптере на столе прибора для настройки инструмента вне станка. При переустановке пластин каждого типа по двум координатным направлениям определяем точки отсчета, в которых погрешность подналадки равна нулю, т. е.  $\Delta\varepsilon_x = 0$ ,  $\Delta\varepsilon_z = 0$ . Далее относительно нулевой точки для каждой пластины выполняются восемь измерений  $\overline{\Delta\varepsilon_x}$ ,  $\overline{\Delta\varepsilon_z}$  по четыре с каждой из сторон – круглой, путем поворота на  $90^\circ$ , квадратной – для четырех вершин. На

основании полученных данных составлены четыре таблицы, каждая из которых содержат результаты 80 измерений (по 8 измерений  $\overline{\Delta\varepsilon_x}$ ,  $\overline{\Delta\varepsilon_z}$  в 4 точках 10 пластин с каждой стороны) погрешности установки пластин по координатным направлениям X и Z.

**Обработка результатов эксперимента.** Реальные значения вылетов резца,  $\overline{T_{II}^x} + \overline{\Delta\varepsilon_x}$ ,  $\overline{T_{II}^z} + \overline{\Delta\varepsilon_z}$  при размерной наладке на приборе, система УЧПУ определяет относительно координат точек привязки инструмента «а» и «б» (рисунку 1). В этом случае для квадратных пластин система управления задает перемещение теоретической вершины резца P, а для круглых пластин, в случае эквидистантного программирования, положение центра пластины O.

Каждое измерение двух случайных значений  $\overline{\Delta\varepsilon_x}$ ,  $\overline{\Delta\varepsilon_z}$  можно представить составляющими вектора случайной величины [6], определяющим погрешность переустановки режущей пластины  $\overline{\Delta\varepsilon}$ . Модуль вектора равен  $|\overline{\Delta\varepsilon}| = \sqrt{\overline{\Delta\varepsilon_x^2} + \overline{\Delta\varepsilon_z^2}}$ , а угол  $\beta$ , образованный с положительным направлением оси Z, принимает значение:  $\beta = \arctg(\overline{\Delta\varepsilon_x} / \overline{\Delta\varepsilon_z})$ .

Расчет поля рассеяния, параметров векторов  $\overline{\Delta\varepsilon}$  для круглых и квадратных пластин выполнен с помощью инструментария пакета MathCAD. Анализ полученных гистограмм и кривых нормального распределения дает следующие результаты. В координатной системе пластины  $X_{Ps}Z_{Ps}$  математическое ожидание модулей векторов для каждой оси  $\overline{\Delta\varepsilon_x}$ ,  $\overline{\Delta\varepsilon_z}$  и поля рассеяния относительно математического ожидания  $\pm 3 \cdot \sigma_x$ ,  $\pm 3 \cdot \sigma_z$  равны следующим значениям:

– для круглых пластин:

$$\overline{\Delta\varepsilon_x} = 0.0086 \text{ мм}, \pm 3 \cdot \sigma_x = \pm 0.00725 \text{ мм},$$

$$\overline{\Delta\varepsilon_z} = 0.0049 \text{ мм}, \pm 3 \cdot \sigma_z = \pm 0.00521 \text{ мм};$$

– для квадратных пластин:

$$\overline{\Delta\varepsilon_x} = 0.0142 \text{ мм}, \pm 3 \cdot \sigma_x = \pm 0.0130 \text{ мм},$$

$$\overline{\Delta\varepsilon_z} = 0.0095 \text{ мм}, \pm 3 \cdot \sigma_z = \pm 0.0083 \text{ мм}.$$

**Выводы и перспективы дальнейших разработок.** В результате проведенного статистического анализа установлено, что исследуемый процесс смены активной зоны режущей кромки пластины является технологически устойчивым и, хотя возникающие при этом погрешности носят случайный характер, их влияние можно оценить по законам теории вероятностей. Поэтому полученные распределения случайных величин процесса позволяют сделать следующие выводы.

1. Для круглых пластин типа RNUN поля рассеяния векторной ошибки установки режущей пластины в среднем на 40 % меньше, чем для квадратных пластин типа SNUN. Границы поля рассеяния D вектора  $\overline{\Delta\varepsilon}$  при переустановке круглой пластины в державке резца представлены на рисунку 3.

2. Направление вектора математического ожидания ошибки размерной привязки для обоих типов пластин примерно соответствует линии действия прихвата. Можно предположить, что при закреплении пластины присутствует ее некоторое «скольжение» по опорной плоскости имеющей наклон  $\gamma = -8^\circ$ .

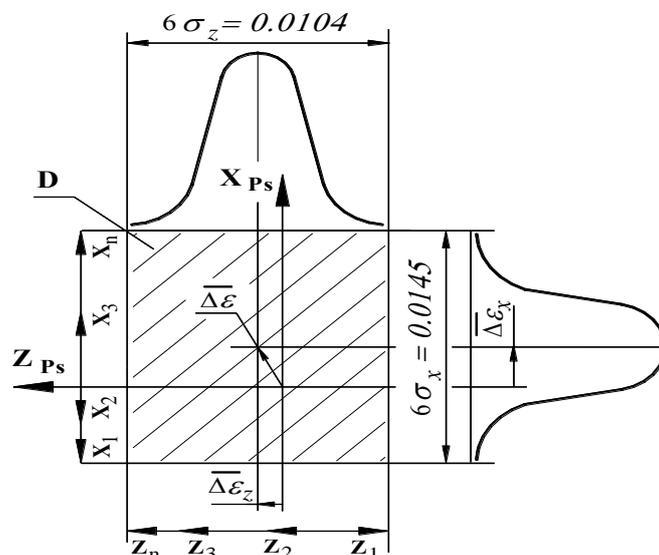


Рис. 3 – Поле рассеяния D положения центра круглой пластины

Проведенное исследование показывает преимущества круглых пластин при подналадке инструмента в процессе обработки. При смене активной зоны пластины (ее повороте в гнезде державки) возникает погрешность базирования и закрепления пластины. Поэтому реальное положение центра пластины в системе координат инструмента  $X_{II}Z_{II}$  определяют с учетом отклонений погрешности переустановки пластины, значения проекций вектора  $\vec{F}_{II}$  на координатные оси выводу:

$$\begin{aligned}\overline{F_{II}^x} &= \overline{T_{II}^x} + r^x (0.5 \cdot \pi) + \overline{\Delta Cx(\pm \Delta EPR)} + \overline{(\Delta \varepsilon_x \pm 3 \cdot \sigma_x)}; \\ \overline{F_{II}^z} &= \overline{T_{II}^z} + r^x (0) + \overline{\Delta Cz(\pm \Delta EPR)} + \overline{(\Delta \varepsilon_z \pm 3 \cdot \sigma_z)}.\end{aligned}\quad (5)$$

За последние десятилетия возможности систем ЧПУ увеличились на порядок, фактически трансформировавшись в современный компьютер, со своей операционной системой. Вместе с тем во многих случаях пользователи довольствуются системами ЧПУ только, как формирователями траекторий, т. е. теми функциями, которые они выполняли еще в середине прошлого века.

В значительной мере причиной здесь является, оставшиеся с прошлых лет концепция скалярного формирования (координатами точек) управляющей программы. Отсюда назначение коррекции – эквидистантное (одинаковое) смещение на группу кадров или предсказание начальной и конечной точки траектории. Исходя из этого, перспективным является параметризация управляющей программы, с подключением корректирующих векторных функций, аргументами которых являются не только данные измерений обработанных поверхностей детали, но и значения или коэффициенты, полученные ранее опытно-статистическими методами.

#### Список использованной литературы:

1. Дунаев П.Ф. Размерные цепи / П.Ф. Дунаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машгиз, 1963. – 308 с.
2. Размерный анализ в машиностроении / С.Г. Емельянов, П.Н. Учайев, Е.А. Кудряшов, С.А. Сергеев, Е.В. Павлов. – М.: Машиностроение, 2012. – 332 с.
3. Лещенко А.И. Анализ точности взаимного расположения фасонных поверхностей в зависимости от погрешности размерной настройки инструмента на программную операцию: сб. науч. праць / А.И. Лещенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь: ПДТУ, 2008. – Вип. 18. – С. 134–138.
4. Лещенко А.И. Моделирование процесса статической настройки станка на операцию программной обработки валков сортового проката: междунар. сб-к науч. трудов / А.И. Лещенко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – Вып. 30. – С. 128–134.
5. Лещенко А.И. Построение математической модели механизма образования погрешностей валков сортового проката при обработке на станках с УЧПУ: сб. праць XI міжнародної науково-технічної конф., Севастополь, 13–18 вересня, 2004 р. / А.И. Лещенко // Машинобудування і техносфера XXI століття. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Т. 2, Вип. 25. – С. 160–163.
6. Лещенко А.И. Расчет технологических размерных цепей средствами векторной алгебры: междунар. сб-к науч. трудов / А.И. Лещенко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – Вып. 25. – С. 220–225.
7. Лещенко А.И. Способ токарной обработки на станках с ЧПУ резцами с неперетачиваемыми пластинками круглой формы: междунар. сб-к науч. трудов / А.И. Лещенко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – Вып. 30. – С. 102–107.
8. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С. Солонин. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
9. Шевелев А.С. Теоретико-вероятностный метод расчета векторных размерных цепей / А.С. Шевелев // Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. – Вып. 6. – Л.: Машиностроение, 1972.
10. Geometric error measurement and compensation of machines—an update / H.Schwenke, W.Knapp, H.Haitjema, A.Weckenmann, R.Schmitt, F.Delbressine // CIRP Annals Manufacturing Technology. – 2008. – № 57. – Pp. 660–675.

#### References:

1. Dunaev, P.F. (1963), *Razmernye tsepi*, 2<sup>nd ed</sup>, pererab. i dop, Mashgiz, Moscow, 308 p.
2. Emelyanov, S.G., Uchayev, P.N., Kudryashov, E.A., Sergeev, S.A. and Pavlov, E.V. (2012), *Razmernyy analiz v mashinostroenii*, Mashinostroenii, Moscow, 332 p.
3. Leshenko, A.I. (2007), «Analiz tochnosti vzaimnogo raspolozheniya fasonnykh poverhnostey v zavisimosti ot pogreshnosti razmernoy nastroyki instrumenta na programmnyu operatsiyu», zb. nauk. prac', *Visnyk Pryazovsk'ogo derzhavnogo tehnicnogo universytetu*, No. 18, PDTU, Mariupol, pp. 134–138.
4. Leshenko, A.I. (2007), «Modelirovanie processa staticheskoy nastojki stanka na operaciyu programmnoj obrabotki valkov sortovogo prokata», mezhdunarodnyj sb. nauchnyh trudov, *Progressivnye tehnologi i sistemy mashinostroenija*, Vol. 30, DonNTU, Doneck, pp. 128–134.
5. Leshenko, A.I. (2004), «Postroenie matematicheskoy modeli mehanizma obrazovaniya pogreshnostej valkov sortovogo prokata pri obrabotke na stankah s UChPU», zb. prac' XI mizhnarodna naukovu-tehnicna. konf., Sevastopol', vid September 13–18, *Mashinobuduvannja i tehnosfera HHI stolittja*, Vol. 2, Iss. 25, DonNTU, Doneck, pp. 160–163.

6. Leshhenko, A.I. (2003), «Raschet tehnologicheskikh razmernyh cepej sredstvami vektornoj algebry, mezhdunarodnyj sb. nauchnyh trudov», *Progressivnye tehnologi i sistemy mashinostroenija*, Vol. 25, DonNTU, Doneck, pp. 220–225.
7. Leshhenko, A.I. (2008), «Sposob tokarnoj obrabotki na stankah s ChPU rezcami s neperetachivaemymi plastinkami krugloj formy», mezhdun. sb. nauch. trudov, *Progressivnye tehnologi i sistemy mashinostroenija*, Vol. 30, DonNTU, Doneck, pp. 102–107.
8. Solonin, I.S. (1972), *Matematicheskaja statistika v tehnologii mashinostroenija*, Mashinostroenie, Moskva, 216 p.
9. Shevelev, A.S. (1972), «Teoretiko-verojatnostnyj metod rascheta vektornyh razmernyh cepej», *Vzaimozamenjajemost' i tehnicheckie izmerenija v mashinostroenii*, Vol. 6, Mashinostroenie, L.
10. Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R. and Delbressine, F. (2008), «Geometric error measurement and compensation of machines—an update», *CIRP Annals Manufacturing Technology*, No. 57, pp. 660–675.

**Лешенко Александр Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий машиностроения Приазовского государственного технического университета.

Научные интересы:

- управление и программирование для станков с ЧПУ;
- CAD/CAM/CAE системы.

E-mail: aleshenko1954@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 10.10.2017.