

## Automation of control and management of technological process

O.T. Mankesheva\*, G.A. Smailova

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

\*Corresponding author: [mankesheval@gmail.com](mailto:mankesheval@gmail.com)

**Abstract.** The article describes the materials and methods used to automate the control and control of the technological process when processing parts on multi-purpose machines. The main control element is a measuring probe, which is integrated into the machine and allows measurements to be made at the processing workplace. This makes it possible not only to control the size deviations of the parts, but also to adjust the processing parameters in real time. The measurement process is performed in a preset machine program, where the coordinates of the characteristic points of the part are measured. Coordinate deviations are used to calculate the accuracy of processing. The measured deviations can be compensated by automatic correction in the control program. However, the accuracy of measurements on the machine is limited by the accuracy of its positioning, which is inferior to coordinate measuring machines. The positional coupling control system makes it possible to compensate for spatial deviations when moving machine components caused by equipment inaccuracies and other factors. To increase accuracy, software algorithms are used that allow you to adapt the processing parameters to the current deviations. In addition, algorithms have been implemented to automatically calculate deviations and make necessary adjustments to the control program of the machine. The use of microprocessor control allows you to quickly change the program commands and thereby maintain the continuity of the processing process with real-time adjustments. Thus, the proposed approach of automation of control and control allows to increase the accuracy of processing by integrating measuring and correcting systems into the control circuit of the machine.

**Keywords:** automation, precision, control, technological process, transition.

### 1. Введение

Машиностроение является одной из ведущих отраслей промышленности, которая определяет развитие всей экономики страны. Ее продукцией являются машины различного назначения, которые поставляются всем отраслям промышленного хозяйства.

Рост промышленности, а также темпы перевооружения новой техникой в значительной степени зависит от уровня развития машиностроения.

Важное место отводится машиностроению в перспективных планах развития экономики страны на ближайшее будущее.

Перед технологами машиностроителями поставлена задача дальнейшего повышения, в первую очередь, качества машин, снижения трудоемкости, себестоимости и материоемкости их изготовления, внедрения поточных методов работы механизации и автоматизации производства, а также сокращения сроков ввода в строй новых объектов.

Технический прогресс в машиностроении характеризуется не только улучшением конструкции машин, но и непрерывным совершенствованием технологий их производства.

Важно качественно, дешево и в заданные плановые сроки с минимальными затратами живого и общественного труда изготавливать машины, применяя высокопроизводительное оборудование, технологическую оснастку, средства механизации и автоматизации производства. От принятой технологии производства во мно-

гом зависит надежность работы выпускаемых машин, а также экономия при их эксплуатации.

Совершенствование технологии машиностроения определяется потребностями производства, необходимых обществу машин. Развитие новых прогрессивных технологических методов способствует конструирование более современных машин.

Массовый выпуск машин, станков и аппаратов и т. д. стало возможным вследствие развития высокопроизводительных методов производства и дальнейшее повышение быстродействия, мощности, точности рабочих давлений и температур, КПД, износстойкости и др. показателей работы машин было достигнуто в результате разработки новейших технологических методов и процессов.

В связи с этим актуальным является направление автоматизации процессов контроля при изготовлении деталей. Актуальность обусловлена ростом масштабов работ по интенсификации и компьютеризации технологического производства и интегрированного управления функционированием как сетью технологических процессов, так и отдельным предприятием, и целой отраслью народного хозяйства. Создание на научной основе автоматизированных производств и систем управления технологическими процессами, их последовательная увязка по иерархическим уровням и интеграции в единую систему сбора и обработки данных и оперативного управления повышает качество и эффективность всех звеньев производства в народном хозяйстве.

## 2. Материалы и методы

Для измерения на станке достигнутых при обработке показателей точности детали и получения информации в целях управления точностью применяют информационно-измерительную систему с использованием измерительного щупа. Измерительный щуп помещается в одной из позиций инструментального магазина и при необходимости контроля отклонений автоматически устанавливается в шпиндель станка.

Оснащение многоцелевых станков измерительными системами дает следующие преимущества:

- возможность осуществления автоматического контроля на станке и проведения соответствующей коррекции по результатам измерения;
- возможность реализации на станке гибких технологических циклов, направленных на достижение требуемой точности детали с учетом возникающих в технологической системе отклонений;
- возможность получения информации о точности установки на станке заготовки и спутника, о точности установки режущего инструмента и его размерном износе;
- возможность определения фактических размеров заготовки для автоматического определения числа ходов и соответствующих режимов обработки.

Измерительный щуп может быть одно-, двух- или трехкоординатного исполнения с электромеханическим преобразователем, фиксирующим момент контакта измерительного наконечника с деталью или с измерительным датчиком, непосредственно определяющим отклонение в измеряемой точке. В первом случае для оценки отклонений используют измерительную систему ЧПУ станка. В момент контакта измерительного наконечника с деталью от щупа по каналам радиосвязи поступает команда на останов движения станка. Достигнутое относительное положение рабочих органов фиксируется путем считывания данных с соответствующих датчиков системы ЧПУ [1].

Процесс измерения выполняется по циклу, предусмотренному в программе станка. При этом измеряют координаты отдельных характерных точек обработанной поверхности детали и по алгоритмам путем расчета на управляющей ЭВМ определяют достигнутые показатели точности детали. С этой целью различают плановые координаты характерных точек  $x_i, y_i, z_i$  которые определяют расположение точек на контролируемой поверхности и нормальные координаты точек, которые характеризуют отклонение точек по нормали к измеряемой поверхности [2].

На рисунке 1 приведена схема измерения точности расстояния и поворота обработанной поверхности (система  $oxuz$ ) относительно технологических баз (система  $OXYZ$ ). Для определения точности расстояния с учетом погрешности относительного поворота измерения производят поочередно в трех точках 1,2,3. Отклонение размера вычисляют по формуле:

$$\Delta_\Gamma = \frac{x_2 \cdot y_3 - y_2 \cdot x_3}{c} \cdot \Delta_{z1} + \frac{y_1 \cdot x_3 - y_3 \cdot x_1}{c} \cdot \Delta_{z2} + \frac{y_2 \cdot x_1 - y_1 \cdot x_2}{c} \cdot \Delta_{z3} \quad (1)$$

$$C = (x_2 \cdot y_3 - y_2 \cdot x_3) + (y_1 \cdot x_3 - y_3 \cdot x_1) + (y_2 \cdot x_1 - y_1 \cdot x_2),$$

где  $\Delta_{z1}, \Delta_{z2}, \Delta_{z3}$  - отклонение размера  $\Gamma$  в точках измерения;

$x_i, y_i$  – плановые координаты точек измерения.

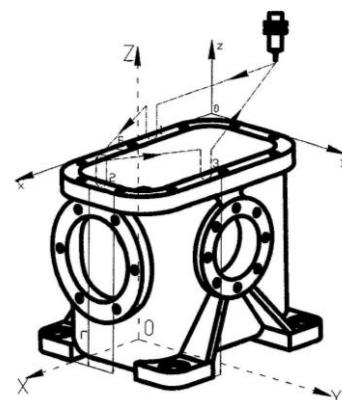


Рисунок 1. Схемы измерения точности положения плоских поверхностей относительно установочной и направляющей баз

Отклонения относительного поворота:  
в плоскости  $XOZ$

$$\Delta_\beta = \frac{x_3 - x_2}{C} \cdot \Delta_{z1} + \frac{x_1 - x_3}{C} \cdot \Delta_{z2} + \frac{x_2 - x_1}{C} \cdot \Delta_{z3}$$

в плоскости  $YOZ$

$$\Delta_\lambda = \frac{y_3 - y_1}{C} \cdot \Delta_{z1} + \frac{y_1 - y_3}{C} \cdot \Delta_{z2} + \frac{y_2 - y_1}{C} \cdot \Delta_{z3}$$

Для определения отклонения ширины бурта  $\Delta_B$  и погрешности  $\Delta_\gamma$  поворота плоскости  $xoz$  относительно направляющей базы измерения выполняют в точках 4 и 5. Отклонения размера  $\Delta_B$  и относительного поворота  $\Delta_\gamma$  при этом соответственно составят:

$$\Delta_B = \frac{x_5}{x_5 - x_4} \Delta_{y4} - \frac{x_4}{x_5 - x_4} \Delta_{y5}$$

$$\Delta_\gamma = \frac{1}{x_5 - x_4} \Delta_{y4} - \frac{1}{x_5 - x_4} \Delta_{y5}$$

где  $x_4, x_5$  - координаты точек измерения;  
 $\Delta_{y4}, \Delta_{y5}$  - отклонения размера  $\Delta_B$  в точках измерения.

Отклонение показателей точности обрабатываемой заготовки рассчитывают с помощью вычислительного устройства. Отклонения компенсируются путем автоматической коррекции программ последующих чистовых переходов. Коррекция погрешности относительного поворота возможна при наличии в системе станок — приспособление — инструмент — заготовка компенсирующих звеньев, например поворотных столов глобусного типа.

К числу факторов, налагающих ограничения на использование измерительных систем, следует отнести следующие:

-точность измерения на станке несколько ниже, чем на координатно-измерительной машине, так как она не превышает фактическую точность позиционирования рабочих узлов станка;

-увеличение продолжительности цикла обработки на станке в связи с последовательным включением измерительных переходов.

Эффективным способом повышения точности измерения является применение автоматической системы управления позиционными связями станка. Использование такой системы позволяет компенсировать во всей рабочей зоне станка пространственные отклонения, обусловленные погрешностью геометрической точности оборудования и других систематически действующих факторов.

Для измерения точности положения центра отверстия в направлении одной из координат, например OZ, измерения выполняют в двух точках 1 и 2 (рисунок 2, а). Отклонение центра отверстия вычисляют по формуле:

$$\Delta_G = (\Delta_{z1} + \Delta_{z2}) / 2 \quad (2)$$

При необходимости определения отклонений центра отверстия в двух направлениях OZ и OХ измерения проводят (рисунок 2, б) в четырех точках

$$\left\| \begin{array}{c} \Delta_G \\ \Delta_A \end{array} \right\| = \frac{1}{2} \left\| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right\| \cdot \left\| \begin{array}{c} \Delta_{z1} \\ \Delta_{z2} \\ \Delta_{z3} \\ \Delta_{z4} \end{array} \right\|$$

Измерение отклонений в четырех точках позволяет, оценить также точность диаметрального размера и отклонения геометрической формы отверстия в поперечном сечении. Отклонения диаметральных размеров составят:

в направлении OХ:

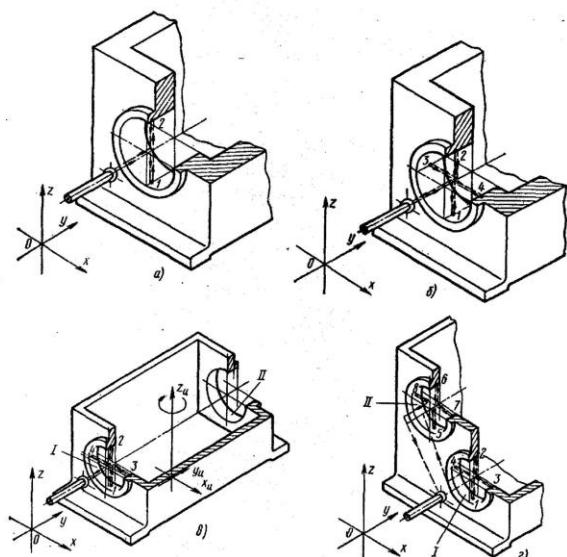
$$\Delta D_x = \Delta_{x3} + \Delta_{x4};$$

В направлении OZ:  $\Delta D_z = \Delta_{x1} + \Delta_{x2}$ ;

Погрешность геометрической формы

$$\omega_\phi = \Delta D_x - \Delta D_z \quad \text{при } \Delta D_x > \Delta D_z$$

$$\omega_\phi = \Delta D_z - \Delta D_x \quad \text{при } \Delta D_x > \Delta D_z$$



**Рисунок 2. Схемы измерения точности положения центра отверстия: а- контроль в одном направлении; б- контроль в двух направлениях; в- контроль соосности двух отверстий; г- контроль точности расстояния между центрами двух отверстий**

Для определения отклонения от соосности двух главных отверстий (рисунок 2, в) поочередно по формуле (1) определяют отклонение центров отверстия  $I(\Delta_G^{(I)}, \Delta_A^{(I)})$  и отверстия  $I(\Delta_G^{(II)}, \Delta_A^{(II)})$ . Затем рассчитывают отклонение от соосности отверстий по формуле:

$$e = \sqrt{(\Delta_G^{(I)} - \Delta_G^{(II)})^2 + (\Delta_A^{(I)} - \Delta_A^{(II)})^2} \quad (3)$$

несовпадение осей отверстий в направлении координатных осей составит

$$e_z = \Delta_G^{(I)} - \Delta_G^{(II)}, e_x = \Delta_A^{(I)} - \Delta_A^{(II)}$$

Эта метрологическая операция требует измерения в восьми точках и поворота стола с деталью на  $180^\circ$ . Результаты измерения позволяют оценить точность углового положения общей оси, проходящей через центры двух отверстий. Если начало отсчета координатной системы главных отверстий располагается в отверстии I, то угловые отклонения составят

$$\left\| \begin{array}{c} \Delta_\lambda \\ \Delta_Y \end{array} \right\| = \frac{1}{y_{II} - y_I} \left\| \begin{array}{c} e_z \\ e_x \end{array} \right\|$$

Где  $y_{II}, y_I$  - координаты точек измерения по оси OY в отверстии I и II,  $y_I = y_i$ , для  $i = (1 \dots 4)$   $y_{II} = y_i$ , для  $i = (5 \dots 8)$ .

Точность расстояния между центрами двух отверстий определяют по схеме, представленной на рисунке 2, г. Вначале по изменениям в точках 1—4 определяют отклонения  $\Delta_G^{(I)}, \Delta_A^{(I)}$  центра отверстия I, затем по изменениям в точках (5-8) находим отклонения  $\Delta_G^{(II)}, \Delta_A^{(II)}$  центра отверстия II. Межцентровое расстояние определяют по формуле:

$$L_\phi = \sqrt{(x_1 + \Delta_A^{(I)}) - (x_2 + \Delta_A^{(II)})}^2 + [(z_1 + \Delta_G^{(I)}) - (z_2 + \Delta_G^{(II)})]^2 \quad (4)$$

где  $(x_1, z_1), (x_2, z_2)$ -требуемые координаты центров отверстия I и II.

Требуемое межцентровое расстояние

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

Разность выражений (2) и (3) определяет отклонение межцентрового расстояния  $\Delta L = L_\phi - L$

Измерение точности относительного положения оси главного отверстия (рисунок 3) выполняется в двух сечениях I и II по восьми контрольным точкам. Если принять, что начало координатной системы отверстий совмещено с торцом, то линейные и угловые отклонения оси отверстия определяются матричными выражениями:

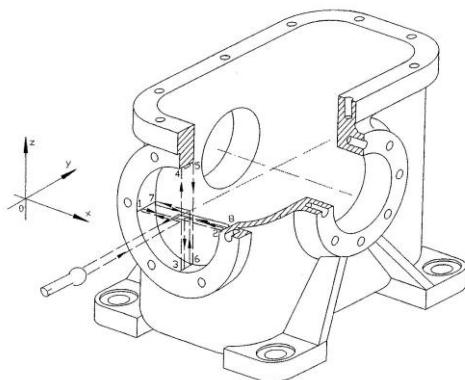
в плоскости XOY

$$\left\| \begin{array}{c} \Delta_A \\ \Delta_Y \end{array} \right\| = \frac{1}{y_2 - y_1} \left\| \begin{array}{cccc} \frac{y_1}{2} & \frac{y_1}{2} & -\frac{y_2}{2} & \frac{y_2}{2} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right\| \cdot \left\| \begin{array}{c} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_7 \\ \Delta x_8 \end{array} \right\|$$

в плоскости YOZ

$$\left\| \begin{array}{c} \Delta_G \\ \Delta_Y \end{array} \right\| = \frac{1}{y_2 - y_1} \left\| \begin{array}{cccc} \frac{y_1}{2} & \frac{y_1}{2} & -\frac{y_2}{2} & \frac{y_2}{2} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right\| \cdot \left\| \begin{array}{c} \Delta z_3 \\ \Delta z_4 \\ \Delta z_5 \\ \Delta z_6 \end{array} \right\|$$

где  $y_1, y_2$  – координаты точек измерения по оси  $OY$  в сечениях I и II,  $y_{ii}=y_i$  для  $i=(1 \dots 4)$ ,  $y_{ii}=y_i$  для  $i=(5 \dots 8)$ .



**Рисунок 3. Измерение точности относительного положения оси главного отверстия**

Отклонение от перпендикулярности торца к оси главного отверстия можно измерить по схеме, представленной на рисунок 4.

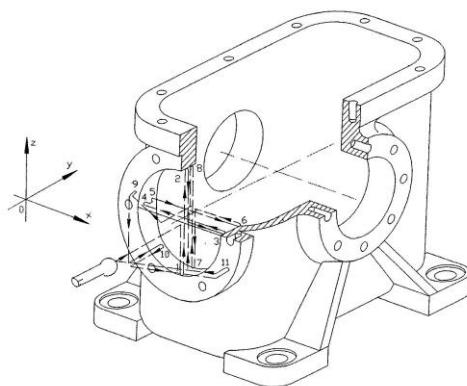
Вначале измеряют точность углового положения оси отверстия, а затем определяют точность углового положения торцовой плоскости. Отклонение от перпендикулярности торца к оси отверстия определяют в двух координатных плоскостях:

$$\text{в плоскости } XOY: \Delta_\gamma = \Delta_\gamma^{(o)} - \Delta_\gamma^{(II)}$$

$$\text{в плоскости } YOZ: \Delta_\lambda = \Delta_\lambda^{(o)} - \Delta_\lambda^{(II)}$$

где  $\Delta_\gamma^{(o)}, \Delta_\lambda^{(o)}$  — угловые отклонения оси отверстия;

$\Delta_\gamma^{(II)}, \Delta_\lambda^{(II)}$  — угловые отклонения плоскости.



**Рисунок 4. Схема измерения перпендикулярности торца к оси главного отверстия**

Автоматизация выполнения контрольных операций на рабочей позиции позволяет создавать технологические циклы управления станком, при которых гарантирована требуемая точность обработки заготовки [2]. Новый подход к построению гибких технологических циклов предусматривает включение в управляющую программу описанных выше метрологических переходов по оценке достигнутой точности. В этом случае метрологические переходы включают в программу по окончании предварительной обработки, непосредственно перед выполнением переходов, связанных с чистовой обработкой заготовки. На основе результатов измерения

фактической точности в размеры статической настройки, заданные в программе для последующих переходов, вводится необходимая коррекция.

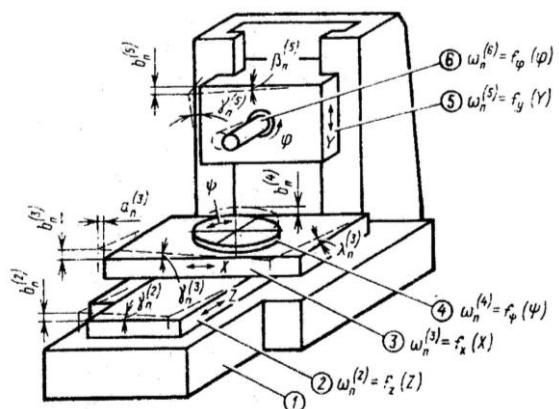
Структура и последовательность выполнения переходов, связанных с достижением точности при обработке плоских поверхностей и главных отверстий. Алгоритм состоит из трех основных модулей. Переходы первого модуля составляют программу измерений, выполняемых на станке с помощью измерительного щупа. По окончании этой программы получают данные об отклонении нормальных координат  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  в заданных точках измерения. Переходы второго модуля образуют программу расчета отклонений параметров точности или параметров положения заготовки на основе полученных числовых значений нормальных и плановых координат точек измерения.

Выходом этого модуля являются измерения отклонений параметров точности заготовки. Переходы третьего модуля определяют процедуру внесения необходимой коррекции в управляющую программу для достижения требуемой точности детали при выполнении последующих чистовых переходов.

Требуемое движение формообразования при обработке деталей на станках создается соответствующим относительным перемещением исполнительных поверхностей станка, на которых базируются заготовка и режущий инструмент. Требуемый закон относительного движения исполнительных поверхностей достигается в результате перемещения по управляемым координатам X, Y, Z, W подвижных узлов станка (столов, суппортов, кареток), базирование которых осуществляется по соответствующим направлениям.

На рисунке 5 представлен многоцелевой станок горизонтальной компоновки, управляемые координаты которого образуют вектор  $Y=(X, Y, Z, \Psi, \phi)$ .

Точность позиционных перемещений каждого из перемещаемых узлов характеризует текущий вектор установки  $\omega_n^{(i)} = (a_n^{(i)}, b_n^{(i)}, c_n^{(i)}, \lambda_n^{(i)}, \beta_n^{(i)}, \gamma_n^{(i)})$ , параметры которого меняются с изменениями соответствующей управляемой координаты. При этом параметры вектора установки в данном случае имеют нижний индекс «n», так как характеризуют отклонения, возникающие при позиционировании узлов станка. Верхний индекс  $i$  обозначает номер перемещаемого узла.



**Рисунок 5. Формирование пространственных позиционных отклонений при перемещении узлов станка по управляемым координатам**

Точность привода по каждой из управляемых координат определяет только один из шести (1-6) параметров вектора позиционирования соответствующего узла:

- для продольного стола  
 $\omega_n^{(2)} = (a_{n(z)}^{(2)}, b_{n(z)}^{(2)}, c_{n(z)}^{(2)}, \lambda_{n(z)}^{(2)}, \beta_{n(z)}^{(2)}, \gamma_{n(z)}^{(2)}) \cdot Z,$
- для поперечного стола  
 $\omega_n^{(3)} = (a_{n(x)}^{(3)}, b_{n(x)}^{(3)}, c_{n(x)}^{(3)}, \lambda_{n(x)}^{(3)}, \beta_{n(x)}^{(3)}, \gamma_{n(x)}^{(3)}) \cdot X,$
- для поворотного стола  
 $\omega_n^{(4)} = (a_{n(\psi)}^{(4)}, b_{n(\psi)}^{(4)}, c_{n(\psi)}^{(4)}, \lambda_{n(\psi)}^{(4)}, \beta_{n(\psi)}^{(4)}, \gamma_{n(\psi)}^{(4)}) \cdot \psi,$
- для шпиндельной бабки  
 $\omega_n^{(5)} = (a_{n(\gamma)}^{(5)}, b_{n(\gamma)}^{(5)}, c_{n(\gamma)}^{(5)}, \lambda_{n(\gamma)}^{(5)}, \beta_{n(\gamma)}^{(5)}, \gamma_{n(\gamma)}^{(5)}) \cdot Y.$

Значения остальных пяти составляющих вектора позиционирования соответствующего узла зависят от геометрической точности станка, прямолинейности направляющих, зазора в направляющих и других факторов.

Таким образом, позиционирование узла по одной из управляемых координат приводит к возникновению на замыкающем звене пространственных отклонений по всем шести параметрам вектора  $\omega_n$ . Это означает, что при перемещении по одной координате одновременно происходит формирование отклонений других управляемых координат, движение по которым не программируется. При этом формируемые отклонения могут превышать точность позиционирования по соответствующей координате в 1.5-3 раза. Все эти отклонения формируются на этапе статической настройки, в процессе позиционирования рабочих органов станка в соответствии с заданной направляющей программой.

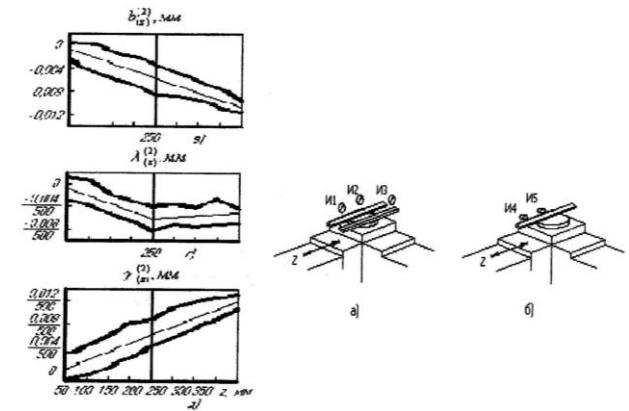
Параметры вектора позиционирования  $\omega_n^{(i)}$  общем случае представляют

собой стационарные случайные функции, аргументами которых являются соответствующие координаты перемещения узлов станка [3]:

- при перемещении каретки по оси Z вектора  $\omega_n^{(2)} = f_z(Z);$
- при перемещении стола по оси X вектора  $\omega_n^{(3)} = f_x(X);$
- при повороте поворотного стола вокруг оси  $\Psi$  вектора  $\omega_n^{(4)} = f_\psi(\psi);$
- при перемещении шпиндельной бабки по оси Y вектора  $\omega_n^{(5)} = f_y(Y);$
- при повороте шпинделя вокруг оси  $\varphi$  вектора  $\omega_n^{(6)} = f_\varphi(\varphi).$

На рисунке 6 представлены графики изменения параметров вектора  $\omega_n^{(2)}$  позиционирования продольного стола при перемещении по координате Z, там же приведены схемы измерения позиционных отклонений, формируемых по установочной и направляющей базам.

Для измерения отклонений  $b_{n(Z)}^{(2)}, \lambda_{n(Z)}^{(2)}, \gamma_{n(Z)}^{(2)}$ , формируемых по установочной базе, используют индикаторы И1, И2, И3; для измерения отклонений, формируемых по направляющей базе, используют индикаторы И4, И5.



**Рисунок 6. Изменение параметров вектора позиционирования  $\omega_n^{(2)}$  при перемещении продольного стола по оси Z: а-изменение позиционных отклонений, формируемых по установочной базе; б-изменение позиционных отклонений, формируемых по направляющей базе; в-изменение параметра смещения  $b_Z^{(2)}$ ; г-изменение параметров поворота соответственно  $\lambda_n^{(2)}, \gamma_n^{(2)}$**

Оценить влияние позиционных отклонений каждого узла на точность относительного положения исполнительных поверхностей станка возможно на основе выявления структуры установочных и формообразующих движений, путем приведения позиционных отклонений соответствующего узла к замыкающему звену. Позиционные отклонения на исполнительных поверхностях стола, на которых устанавливают заготовку, определяются вектором

$$\Pi(z, x, \psi) = [a_n(z, x, \psi), b_n(z, x, \psi), c_n(z, x, \psi), \dots, \gamma_n(z, x, \psi)].$$

Составляющие вектора  $\Pi(z, x, \psi)$  зависят от точности позиционирования каретки 2 при ее перемещении в направлении оси Z от точности позиционирования столов 3 и 4 при перемещении по координатам X,  $\Psi$ . Формирование требуемых размеров статической настройки обеспечивается при одновременном перемещении нескольких узлов станка по различным управляемым координатам. При перемещении шпиндельной бабки 5 в направлении оси Y формируется вектор  $\Pi(y)$  позиционных отклонений исполнительных поверхностей шпинделя, по которым базируется режущий инструмент,

$$\Pi(y) = [a_n(y), b_n(y), c_n(y), \dots, \gamma_n(y)]$$

Таким образом, позиционные отклонения на исполнительных поверхностях станка, обусловленные совокупным перемещением нескольких узлов, можно определить по следующей матричной формуле:

$$\left\| \begin{array}{c} \Pi(z, x, \psi) \\ \Pi(y) \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cccc} W_{11} & W_{12} & W_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{24} \end{array} \right\| \cdot \left\| \begin{array}{c} \omega_n^{(2)}(z) \\ \omega_n^{(3)}(x) \\ \omega_n^{(4)}(\psi) \\ \omega_n^{(5)}(y) \end{array} \right\| \quad (5)$$

где  $W_{11}, \dots, W_{24}$  — матрицы приведения позиционных отклонений соответствующего узла к исполнительным поверхностям станка. Матрицы приведения позиционных отклонений имеют вид:

$$W_y = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & E_{z_i} & -E_{y_i} \\ 1 & -E_{z_i} & 0 & E_{x_i} & 0 \\ 0 & 1 & E_{y_i} & -E_{z_i} & 0 \\ 0 & 1 & E_{x_i} & -E_{y_i} & 0 \\ 0 & -E_{y_i} & 1 & E\lambda_i & 0 \\ 0 & E_{\beta_i} & -E_{x_i} & 1 & 0 \end{vmatrix},$$

где  $E_{xi}$ ,  $E_{yi}$ ,  $E_{xi}$ ,  $E_{zi}$ ,  $E_{\lambda i}$ ,  $E_{\beta i}$ ,  $E_{\gamma i}$  — линейные и угловые размеры, определяющие положение исполнительных поверхностей относительно координатной системы основных баз соответствующего перемещаемого узла.

В соответствии с формулой (5) получим

$$\varUpsilon(z, x, \psi) = W_{11}\omega_n^{(2)}(z) + W_{12}\omega_n^{(3)}(z) + W_{13}\omega_n^{(4)}(\psi)$$

$$\varUpsilon(y) = W_{24}\omega_n^{(4)}(y)$$

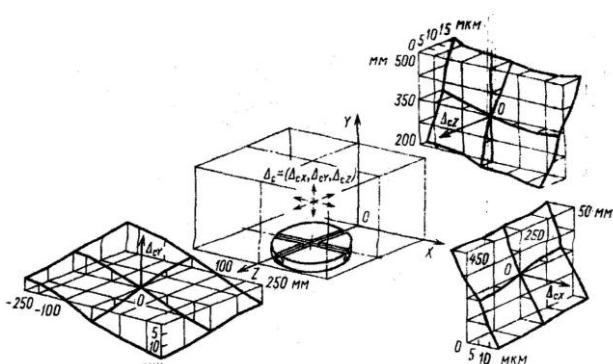
Суммарные отклонения вектора статической настройки  $\Delta k_{cn} = (\Delta A_{cn}, \Delta B_{cn}, \Delta C_{cn}, \Delta \lambda_{cn}, \Delta \beta_{cn}, \Delta \gamma_{cn})$  обусловленные погрешностями позиционных перемещений детали позиционных перемещений детали по Z, X, Y и режущего инструмента по Y, определяются как разность векторов

$$\Delta k_{cn} = \varUpsilon(y) - \varUpsilon(z, x, \psi)$$

Таким образом, если каждому значению управляемой координаты X, Y, Z,  $\varphi$  поставить в соответствие связанные с ними значения параметров векторов позиционирования  $\omega_n^{(2)}, \omega_n^{(3)}, \omega_n^{(4)}, \omega_n^{(5)}$ , то можно определить согласно формуле (2) отклонения вектора статической настройки  $\Delta k_{cn}$  в любой точке  $N_i(x_i, y_i, z_i)$  рабочего объема станка:

$$N_i(x_i, y_i, z_i) \Rightarrow \Delta_{ci}, (\Delta_{cxn}, \Delta_{cyn}, \Delta_{czn})$$

Схема пространственных позиционных отклонений в рабочей зоне многоцелевого станка 6904МФ2, полученная в результате аттестации его геометрической точности и выполнения расчетов по изложенной методике, представлена на рисунке 7.



**Рисунок 7. Пространственные позиционные отклонения в рабочей зоне многоцелевого станка**

Для компенсации возникающих позиционных отклонений  $\Delta k_{cn}$  применяют способ коррекции, который заключается в том, что в соответствии с выявленным значением отклонений  $\Delta_{ci} = (\Delta_{cx}, \Delta_{cy}, \Delta_{cz})$  в определенной точке, рабочей зоны автоматически вносится необходимая поправка  $K = (K_{xi}, K_{yi}, K_{zi})$  в управляемые координаты соответствующего кадра, программы:  $(K_{xi}, K_{yi}, K_{zi}) = \{(-$

$\Delta_{cx}), (-\Delta_{cy}), (-\Delta_{cz})\}$  для  $x_i \in (x_{max} \dots x_{min}), y_i \in (y_{max} \dots y_{min}), z_i \in (z_{max} \dots z_{min})$ .

### 3. Результаты и обсуждение

Программы реализации расчетов пространственных позиционных отклонений. Распечатка программы реализации расчетов представлена в таблице 1.

**Таблица 1. Программа реализации расчетов**

%	Начало программы
N001G64X-116000T01	Ускоренное перемещение по x. Поиск инструмента № 1
N002G64B+250000F42M81	Поворот стола
N003F48S48M06	Задание режимов s=250, n=250. Смена инструмента
N004G60Y+065000Z-002475	Точное позиционирование по y и z
N005M03	Включение вращения шпинделя
N006G67X+055000M10	Зажим стола. Фрезерование плоскости
N007G63Z+002000T03M05	Отвод инструмента по z. Останов шпинделя. поиск инструмента № 3
N008F46S60M06	Задание режимов s=200, n=1000. Смена инструмента
N009G64X-095000	Ускоренное перемещение по x.
N010G60Y+062000Z-002500	Точное позиционирование по y и z. Включение вращения шпинделя
N011M03	Зажим стола. Фрезерование плоскости
N012G67X+092000M10	Останов шпинделя. Поиск инструмента № 13
N013T13M05	Отвод инструмента по z.
N014G63Z+002000	Задание режимов s=80, n=400. Смена инструмента
N015G60F38S52M06	Точное позиционирование по x и y.
N016X4-020500Y+065000	Рассверливание отверстия 1 (автоматический цикл)
N017G81Z-001600R02500	Останов шпинделя
N018G80M05	Поворот стола
N019G64B+500000F42M81	Точное позиционирование по x и y.
N020G60X-027000Y+058000F38	Рассверливание отверстия 2 (автоматический цикл)
N021G81Z-004300R005750	Точное позиционирование по x и y.
N022G80X-037000Y+023000	Рассверливание отверстия 1 (автоматический цикл)
N023G81Z-002400R005750	Останов шпинделя. поиск инструмента № 5
N024G80T05M05	

Управление многоцелевым станком с использованием микропроцессора позволяет реализовать способ внесения коррекции в программу управления станком путем изменения текстов кадров программы непосредственно перед подачей получаемой от них информации на обработку станком.

Такой способ коррекции позволяет оперативно по ходу обработки вносить изменение в текст любого из кадров программы управления станком. При этом ограничением корректирующей процедуры может явиться лишь время, необходимое на изменение требуемого текста, при котором не нарушается непрерывность процесса обработки детали.

Согласно алгоритму управления, реализуемому с помощью микропроцессора, происходит чтение каждого из кадров программы, заданной в коде ISO -7bit, и преобразование заданных, значений управляющих координат по формуле:

$$\begin{vmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \\ \psi^* \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \psi \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} K_X \\ K_Y \\ K_Z \\ K_\psi \end{vmatrix} \quad (6)$$

где  $X, Y, Z, \psi$  — координаты, заданные в исходной программе управления станком;

$K_X, K_Y, K_Z, K_\psi$  — значения коррекции по каждой из управляющих координат;

$X^*, Y^*, Z^*, \psi^*$  — откорректированные значения координат, передаваемые на отработку исполнительным механизмам станка.

Коррекция, вносимая по каждой управляющей координате, определяется, в свою очередь, выражением

$$\begin{vmatrix} K_X \\ K_Y \\ K_Z \\ K_\psi \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_x a_y a_z a_\psi \\ b_x b_y b_z b_\psi \\ c_x c_y c_z c_\psi \\ d_x d_y d_z d_\psi \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \psi \end{vmatrix}$$

или в краткой форме записи  $K = AY$

где  $A$  — матрица функциональных коэффициентов, учитывающих влияние текущих координат на значение корректирующего воздействия.

Элементы матрицы  $A$  определяются согласно формуле (6) путем составного преобразования, связанного с суммированием соответствующих элементов прямоугольных матриц, учитывая при этом связь между координатами точек обрабатываемой поверхности детали ( $X_d, Y_d, Z_d$ ), размерами вылета инструмента ( $X_i, Y_i, Z_i$ ), и текущими значениями управляемых координат ( $X, Y, Z$ ),

Таким образом, при выполнении установочных и формообразующих движений обеспечивается коррекция относительных перемещений детали и режущего инструмента ( $K_X, K_Y, K_Z$ ), с целью компенсаций пространственных отклонений  $\Delta_{ci} = (\Delta_{cX}, \Delta_{cY}, \Delta_{cZ})$ , в каждой точке рабочей зоны, обусловленных погрешностью позиционных перемещений и отклонениями геометрической точности оборудования.

Коррекция относительного поворота  $K_\psi$  осуществляется при наличии угловых отклонений  $\Delta_\psi$  в положении устанавливаемой детали и спутника. В тех случаях, когда компенсируется только часть позиционных отклонений, определяемая как «погрешность позиционирования по заданной координате», возникающая в результате неточности изготовления ходовых винтов и отработки программы [2], выражение (5) принимает вид

$$\begin{vmatrix} K_X^* \\ K_Y^* \\ K_Z^* \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_x^* & 0 \\ b_y^* & 0 \\ 0 & c_z^* \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix}$$

В выражении (6) элементы  $a_x^*, b_y^*, c_z^*$  структурно представляют определенную часть соответствующих элементов  $a_x, b_y, c_z$ , матрицы  $A$ . Они учитывают лишь отклонения трех параметров смещения  $a_x^* = a_x^{(3)}, b_y^* = b_y^{(5)}, c_z^* = a_z^{(2)}$ , которые определяют точность работы привода, между тем как элементы  $a_x, b_y, c_z$  матрицы  $A$  учитывают в целом 18 независимых параметров.

Автоматическое внесение требуемой коррекции в программу станка по ходу обработки означает, что заданные в исходной программе установочные и формообразующие движения дополняются малыми перемещениями, обусловленными действием корректирующих процедур.

Управление станка путем использования мини-ЭВМ или микропроцессора позволяет реализовать предложенный способ управления точностью в виде программно-реализованной корректирующей процедуры, составленной как рабочая программа, размещенная в памяти микроЭВМ. Разработанная программа коррекции точности позиционных перемещений имеет иерархическую модульную структуру. Это позволяет путем введения дополнительных программных блоков компенсировать не только отклонения геометрической точности станка, но также температурные деформации, размерный износ инструмента и другие, постоянные и систематические факторы, в том числе и отклонения, обусловленные погрешностью установки детали, спутника и инструмента [4].

Алгоритм выполнения коррекции на основе модификации заданных в программе значений управляемых координат представлен на рисунке 8. Выполнение корректирующей процедуры осуществляется в процессе обработки детали при трансляции управляющей программы на станок, т. е. непосредственно перед подачей соответствующего кадра на отработку в систему ЧПУ. Это означает выполнение требований управления станком в реальном масштабе времени.

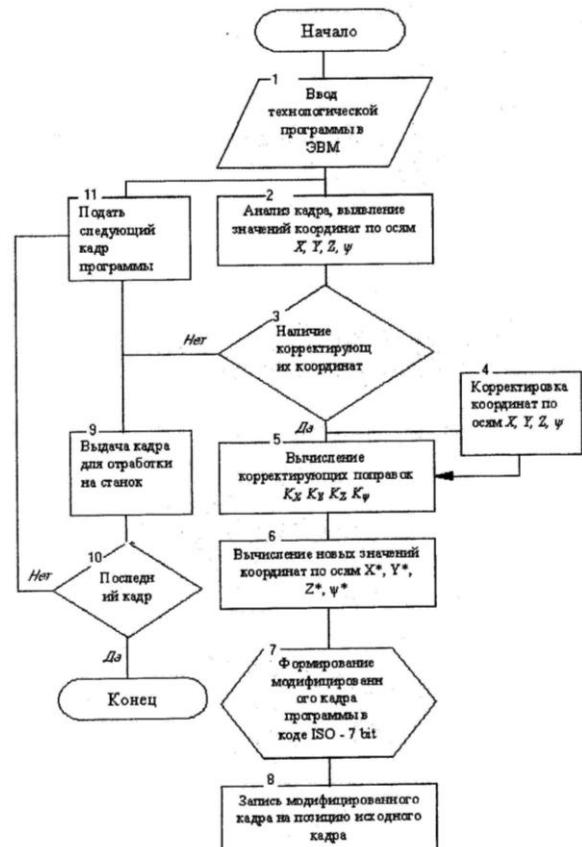


Рисунок 8. Алгоритм коррекции управляемых координат станка, основанный на модификации соответствующих кадров задаваемой программы

В процессе трансляции поочередно просматриваются все кадры технологической программы, и для выполнения корректирующей процедуры выбираются те из них, в которых содержится информация о значениях задаваемых перемещений в направлении соответствующих управляемых координат. Таким образом, основные ис-

ходные параметры, определяющие значение и точность задаваемых перемещений, получают автоматически непосредственно из технологической программы. Обращение к программному блоку для расчета корректирующих поправок происходит на основе полученной информации. Значения функциональных коэффициентов, учитывающих влияние текущих координат на значение корректирующего воздействия, задают в ЭВМ до начала обработки. Для введения в ЭВМ необходимой информации о геометрической точности станка могут быть использованы также программные таблицы, ставящие в соответствие значения управляемых координат X, Y, Z,  $\psi$  необходимых корректирующих поправок  $K_x, K_y, K_z$ .

Новые значения управляющих координат, полученные после введения корректирующих поправок, помещаются на место прежних, и модифицированный кадр передается для обработки на станок.

Предложенный способ пространственной коррекции позиционных отклонений может быть реализован также на обычных многоцелевых станках и станках с ЧПУ, не имеющих канала прямого управления от ЭВМ. В этом случае корректирующая процедура выполняется до начала обработки. Для этого может быть использована расчетная ЭВМ, не предназначенная для прямого управления станками. В ЭВМ загружают технологическую программу обработки детали и на выходе получают модифицированную управляющую программу станка, в которой учитывается геометрическая точность станочного оборудования, используемого для обработки данной детали.

#### 4. Выводы

Составленная система пространственных размерных связей, формируемых на различных этапах обработки

детали, обеспечивает достижение необходимой точности.

Представленные схемы измерения точности различных параметров позволяют рассчитать отклонения, компенсируемые путем коррекции последующих чистовых проходов.

В статье были приведены расчеты и фактические значения:

1) отклонений показателей точности различных параметров вносят коррекцию в процессе изготовления детали для достижения необходимой точности;

2) параметров вектора погрешности установки и отклонения размеров установки позволяют внести коррекцию в процессе изготовления детали для достижения необходимой точности.

#### References / Литература

- [1] Fursenko, S.N., Jakubovskaja, E.S. & Volkova, E.S. (2018). Avtomatizacija tehnologicheskikh processov: Uchebnoe posobie. Minsk: Novoe znanie; Moskva: INFRA-M
- [2] Latyshenko, K.P. (2019). Avtomatizacija izmerenij, ispy-tanij i kontrolja: Uchebnoe posobie (2-e izd.). Saratov: Vuzovskoe obrazovanie. Retrieved from: <https://www.iprbookshop.ru/79612.html>
- [3] Shirladze, A.G., Fedotov, A.V. & Homchenko, V.G. (2015). Avtomatizacija tehnologicheskikh processov i proizvodstv: Uchebnik. Saratov: Vuzovskoe obrazovanie. Retrieved from: <https://www.iprbookshop.ru/37830.html>
- [4] Belov, P.S. & Dragina, O.G. (2020). Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya tehnologicheskikh processov: Uchebnoe posobie dlja SPO. Saratov: Profobrazovanie; Aj Pi Ar Media. Retrieved from: <https://www.iprbookshop.ru/89237.html>

## Технологиялық процесті бақылау мен басқаруды автоматтандыру

О.Т. Манкешева\*, Г.А. Смаилова

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [mankesheval@gmail.com](mailto:mankesheval@gmail.com)

**Андратпа.** Мақалада көп мақсатты станоктарда бөлшектерді өңдеу кезінде технологиялық процесті бақылау мен басқаруды автоматтандыру үшін қолданылатын материалдар мен әдістер сипатталған. Бақылаудың негізгі элементі - өлшеуіш зонд, ол машинаға біріктірілген және өңдеу жұмыс орнында өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл бөлшектердің өлшемдеріндегі ауытқуларды бақылауға ғана емес, сонымен қатар нақты уақыттағы өңдеу параметрлерін реттеуге мүмкіндік береді. Өлшеу процесі машинаниң берілген бағдарламасында орындалады, онда бөліктің тән нүктелерінің координаттары өлшенеді. Өңдеу дәлдігін есептеу үшін координаталық ауытқулар қолданылады. Өлшенген ауытқулар басқару бағдарламасында автоматты түзету арқылы өтелуі мүмкін. Алайда, машинадағы өлшеу дәлдігі оның орналасу дәлдігімен шектеледі, бұл координаталық өлшеу машиналарынан тәмен. Позициялық байланыстарды басқару жүйесі жабдықтың дәлсіздіктерінен және басқа факторлардан тұындаған машина түйіндерінің қозгалуындағы кеңістікік ауытқуларды өтеуге мүмкіндік береді. Дәлдікті жақсарту үшін өңдеу параметрлерін ағымдағы ауытқуларға бейімдеуге мүмкіндік беретін бағдарламалық жасақтама алгоритмдері қолданылады. Сонымен қатар, ауытқуларды автоматты түрде есептеу және машинаниң басқару бағдарламасына қажетті түзетулер енгізу үшін алгоритмдер енгізілді. Микропроцессорлық басқаруды қолдану бағдарлама командаларын жедел өзгертуге мүмкіндік береді және осылайша нақты уақыт режимінде түзетулермен өңдеу процесінің үздіксіздігін сақтайды. Осылайша, бақылау мен басқаруды автоматтандырудың ұсынылған тәсілі өлшеу және түзету жүйелерін машинаниң басқару тізбегіне біріктіру арқылы өңдеу дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

**Негізгі сөздер:** автоматтандыру, дәлдік, бақылау, технологиялық процесс, ауысу.

## Автоматизация контроля и управления технологическим процессом

О.Т. Манкешева\*, Г.А. Смаилова

Satbayev University, Алматы, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [mankesheval@gmail.com](mailto:mankesheval@gmail.com)

**Аннотация.** В статье описаны материалы и методы, использующиеся для автоматизации контроля и управления технологическим процессом при обработке деталей на многоцелевых станках. Основным элементом контроля является измерительный щуп, который интегрируется в станок и позволяет производить измерения на рабочем месте обработки. Это дает возможность не только контролировать отклонения размеров деталей, но и корректировать параметры обработки в реальном времени. Процесс измерения выполняется в заданной программе станка, где измеряются координаты характерных точек детали. Отклонения координат используются для расчета точности обработки. Измеренные отклонения могут быть компенсированы автоматической коррекцией в управляющей программе. Однако точность измерений на станке ограничена точностью его позиционирования, что уступает координатно-измерительным машинам. Система управления позиционными связями позволяет компенсировать пространственные отклонения при перемещении узлов станка, вызванные неточностями оборудования и другими факторами. Для повышения точности применяют программные алгоритмы, которые позволяют адаптировать параметры обработки под текущие отклонения. Кроме того, реализованы алгоритмы для автоматического расчета отклонений и внесения необходимых поправок в управляющую программу станка. Использование микропроцессорного управления позволяет оперативно изменять команды программы и тем самым поддерживать непрерывность процесса обработки с корректировкой в режиме реального времени. Таким образом, предложенный подход автоматизации контроля и управления позволяет повысить точность обработки за счет интеграции измерительных и корректирующих систем в управляющий контур станка.

**Ключевые слова:** автоматизация, точность, контроль, технологический процесс, переход.

Received: 25 January 2025

Accepted: 15 June 2025

Available online: 30 June 2025