

УДК 621.9.08:681.5

## Система активного контроля для обрабатывающего центра

**И.В. Лазаренко, А.В. Федотов**

*Рассмотрены принципиальные решения системы активного контроля для обрабатывающего центра, предназначенной для стабилизации качества процесса механической обработки деталей. Приведена математическая модель обрабатываемого на станке комплекта в виде твердого тела, позволяющая на основе результатов координатных измерений объема обработки определить его линейные и угловые смещения из-за погрешностей обработки и базирования.*

**Ключевые слова:** активный контроль, гибкая производственная система, качество механической обработки, управление точностью обработки, измерительная головка.

## Active control system for machining center

**I.V. Lazarenko, A.V. Fedotov**

*The article considers the fundamental solution for the machining center active control, designed to stabilize the quality of the parts machining process. A mathematical model of the machined kit of parts in the form of a solid, allowing based on results of the object coordinates measurements to determine its linear and angular displacements due to errors in processing and locating is presented.*

**Keywords:** active control, flexible manufacturing system, quality of machining, process precision control, measuring head.

В машиностроении и металлообработке для обеспечения качества и конкурентоспособности продукции важную роль играют средства активного контроля геометрических параметров изготавливаемых деталей. В многономенклатурном механообрабатывающем производстве средства активного контроля должны обладать гибкостью и обеспечивать автоматическую программную переналадку при смене обрабатываемых деталей. Основным средством измерения размеров деталей при обработке на станках с ЧПУ являются «индикаторы контакта» — измерительные системы с измерительными головками. Локальное использование измерительной головки на станке с ЧПУ не обеспечивает весь комплекс функций автоматического активного контроля, необходимых при функционировании гибкого производственного модуля (ГПМ) в условиях безлюдной технологии. В то же время представляется возможным создание полнофункциональной системы активного контроля на базе измерительных головок, что требует, однако, разработки дополнительного аппаратного, математического и программного обеспечения [1].



**ЛАЗАРЕНКО**  
**Ирина Валерьевна**  
аспирант, старший преподаватель  
(Омский государственный технический университет)

**LAZARENKO**  
**Irina Valerievna**  
post-graduate, senior tutor  
(Omsk State Technical University)



**ФЕДОТОВ**  
**Алексей Васильевич**  
кандидат технических наук, доцент  
(Омский государственный технический университет)

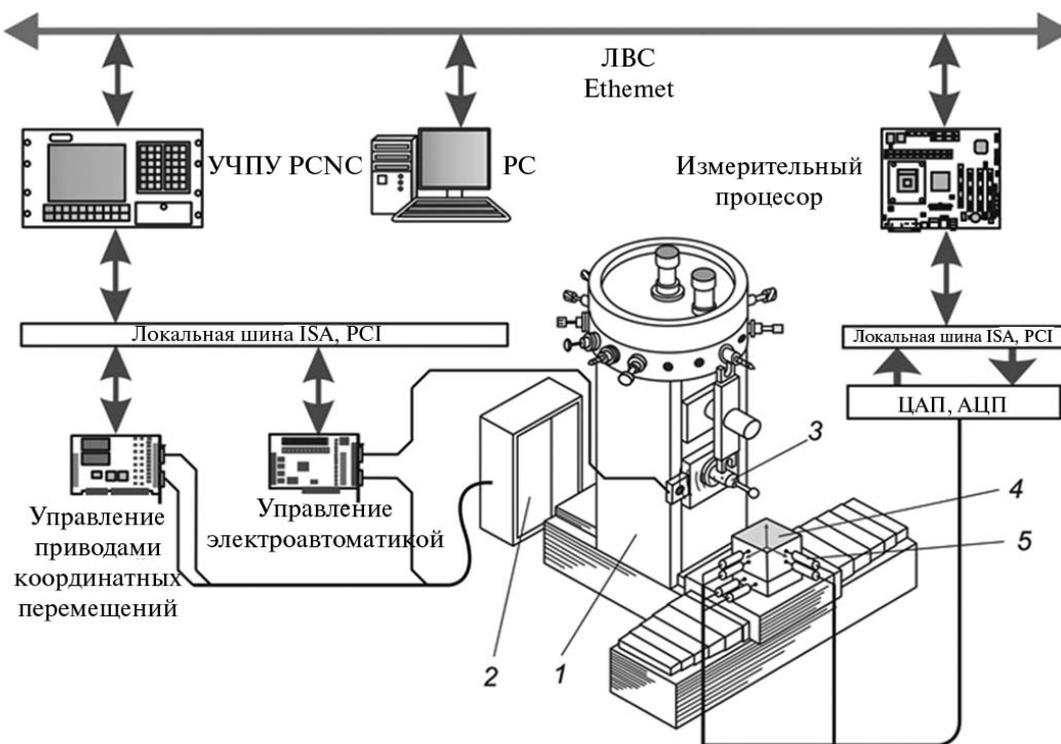
**FEDOTOV**  
**Aleksey Vasilievich**  
Candidate of Engineering Sciences, Assoc. Prof.  
(Omsk State Technical University)

Систему активного контроля для ГПМ на базе обрабатывающего центра (ОЦ) с системой ЧПУ класса PCNC, на наш взгляд, можно реализовать в соответствие со структурой, показанной на рисунке. Компьютерная система ЧПУ, оснащенная необходимыми интерфейсными средствами для связи с силовой электроникой и электроавтоматикой 2 станка 1, управляет рабочим циклом станка в соответствие с управляющей программой (УП). Управляющая программа включает измерительные циклы с использованием измерительной головки (ИГ) 3, в результате выполнения которых формируется измерительная информация, содержащая данные о координатах контрольных точек, выбранных на поверхности обрабатываемой детали или спутника с технологической оснасткой.

Обработка этой информации соответствующими алгоритмами позволяет выделить различные составляющие технологической погрешности обработки и определить необходимые корректирующие воздействия на технологический процесс для компенсации возникших погрешностей и стабилизации уровня настроенности технологического процесса [2].

Погрешности обработки можно разделить на линейные смещения поверхностей обрабатываемой детали в направлениях, параллельных осям системы координат станка, на повороты поверхностей относительно осей, параллельных осям координат станка, и на погрешности формы [3]. Компенсации в процессе обработки поддаются только первые две составляющие (частично) [4]. Компенсация линейных смещений возможна за счет коррекций управляющей программы. Для компенсации угловых смещений нужны прецизионные поворотные столы или дополнительные компенсирующие поворотные устройства.

В состав системы активного контроля введено корректирующее устройство 4, устанавливаемое на стол станка и обеспечивающее управляемые микроповороты вокруг осей, параллельных осям системы координат станка. Повороты вокруг осей управляются отдельно и для каждого поворота предусмотрен свой следящий привод 5 с датчиком угла поворота. Спутник с обрабатываемой деталью устанавливается на базовую плоскость корректирующего устройства 4.



Система активного контроля для ОЦ

Для обработки измерительной информации, вычисления корректирующих воздействий и управления корректирующим устройством используется измерительный процессор, реализованный на основе одноплатного встраиваемого PC-совместимого компьютера. При выполнении измерительных циклов устройство числового программного управления (УЧПУ) передает информацию о координатах контрольных точек и о базовых значениях этих координат измерительному процессору, который вычисляет составляющие технологической погрешности и необходимые для их компенсации корректирующие воздействия. Данные о линейных коррекциях передаются в УЧПУ и записываются в соответствующие корректоры. Они будут использованы при продолжении выполнения управляющей программы.

Угловые коррекции реализуются с использованием корректирующего устройства под непосредственным управлением измерительного процессора. Обмен информацией между УЧПУ и измерительным процессором может осуществляться как с использованием последовательного интерфейса, так и через локальные вычислительные сети (ЛВС). Эти средства обмена информацией являются стандартными для УЧПУ класса PCNC, и их использование не требует дополнительного обеспечения.

Корректирующее устройство должно обеспечивать точные микроповороты вокруг трех неподвижных взаимно перпендикулярных осей, параллельных осям системы координат станка. Принципиальные решения такого устройства получаются достаточно сложными, и его упрощение представляется актуальной задачей.

При моделировании процесса обработки на станке объект обработки (комплект заготовка-приспособление-спутник) будем рассматривать в качестве твердого тела. Задать положение тела в системе координат станка можно, связав с ним локальную систему координат. Совместим три взаимно перпендикулярные грани тела с координатными плоскостями локальной системы координат и зададим на этих гранях шесть контрольных точек  $K1(X1, Y1, Z1)$ ,  $K2(X2, Y2, Z2)$ , ...,  $K6(X6, Y6, Z6)$  [2].

Координаты контрольных точек задаются в системе координат станка. Для контрольных точек  $K1, K2, K3$  измеряются на станке в системе координат станка координаты  $Z1, Z2, Z3$ . Остальные координаты задаются при программировании процесса измерения. Соответственно, для контрольных точек  $K4$  и  $K5$  измеряются координаты  $Y4$  и  $Y5$ , а для контрольной точки  $K6$  — координата  $X6$ .

Координаты контрольной точки  $K$  тела в его базовом положении

$$K = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}.$$

После смещения тела вследствие погрешности базирования или обработки эта точка в неподвижной системе координат будет иметь новые координаты, которые определяются матрицей

$$K_1 = MLK,$$

где  $L$  — матрица  $4 \times 4$  линейных сдвигов;  $M$  — матрица  $4 \times 4$  направляющих косинусов, учитывающих углы поворотов тела вокруг неподвижных осей координат.

Матрицу  $M$  направляющих косинусов при описании координат контрольных точек можно выразить через элементарные повороты тела вокруг осей неподвижной системы координат (при этом имеет значение последовательность этих поворотов). Так, для последовательности поворотов  $\psi(OZ) - \varphi(OY) - \theta(OX)$  получим матрицу

$$M_{\text{звх}} = (\cos \varphi \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi \sin \theta \sin \varphi \cos \psi + \cos \theta \sin \psi - \sin \theta \sin \psi \cos \theta \sin).$$

Учет линейных сдвигов тела вдоль осей неподвижной системы координат на величины  $X_0, Y_0, Z_0$  произведем, используя матрицу переноса начала локальной системы координат тела в неподвижной системе координат станка:

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

На основе результатов измерения вычисляется фактическое положение тела в системе координат станка. Повороты системы координат тела вокруг координатных осей станка:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{a_1}{k_1}\right), \quad \psi = \arcsin\left(\frac{b_1}{\sqrt{k_1^2 - a_1^2}}\right),$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c_2}{k_2 \frac{\sqrt{k_1^2 - a_1^2}}{k_1}}\right);$$

смещение начала системы координат тела в системе координат станка:

$$X_0 = -(d_1 b_2 c_3 - d_1 c_2 b_3 - d_2 b_1 c_3 + d_2 c_1 b_3 + d_3 b_1 c_2 - d_3 c_1 b_2) / (a_1 b_2 c_3 - a_1 c_2 b_3 - a_2 b_1 c_3 + a_2 c_1 b_3 + a_3 b_1 c_2 - a_3 c_1 b_2),$$

$$Y_0 = -(a_1 d_2 c_3 - a_1 c_2 d_3 - a_2 d_1 c_3 + a_2 c_1 d_3 + a_3 d_1 c_2 - a_3 c_1 d_2) / (a_1 b_2 c_3 - a_1 c_2 b_3 - a_2 b_1 c_3 + a_2 c_1 b_3 + a_3 b_1 c_2 - a_3 c_1 b_2),$$

$$Z_0 = -(a_1 b_2 d_3 - a_1 d_2 b_3 - a_2 b_1 d_3 + a_2 d_1 b_3 + a_3 b_1 d_2 - a_3 d_1 b_2) / (a_1 b_2 c_3 - a_1 c_2 b_3 - a_2 b_1 c_3 + a_2 c_1 b_3 + a_3 b_1 c_2 - a_3 c_1 b_2),$$

где  $X_0, Y_0, Z_0$  — координаты начала системы координат тела в системе координат станка (начало координат  $O_T(X_0, Y_0, Z_0)$ );  $\psi$  — угол поворота тела вокруг оси  $OZ$ ;  $\varphi$  — угол поворота тела вокруг оси  $OY$ ;  $\theta$  — угол поворота тела вокруг оси  $OX$ , последовательность поворотов фиксирована и соответствует порядку перечисления углов:

$$a_1 = Y_2 Z_3 - Y_2 Z_1 - Y_1 Z_3 - Z_2 Y_3 + Z_2 Y_1 + Z_1 Y_3,$$

$$b_1 = X_1 Z_3 - X_1 Z_2 + Z_1 X_2 - X_2 Z_3 - Z_1 X_3 + X_3 Z_2,$$

$$c_1 = X_2 Y_3 - X_1 Y_3 - Y_1 X_2 - X_3 Y_2 + Y_1 X_3 + X_1 Y_2,$$

$$d_1 = -X_1 Y_2 Z_3 - X_3 Z_2 Y_1 + X_3 Y_2 Z_1 + X_2 Y_1 Z_3 + X_1 Z_2 Y_3 - X_2 Z_1 Y_3,$$

$$a_2 = c_1 Y_5 - c_1 Y_4 - b_1 Z_5 + b_1 Z_4,$$

$$b_2 = -X_5 c_1 + X_4 c_1 - a_1 Z_4 + a_1 Z_5,$$

$$c_2 = -X_4 b_1 + X_5 b_1 - a_1 Y_5 + a_1 Y_4,$$

$$d_2 = a_1 Z_4 Y_5 + X_4 b_1 Z_5 + X_5 c_1 Y_4 - X_4 c_1 Y_5 - X_5 b_1 Z_4 - a_1 Y_4 Z_5,$$

$$a_3 = b_1 c_2 - c_1 b_2,$$

$$b_3 = -a_1 c_2 + a_2 c_1,$$

$$c_3 = a_1 b_2 - a_2 b_1,$$

$$d_3 = -a_2 c_1 Y_6 + a_1 c_2 Y_6 - X_6 b_1 c_2 + X_6 c_1 b_2 + a_2 b_1 Z_6 - a_1 b_2 Z_6,$$

$$k_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2},$$

$$k_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}.$$

При программировании обработки на станке исходят из расчетного положения тела в системе координат станка, которое известно и задается положением его системы координат  $X_{от}, Y_{от}, Z_{от}, \theta_T, \varphi_T, \psi_T$ . Погрешности базирования и обработки вызывают отклонение положения тела от расчетного. Для компенсации возникающих отклонений в процессе дальнейшей обработки необходимо на расчетные значения сместить тело в системе координат станка. Корректирующие смещения определяются из следующих соотношений

$$X_K = X_{от} - X_0; \quad Y_K = Y_{от} - Y_0; \quad Z_K = Z_{от} - Z_0,$$

$$\theta_K = \theta_T - \theta; \quad \varphi_K = \varphi_T - \varphi; \quad \psi_K = \psi_T - \psi.$$

Рассмотренная модель определяет алгоритм обработки измерительной информации измерительным процессором. Результат обработки используется для корректирующих поворотов корректирующего устройства и для записи в корректоры УЧПУ.

При реализации системы активного контроля значительную сложность представляет корректирующее устройство. Его упрощение возможно за счет сокращения числа осей поворотов. Если использовать для описания угловых смещений тела углы Эйлера, то вместо трех осей поворота достаточно будет двух осей, и конструкция устройства упростится.

Положение системы координат тела в системе координат станка с использованием углов Эйлера определится через углы:

$\alpha$  — угол прецессии между осью  $OX$  и линией узлов (линией пересечения расчетной и фактической координатных плоскостей  $XOY$ ). Угол отсчитывается в направлении от  $OX$  к  $OY$  ( $0 \leq \alpha < 2\pi$ );

$\beta$  — угол нутации между положительными направлениями расчетной и фактической осей  $OZ$  ( $0 \leq \beta < \pi$ );

$\gamma$  — угол чистого вращения между линией узлов и смещенной осью  $OX$ , ( $0 \leq \gamma < 2\pi$ ).

Матрица поворотов системы координат тела на углы Эйлера в последовательности  $Z(\alpha)$ ,  $X(\beta)$ ,  $Z(\gamma)$  имеет вид

$$M_1 = (\cos\varphi\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi\sin\theta\sin\varphi\cos\psi + \cos\theta\sin\psi - \sin\theta\sin\psi\cos\theta\sin).$$

Для расчета углов Эйлера можно использовать соотношение

$$M_{zx} = M_1,$$

позволяющее составить систему уравнений, решениями которой будут искомые углы

$$\alpha = f(\theta, \varphi, \psi); \beta = f(\theta, \varphi, \psi); \gamma = f(\theta, \varphi, \psi).$$

При построении системы активного контроля на базе измерительной головки такая система интегрируется с системой ЧПУ станка, поскольку последняя управляет измерительными циклами и обеспечивает выдачу информации о координатах контрольных точек в процессе измерений. Предлагаемая система активного контроля при реализации позволит автоматически поддерживать уровень настроенности станка с ЧПУ в составе гибкого производственного модуля за счет оперативной компенсации существенных составляющих погрешностей обработки и базирования обрабатываемого комплекта.

#### Литература

1. Федотов А.В., Лазаренко И.В. Особенности активного контроля в гибких производственных системах для механической обработки // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 21—24.
2. Хомченко В.Г., Федотов А.В. Автоматический контроль в механообрабатывающих ГПС. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 160 с.
3. Лазаренко И.В., Федотов А.В. Оценка возможности компенсации погрешностей механической обработки при фрезеровании грани детали на станке с ЧПУ // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2010. № 3(93). С. 67—70.
4. Федотов А.В. Автоматический контроль размеров деталей при обработке в гибких производственных модулях // Тр. VIII Всероссийской науч.-практ. конф. «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» / под ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева; Сиб. гос. индустр. ун-т. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2011. С. 224—230.

#### References

1. Fedotov A.V., Lazarenko I.V. Osobennosti aktivnogo kontrolya v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh dlia mekhanicheskoi obrabotki [Features active control of flexible manufacturing systems for machining]. *Izmeritel'naia tekhnika*, 2011, no. 7, pp. 21—24.
2. Khomchenko V.G., Fedotov A.V. *Avtomaticheskii kontrol' v mekhanooobratyvaiushchikh GPS* [Automatic control of the machining GPS.]. Omsk, OmSTU Publ., 2010. 160 p.
3. Lazarenko I.V., Fedotov A.V. Otsenka vozmozhnosti kompensatsii pogreshnostei mekhanicheskoi obrabotki pri frezerovanii grani detali na stanke s ChPU [Assessing the possibility of error compensation in milling machining parts verge on CNC]. *Omskii nauchnyi vestnik. Ser. Pribory, mashiny i tekhnologii*, 2010, no. 3(93), pp. 67—70.
4. Fedotov A.V. Avtomaticheskii kontrol' razmerov detalei pri obrabotke v gibkikh proizvodstvennykh moduliakh [Automatic control of the dimensions of the parts processing in a flexible manufacturing cell ]. *Trudy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sistemy avtomatizatsii v obrazovanii, nauke i proizvodstve»* [Proceedings of the VIII All-Russian scientific-practical conference «Automation in education, science and industry»]. Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2011, pp. 224—230.

Статья поступила в редакцию 23.09.2012

#### Информация об авторах

ЛАЗАРЕНКО Ирина Валерьевна (Омск) — аспирант, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и робототехника». Омский государственный технический университет (Россия, 644050, Омск, Пр. Мира, д. 11).

ФЕДОТОВ Алексей Васильевич (Омск) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и робототехника». Омский государственный технический университет (Россия, 644050, Омск, Пр. Мира, д. 11, e-mail: avfedotov@mail.ru).

#### Information about the authors

LAZARENKO Irina Valerievna (Omsk) — post-graduate, senior tutor «Automation and Robotics» Department. Omsk State Technical University (pr. Mira 11, Omsk, 644050, Russian Federation).

FEDOTOV Aleksey Vasilievich (Omsk) — Candidate of Engineering Sciences, Assoc. Prof. «Automation and Robotics» Department. Omsk State Technical University (pr. Mira 11, Omsk, 644050, Russian Federation, e-mail: avfedotov@mail.ru).