

3. *Martinov G.M., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A., Grigoriev A.S., Obukhov A.I., Martinova L.I.* Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems // Automation and Remote Control. March 2017, Vol. 78, Issue 3, pp 525-536.
4. *Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л., Евстафьева С.В., Мартинова Л.И.* Построение специализированной системы ЧПУ для многокоординатных токарно-фрезерных обрабатывающих центров // Автоматизация в промышленности. 2014. № 6. С. 25-28.
5. *Grigoriev S. and Martinov G.* An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines. Procedia CIRP, 46, 2016, pp.525-528.
6. *Martinova L.I., Fokin N.N.* An approach to creation of a unified system of programming CNC machines in the dialog mode. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018. pp.1-5.
7. *Мартинова Л.И., Фокин Н.Н.* Исследование и разработка унифицированного средства генерации управляющих программ. В сб.: Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2017) Тр. XVII международной научно-практической конференции. Под ред. А.В. Толока, ИПУ РАН. 2017. С. 361-363.
8. *Pushkov R., Salamatin E., Evstafieva S.* Method of developing parametric machine cycles for modern CNC systems using high-level language. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, 2018. Pp.1-7.
9. *Martinova L.I., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A., Pushkov R.L., Obukhov A.I.* The russian multi-functional CNC system AxiOMA control: practical aspects of application. Automation and Remote Control. 2015. T. 76. № 1. С. 179-186.
10. *Martinov G.M., Stas A.V., Kudinov O.A.* The approach of creating a particular postprocessor and using CNC measuring cycles. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, 2018. Pp.1-7.

*Мартинова Лилия Ивановна – канд. техн. наук, доцент,  
Фокин Николай Николаевич – аспирант ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»,  
Контактный телефон (499) 972-94-40,  
E-mail: e-mail@ncsystems.ru*

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ УСТАНОВКИ ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

**Л.И. Мартинова, Н.В. Козак, А.В. Стась (МГТУ «СТАНКИН»)**

*Представлен анализ погрешностей, определяемых циклом контроля положения заготовок. Описан процесс измерения точности положения заготовки на станке с ЧПУ. Разработана методика использования цикла контроля положения заготовок и добавления новых пользовательских элементов. Продемонстрировано применение в управляющей программе цикла определения и контроля положения заготовок на столе станка с ЧПУ<sup>1</sup>.*

*Ключевые слова: система ЧПУ, контроль положения заготовок, определение положения заготовок, измерительные циклы, алгоритм цикла, математическая модель цикла, пользовательский экран цикла.*

Сегодня акцент делается на создание безлюдных и малолюдных промышленных производств. В связи с этим в процессе выполнения последовательности технологических операций актуальной задачей является точность автоматической установки заготовки на станок с ЧПУ [1–3]. При изготовлении деталей требуется контроль реального положения заготовки в системе координат станка, а в случае необходимости также возможность компенсации погрешностей, возникших при базировании и закреплении заготовки.

Определение положения и контроль точности установки заготовок на станках с ЧПУ осуществляется с применением специальных измерительных циклов, по результатам которых выполняется реальная переустановка или виртуальная коррекция положения заготовки [4]. В целях импортозамещения и расширения функциональных возможностей отечественных систем управления осуществляется разработка

измерительных циклов для определения положения и контроля точности установки заготовок в рамках отечественной системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» [5].

### Погрешности, определяемые циклом контроля положения заготовок

При использовании цикла контроля положения заготовок на столе станка следует учитывать различные виды погрешностей. Их можно разделить на компенсируемые и некомпенсируемые (рис. 1). Цикл контроля положения заготовки определяет погрешности ее установки на столе станка, данные о которых используются для корректировок в управляющей программе ЧПУ. В структуру компенсируемых погрешностей входят погрешности приводов станка и калибровки шупа. Данные об этих погрешностях должны определяться заранее и использоваться при контроле положения заготовок.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения Госзадания (№ 2.1237.2017/4.6) и проводилось с использованием оборудования, предоставленного центром коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН».

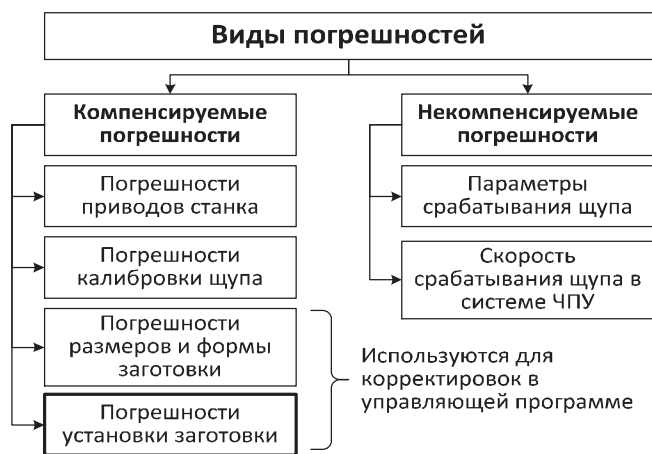


Рис. 1. Виды погрешностей

К некомпенсированным относятся погрешности, возникающие в процессе выполнения измерений, например, задержка передачи координат срабатывания щупа в систему ЧПУ и скорость срабатывания щупа (скорость передачи сигнала о срабатывании щупа и его регистрация в системе ЧПУ).

**Коррекция погрешностей перед контролем положения заготовки**

Погрешности приводов подачи и геометрических параметров измерительного щупа, как и некомпенсированные погрешности, являются характеристиками самой измерительной системы [6], то есть зависят от ее конструктивных особенностей, кинематики, компоновки исполнительных органов, жесткости конструкций и т. п.

Погрешности приводов подачи — это зазоры или люфты в передаче, погрешность шага винта, отклонение от прямолинейности направляющих, отклонения в соосности и т.п. Они определяются при помощи лазерного интерферометра, после чего их значения заносятся в специальную таблицу погрешностей системы ЧПУ, и далее они автоматически учитываются при выполнении цикла.

Погрешности геометрических параметров измерительного щупа — это отклонение положения оси измерительного щупа от оси шпинделя, радиус шарика измерительного щупа и длина щупа. Эти параметры определяются при помощи циклов калибровки. Рассчитанные системой ЧПУ погрешности калибровки щупа записываются в память ЧПУ (сохраняемые системные переменные) и автоматически учитываются при выполнении цикла контроля положения заготовки.

В различных системах ЧПУ присутствует свой набор циклов калибровки, который в основном состоит из определения: реального радиуса шарика щупа, реальной длины щупа и величины отклонения оси щупа от оси шпинделя.

В системе ЧПУ «АксиОМА Контроль» также реализован набор калибровочных циклов [7]:

- определение отклонения оси шпинделя от оси щупа по осям  $X$  и  $Y$ . Этот параметр бывает, как положительным, так и отрицательным;
- определение радиуса в положительном и отрицательном направлении вдоль осей  $X, Y$ ;
- определение реальной длины щупа.

Измеренные и рассчитанные значения погрешностей щупа записываются в сохраняемые системные переменные ЧПУ и учитываются при проведении последующих измерений заготовки.

**Погрешности, определяемые перед обработкой заготовки**

Погрешности установки заготовки — определяют при помощи цикла контроля положения заготовки на столе станка с ЧПУ. При этом определяется вектор погрешностей, параметры которого вводятся в таблицу смещения системы координат детали и автоматически учитываются при дальнейшей обработке заготовки.

Погрешности размеров и формы заготовки определяются специализированными циклами для более точного определения параметров заготовки с целью соблюдения параметров обработки. Например, если плоскость обработки имеет выпуклую форму, то для постоянства толщины снимаемого слоя необходима корректировка начальной точки обработки по высоте (от обрабатываемой плоскости) на величину этой выпуклости.

**Измерение точности положения заготовки на столе станка с ЧПУ с использованием циклов**

Цикл контроля положения заготовки используется для определения отклонения положения заготовки относительно системы координат, в которой осуществляется установка заготовки. Обычно эта система координат привязана к вспомогательным базам приспособления, в котором устанавливается и закрепляется заготовка.

Будем рассматривать процесс установки заготовки на станок как совмещение координатной системы  $OXYZ$ , связанной с технологическими базами детали, с координатной системой  $oxyz$ , связанной с исполнительными поверхностями (вспомогательными базами) приспособления (или стола станка). В этом случае погрешность установки будет определяться смещением и поворотом координатной системы  $OXYZ$  детали относительно координатной системы  $oxyz$  приспособления (или стола станка) (рис. 2).

В общем случае погрешность установки заготовки на станке может быть представлена в виде [8]:

$$\omega = (x, y, z, \phi, \theta, \psi), \tag{1}$$

где  $x, y, z$  — параметры смещений координатной системы заготовки ( $OXYZ$ ) относительно координатной системы приспособления или станка ( $oxyz$ );  $\phi, \theta, \psi$  — параметры поворота системы

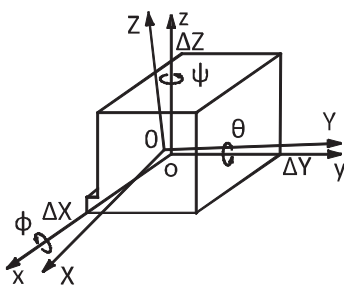


Рис. 2. Схема формирования погрешности

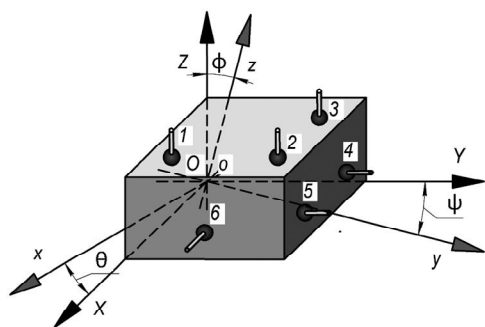


Рис. 3. Контрольные точки измерений и элементы вектора погрешностей

OXYZ заготовки относительно осей координатной системы oxuz приспособления (станка).

При разработке технологической операции, выполняемой на станке с ЧПУ, система координат заготовки (детали), в которой программируются все перемещения обрабатывающего инструмента, чаще привязывается не к технологическим базам, а к тем поверхностям (или осям), положение которых можно определить с помощью измерительного щупа при настройке технологической системы. Таким образом, нулевая точка детали “0” и соответственно система координат детали обычно привязывается к одному из углов детали либо к точке пересечения оси отверстия (или, наоборот, цилиндрического или прямоугольного выступа) и его торца. Для исключения погрешности установки каждой последующей заготовки на станке необходимо их контролировать и компенсировать, что выполняется с помощью специальных измерительных циклов [9].

В системе ЧПУ «АксиОМА Контроль» циклы контроля положения заготовок используются для определения реального положения (наличия или отсутствия сдвига или поворота) заготовки относительно осей системы

Таблица. Входные/выходные параметры цикла определения и контроля положения заготовок

№	Параметр	Описание параметра
<b>Входные параметры</b>		
1.	Рабочая плоскость	Выбор плоскости, параллельно которой расположена установочная плоскость (G17 (XY), G18 (XZ), G19 (YZ))
2.	Плоскость	Выбор плоскости для определения количества точек обмера (установочная (три точки), направляющая (две точки) или опорная (одна точка))
3.	Номер инструмента	Позиция щупа в барабане
4.	Безопасная высота	Высота над заготовкой
5.	Скорость подачи	Скорость подачи
6.	Перебег	Величина перебега
7.	X1-X6, Y1-Y6, Z1-Z6	Заданные значения координат 6 точек обмера
<b>Выходные параметры</b>		
1.	X1-X6, Y1-Y6, Z1-Z6	Реальные значения координат шести точек обмера
2.	X, Y, Z	Смещение заготовки вдоль осей OX, OY, OZ
3.	φ, θ, ψ	Значения углов поворота заготовки относительно осей станка

координат станка и при необходимости коррекции ее положения. Определение реального положения заготовки на станке предусматривает три этапа: 1) обмер в плоскости, параллельной плоскости установочной базы, — измеряются координаты трех точек, 2) обмер в плоскости, параллельной плоскости направляющей базы, — координаты двух точек, 3) обмер в плоскости, параллельной плоскости опорной базы, — измеряются координаты одной точки (рис. 3). Далее, имея координаты шести точек заготовки, можно определить реальное положение заготовки в системе координат станка и при необходимости осуществить коррекцию.

В отличие от более ранней публикации [10] углы φ, θ и ψ показывают поворот заготовки соответственно в плоскостях YOZ, XOZ и XOY.

Ниже представлено выполнение описанных действий при помощи разработанных измерительных циклов, входящие в цикл контроля положения заготовок на столе станка с ЧПУ.

**Цикл обмера параллельно установочной плоскости**

1-й цикл — обмер параллельно установочной плоскости (в большинстве случаев это плоскость XOY). Обмер проводится параллельно этой плоскости, то есть в данном случае вдоль оси OZ, в трех точках на поверхности заготовки. При этом определяется сдвиг заготовки вдоль оси OZ (параметр Z в векторе погрешностей), а также поворот вокруг осей OX (параметр φ — угол в плоскости YOZ) и OY (параметр θ — угол в плоскости XOZ). Для расчета этих параметров используют следующую матрицу [9]:

$$\begin{bmatrix} Z \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} (X2Y3 - X2Y3) & (Y1X3 - Y3X1) & (Y2X1 - Y1X2) \\ (Y3 - Y2) & (Y1 - Y3) & (Y2 - Y1) \\ (X3 - X2) & (X1 - X3) & (X2 - X1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z11 \\ Z22 \\ Z33 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3 — координаты точек относительно осей OX и OY, — величины смещения положения заготовки относительно оси OZ, вычисляются после обмера точек 1–3, C — определитель системы.

**Цикл обмера параллельно направляющей плоскости**

2-й цикл — обмер параллельно направляющей плоскости (в статье установочная плоскость размещается параллельно плоскости XOZ). Обмер проводится в двух точках (точки 4 и 5), при этом определяется сдвиг относительно оси OY (Y) и угол поворота вокруг оси OZ (параметр ψ — угол в плоскости XOY).

Составляющие вектора погрешностей установки по направляющей базе вычисляются по формуле [9]:

$$\begin{bmatrix} Y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X5 & X4 \\ X5 - X4 & X5 - X4 \\ 1 & 1 \\ X5 - X4 & X5 - X4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y44 \\ Y55 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где X4, X5 — координаты контрольных точек относительно оси OX; Y44,

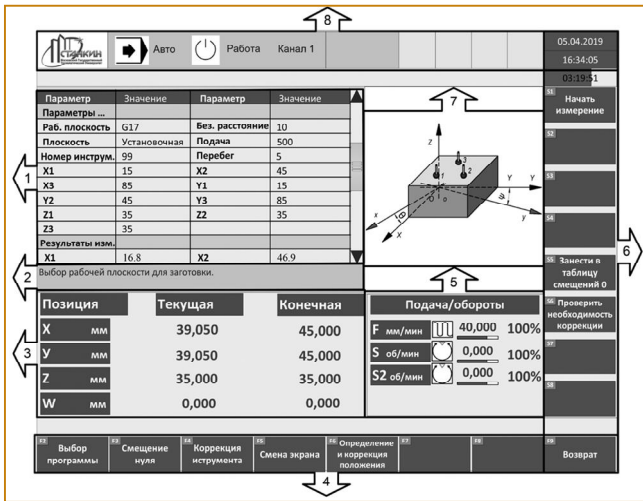


Рис. 4. Эскиз экрана оператора для цикла обмера точек на поверхности заготовки

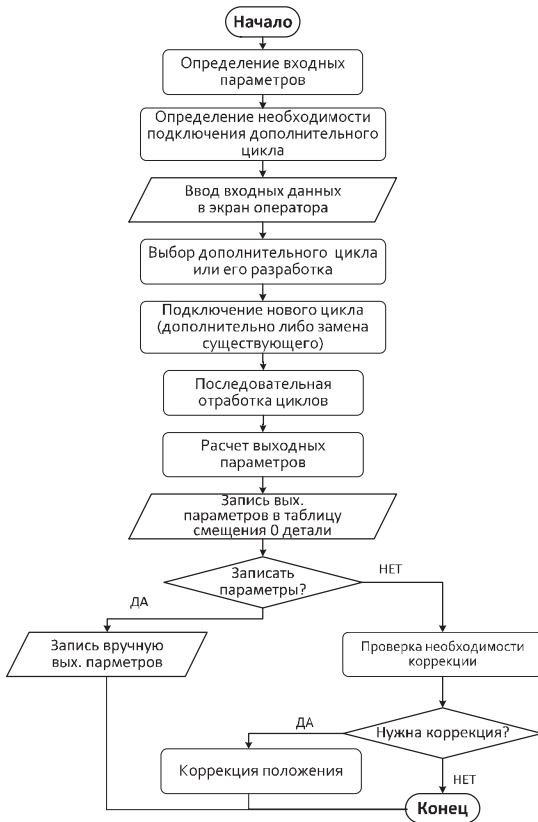


Рис. 5. Методика внесения новых элементов в цикл определения положения заготовки

У55 — смещения положения заготовки относительно оси ОУ, которые вычисляются после обмера точек 4, 5.

**Цикл обмера параллельно опорной плоскости**

3-й цикл — обмер параллельно опорной плоскости (в статье опорная плоскость размещается параллельно плоскости YZ). Обмер проводится в точке 6, при этом определяется сдвиг относительно оси ОХ (параметр Х). Для опорной базы используется формула [8]:

$$X = X66, \tag{4}$$

где X66 — величина отклонения положения заготовки относительно оси ОХ, которая вычисляется после обмера точки 6 [7].

В общем случае, когда надо узнать погрешности при сдвигах и поворотах вокруг всех осей (то есть полный вектор погрешностей), используют все три цикла.

После определения координат точек касания, эти значения заносятся в ячейки памяти системы ЧПУ, и рассчитывается вектор погрешности. После его расчета данные автоматически заносятся в строку таблицы смещений нулевой точки заготовки.

Далее, исходя из заданной максимально допустимой погрешности, определяется необходимость коррекции положения заготовки. При ее необходимости используются значения, находящиеся в таблице смещения 0 детали для коррекции управляющей программы.

Итак, измерительный цикл определения и контроля положения заготовки предусматривает три этапа:

- 1) вызов цикла для обмера точек на поверхности заготовки;
- 2) расчет вектора погрешностей по результатам измерений;
- 3) принятие решения о необходимости коррекции положения заготовки и дальнейшая коррекция в ходе выполнения обработки.

**Разработка интерфейса цикла определения и контроля положения заготовки на столе станка с ЧПУ**

Для цикла определения и контроля положения заготовки используются следующие входные/выходные параметры (таблица). Отметим, что во входных параметрах нет необходимости задавать габариты детали, поскольку их можно узнать по заданным значениям координат точек обмера. Например, параметр Z1 будет определять высоту, Y4 — длину, а X6 — ширину заготовки.

Концепция экрана оператора для цикла определения и контроля положения заготовки на станке разработана с применением программы Microsoft Visio. Экран оператора представлен на рис. 4.

Экран оператора включает: 1 — кнопки задания и отображения входных/выходных параметров, 2 — пояснение к параметрам, 3 — отображение текущей и конечной позиции по осям, 4 — управляющие F-клавиши, 5 — информацию о текущей скорости подачи (F) и оборотах шпинделей (S, S2), 6-управляющие S-клавиши, 7 — визуализацию цикла, 8 — выбранный режим работы, активный канал, время работы и т. д. [7].

**Методика использования цикла контроля положения заготовки и добавления новых пользовательских элементов**

Представленные циклы демонстрируют способ выполнения контроля в автоматическом режиме, как видно, он является составным. Технология контроля может предусматривать и другие варианты обмера (например, существует способ обмера угла поворота и смещения не по двум точкам, а по центрам двух от-

верстий) [8], для таких случаев предусмотрен вариант подключения новых (пользовательских) циклов.

Данная методика включает следующие этапы (рис. 5).

1. Определяются входные данные: тип заготовки, способ ее обмера (по точкам, центрам отверстий и т. д.), число неизвестных элементов (повороты и сдвиги вокруг осей, которые необходимо контролировать), тип плоскостей (установочная, направляющая или опорная) и т. д.

2. Определяется необходимость использования дополнительных измерительных циклов.

3. Записываются входные данные цикла контроля положения в окне оператора.

4. Выбирается дополнительный измерительный цикл (существующий в системе ЧПУ либо разработанный самим пользователем).

5. Заменяется один или несколько циклов, существующих в данном наборе на новый либо новый используется дополнительно.

6. Выполняется последовательная отработка всех циклов.

7. Рассчитываются выходные параметры и автоматически заносятся в таблицу смещения нулевой детали.

8. Выполняется проверка записи всех рассчитанных параметров, если выходные параметры после отработки дополнительного цикла не записались, их нужно ввести в таблицу вручную.

9. Выполняется проверка необходимости коррекции, при необходимости проводится коррекция положения заготовки.

#### Применение в управляющей программе цикла определения и контроля положения заготовок на столе станка с ЧПУ

После обмера рассчитанные измерительным циклом параметры вектора погрешностей записываются в соответствующие ячейки памяти в таблице положения системы координат детали СЧПУ «АксиОМА Контроль».

Далее, корректируется положение системы координат детали с помощью функции G154, вставляя кадр (G154 P2) в управляющую программу. Значение положения системы координат находятся на странице P2 в окне «Смещение нуля» в таблице положения системы координат детали (см. листинг).

#### Заключение

Автоматизация контроля положения заготовок на столе станка с ЧПУ позволяет повысить эффективность и точность ее обработки, а также свести к минимуму время контроля и снизить влияние чело-

```
// Строка безопасности
G00 G15 G17 G40 G49 G53 G71 G80
G90 G94 G97 G153 G191 G193
// Коррекция положения (данные о
коррекции из ячейки 154 страницы 2)
G154 P2
N10 G17 T3 M6 G00 X0 Y0
N20 G1 Y50 F1500
N30 G2 X0 Y50 I0 J-50
N40 G1 X0 Y0
...
```

Листинг программы

веческого фактора. Сегодня многие лидеры в области систем ЧПУ разрабатывают программное обеспечение для контроля заготовок и деталей на станках, однако, эти циклы зачастую являются закрытым продуктом и бывают недостаточно гибкими для решения всех задач конечного пользователя. В связи с этим в рамках создания отечественной системы ЧПУ «АксиОМА

Контроль» ведется разработка набора измерительных циклов, включая и циклы определения и контроля положения заготовок на станках с ЧПУ, которые являются расширяемым программным приложением.

#### Список литературы

1. *Martynova L. and Martinov, G.* Automation of Machine-Building Production According to Industry 4.0. In: 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. 2018. Vladivostok, pp.1 - 4.
2. *Roman Pushkov, Evgeniy Salamatin, Svelilana Evstafieva* (2018). Method of developing parametric machine cycles for modern CNC systems using high-level language. In: MATEC Web Conf. Vol. 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). 2018. pp.1-7.
3. *Григорьев С.Н., Кутин А.А., Долгов В.А.* Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ Станкин. 2014. № 4 (31). С. 10-15.
4. *Мартинова Л.И., Стась А.В., Григорьев А.С., Бабин М.С.* Автоматизация операционного контроля на фрезерных станках с ЧПУ // Автоматизация в промышленности. 2017. №5. с.33-36
5. *Мартинов Г.М., Мартинова Л.И.* Формирование базовой вычислительной платформы ЧПУ для построения специализированных систем управления // Вестник МГТУ Станкин. 2014. С. 92-97.
6. *Martynov G. and Martinova L.* Trends in the numerical control of machine-tool systems // Russian Engineering Research. (2010). 30(10), pp.1041-1045.
7. *Мартинова Л.И., Стась А.В.* Исследование и разработка автоматического цикла контроля положения заготовок на станках с ЧПУ // Тр. XVII-ой междунар. научно-практич. конф. "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2017). ИПУ РАН. с.63-67.
8. *Баранчукова И.М., Гусев А.А., Крамаренко Ю.Б. и др.* Проектирование технологии. Учебник для машиностроительных специальностей вузов Под общ. ред. Ю.М.Соломенцева М.: Машиностроение, 1990. 354-359 с.
9. *Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Григорьев А.С.* Специфика разработки программного обеспечения для систем управления технологическим оборудованием в реальном времени. T-Comm // Телекоммуникации и транспорт. 2009. № S2. С. 121-124.
10. *Мартинова Л.И., Стась А.В., Кудинов О.А.* Автоматизация определения и контроля положения заготовки при ее обработке на станке с ЧПУ// Автоматизация в промышленности, №5. 2018. с.26-30.

*Мартинова Лилия Ивановна — канд. техн. наук, доцент, канд. техн. наук, доцент,*

*Козак Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент,*

*Стась Анна Владимировна — инженер ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».*

*Контактный телефон (499) 972-94-40,*

*E-mail: kozak@ncsystems.ru*