

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЕЕ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКЕ С ЧПУ

Л.И. Мартинова, А.В. Стась, О.А. Кудинов (МГТУ «СТАНКИН»)

*Проведен анализ погрешностей установки призматической заготовки на столе станка с ЧПУ. Представлена методика создания измерительного цикла определения положения заготовки на столе станка с ЧПУ. Показана разработка данного цикла по методике, включающей разработку математической модели, блок-схемы, управляющей программы и экрана оператора. Проведены испытания цикла для коррекции положения заготовки с последующей обработкой детали<sup>1</sup>.*

*Ключевые слова:* система ЧПУ, измерительные циклы, операционный контроль, определение положения заготовки, контроль положения заготовки, математическая модель цикла, блок-схема цикла, методика разработки цикла.

В связи с постоянным развитием малолюдных и безлюдных технологий остро стоит проблема автоматизации вспомогательных технологических операций, среди которых и автоматическая оценка фактического положения заготовки на станке с ЧПУ с целью компенсации погрешностей, формируемых на этапе ее установки и закрепления [1, 2].

Для автоматического определения реального положения заготовки используются специальные измерительные циклы, которые реализуются с применением измерительных щупов, позволяющих выявить и компенсировать погрешности путем реальной или виртуальной коррекции положения заготовки на столе станка с ЧПУ или коррекции управляющей программы по ее обработке [3, 4].

### Анализ погрешностей установки заготовки на столе с ЧПУ

Погрешности, возникающие в процессе обработки заготовок, бывают случайными и систематическими. Систематические погрешности остаются постоянными или изменяются закономерно для всех заготовок из партии. Причинами их возникновения являются: погрешности, износ и деформация станков; погрешности приспособлений; погрешности и износ инструмента; температурные факторы.

Случайные погрешности характеризуются отсутствием закономерностей. Причинами их возникновения являются: погрешности, возникающие при базировании и закреплении заготовки в приспособлении; деформация технологической системы, колебания припуска и твердости заготовки; погрешности установки инструмента; погрешности измерений и т. д.

Погрешность установки заготовок на станках и в приспособлениях определяется суммой погрешностей базирования и закрепления.

Погрешность базирования — погрешность, возникающая из-за погрешностей формы и расположения базовых поверхностей и несовпадения измерительной и установочной баз.

Причиной возникновения погрешности закрепления является смещение заготовки под действием сил зажима. Смещение происходит из-за деформаций

компонентов системы: заготовка — установочные элементы — корпус приспособления. При обработке векторы погрешности закрепления и базирования считаются коллинеарными.

Если заготовка базируется непосредственно на столе станка, рассматриваются только смещение и поворот системы координат заготовки относительно системы координат станка. Если заготовка базируется в приспособлении, то смещение и поворот системы координат заготовки в системе координат станка определяются суммой смещений и поворотов основных баз приспособления в координатной системе станка и системы координат заготовки в системе вспомогательных баз приспособления. В этом наиболее общем случае погрешность базирования заготовки определяется вектором  $\varepsilon_C$  смещений и вектором  $\sigma(\varphi, \psi, \theta)$  поворотов.

При этом вектор смещений можно представить суммой вектора смещений приспособления относительно системы координат станка и вектора смещения заготовки относительно системы координат приспособления [5].

### Методика разработки измерительного цикла определения и контроля положения заготовок на столе станка с ЧПУ

Разработка цикла определения и контроля положения заготовки состоит из шести основных этапов: создание математической модели, разработка алгоритма цикла, создание управляющей программы на основе блок-схемы, разработка пользовательского экрана, тестирование на эмуляторе системы ЧПУ и тестирование на станке с системой ЧПУ (рис. 1).

При разработке математической модели цикла определяются цели и задачи, контролируемые параметры, выбирается математический аппарат, на базе которого создается математическая модель цикла.

При разработке алгоритма цикла определяются входные/выходные параметры, задаются их ограничения, разрабатывается последовательность действий, и на основе этого создается блок-схема.

При разработке управляющей программы определяются переменные для входных/выходных параметров и внутренние переменные, которые ис-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (№ 2.1237.2017/4.6).



Рис. 1. Методика разработки цикла определения положения заготовки на столе станка с ЧПУ

пользуются для расчетов траекторий и т.д. Далее, разрабатывается управляющая программа на языке ISO 7bit совместно с языком высокого уровня системы ЧПУ.

Разработка пользовательского экрана включает разработку внешнего вида окна, выбор способа задания входных и вывода выходных параметров, компоновку элементов на экране и формирование связей между ними.

После разработки цикла его тестируют сначала на эмуляторе системы ЧПУ, а далее — на станке. Тестируется корректность задания входных и отображения выходных параметров, корректность расчета выходных параметров, выдача предупреждений о некорректной отработке цикла, соответствие реальной траектории перемещения инструмента заданной и т.д. После успешного прохождения тестирования цикл считается пригодным к использованию [3, 5].

**Создание математической модели цикла определения и коррекции положения заготовки на столе станка с ЧПУ**

Цель цикла: определить реальное положение заготовки на столе станка с ЧПУ и при необходимости провести его коррекцию.

Задачи цикла: провести обмер отдельно в установочной (обмер в трех точках), направляющей (обмер в двух точках), опорной (обмер в одной точке) плоскостях или всех вместе (обмер всех шести точек); рассчитать сдвиги и повороты осей заготовки относительно осей станка; принять решение о необходимости коррекции положения заготовки; провести виртуальную или реальную коррекцию положения заготовки на столе станка с ЧПУ.

В работе рассматривается вариант установки заготовки на столе станка с ЧПУ.

Измерительный цикл определения и контроля положения заготовки предусматривает три этапа:

1) вызов цикла для обмера координат точек на поверхности заготовки (при этом можно обмерять 1...6 точек в зависимости от того, в какой плоскости (установочной, направляющей или опорной) проводится обмер или обмеряется их комбинация;

2) расчет вектора погрешностей по результатам измерений;

3) принятие решения о необходимости коррекции положения заготовки и дальнейшая коррекция.

Данный цикл учитывает погрешности: установки заготовки на столе станка, элементов станка, параметров измерительного щупа (отклонение его оси от оси шпинделя станка, погрешность радиуса шарика стержня измерительного щупа и его длины) [1–3, 5].

Погрешности параметров измерительного щупа определяются перед проведением цикла определения положения заготовки посредством применения циклов калибровки измерительного щупа. Для вычисления этих погрешностей в системе ЧПУ «АксиОМА Контроль» имеется ряд калибровочных циклов:

— «Измерение отклонения от оси» — определяет отклонение оси щупа от оси шпинделя по осям X и Y. Этот параметр может быть как положительным, если отклонение происходит вдоль положительного направления оси, так и отрицательным;

— «Измерение радиуса шарика» — определяется радиус в положительном и отрицательном направлениях вдоль осей X и Y;

— «Измерение длины инструмента» — определяется реальная длина щупа.

Эти значения параметров записываются в соответствующие названиям ячейки памяти системы ЧПУ и потом учитываются в циклах обмера заготовки.

Погрешности установки определяются в процессе отработки цикла определения и контроля положения заготовки на столе станка с ЧПУ.

При построении математической модели используются матрицы определения вектора погрешностей, состоящего из погрешностей сдвига и поворота относительно осей станка.

Вектор погрешностей определяется следующим образом:

$$\omega = (X, Y, Z, \varphi, \theta, \psi), \tag{1}$$

где X, Y, Z — параметры смещений осей заготовки относительно соответствующих осей станка;

$\varphi, \theta, \psi$  — параметры поворота системы заготовки OXYZ относительно системы станка oxyz (рис. 2).

Вычисление составляющих вектора погрешностей установки по установочной базе (цикл 1) выполняется по формуле:

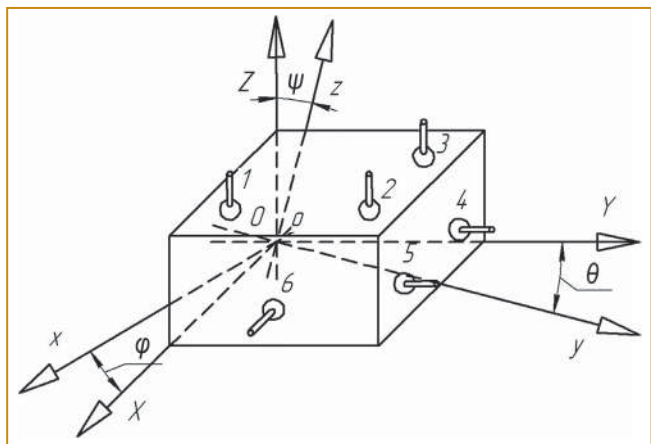


Рис. 2. Элементы вектора погрешностей

$$\begin{bmatrix} Z \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} (X_2Y_3 - Y_2X_3) & (Y_1X_3 - Y_3X_1) & (Y_2X_1 - Y_1X_2) \\ (Y_3 - Y_2) & (Y_1 - Y_3) & (Y_2 - Y_1) \\ (X_3 - X_2) & (X_1 - X_3) & (X_2 - X_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{11} \\ Z_{22} \\ Z_{33} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $Z, \varphi, \theta$  — результирующее смещение вдоль оси  $Z$  и повороты вокруг осей  $X, Y$ , которые вычисляются после обмера точек 1, 2, 3 на установочной базе;

$X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3$  — координаты точек относительно оси  $OX$ ;

$Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}$  — величины смещения положения заготовки относительно оси  $OZ$ , вычисляются после обмера точек 1–3;

$C$  — определитель системы.

Составляющие вектора погрешностей установки по направляющей базе (цикл 2) вычисляются по формуле:

$$\begin{bmatrix} Y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_5 & X_4 \\ X_5 - X_4 & X_5 - X_4 \\ 1 & 1 \\ X_5 - X_4 & X_5 - X_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{44} \\ Y_{55} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $Y, \psi$  — результирующее смещение вдоль оси  $Y$  и поворот вокруг оси  $Z$ , которые вычисляются после обмера точек 4, 5 на установочной базе;

$X_4, X_5$  — координаты контрольных точек относительно оси  $OX$ ;

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

№	Параметр	Описание параметра
<b>Входные параметры</b>		
1.	Плоскость	Плоскость, параллельно которой находится установочная плоскость (XY, XZ, YZ)
2.	Рабочая плоскость	Выбор плоскости для обмера (установочная, направляющая или опорная)
3.	Номер инструмента	Позиция щупа в барабане
4.	Безопасная высота	Безопасная высота над заготовкой
5.	Скорость подачи	Скорость подачи
6.	Перебег	Величина перебега
7.	x1-x6, y1-y6, z1-z6	Координаты заданных точек срабатывания щупа
8.	Ширина, длина	Параметры заготовки
<b>Выходные параметры</b>		
1.	X1-X6, Y1-Y6, Z1-Z6	Реальные значения координат 6 точек обмера
2.	X, Y, Z	Смещение заготовки вдоль осей OX, OY, OZ
3.	$\varphi, \theta, \psi$	Значения углов поворота заготовки относительно осей станка

$Y_{44}, Y_{55}$  — смещения положения заготовки относительно оси  $OY$ , которые вычисляются после обмера точек 4,5.

Для опорной базы (цикл 3) используется формула:

$$X = X_{66}, \quad (4)$$

где  $X$  — параметр смещения вдоль оси  $X$ , который вычисляется после обмера точки 6 на опорной базе;

$X_{66}$  — величина отклонения положения заготовки относительно оси  $OX$ , которая вычисляется после обмера точки 6 [5, 6].

**Создание блок-схемы цикла определения и контроля положения заготовки на станке с ЧПУ**

Для цикла определения и контроля положения заготовки используются следующие входные/выходные параметры (таблица).

Для цикла имеются следующие ограничения: должен быть определен радиус шарика щупа, а также его длина и положение в шпинделе (при помощи калибровочных циклов); должна быть выбрана корректная позиция щупа в барабане; скорость подачи должна быть больше нуля; безопасная высота должна быть положительной и больше диаметра шарика щупа.

На рис. 3 представлена блок-схема работы цикла. Цикл включает три независимых цикла для определения положения заготовки. Первый цикл (обмер в установочной плоскости) предусматривает определение координат положения точек 1, 2 и 3 (рис. 2). После

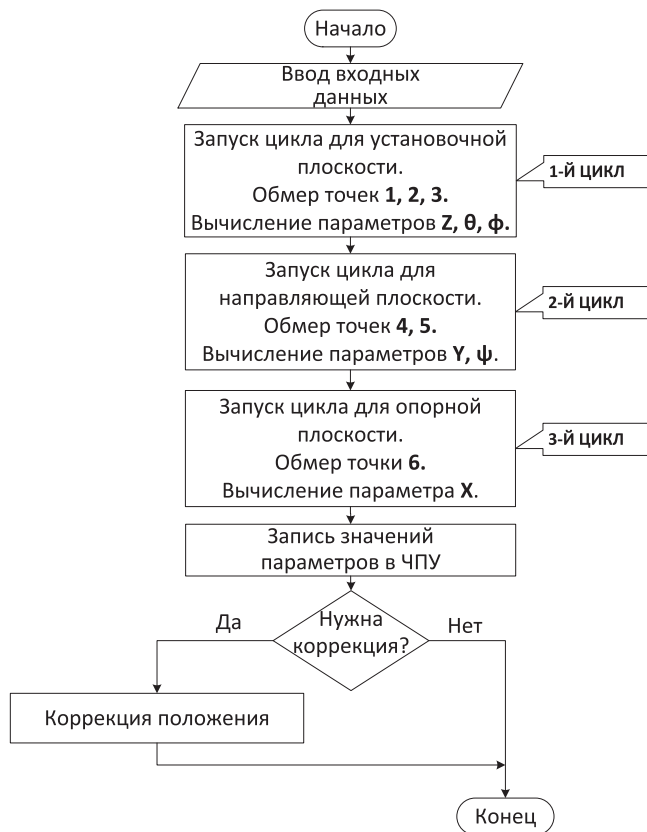


Рис. 3. Блок-схема цикла определения положения заготовки

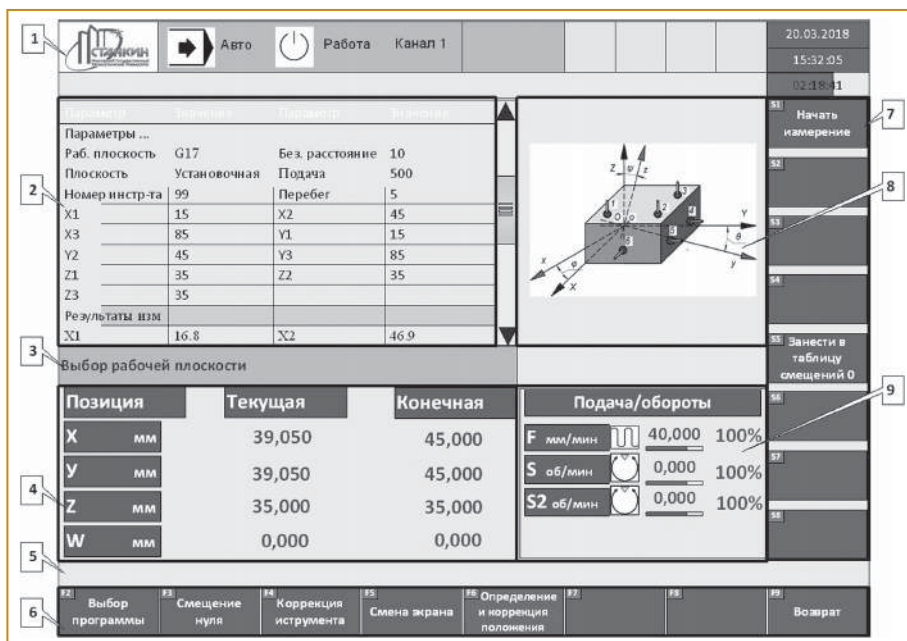


Рис. 4. Эскиз экрана оператора для цикла определения и контроля положения заготовки, где 1 – строка состояния, отображающая выбранный режим работы, активный канал, время работы и т. д., 2 – кнопки задания и отображения входных/выходных параметров, 3 – пояснение к параметрам, 4 – отображение текущей и конечной позиции по осям, 5 – вывод сообщений, 6 – управляющие F-клавиши, 7 – управляющие S-клавиши, 8 – визуализация цикла, 9 – информация о текущей скорости подачи (F) и оборотах шпинделей (S, S2) [7]

обмера рассчитывается смещение вдоль оси Z и углы поворота  $\theta$  и  $\varphi$ . Второй цикл (обмер в направляющей плоскости) предусматривает определение координат точек 4 и 5, расчет сдвига вдоль оси Y и угла поворота  $\psi$ . Третий цикл (обмер в опорной плоскости) предусматривает определение координат точки 6 и расчет сдвига относительно оси X.

Далее, рассчитанные параметры заносятся в таблицу смещений нулевой точки системы ЧПУ. Система ЧПУ принимает решение о необходимости коррекции. При задании траектории касания используются параметры измерительного щупа, которые вычисляются при помощи калибровочных циклов [1–3, 5].

После обмера рассчитанные на измерительном цикле параметры вектора погрешностей записываются в таблицу смещений нулевой точки.

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

Экран оператора для цикла определения и контроля положения заготовки на станке представлен на рис. 4.

При использовании цикла определения положения заготовки сначала нужно ввести значения входных параметров в поле (2), расшифровка которых видна в строке (3). Далее нужно нажать клавишу S1 «Начать измерение» в поле (7) и подождать до конца отработки цикла. При этом скорость подачи и координаты движения видны в полях (9) и (4) соответственно. Также можно посмотреть траекторию

движения инструмента, нажав F-клавишу F5 «Смена экрана» и выбрав режим «Графика» или «Полноэкранная графика». После обмера выходные параметры будут выведены на экран в соответствующей части поля (2). Полученные выходные параметры записываются в таблицу смещений с помощью клавиши S7 «Занести в таблицу смещений» в поле (7).

При отработке цикла в строке сообщений (5) выводятся сообщения, например, о том, какой выбран цикл, какие параметры вектора погрешностей рассчитаны и т. д. При возникновении ошибки появится соответствующее сообщение в строке состояния (1).

В поле визуализации цикла (8) продемонстрированы контролируемые параметры и тип заготовки. В данном варианте выбран цикл для определения положения призматической заготовки.

**Пример использования результатов цикла для коррекции положения заготовки при обработке детали в автоматическом режиме**

Для проведения станочных испытаний разработанного цикла измерения положения заготовки была выбрана деталь типа “призма” и разработана 3D модель в САПР Creo Parametric (рис. 5).

Испытания проводились на фрезерно-строгальном четырехосевом станке с системой ЧПУ «АксиОМА Контрол». Деталь изготавливалась из цилиндрической заготовки с предварительно отфрезерованными лысками для зажатия ее в тиски.

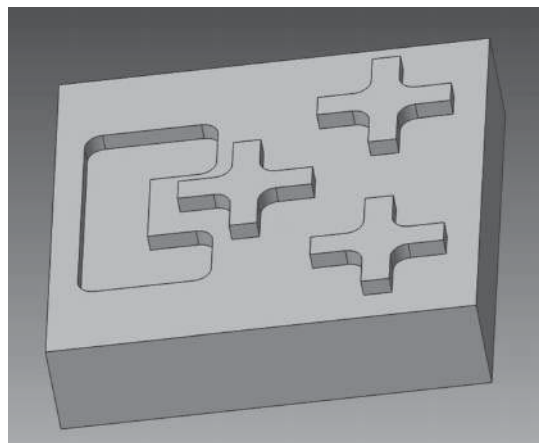


Рис. 5. 3D модель детали для проверки работы цикла измерения заготовки

Таблица положений системы координат детали						
P2	X мм	Y мм	Z мм	φ град	θ град	ψ град
G154	0.015	0.020	0.001	0.025	0.011	0.232

Рис. 6. Значения вектора погрешностей

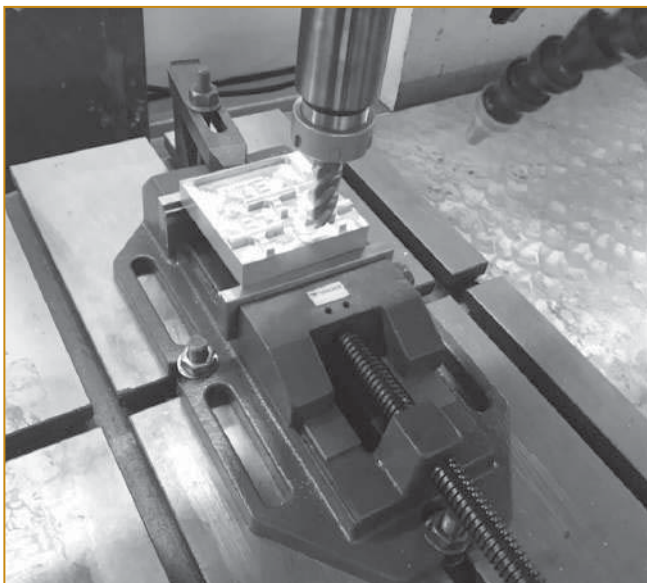


Рис. 7. Результат работы управляющей программы

На основе готовой 3D модели, данных о заготовке и параметров режущего инструмента из САМ-модуля системы Сгео Parametric была разработана траектория движения инструмента для получения необходимой геометрической формы детали. Данные о траектории движения инструмента и о технологических параметрах обработки содержатся в файле CLDATA, который не привязан к системе ЧПУ. Для получения на его основе управляющей программы необходимо использовать постпроцессор, который переводит данные из формата CLDATA в код ISO-7bit конкретной системы ЧПУ. Постпроцессор, адаптированный для системы ЧПУ «АксиОМА Контрол», учитывает особенности синтаксиса системы для вызова функции коррекции положения заготовки и для осуществления коррекции положения системы координат заготовки. В начале программы в автоматическом режиме генерируется строка с G154 и номером страницы, куда заносятся значения погрешностей положения заготовки после отработки цикла определения ее положения (рис. 6). Готовая деталь показана на рис. 7.

**Мартинова Лилия Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, **Стась Анна Владимировна** – аспирант, **Кудинов Олег Алексеевич** – аспирант ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».  
 Контактный телефон (499) 972-94-40.  
 E-mail: e-mail@ncsystems.ru

### Заключение

Автоматический контроль положения заготовки на столе станка с ЧПУ повышает точность ее обработки, минимизирует время проведения контроля и влияние человеческого фактора. Мировые лидеры в области ЧПУ разрабатывают специальное ПО для осуществления контрольно-измерительных операций, но это ПО не всегда позволяет решить задачи контроля в полной мере.

Для системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» цикл разработан на языке высокого уровня программирования систем ЧПУ совместно с языком ISO-7bit, результаты измерений записываются в память системы ЧПУ и используются для коррекции положения заготовки или управляющей программы по ее обработке [5].

### Список литературы

1. Григорьев С.Н., Кутин А.А., Долгов В.А. Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ Станкин. 2014. № 4 (31). С. 10-15.
2. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И. Формирование базовой вычислительной платформы ЧПУ для построения специализированных систем управления // Вестник МГТУ Станкин. 2014. С. 92-97.
3. Мартинова Л.И., Стась А.В., Григорьев А.С., Бабин М.С. Автоматизация операционного контроля на фрезерных станках с ЧПУ // Автоматизация в промышленности, №5. 2017. с.33-36.
4. Мартинова Л.И., Стась А.В. Разработка автоматических измерительных циклов для оценки положения заготовки на станке // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Оренбург, 2017. 704 с. с. 629-633.
5. Григорьев А.С., Мартинова Л.И., Стась А.В. Автоматизация контрольно-измерительных операций на станках, оснащенных системами ЧПУ "АксиОМА Контрол" // Автоматизация в промышленности. №5. 2016. с.43-46.
6. 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.
7. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Григорьев А.С. Специфика разработки программного обеспечения для систем управления технологическим оборудованием в реальном времени // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2009. № S2. С. 121-124.

### Платформа Winnum от «Би Питрон СП»

Компания «Би Питрон СП» продемонстрирует на выставке «Металлообработка-2018» российскую разработку — платформу Winnum для удаленного мониторинга, диагностики и оптимизации работы производства. Система обеспечивает непрерывный сбор сигналов с производственного оборудования, создает среду для их хранения и обработки. Отчеты, формируемые при обработке полученных данных, позволяют оперативно выявлять незадействованные ресурсы на производстве, обеспечить более сбалансированную нагрузку на оборудование, проводить оптимизацию производственных процессов.

Одно из решений платформы Winnum — Winnum CNC — предназначено для работы с оборудованием с ЧПУ, его удаленного мониторинга и диагностики. Решение обеспечивает выполнение важнейших задач, нацеленных на повышение эффективности работы и эксплуатации станочного парка современного предприятия, позволяет увеличить показатели бесперебойной работы, предотвратить выход оборудования из строя и свести к минимуму время его простоя.

[Http://www.metobr-expo.ru](http://www.metobr-expo.ru)