

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Чепчуров М.С., д-р техн. наук, проф.,

Табекина Н.А., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Вороненко В.П., д-р техн. наук, проф.

Московский государственный технологический университет «Станкин»

## КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ АВТОМАТОВ ПРОДОЛЬНОГО ТОЧЕНИЯ\*

avtpost@mail.ru

*В статье рассмотрены вопросы, связанные с автоматизированным контролем геометрических параметров заготовок при изготовлении деталей на автоматах продольного точения. Массовое производство изделий с использованием автоматов продольного точения позволяет получать значительные объёмы продукции со стабильными качественными характеристиками. Переход от кулачкового управления к программному позволяет не только сократить время технологической подготовки производства (в массовом производстве практически отсутствуют время переналадки), но и упростить саму конструкцию оборудования, что снизит затраты на его эксплуатацию, а в конечном итоге приведёт к снижению себестоимости выпускаемой продукции с использованием автоматов продольного точения. Целью данной работы является получение модели обхода профиля детали инструментом, выведенная из условия о получении контура детали за один проход и одним инструментом, а также построение схемы технологической системы на базе автоматов продольного точения, позволяющая обеспечить стабильность полученных размеров детали.*

**Ключевые слова:** автомат продольного точения, бесконтактный метод контроля, адаптация инструмента, управляющая программа, интерполяция, технологическая система.

**Введение.** На первый взгляд, казалось бы: резервы повышения эффективности получения изделий на автоматах продольного точения исчерпаны. Но в результате анализа опыта обработки сложно профильных изделий, в том числе имеющих плоскости [1], выяснилось, что изделия, получаемые на автомате продольного точения, например, стоматологические боры, требуют последующей сортировки, так как при обеспечении точности диаметров их хвостовиков возникает нестабильность размера, выходящего за пределы допусков. Стоит заметить, что это зависит от точности и частоты размерной настройки и поднастройки станка. Причём, в случае превышения допустимого диаметра, хотя и возникает исправимый брак, но он условен, так как после выполнения контрольной операции не возможен съём припусков на токарной операции. При изготовлении стоматологических боров – если размер полученного диаметра больше максимально допустимого, то увеличивают длительность операции галтовки, тем самым снимая больший припуск [2]. Аналогично и при диаметре меньше допустимого – исправления возможны путём увеличения времени гальванической операции [3]. Все это накладывает

дополнительные расходы, влияющую на конечную стоимость изделия. Таким образом, приходит вариант решения этой задачи с использованием контрольно-сортировочного оборудования [2], выполняющего селекцию получаемых на автомате изделий на группы, количество которых определяется расчётом. В случае с оперативным контролем стоматологических боров после токарной операции происходит сортировка на 4 потока [2]. Последовательность технологических операций выглядит следующим образом: получение изделий на токарном автомате – транспортировка изделий к контрольно-сортировочному оборудованию – сортировка изделий на 4 потока. А затем, в случае исправимого брака, выполняется галтовка с последующим никелированием (или другой операцией).

Как показал анализ полученных изделий: на окончательный размер оказывает влияние, главным образом, износ режущего инструмента и некорректно назначенные режимы резания. Как описывалось в работе [4], износ инструмента можно компенсировать поднастройкой инструмента (компенсацией его износа в поперечном направлении). В системе ЧПУ эта задача решается с использованием корректоров, причем

коррекция может быть выполнена автоматически по получаемому диаметру. Задача, лежащая на поверхности и решаемая методами активного контроля при производстве, например, стоматологических боров, порождает много вопросов, связанных с практической её реализацией.

**Вопрос 1.** Какой метод контроля использовать: контактный или бесконтактный?

**Вопрос 2.** Когда адаптировать режущий инструмент: в течении цикла получения изделия или с началом нового цикла?

**Вопрос 3.** Что делать с деталью, у которой размер не соответствует номинальному?

Авторы попытались последовательно получить ответы на эти вопросы.

**Методология.** Контроль геометрических параметров осуществляется бесконтактным методом активного контроля.

Модель траектории движения инструмента составлена исходя из условий получения контура детали за один проход и одним инструментом. Профиль составлен на основе чертежа изделия.

Действуют ограничения по продольному усилию резания, а также – ограничение по подаче в продольном направлении, рассчитываемое на основании формулы В. Л. Чебышева.

Задачи реализована, основываясь на условии выполнения только линейной или круговой интерполяции, при этом обработка проектируется только для одного инструмента.

#### **Основная часть.**

**1.** Контактный метод контроля достаточно широко используется. За долгое время его применения в машиностроении накоплен опыт изготовления различных устройств, как активного, так и пассивного контроля. Все они широко описаны в литературе, но учитывая габариты рабочего пространства, в котором получают изделия; стружку; СОЖ; а главное, хотя и незначительного, но все же воздействия на получаемую деталь измерительного органа прибора, достоверность результатов подобных измерений сомнительна. Скорее всего, такие приборы пригодны для использования за пределами рабочей зоны. Контактные измерительные устройства достаточно известны, требуют тщательного выполнения размеров основных элементов измерительных органов, но не дают требуемого эффекта. К тому же, обработка результатов контактных измерений требует затрат времени, то есть изделия необходимо сначала вывести из рабочей зоны, а затем выполнить измерения. После этого использовать полученные результаты для коррекции износа инструмента, что требует дополнительной оценки временных затрат.

Более привлекательными, по мнению авторов, являются бесконтактные измерительные устройства на базе ПЗС-матриц и полупроводниковых лазеров, нашедших самое широкое применение. Современная элементная база позволяет выполнять эти устройства компактными, что позволяет разместить их непосредственно в рабочей зоне получения изделий. Современные микроконтроллеры при наличии соответствующего программного обеспечения позволяют выполнять «быструю» обработку данных измерений. Также стоит отметить, что выполнение самого измерения не занимает много времени. Ширина зоны контроля при использовании проекционного способа контроля равна ширине или длине ПЗС-матрицы. А точность измерений определяется, главным образом, размерами зерна ПЗС-матрицы, что неоднократно описывалось, в том числе и авторами [5].

**2.** Вопрос адаптации инструмента связан с погрешностью поверхности получаемого изделия, так как изменение корректора приводит и к изменению получаемого размера, то есть возникает следующий вопрос: достоверны ли результаты измерений? (так как номинальные значения диаметров будут различаться). Следовательно ответ – адаптацию следует выполнять после завершения процесса обработки. Конечно можно решить этот вопрос с использованием специального алгоритма обработки результатов измерений в нескольких сечениях, но реальные значения размеров при коррекции будут меняться, также хотя и незначительно изменится мощность резания, то есть появляются дополнительные усилия (могут уменьшиться), влияющие на точность получаемого размера, и система должна среагировать на это изменение. Если с изменением усилий резания все просто, система может их «не заметить», то перемещение рабочего органа на несколько микрометров требует определённого времени, что опять приводит к появлению искажений поверхности детали. Таким образом – изменения корректора выполняют после окончания цикла обработки, учитывая, что после получения изделия требуется время на установку заготовки и её закрепление, в нашем случае – перемещение и закрепление прутка.

**3.** Если при решении первых двух вопросов осуществлялась сортировка деталей на четыре потока, то в данном случае – отклонения получаемого размера от требуемого больше, чем на предельную величину будет вызывать сбой в системе и требовать остановки оборудования, а остальные размеры должны будут находиться в

пределах допуска. Таким образом, имеем всего лишь два потока деталей: годно и брак неисправимый, но при возможности установки сортировочного устройства можно и организовать автоматическую селекцию полученных деталей.

Определим изменения в технологии получения изделий на автомате продольного точения, оснащённого системой программного управления. По аналогии с моделью из [6], составим модель траектории движения инструмента. Если в предложенной работе [7] модели рабочий орган оборудования мог последова-

тельно / одновременно перемещаться по двум координатам X и Z, то в случае с автоматом продольного точения эти движения выполняются различными органами: механизмом подачи заготовки в продольном направлении и механизмом перемещения инструмента в поперечном направлении. Составим модель для профиля изделия в продольном сечении, изображенную на рис.1. Профиль составлен на основе чертежа изделия, на котором представлены все необходимые размеры, позволяющие идентифицировать его геометрию.

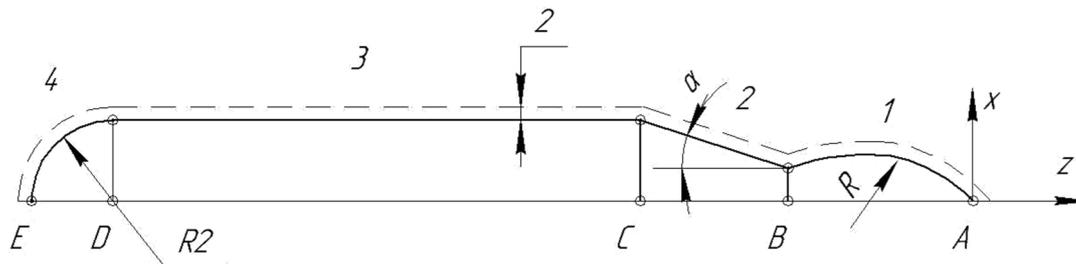


Рис. 1. Профиль изделия в продольном сечении

Представленный ниже способ интерпретации перемещений инструмента также использован и ранее для расчета кулачков для управления суппортами токарного автомата [3, 8].

Считаем, что профиль получен одним инструментом, последовательно выполняющим съём припуска по эквидистанте, расположенной на расстоянии 2, равном радиусу при вершине режущего инструмента.

Время последовательного обхода контура детали при постоянной продольной подаче:

$$S = const, \text{ мм/мин}$$

$$T_0 = \frac{(l_{AB} + l_{BC} + l_{CD} + l_{DE})}{S_{\text{пр}}} = \frac{L_{\text{дет}}}{S_{\text{пр}}} \quad (1)$$

где  $l$  – длина соответствующего участка, мм;  $L_{\text{дет}}$  – длина детали, мм;

В этом случае, поперечная подача на каждом участке будет определяться:

$$S_{AB} = \frac{l_{AB}}{t_{AB}}; S_{BC} = \frac{l_{BC}}{t_{BC}}; S_{CD} = \frac{l_{CD}}{t_{CD}}; S_{DE} = \frac{l_{DE}}{t_{DE}}$$

Величина шага подачи равна величине дискреты или минимальному шагу перемещения по оси. Профиль имеет участки траектории, не параллельные оси обрабатываемой поверхности: участок AB выполняется с круговой интерполяцией против часовой стрелки с радиусом R; участок BC выполняется с линейной интерполяцией с углом:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{x_C - x_B}{|z_C| - |z_B|} \right)$$

участок CD прямолинеен и параллелен оси Z, но можно считать, что он также выполнен с линей-

ной интерполяцией, но с углом равным 0; участок DE выполнен с круговой интерполяцией R1.

Интерполяторы присутствуют в каждой современной системе ЧПУ, что решает вопрос получения контура. Но из условий задачи о получении контура детали за один проход и одним инструментом появляется задача учёта величины снимаемого припуска, так как она оказывает влияние на силы, возникающие при резании и действующие как на инструмент, так и на заготовку, что в конечном счёте оказывает влияние на точность получаемого размера и на величину микронеровностей детали. Откуда следует задача учёта величины припуска при обработке каждого участка профиля, с учётом как радиуса профиля, так и участка наклона поверхности. В адаптивных системах, управляющих по мощности, затрачиваемой на съём припуска, этот фактор легко регулируется. Но в нашем случае адаптировать нужно уже саму управляющую программу для получения детали, так как требуемый профиль является постоянным, а заготовка имеет заранее известный, что обеспечит расчёт припуска с учётом минимальной величины шага интерполяции, имеем:

$$T_0 = \sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{|z_{i+1}| - |z_i|}{S_{zi}} \right) \quad (2)$$

где  $z_i$  – координата  $i$ -го участка, мм (или дискретах);  $S_{zi}$  – подача в продольном направлении, мм/мин;  $i$  – номер участка;  $n$  – количество участков траектории.

Точки, в которых изменяется траектория, принято называть опорными точками, поэтому в дальнейшем будем использовать этот термин.

Подача в поперечном направлении с учетом угла наклона поверхности по модулю значения координаты, определяется:

$$S_{Xi} = S_{Zi} \cdot \arctg \left( \frac{|x_{i+1}| - |x_i|}{|z_{i+1}| - |z_i|} \right), \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \quad (3)$$

$$S_{Xj} = S_{Zi} \cdot \arctg \left( \frac{|x_{j+1}| - |x_j|}{|z_{j+1}| - |z_j|} \right) = S_{Zi} \cdot \arctg \left( \frac{\delta_{Xj}}{\delta_{Zj}} \right), \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \quad (4)$$

где  $\delta_{Zj}, \delta_{Xj}$  – дискреты или шаг интерполяции по соответствующей оси.

$$S_{Xi} = S_{Zi} \cdot \arctg \left( \frac{|x_{i+1}| - |x_i|}{|z_{i+1}| - |z_i|} \right) \wedge S_{Zi} \cdot \arctg \left( \frac{dS_{Li}}{dZ_i} \right), \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \quad (5)$$

при этом координата  $Z$  изменяется в соответствии с заданным шагом интерполяции  $\delta_Z$  с каждым шагом  $j$ .

Как известно, сила резания изменяется в соответствии с изменением припуска при движении резца в продольном направлении, следовательно, изменяется и мощность, затрачиваемая на снятие припуска [9, 10]. То есть при снятии материала режущей частью инструмента значительные изменения припуска вызывают изменения на поверхности, что несомненно сказывается на качественных характеристиках получаемой поверхности, следовательно, согласно принятому нами условию – сьем всего припуска за один проход, требуется коррекция подачи в продольном направлении, при  $P = const$ , имеем:

$$S_z = \frac{y_p \sqrt{\frac{P}{10C_p \cdot t_j^{X_p} \cdot V_{\phi j}^{n_p} \cdot K_p}}}{\sqrt{10C_p \cdot t_j^{X_p} \cdot V_{\phi j}^{n_p} \cdot K_p}} \quad (6)$$

где  $C_p, x_p, y_p, K_p$  – соответствующие координаты, описанные в справочниках по резанию;  $V_{\phi}$  – фактическая скорость резания, м/мин;  $j$  – номер шага интерполяции на участке, не имеющем траектории, параллельной одной из осей.

Установим, что на всех участках, не имеющих радиуса, инструмент перемещается с линейной интерполяцией, что уже используется в программной обработке [11].

Если усилия, возникающие при обработке на  $j$  шаге  $i$ -го участка, будут превышать допустимые, то рассчитывается новое значение подачи или корректируется значение подачи, уже назначенное системой или оператором.

То есть выражение, содержащие  $S_{Zi}$ , вместо него будет иметь следующую запись. Если  $P > P_{зад}$ , то

$$S_{Zj} = y \sqrt{\frac{P_{зад}}{10C_p \cdot t_j^{X_p} \cdot V_{\phi j} \cdot K_p}} \quad (7)$$

При круговой интерполяции изменение подачи привязано также к изменению координаты, но рассчитывается для каждой интерполяции:

Таким образом, получаем выражение, позволяющее определить подачу в поперечном направлении на любом участке траектории:

При этом  $V_{\phi j}$  также будет рассчитываться с изменением снимаемого припуска, который определяется как:

$$t_j = \frac{d}{2} x_j \quad (8)$$

где  $d$  – диаметр заготовки, мм;

Кроме ограничения по продольному усилию резания действует ограничение по подаче в продольном направлении в соответствии с формулой В. Л. Чебышева:

$$S_{max} < \sqrt{\frac{R_z}{8z}}, \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \quad (9)$$

где  $R_z$  – параметр шероховатости, мкм;  $z$  – радиус при вершине режущего инструмента.

Таким образом, появляется возможность составления модели процесса получения поверхности на автомате продольного точения с учётом съема припуска на один проход одним инструментом. При этом условиями ограничением являются заданное предельное усилие резания и требуемая шероховатость. Задаваемые параметры: радиус при вершине режущего инструмента; коэффициенты, отражающие свойства обрабатываемого материала; свойства материала режущей части инструмента; условие обработки. Целевая функция – время обхода контура детали.

$$\left\{ \begin{aligned} T_0 &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left( \frac{|z_{ji+1}| - |z_{ji}|}{y_p \sqrt{\frac{P_{зад}}{10C_p \cdot t_{ji}^{X_p} \cdot V_{\phi j} \cdot K_p}}} \right) \\ P_{зад} &= const \\ t_{ji} &= \frac{d}{2} x_{ji} \\ \sqrt{\frac{P_{зад}}{10C_p \cdot t_{ji}^{X_p} \cdot V_{\phi j} \cdot K_p}} &\leq \frac{\sqrt{R_z}}{8z} \\ V_{ji} &= \frac{\pi \left( d - \frac{t_{ji}}{2} \right)}{1000} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

В модели появился новый параметр – диаметр заготовки ( $d$ ). Каким образом следует учитывать его? Конечно можно задавать диаметр при начальных расчетах, но авторы видят необходимость его измерения в процессе подачи заготовки, таким образом, в технологической системе появляется второй датчик диаметра, на этот раз – уже заготовки. На рис. 2 представлена

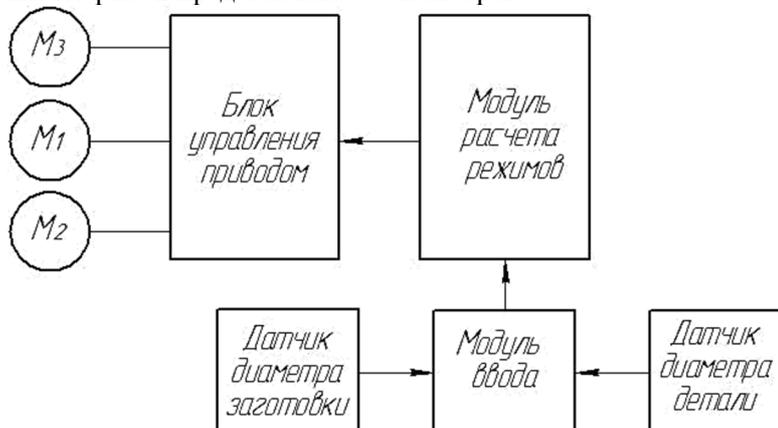


Рис. 2. Схема технологической системы на базе автоматов продольного точения

На рис. 2:  $M_1$  – привод шпинделя,  $M_2$  – привод поперечной подачи,  $M_3$  – привод продольной подачи.

Технологический цикл работы оборудования выглядит следующим образом:

1. Подготовка управляющей программы;
2. Загрузка заготовок в магазин;
3. Расчёт траектории движения инструмента и технологических параметров;
4. Подача заготовки;
5. Измерение диаметра заготовки;
6. Обработка заготовки;
7. Измерения полученной детали;
8. Проверка наличия заготовок в магазине.

В случае отсутствия – возврат в п.2, в случае наличия – продолжение цикла;

9. Проверка наличия команды останова. Если останов включен – работа закончена, иначе – продолжение;

10. Коррекция на требуемую величину, если требуется и возврат на п.4.

В модели 10 отсутствует какая-либо ссылка на корректор, а в шаге 10 цикла работы следует её включить, очевидно, согласно выражению 2 требуется коррекция по координате  $X$ , такая коррекция, как принято [3] выполняется по радиусу при вершине режущей части инструмента –  $r$  (он изменяется с износом инструмента).

Таким образом, полученная авторами модель обхода профиля детали, отличающаяся

схема технологической системы на базе автоматов продольного точения. Основными модулями являются: модуль расчета технологических режимов, он же выполняет по выражениям 2 и 3 построение траектории движения инструмента; датчики, о которых было сказано выше; приводы, описанные в различных работах, в том числе и авторов.

учётom изменения припуска и имеющая ограничения по усилию резания и получаемой шероховатости поверхности, позволяет обеспечить стабильность получаемых размеров детали.

Кроме прогнозирования стабильности получаемых размеров детали возможна автоматизация создания самой программы обработки, основываясь только на геометрических характеристиках получаемого профиля детали [12]. Подобное уже реализовано некоторыми производителями автоматов продольного точения с программным управлением [13]. Авторы предлагают свой подход к реализации этой задачи, основываясь на условии выполнения только линейной или круговой интерполяции, при этом обработка проектируется только для одного инструмента. На рис. 3 приведена схема ввода исходной информации о получаемом профиле, инструменте и детали.

Предложенное авторами техническое решение полностью базируется на предлагаемой в выражении 10 модели и не содержит каких-либо дополнительных параметров, затрудняющих генерацию программы обработки. Это исключает использование оператором оборудования специальных навыков программирования или знания кода *ISO7bit*.

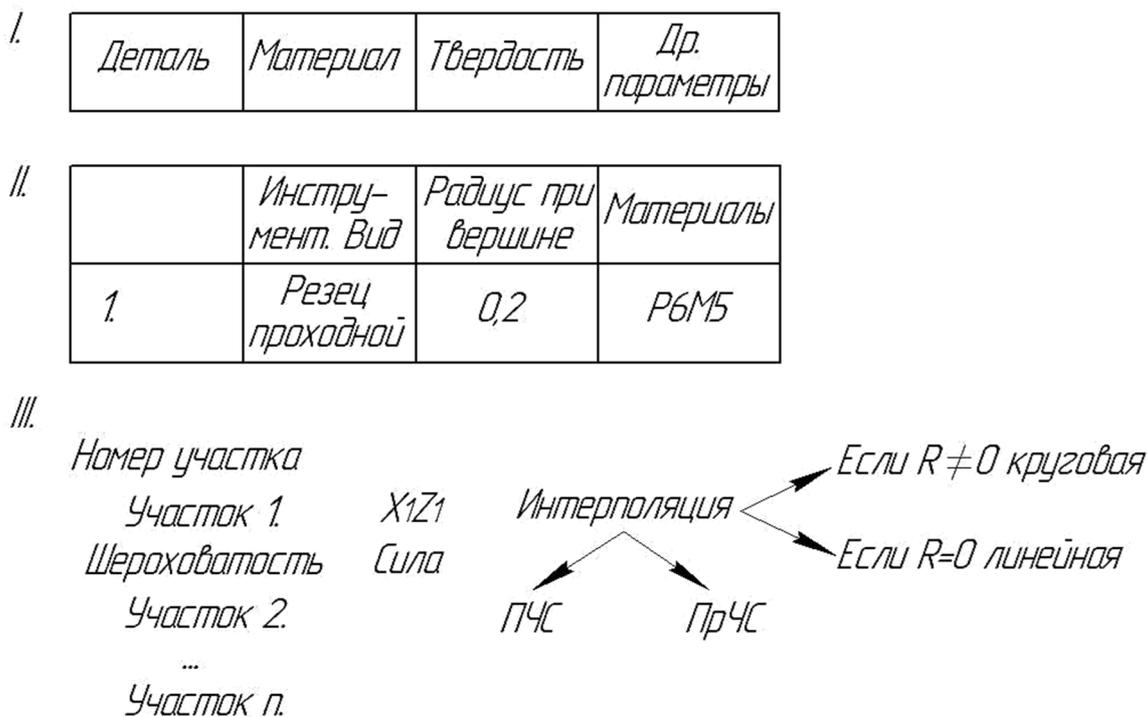


Рис. 3. Предлагаемая схема ввода информации в систему управления автоматом продольного точения

**Выводы.** Получена модель траектории движения инструмента и процесса получения профиля поверхности на автомате продольного точения с учётом поставленных условий задачи: получение контура детали за один проход и одним инструментом. Данная модель отличается учётом изменения припуска и имеет ограничения по усилию резания и получаемой шероховатости поверхности, а также позволяет обеспечить стабильность получаемых размеров детали. Приведены технологический цикл работы оборудования и схема технологической системы на базе автоматов продольного точения, учитывающая измерения диаметра заготовки.

*\*Работа выполнена в рамках гранта: Проект ПСР № 2011-ПР-146 договор № А-28/15 от 14.04.2015 г.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюйко Э.В. Формообразование многогранников на металлорежущих станка // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2008. № 1. С. 117–123.
2. Табекина Н.А. Требования к контрольно-сортировочному автомату, предназначенному для измерения геометрических параметров (диаметра хвостовиков) стоматологических боров // ГРАНИ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ: материалы I Международной научно-практической конференции (20 июля 2012). 2012. С. 85–90.

3. Султан-заде Н.М. Проектирование технологических процессов для автоматических линий учебное пособие / Н. М. Султан-заде [и др.] // Федеральное агентство по образованию, гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Московский гос. ун-т приборостроения и информатики. Москва. 2007.

4. Chepchurov M.S., Tyurin A.V. and Zhukov M. Eu. Getting Flat Surfaces in Turning / M.S. Chepchurov, A.V. Tyurin and M. Eu. Zhukov // World Applied Sciences Journal 30 (10): 1208–1213, 2014.

5. Патент РФ № 2014149933/28, 10.12.14 Табекина Н.А., Чепчуров М.С., Архипова Н.А., Тетерина И.А. Устройство для бесконтактного измерения малых диаметров // Патент России № 153620. 2015, Бюл. № 21.

6. Блудов А.Н. Автоматизация процесса восстановления поверхностей катания колёс грузового железнодорожного транспорта: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Орел, 2015. 155 с.

7. Тюрин А.В., Чепчуров М.С. Выполнение лысок на токарных автоматах // Технология машиностроения №11. 2013г.

8. Тюрин А.В., Чепчуров М.С. Технологические системы на базе автоматов продольного точения с использованием модульной компоновки оборудования // Технология машиностроения №7. - 2013 г.

9. Чепчуров М.С. Измерение и регистрация тока в цепи привода оборудования // Ремонт, восстановление, модернизация. 2008. № 9. С.46–48.

10. Чепчуров М.С. Использование АЦП для регистрации и обработки аналогового сигнала в ПК // Ремонт, восстановление, модернизация. 2008. №5. С.8 – 10.

11. Мартинов Г.М. Развитие систем управления технологическими объектами и процессами // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. №1. С. 74-79.

12. Тюрин А.В., Чепчуров М.С. Модернизация токарных автоматов продольного точения с использованием мехатронных модулей // Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. № 7. С. 10-13.

13. Официальный сайт производителя токарных автоматов *Tornos* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tornos.com> (дата обращения: 26.12.2015).

---

**Chepchurov M.S., Tabekina N.A, Voronenko V.P.**

**CONTROL OF GEOMETRICAL PARAMETERS IN TECHNOLOGICAL SYSTEM BASED ON SLIDING HEAD MACHINES**

*The article deals with the questions related to the automated control of geometric parameters of work pieces in the manufacture of details on sliding head machines. Mass production of products using sliding head machines allows obtaining significant amounts of products with stable qualitative characteristics. Transition from cam control to the program allows not only to reduce the time of technological preparation of production (in mass production the changeover time is almost non-existent), but also to simplify the design of the equipment, that will reduce the operating costs, and finally will lead to decrease in the cost of products using sliding head machines. The purpose of this work is receiving model of round of the profile of detail by the tool from the condition for receiving detail contour in single pass and by one tool, and also creation of the scheme of technological system based on sliding head machines that allows to provide the stability of the obtained detail sizes.*

**Key words:** *sliding head machine, contactless method of control, adaptation of the tool, control program, interpolation, technological system.*

---

**Чепчуров Михаил Сергеевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: [avtpost@mail.ru](mailto:avtpost@mail.ru)

**Табекина Наталья Александровна**, аспирант кафедры «Технология машиностроения»

Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: [mail-tasha@bk.ru](mailto:mail-tasha@bk.ru)

**Вороненко Владимир Павлович**, доктор технических наук, доцент, профессор.

Московский государственный технологический университет «Станкин»

Адрес: Россия, 127055, г. Москва, Вадковский переулок, д. 3а