

УДК 621.924.1

Петраков Ю.В.  
НТУУ «Киевский политехнический институт», Киев, Украина

## ПРОГРАММИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ВРЕЗНОГО КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Petrakov Y.  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([yp-86@yandex.ru](mailto:yp-86@yandex.ru))

### PROGRAMMING OPERATIONS MORTICE CYLINDRICAL GRINDING ON CNC MACHINES

Проведенный анализ тенденций развития систем управления циклами шлифования показывает, что современные шлифовальные станки с ЧПУ снабжаются программным обеспечением, позволяющим выполнять цикл шлифования, разделяя припуск на участки с назначением для каждого участка определенной величины поперечной подачи. Однако, предлагаемые САМ системы хотя и позволяют спроектировать управляющую программу, но не предлагают конкретных рекомендаций по выбору величин подачи и точек переключения, позволяющие автоматизировать процесс проектирования и гарантировать выполнение оптимального цикла шлифования. Проектирование управляющей программы для шлифовального станка с ЧПУ необходимо проводить на основе граничного алгоритма с использованием разработанной математической модели процесса, который всегда осуществляется в упругой технологической обрабатывающей системе станка. Разработанный алгоритм автоматического поиска оптимального закона управления с применением принципа сведения баланса подобно замкнутым системам автоматического управления позволяет решить вариационную задачу нахождения функции управления поперечной подачей при круглом врезном шлифовании, а созданная прикладная программа позволяет автоматизировать процесс проектирования. Для автоматизации процесса проектирования управляющей программы предложено выполнять ее апробацию в специально созданной программе моделирования круглого врезного шлифования и по результатам проводить коррекцию величин точек переключения в прикладной программе проектирования.

**Ключевые слова:** шлифовальные станки с ЧПУ, управление процессом резания.

#### Введение

Современные шлифовальные станки имеют систему числового программного управления как минимум по одной оси в направлении срезания припуска и способны выполнять управление процессом срезания припуска по возмущению, а если они дополнительно снабжены датчиком активного контроля - то и по ошибке [1]. В любом случае основой для проектирования законов управления должна быть математическая модель процесса шлифования.

Осознавая такую проблему и одновременно стараясь использовать оптимальные законы управления, ведущие фирмы все же такти опираются на практический опыт технологов при программировании циклов шлифования, поддерживая такие решения специальными САМ системами автоматизированного программирования. Например, шлифовальные станки фирмы *Studer*, как правило, оснащаются стойками ЧПУ фирмы *Fanuc* и сопровождаются инструкцией оператора-программиста [2]. В инструкции предлагается использовать циклы программирования различных операций от врезного круглого шлифования до шлифования фасонных поверхностей (рис.1).

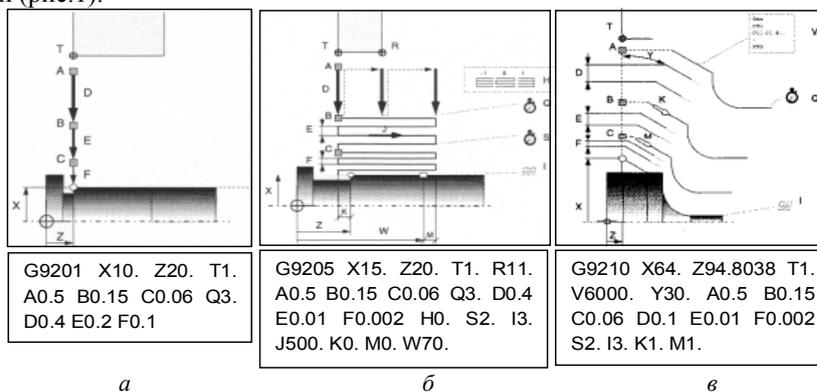


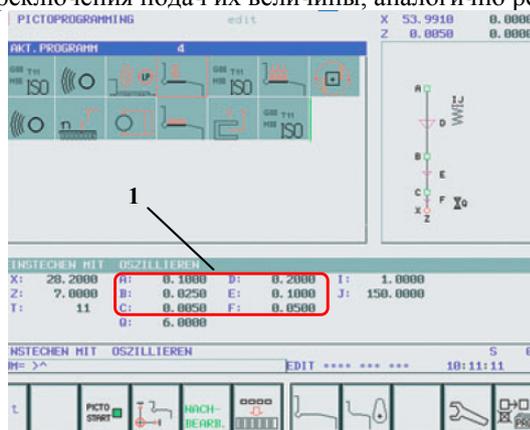
Рис. 1. Схемы операций шлифования и примеры циклов:  
а – врезное шлифование; б – продольное шлифование; в – контурное шлифование

Анализ содержания программ циклов показывает, что для врезного шлифования без осцилляций (рис.1, а) припуск на сторону 0,5мм, разделен на участки, каждый из которых шлифуется при разных величинах поперечной подачи:

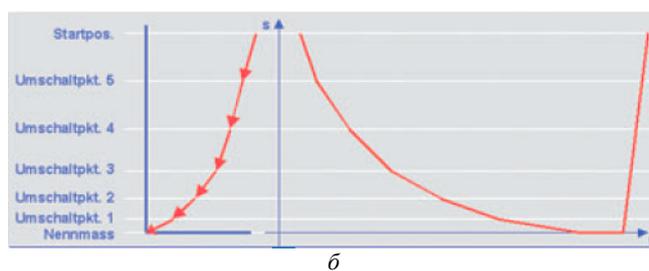
- от 0,5мм до 0,15мм – подача на врезание 0,4мм/мин,
- от 0,15мм до 0,06мм – подача на врезание 0,2мм/мин,
- от 0,06мм до 0мм – подача на врезание 0,1мм/мин.

То же самое можно видеть и в примерах программирования других циклов (смотри команды D, E и F). Таким образом, по инструкциям фирмы наблюдается тенденция выполнения (хотя бы дискретно, по трем участкам разделения припуска) закона управления, который приближается к граничному алгоритму [3,4]. Что касается вопросов, связанных с выбором конкретных величин разделения припуска на участки и назначения поперечных подач для каждого из них, то в инструкции сообщается, что все эти величины выбираются исходя из экспериментальных результатов.

Для автоматизации программирования операций шлифования фирмой *Studer* была разработана специальная САМ система (рис.2), которая облегчает проектирование управляющих программ, автоматизируя выполнение инструкций, представленных на рис.1. На интерфейсе САМ системы фигурой 1 обведены точки переключения подач их величины, аналогично решениям, представленным на рис.1.



а



б

Рис. 2. Интерфейс САМ системы фирмы Studer (а) и визуализация результатов программирования (б)

САМ система обладает безусловными преимуществами перед программированием непосредственно на стойке станка, позволяет автоматизировать процесс проектирования программ как с использованием инструкций, представленных выше, так и с увеличением количества участков разделения припуска и графической визуализацией результатов. Слева на рис.2, б представлен график разделения припуска на операции шлифования, а справа график движения шлифовальной бабки при выполнении такого закона управления во времени.

Анализ во свидетельствует что, не смотря на указанные преимущества САМ системы, главный недостаток остается – отсутствие математических моделей процессов шлифования или хотя бы рекомендаций в виде подсказок для выбора точек переключения подач и их величин.

**Целью** данного исследования является создание САМ системы автоматизации программирования шлифовальных станков с ЧПУ для операции круглого врезного шлифования и разработка методики определения основных исходных данных для такой системы.

#### Основное содержание

##### Математическая модель круглого врезного шлифования

Математическую модель процесса круглого врезного шлифования разработана на основе функциональной схемы, которая построена с использованием системного подхода. На функциональной схеме (рис.3) использованы следующие обозначения:  $D_0$  – исходный диаметр заготовки,  $D_{z1}$  – текущий диаметр заготовки,  $\tau$  – время одного оборота заготовки,  $s$  – оператор Лапласа.

Поперечная подача  $V_s$  на врезание задается соответствующим приводом шлифовальной бабки. Вследствие процесса резания и появления силы резания возникает упругая деформация технологической обрабатываемой системы, которая приводит к тому, что фактическая поперечная подача  $V_\phi$  отличается от заданной  $V_s$ . Кроме того, вследствие накопления упругой деформации возникает эффект запаздывания: слой припуска, который не был срезан на одном обороте заготовки воспринимается на следующем обороте как увеличение заданной глубины резания. Этот эффект представляется в математической модели с помощью запаздывающего звена с передаточной функцией  $e^{-\tau s}$ .

Исследования процесса шлифования [1, 4] позволили установить комплексную характеристику, по которой можно оценивать как интенсивность самого процесса, так и качество обработанной поверхности детали. Такой характеристикой является скорость удаления припуска (Material Removal Rate), которую

целесообразно представлять через ее аналог, имеющий размерность  $мм^2/рад$  при обработке в полярной системе координат (круглое шлифование). Этот параметр не зависит от режима шлифования и определяется только геометрическим взаимодействием исходной инструментальной поверхности шлифовального круга и заготовки. Для перехода к скорости удаления припуска достаточно аналог умножить на ширину (высоту или длину) шлифования и на скорость перемещения периферии инструментальной поверхности по обрабатываемому контуру (размерность скорости –  $рад/с$ ), в результате получаем традиционную размерность  $мм^3/с$  скорости срезания припуска.

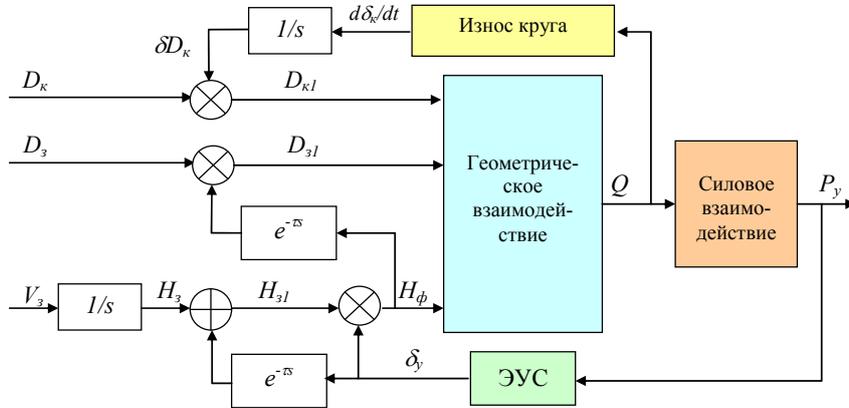


Рис. 3. Функциональная схема круглого врезного шлифования

Математическое содержание блока геометрического взаимодействия на рис.3 можно определить из схемы рис.4, а для шлифования произвольной поверхности. На схеме изображены два положения периферии шлифовального круга (линия 1) при формообразовании контура детали (линия 2), которые отличаются малым перемещением  $\delta\varphi$  по эквидистанте (линия 3).

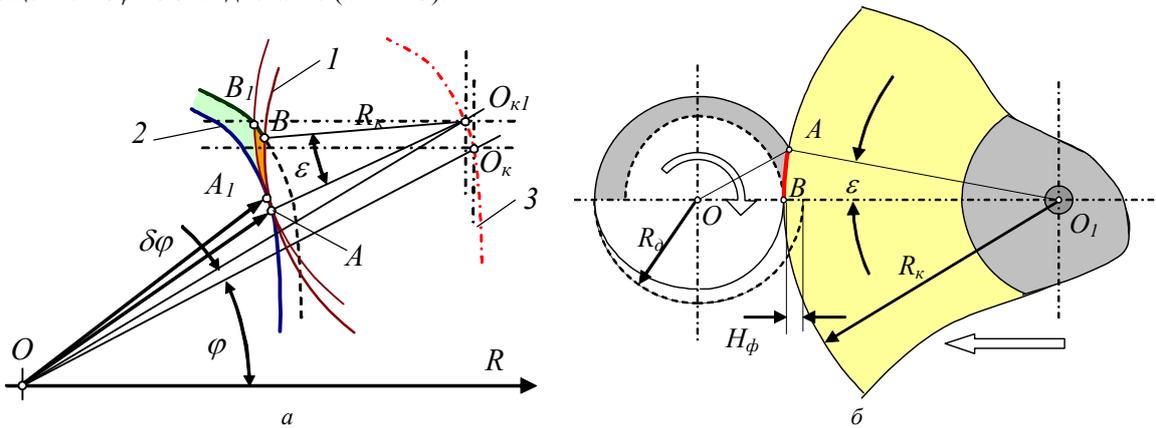


Рис. 4. К расчету скорости срезания припуска

Со схемы видно, что скорость срезания припуска можно оценивать ее аналогом:

$$Q = \lim_{\delta\varphi \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta\varphi}, \tag{1}$$

где  $\delta F$  – площадь фигуры  $AA_1BB_1$ , определяющей сечение слоя, срезаемого при элементарном перемещении круга по эквидистанте.

Скорость срезания припуска рассчитывается по формуле:

$$Q_v = QV_3B, \tag{2}$$

где  $V_3$  – скорость движения по задающей координате,  $B$  – ширина шлифования.

Поскольку толщина срезаемого слоя значительно меньше диаметра круга, а также учитывая, что  $\delta\varphi \rightarrow 0$ , с большой степенью точности площадь срезаемого пересечения можно заменить площадью треугольника со сторонами:

$$AB = L_k \text{ и } AB_1 = L_k + \delta L_k + S \delta\varphi r_c,$$

где  $L_k$  – длина линии контакта шлифовального круга и заготовки,  $\delta L_k$  – приращение длины линии контакта,  $S$  – контурная подача,  $r_c$  – средний полярный радиус контура детали на участке  $AA_1$ .

Из геометрических соотношений схемы следует, что угол между сторонами этого треугольника равен  $\delta\varphi$ , а площадь:



Процесс размерного износа шлифовального круга обычно зависит от многих факторов, а зависимость скорости износа  $d\delta_k/dt$  от скорости срезания припуска носит нелинейный характер и определяется экспериментально [3].

#### Методика решения задачи оптимизации

Задача оптимизации процесса круглого врезного шлифования может быть сформулирована так: найти такое управление процесса, которое при полном удовлетворении требованиям ограничений (точность, шероховатость, отсутствие структурных изменений поверхностного слоя детали) приводит к максимуму производительности операции.

Анализ разработанной математической модели процесса круглого врезного шлифования и формулирование задачи оптимизации свидетельствуют, что она может быть отнесена к классу задач вариационного исчисления [4,5]. Действительно, из бесконечного множества управлений необходимо найти такую функцию управляющего воздействия (поперечной подачи), которая обеспечит траекторию перехода от заготовки к детали в фазовой плоскости «скорость срезания припуска – припуск», которая максимально приближена к ограничениям [3]. Причем следует учитывать, что искомая функция располагается в несколько иной фазовой плоскости: поперечная подача – перемещение шлифовальной бабки.

Для решения представленной вариационной задачи можно воспользоваться дополнительными условиями, которые вытекают из сущности процесса управления: каждому управляющему воздействию в виде изменения поперечной подачи соответствует своя траектория изменения фактической скорости срезания припуска от величины припуска. Следовательно, процесс является однозначно управляемым. Кроме того, благодаря наличию математической модели процесса, появляется возможность наблюдать его реакцию на каждое управление, то есть процесс является наблюдаемым. И, наконец, важным условием есть наличие границ области возможных значений расположения траекторий фактической скорости срезания припуска, которые можно принять в качестве лимита вариаций.

На основе анализа условий задачи был разработан численный метод ее решения с использованием принципа функционирования систем автоматического управления (САУ) с обратной связью. Метод состоит в организации алгоритма вычислений таким образом, чтобы он функционировал аналогично замкнутой САУ, которая в качестве ошибки использует разницу между границей области и траекторией фактической скорости срезания припуска. Так используется известный принцип действия замкнутых САУ: автоматически сводить ошибку к нулю или сохранять в заранее заданных малых отклонениях.

При создании такого алгоритма было учтено, что ошибка измеряется в функции фактического припуска, а используется для управления в функции перемещения шлифовальной бабки. Известно, что эти две переменные связаны между собой через математическую модель процесса шлифования.

Алгоритм, укрупненная блок-схема которого представлена на рис.6, автоматически организует итерационный процесс приближения первоначально заданного управления  $V_z(H_z)$  до оптимального.



Рис. 6. Итерационный алгоритм решения вариационной задачи оптимального управления

На каждой итерации, в результате моделирования процесса шлифования с заданным управлением выполняется расчет фактической скорости срезания припуска в функции фактического припуска  $V_{\phi i}(H_{\phi})$ . Кроме того, на каждом шаге моделирования определяется функция ошибки в зависимости от фактического припуска путем сравнения границ  $D(H_{\phi})$  области допустимых управлений с фактической траекторией и разница  $\delta H$  между фактическим припуском и заданным перемещением шлифовальной бабки. В результате рассчитывается массив функции ошибки уже в функции заданного перемещения шлифовальной бабки  $\delta V(H_z)$ ,

что позволяет через коэффициент  $k_{oc}$  обратной связи автоматически корректировать заданное первоначально управление на следующей итерации и т.д. Как показали исследования функционирования разработанного алгоритма скорость его схождения и ее устойчивость существенно зависят от коэффициента обратной связи, который должен удовлетворять условию  $k_{oc} < 1$ . Увеличение коэффициента приводит к увеличению скорости схождения, что уменьшает необходимое количество итераций, однако, после некоторой величины, которая зависит от конкретных условий задачи, алгоритм теряет устойчивость.

#### Система автоматизированного программирования

Разработанный алгоритм положен в основу прикладной программы, интерфейс которой представлен на рис.7. В окнах интерфейса задаются необходимые для моделирования параметры процесса шлифования, данных технологической обрабатываемой системы (ТОС) и граничного алгоритма управления.

Граничный алгоритм управления определяется двумя ограничениями: максимально допустимой скоростью срезания припуска и линией прижогов. Максимально допустимая скорость срезания припуска рассчитывается по заданной допустимой деформации  $\delta_{дон}$  ТОС в цикле шлифования и составляющей  $P_y$  силы резания. Таким образом, с использованием зависимости (7) верхняя граница алгоритма управления может быть рассчитана по формуле:

$$Q_{\max} = \left( \frac{C\delta_{дон}}{C_p B V_\delta^\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (8)$$

Жесткость ТОС шлифовального станка зависит от многих факторов, в том числе от размеров заготовки и способа ее установки, поэтому ее определение целесообразно выполнять экспериментально. Аналогично, параметры линии прижогов – допустимую скорость срезания припуска в конце цикла и величину критического припуска – также следует определять экспериментально, в зависимости от обрабатываемого материала заготовки и шлифовального круга с использованием теории планирования эксперимента [6].

Для проектирования закона управления поперечной подачей вначале выбрать количество итераций и затем нажать кнопку «Процесс». Результаты поиска закона управления представляются в графическом окне интерфейса. Линией 1 обозначены границы области допустимых управлений в фазовой плоскости: скорость срезания припуска – припуск. Интерфейс показан в состоянии, когда выполнен первый цикл вычислений: линия 2 – первоначально принятый закон управления (постоянная поперечная подача), которому отвечает траектория 3 скорости срезания припуска. Очевидно, что такое управление не только не является оптимальным, но и приводит к браку по прижогам.

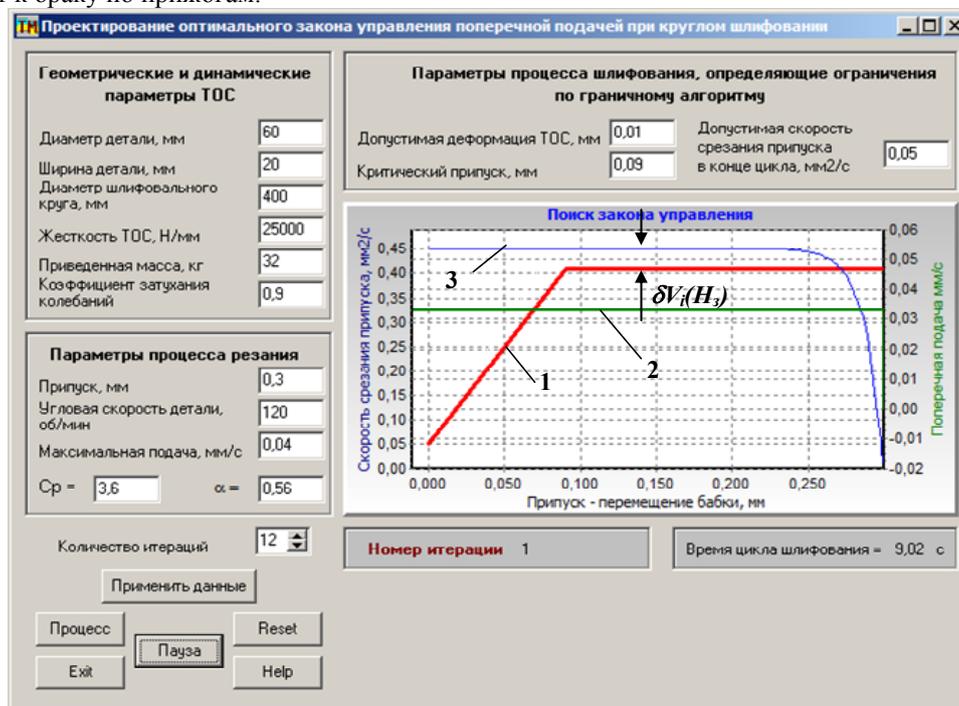


Рис. 7. Интерфейс прикладной программы

Процесс автоматического приближения траектории управления к оптимальной можно наблюдать в графическом окне, где с каждой итерацией закон управления приближается к граничному алгоритму. После выполнения заданного количества итераций процесс заканчивается, и появляются дополнительные окна для сохранения файла управления (рис.8). Сформированный в результате автоматического поиска закон управления

представлен линией 1 в графическом окне, а график изменения скорости срезания припуска, ему соответствующий - линией 2. Видно, что полученный график скорости срезания припуска располагается на границе алгоритма управления, что обеспечивает оптимизацию процесса шлифования, а незначительные колебания на этапе врезания, вызванные переходным процессом в упругой ТОС не будут существенно влиять на процесс шлифования в целом.

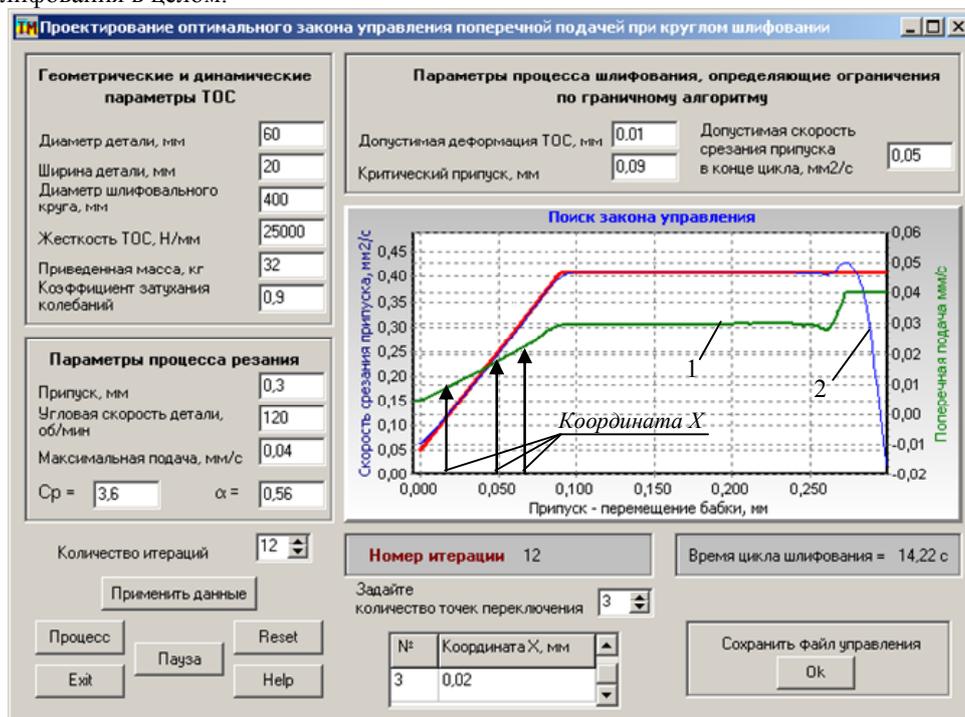


Рис. 8. Интерфейс программы в конце цикла моделирования

Учитывая особенности программирования цикла управления шлифовальных станков, в частности фирмы Studer, предусмотрена возможность выбора количества точек переключения поперечной подачи и соответствующих величин координаты X в окнах интерфейса. Программа автоматически формирует файл управления, определяя величины поперечной подачи, которые соответствуют оптимальному закону управления (показано стрелками на рис.8). Структура файла управления показана на рис.9.

```

30.0 - радиус детали
20.0 - ширина заготовки
200.0 - радиус шлифовального круга
25000000.0 - жесткость ТОС
32.0 - приведенная масса
50911.7 - коэффициент вязкого трения
120.0 - частота вращения заготовки
3.600 - Cp
0.560 - α } данные силовой характеристики
0.010
0.090
0.050 } данные граничного алгоритма
11 - количество точек переключения
0.3000 0.0400
0.2602 0.0400
0.2602 0.0294
0.0893 0.0294
0.0893 0.0233
0.0700 0.0233
0.0700 0.0177
0.0500 0.0177
0.0500 0.0097
0.0200 0.0097
0.0200 0.0040
-0.0048 0.0040 } данные УП
    
```

Рис. 9. Структура файла управления

Поскольку спроектированный файл управления дискретный и отличается от оптимального непрерывного, возникла необходимость проверки его функционирования по результатам моделирования и, в случае

необходимости, возврата к программе проектирования оптимального закона управления с целью коррекции количества точек переключения и величин соответствующих координат.

На рис.10 показан интерфейс программы моделирования, при загрузке созданного файла управления (рис.9) в конце цикла моделирования. Закон управления обозначен линией 1, а соответствующий ему график скорости срезания припуска – линией 2. Видно, что спроектированный закон управления обеспечивает выполнение условий граничного алгоритма (линия 3), однако время цикла увеличилось по сравнению с непрерывным законом управления, который был первоначально спроектирован.

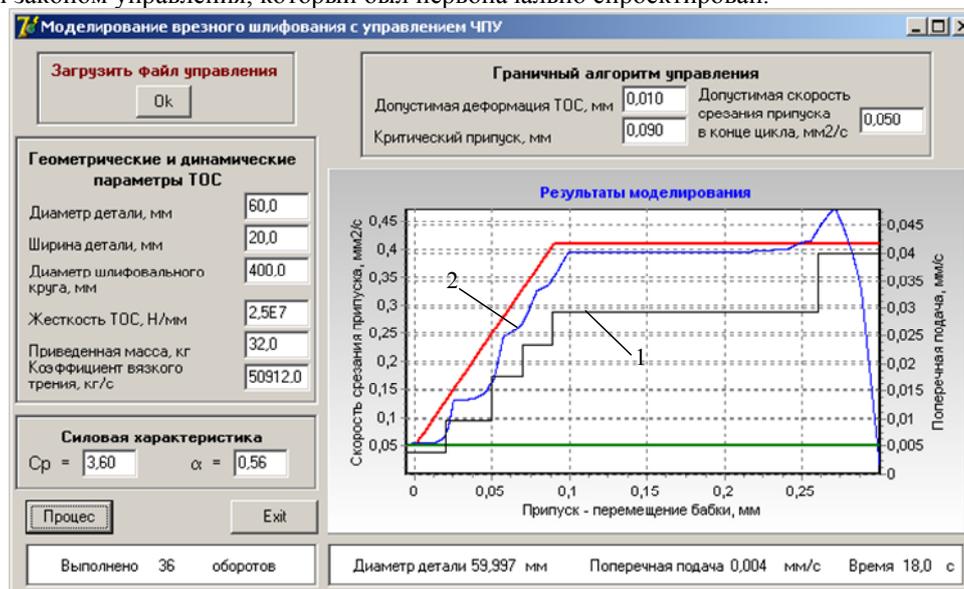


Рис. 10. Интерфейс программы моделирования

Таким образом, разработанное программное обеспечение совместно с методикой определения необходимых параметров технологической обрабатывающей системы и процесса резания позволяют автоматизировать процесс подготовки управляющих программ для круглого врезного шлифования на станках с ЧПУ и гарантируют максимальное приближение к оптимальному режиму, что сокращает время технологической операции в 2-3 раза.

#### Выводы

1. Проведенный анализ тенденций развития систем управления циклами шлифования показывает, что современные шлифовальные станки с ЧПУ снабжаются программным обеспечением, позволяющим выполнять цикл шлифования, разделяя припуск на участки с назначением для каждого участка определенной величины поперечной подачи. Однако, предлагаемые САМ системы хотя и позволяют спроектировать управляющую программу, но не предлагают конкретных рекомендаций по выбору величин подачи и точек переключения, позволяющие автоматизировать процесс проектирования и гарантировать выполнение оптимального цикла шлифования.
2. Проектирование управляющей программы для шлифовального станка с ЧПУ необходимо проводить на основе граничного алгоритма с использованием разработанной математической модели процесса, который всегда осуществляется в упругой технологической обрабатывающей системе станка.
3. Разработанный алгоритм автоматического поиска оптимального закона управления с применением принципа сведения баланса подобно замкнутым системам автоматического управления позволяет решить вариационную задачу нахождения функции управления поперечной подачей при круглом врезном шлифовании, а созданная прикладная программа позволяет автоматизировать процесс проектирования.
4. Для автоматизации процесса проектирования управляющей программы предложено выполнять ее апробацию в специально созданной программе моделирования круглого врезного шлифования и по результатам проводить коррекцию величин точек переключения в прикладной программе проектирования.

**Анотація.** Проведений аналіз тенденцій розвитку систем управління циклами шліфування показує, що сучасні шліфувальні верстати з ЧПК оснащуються програмним забезпеченням, що дозволяє виконувати цикл шліфування, розділяючи припуск на ділянки з призначенням для кожної ділянки певної величини поперечної подачі. Проте, запропоновані САМ системи хоча і дозволяють спроектувати програму, що управляє, але не пропонують конкретних рекомендацій по вибору величин подачі і точок перемикавання, що дозволить автоматизувати процес проектування і гарантувати виконання оптимального циклу шліфування. Проектування програми, що управляє, для шліфувального верстака з ЧПК необхідно проводити на основі граничного алгоритму з використанням розробленої математичної моделі процесу, який завжди здійснюється в пружній технологічній оброблювальній системі верстака. Розроблений алгоритм автоматичного пошуку оптимального закону

управління із застосуванням принципу зведення балансу подібно до замкнутих систем автоматичного управління дозволяє вирішити варіаційну задачу знаходження функції управління поперечною подачею при круглому урізному шліфуванні, а створена прикладна програма дозволяє автоматизувати процес проектування. Для автоматизації процесу проектування програми, що управляє, запропоновано виконувати її апробацію в спеціально створеній програмі моделювання круглого урізного шліфування і по результатах проводити корекцію величин точок перемикання в прикладній програмі проектування.

**Ключові слова:** шліфувальні верстати з ЧПК, управління процесом різання.

**Abstract.** The conducted analysis of progress of control the system by grinding cycles trends shows that modern grinding CNC machine-tools provided with software, allowing to execute a polishing cycle, dividing allowance into distances with setting for every distance of certain size of transversal feed. However, offered the systems though allow to project control the program, but does not offer concrete recommendations on the choice of sizes of feed and points switching, allowing to automates a planning process and guarantee implementation of optimum cycle of grinding. Control program design for a grinding CNC machine-tool it is necessary to conduct on the basis of border algorithm with the use of the developed mathematical model of process which is always carried out in the resilient technological processing system of machine-tool. The developed algorithm of automatic search of optimum law of control with the use of principle of striking the balance like the systems of feedback automatic control allows to decide the variation task of finding of control function transversal feed at the round mortise grinding, and the created application program allows to automatist a planning process. For automation of process of control program design it is suggested to execute its approbation in the specially created program of design of the round mortise grinding and on results to conduct the correction of sizes of switch points in the application program of planning.

**Keywords:** grinding CNC machine-tools, cutting process control.

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. *Петраков Ю.В.* Развитие САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ: Монографія. – К.: Січка, 2011. – 220с.
2. *Инструкция* по программированию для шлифовальных станков фирмы Studer / ВА 0091 216 В/05/Russian, [www.studer.com](http://www.studer.com), 334р.
3. *Петраков Ю.В.* Загальні принципи управління шліфуванням / Сб. Вестник Национального технического университета Украины «КПИ», №46, 2005.-с.55-60
4. *Михелькевич В.Н.* Автоматическое управление шлифованием. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
5. *Петраков Ю.В., Драчев О.И.* Теория автоматического управления технологическими системами / М.: Машиностроение, 2008. – 336с.
6. *Петраков Ю.В., Косміна Н.О.* Автоматичне проектування оптимального керування при круглому врізному шліфуванні / Наукові вісті НТУУ «КПІ» №2, 2008.-С.127-134.
7. *Петраков Ю.В., Писаренко В.В.* Визначення бездефектного режиму шліфування титанових сплавів / Процеси механічної обробки в машинобудуванні : Зб. наук. праць №10 – Житомир, 2011, с.285-297.

#### References

1. *Petrakov Y.V.*, Rozvitok САМ-sistem avtomatizirovanogo programuvanna verstativ z CNC: Monografia. Kyiv: Sichkar, 2011. 220p.
2. *Instrukcia* po programmirovaniu dlia shlifovalnix stankov firmy Studer. ВА 0091 216 В/05/Russian, [www.studer.com](http://www.studer.com), 334p
3. *Petrakov Y.V.*, Zagalny principy upravlinnia shlifuvanniam. Vistnik Nacionalnogo tehniceskogo universiteta Ukrainy “KPI”: No46, 2005.p.55-60.
4. *Mihilkevich V.N.* Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 304p.
5. *Petrakov Y.V., Drachev O.I.* Teoria avtomaticheskogo upravlenia tehnologicheskimi systemami. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 336p.
6. *Petrakov Y.V., Kosmina N.O.* Avtomatychne proektuvannia optymalnogo keruvannia pri kruglomu vriznomu shlifuvanni. Naukovi visti NTUU «KPI» No 2, 2008. P.127-134.
7. *Petrakov Y.V., Pysarenko V.V.* Vznachennia bezdefektnogo regimu shlifuvannia titanovyh splaviv. Procesy mehanichnoi obrobky v mashinobuduvanni: Zb. nauk. prac No10. Zhitomir, 2011, pp.285-297.

Подана до редакції 28.04.2014