

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В ПРИВОДЕ ПОДАЧИ ТОКАРНОГО МОДУЛЯ  
В РЕЖИМЕ СТРУЖКОДРОБЛЕНИЯ**

*М. В. Виноградов, А. А. Игнатьев, Е. А. Сигитов, И. В. Клепова*

**MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN THE DRIVE  
THE LATHE FEEDING MODULE CHIP BREAKING**

*M. V. Vinogradov, A. A. Ignatyev, E. A. Sigitov, I. V. Klerova*

*Аннотация. Актуальность и цели.* При обработке на автоматизированных токарных станках актуален вопрос удаления стружки из зоны резания. Указанное реализуется организацией режима стружкодробления, в частности за счет применения возвратно-поступательных перемещений исполнительного органа. Проведен анализ динамических процессов, возникающих при работе мехатронной системы привода подачи в режиме стружкодробления. *Материалы и методы.* Приводы продольной и поперечной подач токарного модуля, включающие многоступенчатые фрикционные передачи (МФП), в сочетании с аэростатическими направляющими позволяют с большой степенью точности (без проскальзывания) обрабатывать заданный закон движения суппорта с крепящимся на нем резцовым блоком, причем с помощью данной системы стружку возможно дробить как при продольном резании, так и при торцевом точении. Добиться надежного дробления стружки с получением высокого качества поверхности деталей позволяет многоступенчатая фрикционная передача (МФП) приводов подач. Это позволяет в режиме стружкодробления обеспечить токарную обработку деталей практически любой конфигурации. *Результаты.* При обработке в режиме стружкодробления на токарном модуле типа ТПАРМ, имеющем аэростатические направляющие суппорта и лазерный интерферометрический датчик обратной связи, обеспечиваются высокая повторяемость движения суппорта в соответствии с заданным законом изменения его скорости и эффективное стружкодробление при обработке различных материалов. *Выводы.* Использование реверсивных формообразующих движений суппорта с частотой, связанной с частотой вращения шпинделя, в режиме стружкодробления в приводах подачи прецизионных токарных модулей позволяет, наряду с надежным дроблением стружки, исключить наростообразование и получить высокое качество обработки без заметного снижения стойкости инструмента.

*Ключевые слова:* токарная обработка, мехатронная система, привод подачи, динамические процессы, стружкодробление.

*Abstract. Background.* During processing on automated lathes topical issue of chip removal from the cutting zone. Specified is implemented by the mode of chip breaking, particularly through the use of the reciprocating movement of the Executive body. The analysis of the dynamic processes that occur when you work mechatronic drive system supply mode of chip breaking. *Materials and methods.* The drives of longitudinal and cross feeds of the lathe module including a multi-stage friction gear (FIP), combined with aero-static guides allow a high degree of accuracy (no slippage) to work out a given law of mo-

tion of the caliper with mounted on it a cutting unit, and with the help of this system the chips may be split as by longitudinal cutting and face turning. To achieve a reliable chip breakage with obtaining high quality surface detail allows a multi-stage friction gear (FIP) feed drives. This allows mode to provide chip breaking turning machining of parts of any configuration. *Results.* In the processing in the mode of chip breaking on the lathe module type TPARM with aerostatic guides the caliper and laser interferometric sensor feedback ensures high repeatability of slide movement in accordance with a given law of change of its velocity and effective chip breaking when machining different materials. *Conclusions.* Using reverse shaping movements of the caliper with a frequency related to the frequency of rotation of the spindle, in the mode of chip breaking in feed drives precision turning modules allows along with reliable chip breaking is to eliminate built-up edge and get high quality treatment without significant reduction in tool life.

**Key words:** turning processing, mechatronic system, feed drive, dynamic processes, chip control.

### ***Введение***

В современном механообрабатывающем производстве широко используются автоматизированные станочные модули (АСМ) и малолюдные технологии, что делает актуальной задачу управления процессом образования стружки и ее удаления из зоны резания. Наибольшие трудности возникают при сливной стружке, в связи с этим необходимо решить вопрос организации стружкодробления при различных режимах резания. Конечной целью систем автоматизированного управления процессом стружкообразования при различных условиях резания является придание стружке (дроблением или завиванием) такой формы, которая свела бы на нет ее отрицательные стороны. При этом необходимо обеспечить заданное качество обработанной поверхности, износостойкость режущего инструмента (РИ) и улучшить условия удаления стружки из зоны резания и дальнейшей транспортировки [1–3].

В связи с изложенным научный и практический интерес представляет анализ динамических процессов в приводе подачи при реализации возвратно-поступательного перемещения суппорта токарного модуля типа ТПАРМ в режиме стружкодробления.

### ***Влияние стружкодробления на процесс обработки***

Изменение взаимодействия инструмента и заготовки за счет наложения на РИ низкочастотных колебаний позволяет оказать существенное влияние на форму стружки и износ РИ. Однако при этом возникает необходимость установки дополнительных технических средств, что не всегда приемлемо [2–4].

В ряде случаев на АСМ используются для управления процессом стружкообразования различные виды прерывистой подачи РИ. Это дает возможность получать стружку определенной формы и размеров независимо от режимов резания и геометрии РИ. Наиболее эффективным такое решение стружкодробления показано на модуле типа ТПАРМ с приводом подачи на основе МФП [4].

Мехатронная система следящего привода подач прецизионного токарного АСМ с безззорной МФП позволяет обеспечить возвратно-поступа-

тельные движения суппорта для реализации стружкодробления, что особенно важно для прецизионной обработки в автоматическом режиме.

При токарной обработке с образованием сливной стружки возможно ее навивание на заготовку, что приводит к снижению качества поверхности детали, а также может вызвать поломку инструмента. Наконец, сливная стружка затрудняет подвод смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) в зону резания, что снижает стойкость РИ и качество обработки. Без дробления стружки невозможна автоматизация процесса ее удаления из зоны резания, что важно для современных систем механообработки в связи с минимальным участием человека в технологическом процессе.

### *Способы дробления стружки*

Исследования в области решения задачи дробления стружки позволили создать несколько способов и большое количество различных устройств для стружкозавивания и стружкодробления [1–3]. Способы дробления стружки подразделяются на естественные и искусственные. При естественном дроблении стружки ее разрушение происходит в результате деформации об естественные препятствия (поверхности заготовки и резца). Главной особенностью специальных резцов является наличие завивателя. Неустойчивая форма стружки требует в каждом конкретном случае индивидуальной доводки его геометрии. Такие резцы нетехнологичны в изготовлении. Естественный способ дробления не требует усложнения конструкции станка, однако обладает низкой стабильностью. Необходимость разнообразных типов резцов делает совершенно неприменимым этот способ для дробления стружки на АСМ.

Искусственное стружкодробление основано на применении устройств, которые обеспечивают разделение стружки на отдельные элементы. При этом изменяется как кинематика, так и динамика процесса резания. В этом случае на обычный процесс резания накладывается колебательное движение резца относительно заготовки. Дробление стружки осуществляется при выходе РИ из обрабатываемого материала либо при периодическом изменении толщины срезаемого слоя. Вибрации станков при резании – сложный процесс, который определяется вынужденными колебаниями, стохастическими колебаниями и автоколебаниями [4]. Возникновение последних резко снижает качество обработки, поэтому применение вибрационного дробления стружки требует экспериментальных исследований по выбору закона изменения колебаний РИ для каждого конкретного сочетания материала заготовки и инструмента.

При стружкодроблении возможно применение как гармонических колебаний, так и колебаний негармонического вида. Частным случаем резания с колебаниями негармонического вида малой частоты является дискретное резание, заключающееся в периодической остановке РИ или даже его отводе в направлении, противоположном направлению резания. В этом случае, кроме дробления стружки, повышается эффективность действия СОТС, что снижает температуру резания. Экспериментально установлено, что для обеспечения разделения стружки на отдельные элементы время остановки РИ должно быть больше, чем время, соответствующее одному обороту заготовки [4].

Реализовать надежное дробление стружки с сохранением высокого качества поверхности деталей позволяет МФП привода подач токарного АСМ типа ТПАРМ. Приводы продольной и поперечной подач обеспечивают высокую точность (без проскальзывания) установленного закона перемещения РИ, причем стружкодробление осуществляется как при продольном резании, так и при торцевом точении. Частота колебаний РИ связана с частотой вращения шпинделя, т.е. при ее изменении длина элемента стружки практически не изменяется.

### Динамическая модель привода

Мехатронная система привода подачи модуля представляет собой многоконтурную упругую систему. Воспроизведение заданных воздействий характеризуется точностью позиционирования поперечной и продольной кареток суппорта в рабочей зоне при различных динамических режимах и заданной траектории движения.

Передаточная функция привода (рис. 1) равна

$$W(p) = \frac{K_{\text{БУП}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot K_{\text{МФП}}}{T_{\text{дв}} p^2 + (K_{\text{БУП}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot K_{\text{ТГ}} + 1)p + K_{\text{БУП}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot K_{\text{МФП}} \cdot K_{\text{ИНТ}}} \quad (1)$$

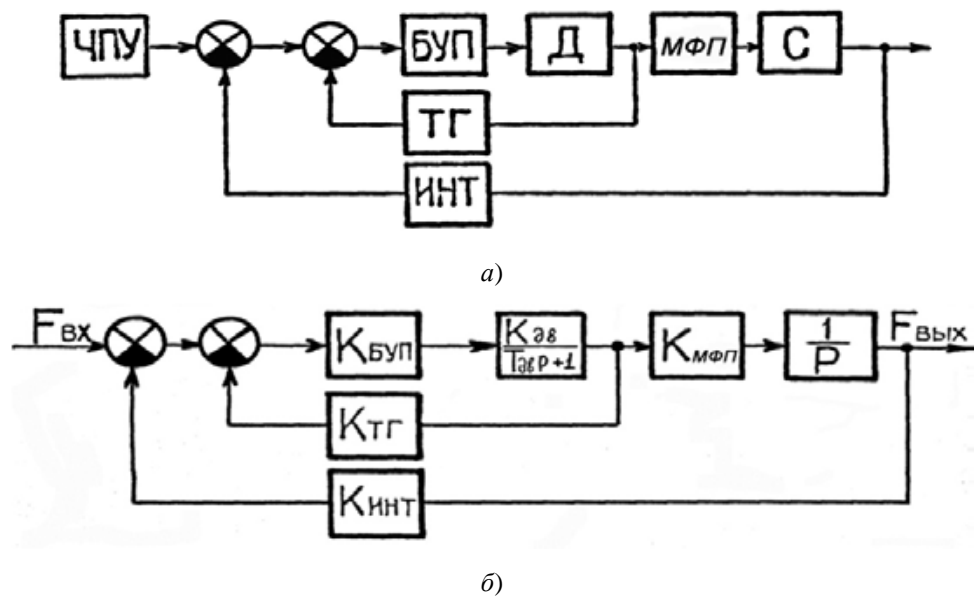


Рис. 1. Динамическая модель привода: а) функциональная схема привода; б) структурная схема привода:  $K_{\text{БУП}}$ ,  $K_{\text{дв}}$ ,  $K_{\text{МФП}}$ ,  $K_{\text{ТГ}}$ ,  $K_{\text{ИНТ}}$  – коэффициенты передачи, соответственно, блока управления приводом, двигателя, МФП, тахогенератора и лазерного интерферометра (датчик обратной связи по перемещению);  $T_{\text{дв}}$  – постоянная времени двигателя

Исходные данные для расчета передаточной функции берутся из технических характеристик элементов привода. Специальным программным

обеспечением задание скорости может осуществляться различными способами, например, по трапецеидальному закону (рис. 2), где  $V_{\max}$  – максимальная подача, определяющая максимальную толщину стружки;  $V_0$  – фиксированная скорость отхода инструмента, обеспечивающая гарантированный быстрый отрыв стружки с учетом отжима инструмента;  $\varphi$  – угол поворота шпинделя, измеряемый по количеству импульсов с датчика вращения шпинделя;  $\varphi_1$  – угол поворота шпинделя, во время которого происходит движение инструмента вперед;  $\varphi_2$  – угол поворота шпинделя, во время которого происходит отход инструмента назад для гарантированного быстрого обрыва стружки.

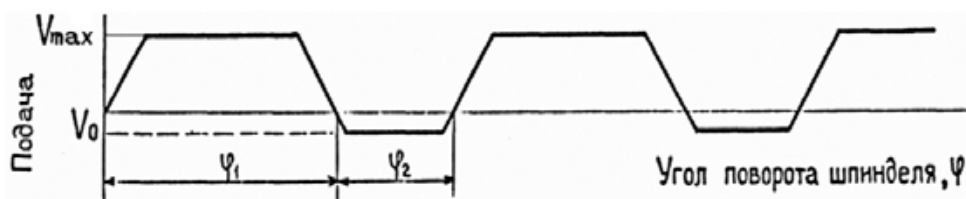


Рис. 2. Вид входного воздействия на привод подачи в режиме стружкодробления

Расчеты показали [4], что в данном случае привод с МФП представляет собой звено второго порядка, описываемое уравнением

$$T^2 m \frac{d^2 x_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + 2hT \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = Kx_{\text{ВХ}}, \quad (2)$$

где  $T$  – постоянная времени;  $h$  – коэффициент демпфирования;  $K$  – коэффициент передачи. Участки разгона и торможения осуществляются с заданным ускорением.

### *Движение инструмента в режиме стружкодробления*

Частным случаем входного воздействия является синусоидальный сигнал, соответствующий периоду колебаний РИ в режиме стружкодробления.

Рассмотрим аналитическое описание движения РИ при синусоидальном входном воздействии вида

$$F_{\text{ВХ}}(t) = A \sin \omega t = A \sin 2\pi f_c t, \quad (3)$$

где  $f_c$  – частота дробления стружки, Гц;  $A$  – амплитуда колебаний, мм.

Результирующее движение можно представить в виде двух составляющих: переменной и постоянной, причем последняя является характеристикой равномерного движения. Переменную составляющую можно представить в виде, как на рис. 3,б.

Обозначим тангенс угла наклона прямой I как  $V_{\text{в}}$ , а тангенс угла наклона прямой II – как  $V_{\text{н}}$ .

Тогда значение  $S(t)$  в точке 1 равно

$$S_1(t) = 2A + S^1 \cdot 1,5. \quad (4)$$

Значение  $S(t)$  в точке 2 равно

$$S_2(t) = S^1 \cdot 2,6, \quad (5)$$

где  $S^1$  – перемещение каретки на оборот шпинделя (средняя подача на оборот).

В то же время

$$S_1(t) = V_B \cdot 1,5, \quad (6)$$

$$S_2(t) = V_B \cdot 1,5 - V_H \cdot 1,1, \quad (7)$$

где  $V_B$  – скорость движения вперед, мм/об.;  $V_H$  – скорость движения назад, мм/об.

Таким образом,

$$S_1(t) = S_2(t) \frac{S_1(t)}{S_2(t)}, \quad (8)$$

или

$$S_1(t) = 2AS^1 \cdot 1,5 = S^1 \cdot 2,6 \frac{V_B \cdot 1,5}{V_B \cdot 1,5 - V_H \cdot 1,1}. \quad (9)$$

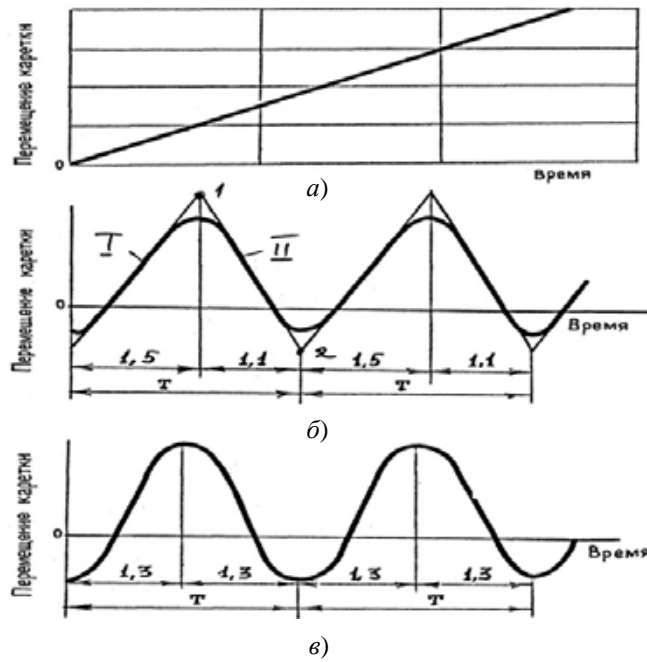


Рис. 3. Составляющие результирующего движения ( $T$  – период колебаний инструмента):

$a$  – равномерное движение;  $б$  – переменная составляющая;  $в$  – моделирование переменной составляющей; для трапецеидального закона (б):

1,5 – количество оборотов шпинделя при увеличении скорости; 1,1 – количество оборотов шпинделя при снижении скорости; для синусоидального закона (в):

1,3 – количество оборотов шпинделя при увеличении скорости,

1,3 – количество оборотов шпинделя при снижении скорости

Если принять, что скорости движения вперед и назад задаются одинаковыми, т.е.  $V_B = V_H$ , тогда получим

$$2A + S^1 \cdot 1,5 = S^1 \cdot 2,6 \frac{1,5V_B}{0,4V_B},$$

$$2A = S^1 \cdot 7,75 - S^1 \cdot 1,5 = 6,25 \cdot S^1,$$

$$A = 3,125S^1. \quad (10)$$

Используя соотношение (7) между амплитудой и перемещением каретки на оборот шпинделя, можно определить мгновенное значение перемещения каретки. В общем случае закон движения инструмента описывается уравнением

$$S(t) = V_c^1 \cdot t + A \sin \omega t, \quad (11)$$

где  $V_c^1$  – средняя подача, мм/с.

Частота стружкодробления связана с частотой вращения шпинделя соотношением

$$f_c = f_{ш} \cdot 0,38, \quad (12)$$

где  $f_{ш}$  – частота вращения шпинделя.

С учетом  $\omega = 2\pi f_c$  получим уравнение движения в другом виде

$$S(t) = V_c^1 \cdot t + 3,125 V_c^1 \sin(0,38\omega_{ш}t), \quad (13)$$

где  $\omega_{ш}$  – круговая частота вращения шпинделя.

Для анализа кинематики процесса стружкодробления удобно иметь зависимость пути инструмента от числа оборотов шпинделя.

Угол поворота шпинделя  $\Theta$  равен

$$\Theta = \omega_{ш} \cdot t = 2\pi n, \quad (14)$$

где  $n$  – число оборотов, об./с ( $n$  может принимать дробные значения).

Путь инструмента в зависимости от числа оборотов шпинделя будет равен

$$S(n) = S^1 \cdot n + 3,125S^1 \sin(0,38 \cdot 2\pi n), \quad (15)$$

или

$$S(n) = S^1 \cdot [n + 3,13 \sin(2,39n)]. \quad (16)$$

Пусть скорость движения вперед  $V_B$  не равна скорости движения назад  $V_H$ . В дальнейшем удобно использовать их соотношение

$$Q = \frac{V_B}{V_H}. \quad (17)$$

Подставляя в формулу (9) соотношение (15), получаем следующее выражение:

$$S_1(t) = 2A + 1,5S^1 = 2,6S^1 \frac{1,5V_B}{1,5V_B - 1,1V_H}. \quad (18)$$

После преобразований имеем соотношение между амплитудой колебаний  $A$  и перемещением каретки на оборот  $S^1$

$$A = S^1 \left( \frac{1,95}{1,5 - 1,1Q} - 0,75 \right). \quad (19)$$

Таким образом, введя в выражение (16) соотношение (19), получаем формулу, описывающую закон изменения пути резца в зависимости от угла поворота шпинделя:

$$S(n) = S^1 \left[ n + \left( \frac{1,95}{1,5 - 1,1Q} - 0,75 \right) \sin(2,39n) \right]. \quad (20)$$

Полученные аналитические зависимости позволяют сделать оценку действительной скорости движения резца и сравнить ее со средней скоростью (средней подачей на оборот  $S^1$ ).

Расчетные значения, получаемые с учетом выражения (7), предполагают некоторую идеализацию закона движения резца без учета переходных процессов в точках реверса. Реально в этих точках наблюдаются сглаживание кривой за счет  $S(t) = V_c^1 \cdot t + A \sin \omega t$ , отличия характеристик звеньев привода подачи от идеальных. В связи с этим целесообразнее описывать закон изменения действительной подачи, используя уравнение (20), после дифференцирования которого получим выражение для действительной подачи, т.е. скорости перемещения резца

$$V(n) = S^1 + S^1 \left[ \frac{4,66}{1,5 - 1,1Q} - 1,79 \right] \cos(2,39n). \quad (21)$$

Приняв значение косинуса, равное единице, определяем максимальные значения действительных подач для различных значений средних подач. Один из вариантов настройки мехатронной системы стружкодробления предусматривает при наличии импульсного датчика, формирующего 180 импульсов за 1 оборот шпинделя, движение вперед за 256 импульсов, а назад – 192 импульса, что соответствует периоду 2,49 оборота шпинделя. При этом система управления обеспечивает положительную полярность сигнала (движение вперед) в течение 1,4 оборота шпинделя и отрицательную полярность – в течение 1,1 оборота. Если изменение полярности происходит по релейному закону, то зависимость перемещения рабочего органа от времени будет иметь резкие перегибы, обуславливаемые мгновенными изменениями скорости движения каретки в точках реверса. Очевидно, что реальный закон изменения скорости можно представить в виде трапеции (см. рис. 2), тогда зависимость перемещения от времени будет иметь вид, как на рис. 4,а, а ускорения – как на рис. 4,в.



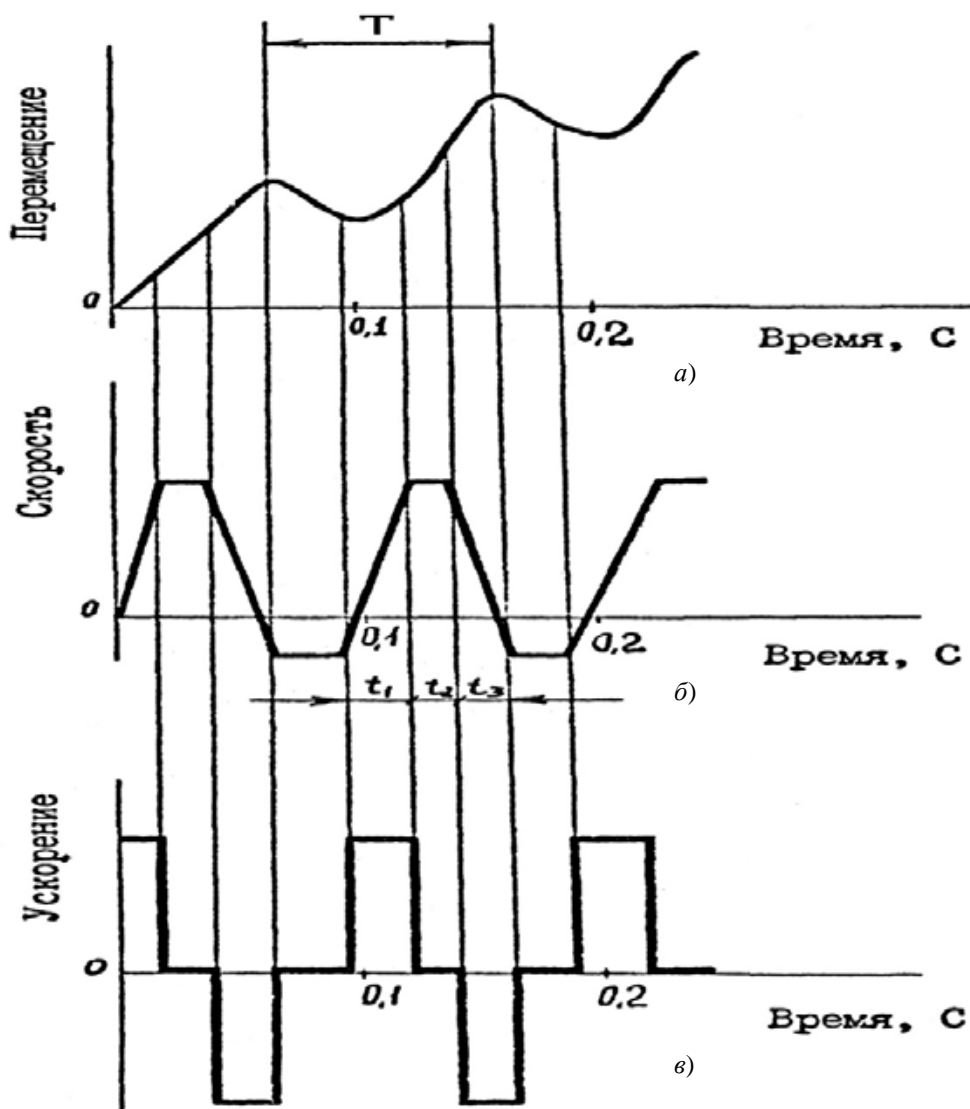


Рис. 4. Зависимость перемещения (а), скорости (б) и ускорения (в) от времени с учетом динамических свойств привода

Движение в одну сторону можно разбить на три характерных участка: разгон – участок  $t_1$ , равномерное движение с постоянной скоростью – участок  $t_2$ , торможение – участок  $t_3$  (рис. 4,б). Перемещение вперед  $S_B$  при этом можно определить по формуле

$$S_B = at_1^2 / 2 + V_B t_2 + at_3^2 / 2, \quad (22)$$

где  $V_B$  – скорость каретки вперед после разгона;  $a$  – ускорение;  $t_1, t_2, t_3$  – продолжительность разгона, равномерного движения и торможения, соответственно. С учетом реальных возможностей МФП ускорение каретки ограничено величиной  $a_{\max} = 500 \text{ мм/с}^2$ . При скорости каретки  $V_B = 1 \text{ мм/с}$  время разгона до указанной скорости составит  $t_1 = t_3 = V_B / a_{\max} = 0,002 \text{ с}$ . Если при-

нять период  $T$  равным 0,1 с, то движение вперед будет осуществляться в течение времени  $t_в = (T/2,5) \cdot 1,4 = 0,056$  с. На равномерное движение с постоянной скоростью остается

$$t_2 = t_в - 2t_1 = 0,052 \text{ с.}$$

Перемещение вперед за один период, определенное по формуле (22), составляет  $S_в = 0,05$  мм. Приняв скорость движения назад  $V_н$  в три раза меньше скорости движения вперед, получим величину перемещения назад за период при том же ускорении  $S_н = 0,01$  мм. Суммарное перемещение за один период можно определить  $S = S_в - S_н = 0,04$  мм, что при частоте 10 Гц дает величину действительной подачи  $V_{действ} = 0,3$  мм/с. Максимальная величина действительной подачи для скорости  $S_в = 10$  мм/с, определенная аналогичным способом, составляет  $V_{действ} = 2,36$  мм/с.

### Форма элементов стружки

Используя полученные зависимости, описывающие закон движения, который реализуется приводом, можно смоделировать процесс формирования микрорельефа обработанной поверхности детали. На рис. 5 показана развертка поверхности детали, обработанной в условиях стружкодробления, когда скорость движения назад меньше скорости движения вперед. На развертке видна характерная прерывисто-винтовая линия с шагом  $d$ :

$$d^1 = d / f_{ш}. \quad (23)$$

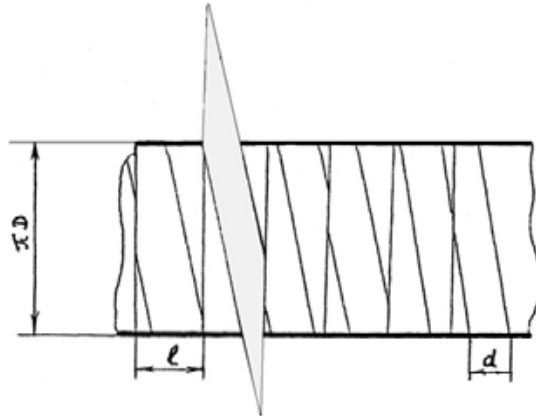


Рис. 5. Развертка поверхности детали:

$D$  – диаметр детали;  $l$  – шаг кольцевых линий;  $d$  – шаг прерывисто-винтовых линий

Кроме того, на прерывистую линию «накладываются» кольцевые линии, которые соответствуют движению назад с малой скоростью (практически остановка в течение 1,1 оборота). Шаг кольцевых линий

$$l = S^1 \frac{f_{ш}}{f}. \quad (24)$$

Для кареток станков целесообразен такой закон перемещения, который имел бы плавные изменения скорости в течение периода колебаний. В этом случае исключается резкое изменение скорости и снижается амплитуда вынужденных колебаний узлов, снижаются динамические нагрузки на элементы МФП. Указанным требованиям отвечает синусоидальный закон изменения перемещений каретки

$$S = \frac{S_{\max}}{2} \cdot \sin \omega t, \quad (25)$$

где  $S$  – перемещение каретки;  $S_{\max}$  – максимальный ход каретки.

Из уравнения (25) получается выражение для скорости  $V$  и ускорения  $a$  каретки:

$$V = \omega \frac{S_{\max}}{2} \cdot \cos \omega t, \quad (26)$$

$$a = -\omega^2 \frac{S_{\max}}{2} \cdot \sin \omega t. \quad (27)$$

Максимальное значение ускорения  $a_{\max}$  равно

$$a_{\max} = \frac{2\pi^2}{T^2} S_{\max}. \quad (28)$$

Экспериментальные исследования мехатронной системы привода подачи в режиме стружкодробления осуществлялись на токарном АСМ типа ТПАРМ в условиях цеха. Вид осциллограмм тока в цепи двигателя привода подачи показан на рис. 6. При рабочей подаче в режиме со стружкодроблением ток в цепи двигателя меняет свою величину и направление с заданной частотой.

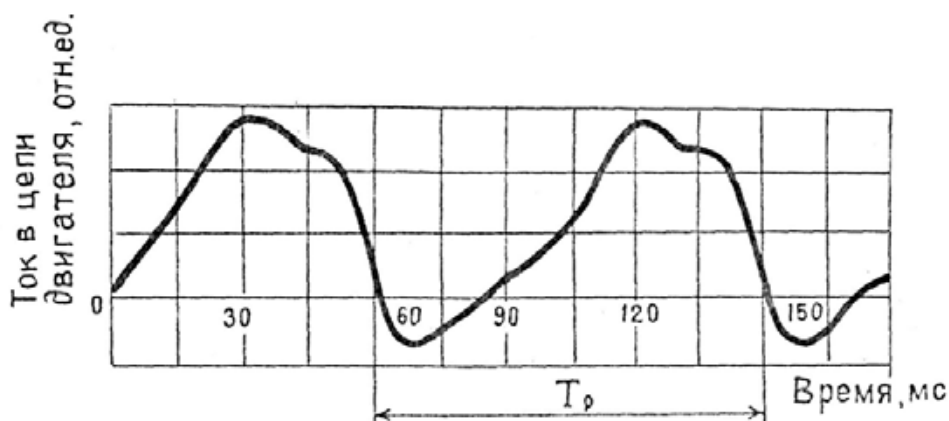


Рис. 6. Осциллограмма тока в цепи двигателя при рабочей подаче

Действительно, если рассматривать звено нагрузки как колебательное звено второго порядка, то при наложении кривой переходного процесса тако-

го звена на трапецеидальный закон изменения тока можно получить кривую, аналогичную полученной в результате экспериментальных исследований (на рис. 7 показана пунктиром).

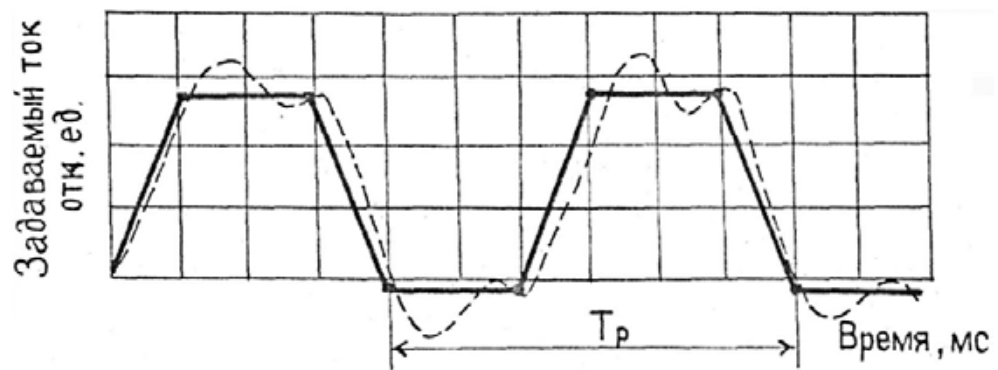


Рис. 7. Характер изменения, задаваемого системой тока в цепи двигателя мехатронной системы

Для анализа скорости вращения двигателя подачи осциллограф подключался к тахогенератору, который играет роль датчика обратной связи по скорости в мехатронной системе управления приводом подачи. Анализ полученных осциллограмм показал их идентичность осциллограммам, характеризующим изменение тока в цепи двигателя. Соотношение амплитуд положительной и отрицательной ветвей осциллограммы составляет  $A_1 / A_2 \approx 4,5 / 1,5$ . Соотношение длительности положительной ветви осциллограммы к периоду колебания составляет  $t / T_p \approx 1,4 / 2,5$  (рис. 8).

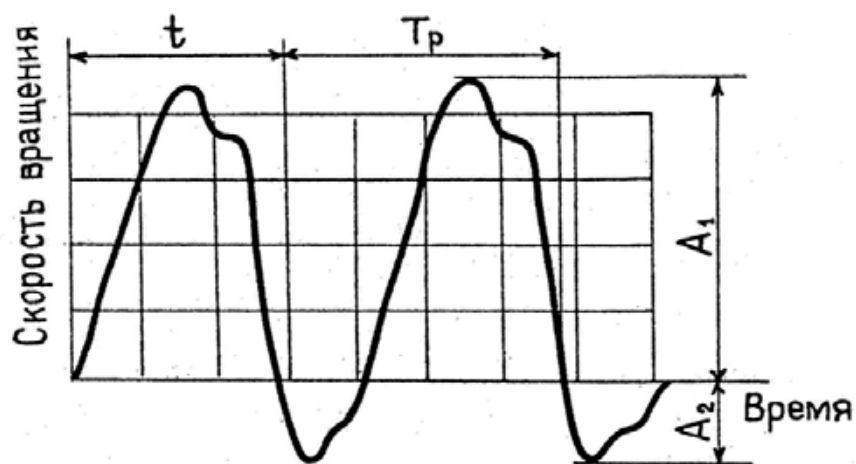


Рис. 8. Осциллограмма изменения скорости вращения двигателя подачи в режиме стружкодробления

Форма элементов стружки зависит от материала и режимов обработки и в целом соответствует изложенному выше (рис. 9).

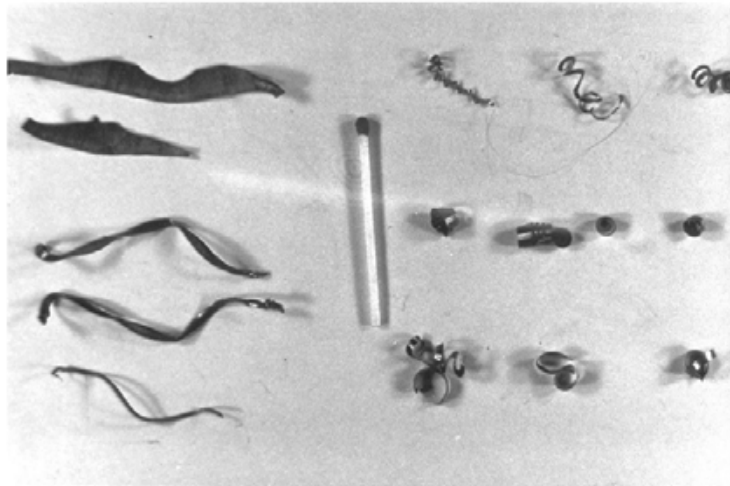


Рис. 9. Форма элементов стружки, получаемых при токарной обработке различных деталей в режиме стружкодробления

### *Заключение*

Сопоставительный анализ результатов экспериментальных и аналитических исследований с данными многолетней эксплуатации прецизионных токарных АСМ типа ТПАРМ позволили установить, что привод подачи с МФП обеспечивает как эффективное стружкодробление, так и высокое качество обработанной поверхности, в частности, шероховатость  $R_a$  порядка  $0,1 \dots 0,2$  мкм при точении деталей из алюминиевых и медных сплавов [4].

### *Библиографический список*

1. Вейц, В. Л. Динамика и управление процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке / В. Л. Вейц, В. В. Максаров. – СПб. : СЗПИ, 2000. – 160 с.
2. Лавров, Н. К. Завивание и дробление стружки в процессе резания / Н. К. Лавров. – М. : Машиностроение, 1971. – 87 с.
3. Федоров, В. Л. Инструментальные материалы и вопросы стружкодробления в ГПС / В. Л. Федоров, Э. Н. Дымова // Итоги науки и техники. Сер.: Резание металлов. Станки и инструменты. – 1991. – Т. 10. – 136 с.
4. Виноградов, М. В. Приводы подачи прецизионных автоматизированных станков с многоступенчатой фрикционной передачей / М. В. Виноградов, А. А. Игнатьев, Е. А. Сигитов. – Саратов : СГТУ, 2014. – 140 с.

---

#### ***Виноградов Михаил Владимирович***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра автоматизации, управления,  
мехатроники,  
Саратовский государственный  
технический университет  
им. Ю. А. Гагарина  
E-mail: michail2202@mail.ru

#### ***Vinogradov Mikhail Vladimirovich***

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of automation, control,  
mechatronics,  
Saratov State Technical University  
named after Y. A. Gagarin

***Игнатъев Александр Анатольевич***  
доктор технических наук, профессор,  
кафедра автоматизации, управления,  
мехатроники,  
Саратовский государственный  
технический университет  
им. Ю. А. Гагарина  
E-mail: atp@sstu.ru

***Ignatyev Alexander Anatolyevich***  
doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of automation, control,  
mechatronics,  
Saratov State Technical University  
named after Y. A. Gagarin

***Сигитов Евгений Александрович***  
кандидат технических наук, доцент,  
кафедра автоматизации, управления,  
мехатроники,  
Саратовский государственный  
технический университет  
им. Ю. А. Гагарина;  
директор,  
ЗАО «НПК Прецизионного  
оборудования»  
E-mail: sea54@mail.ru

***Sigitov Evgeny Alexandrovich***  
candidate of technical sciences,  
associate professor,  
sub-department of automation, control,  
mechatronics,  
Saratov State Technical University  
named after Y. A. Gagarin;  
director,  
CJSC «Scientific-production complex  
precision equipment»

***Клепова Ирина Викторовна***  
аспирант,  
Саратовский государственный  
технический университет  
им. Ю. А. Гагарина  
E-mail: klepovaiv@gmail.com

***Klepova Irina Viktorovna***  
postgraduate student,  
Saratov State Technical University  
named after Y. A. Gagarin

---

УДК 62-187.4

**Виноградов, М. В.**

**Моделирование динамических процессов в приводе подачи токарного модуля в режиме стружкодробления / М. В. Виноградов, А. А. Игнатъев, Е. А. Сигитов, И. В. Клепова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 2 (22). – С. 149–162.**