

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

УДК 621.941.01

И. А. КАШТАЛЬЯН, В. К. ШЕЛЕГ, Б. ОРУКАРИ

**ДИСКРЕТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ РЕЗАНИЯ
НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: kashtt@yandex.ru*

Рассмотрена задача повышения эффективности использования токарных станков с числовым программным управлением путем введения в процесс резания кинематической неустойчивости. Представлены математические модели и алгоритмы управления подачей и скоростью резания в функции пути.

Ключевые слова: числовое программное управление, математическая модель, алгоритм управления, нестационарный процесс, кинематика процесса резания, качество, точность.

I. A. KASHTALYAN, V. K. SYELEH, B. ORUKARI

**DISCRETE CONTROL OF CUTTING PROCESSES ON NUMERICALLY-CONTROLLED
CUTTING MACHINES**

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
e-mail: kashtt@yandex.ru*

The problem of numerically-controlled cutting machines efficiency increase by insertion of the kinematics instability in the cutting process is considered. Mathematical models of cutting speed and feed control in the function of path are presented.

Keywords: numerical program control, mathematical model, control algorithm, unstable process, cutting process kinematics, quality, accuracy.

Введение. Современный этап развития машиностроительного производства характеризуется широким внедрением станков и станочных комплексов с числовым программным управлением (ЧПУ). Оборудование с ЧПУ является сложным и дорогостоящим. Его приобретение всегда связано с большими финансовыми затратами. Вследствие этого проблема эффективного использования такого оборудования является актуальной для любого машиностроительного предприятия. Среди причин, снижающих эффективность использования станков с ЧПУ, выделяют неустойчивость процесса резания, которая обусловлена рядом систематических и случайных факторов (неустойчивость структуры и физико-механических свойств заготовок, неустойчивость припуска, неоднородность пластической деформации при резании, изнашивание режущего инструмента). Однако современные станки с ЧПУ оснащены системами, которые ориентированы на управление процессами резания без учета факторов неустойчивости. Вследствие этого они учитываются только на этапе подготовки управляющих программ, чаще путем занижения режимов резания. В результате уменьшаются производительность и качество обработки, снижается стойкость режущего инструмента. Вместе с тем представляется, что переход к программному управлению кинематикой процесса резания позволит снизить негативное влияние факторов не-

стабильности на выходные параметры процесса обработки (производительность, точность, качество поверхности) и расширить функциональные возможности оборудования с ЧПУ.

Математические модели и алгоритмы управления процессами резания. Задача повышения эффективности использования токарных станков с ЧПУ может быть реализована включением в программное обеспечение (ПО) программных модулей, реализующих новые математические модели и алгоритмы управления. При этом они должны удовлетворять ряду требований. Основными из них являются: инвариантность, быстродействие, предсказуемость поведения системы управления в промежутки времени между управляющими воздействиями, возможность использования в системах детерминированного (в том числе оперативного) и адаптивного управления. Указанные требования учтены на этапе выбора стратегии управления. Она заключается в следующем: параметр, используемый в качестве управляющего воздействия, изменяется приращениями в функции пути, а уровень сигнала управления между приращениями остается постоянным и определяется частотой управляющих импульсов (формируется в функции времени).

В результате анализа широкой номенклатуры деталей, изготавливаемых на токарных станках с ЧПУ, установлено, что существует множество переходов, которые целесообразно выполнять с включением в процесс резания кинематической нестабильности. Необходимо реализовать законы изменения управляющего воздействия (подачи и/или скорости резания), которые могут быть использованы как типовые решения при выполнении технологических переходов различной структуры. Кроме того, важным условием является возможность задания этих законов в одном кадре управляющей программы (УП). К таким законам относятся: линейное изменение минутной подачи в функции пути; модулированное изменение подачи; прерывание подачи; линейное изменение скорости резания (частоты вращения шпинделя) и подачи в функции пути; поддержание постоянства скорости резания и подачи на оборот при торцовом и фасонном точении [1].

Линейное изменение подачи в функции пути. Линейное изменение минутной подачи осуществляется приращениями величиной ΔS по мере обработки каждого участка траектории длиной Δl [2]. Устройство числового программно-

$$S_k = S_n \pm l\Delta S / \Delta l,$$

где S_n и S_k – начальная и конечная скорости подачи соответственно, мм/мин; l – длина обработки, на которой подача изменяется от S_n до S_k , мм.

Значение ΔS выбирают из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин; значение Δl задают со знаком «плюс» или «минус» и принимают кратным единице дискретности (длине перемещения исполнительного органа станка при подаче от УЧПУ одного импульса). При этом знак «плюс» указывает на увеличение подачи (разгон), а знак «минус» – на ее уменьшение (замедление). Текущее значение подачи после каждого приращения находится на прямой, начало которой в координатах «минутная подача – длина перемещения» определяется значением S_n , а угол наклона – отношением $\Delta S / \Delta l$. Параметры переменной подачи S_n , ΔS , Δl и направление изменения (знак приращения при Δl) задаются в кадре УП совместно с геометрической и технологической информацией.

На рис. 1 представлена схема алгоритма, реализующего математическую модель линей-

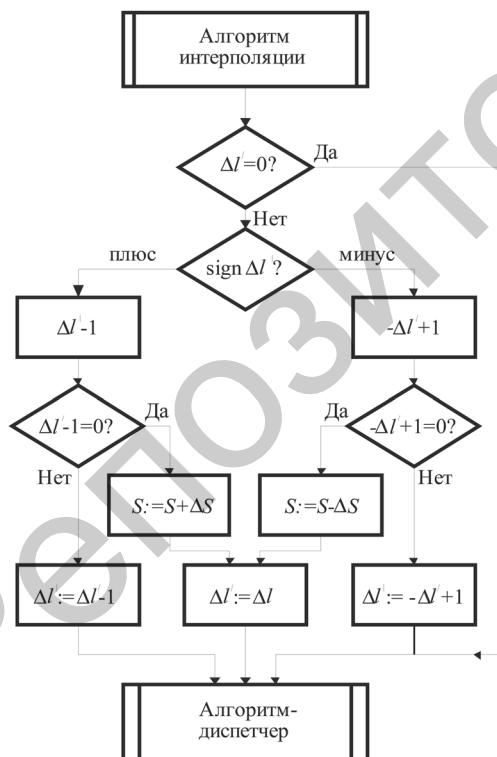


Рис. 1. Схема алгоритма линейного изменения подачи в функции пути: S – подача; ΔS – приращение подачи; Δl – путь, пройденный режущим инструментом между приращениями подачи; $\Delta l'$ – текущее значение Δl

ного изменения минутной подачи. Диаграммы изменения скорости минутной подачи по этому алгоритму представлены на рис. 2.

Работа системы ЧПУ по алгоритму происходит следующим образом. После очередного цикла интерполяции проверяется, запрограммировано ли в данном кадре УП линейное изменение скорости подачи (содержимое ячейки $\Delta l' \neq 0$). Если изменение запрограммировано, то содержимое ячейки $\Delta l'$ уменьшается на единицу и результат вычисления проверяется на равенство нулю. Так происходит до тех пор, пока значение $\Delta l'$ не станет равно нулю. Это равенство свидетельствует о том, что сделано количество шагов, необходимое для очередного увеличения или уменьшения (в зависимости от знака при Δl) скорости подачи.

Устройство ЧПУ реализует минутную подачу. Однако процесс резания для большинства методов механической обработки связывают с подачей на оборот S_0 . Поэтому необходимо иметь зависимости для ее вычисления в любой точке поверхности, обработанной с переменной подачей.

При реализации данного алгоритма время τ_s обработки участка поверхности заготовки длиной l равно сумме времен обработки участков длиной Δl на различной скорости подачи. В случае увеличения скорости подачи (разгона)

$$\tau_s = \sum_{k=1}^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H + (k-1)\Delta S},$$

где n_s – число приращений подачи на участке длиной l ($n_s = l/\Delta l$); k – переменная.

Приняв в качестве пределов интегрирования порядковые номера 1 и n_s членов ряда, между которыми необходимо определить сумму, получим

$$\tau_s = \int_1^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H + (k-1)\Delta S} dk.$$

После преобразования этого выражения имеем

$$\tau_s = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln(S_H + n_s \Delta S - \Delta S) - \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln S_H,$$

откуда

$$n_s = \frac{e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H}{\Delta S}. \quad (1)$$

Расстояние Δl между приращениями подачи – величина постоянная для каждого члена ряда, поэтому текущее значение координаты точки, в которой находится вершина резца в момент времени τ_s , может быть определено по формуле

$$l_{\tau_s} = n_s \Delta l. \quad (2)$$

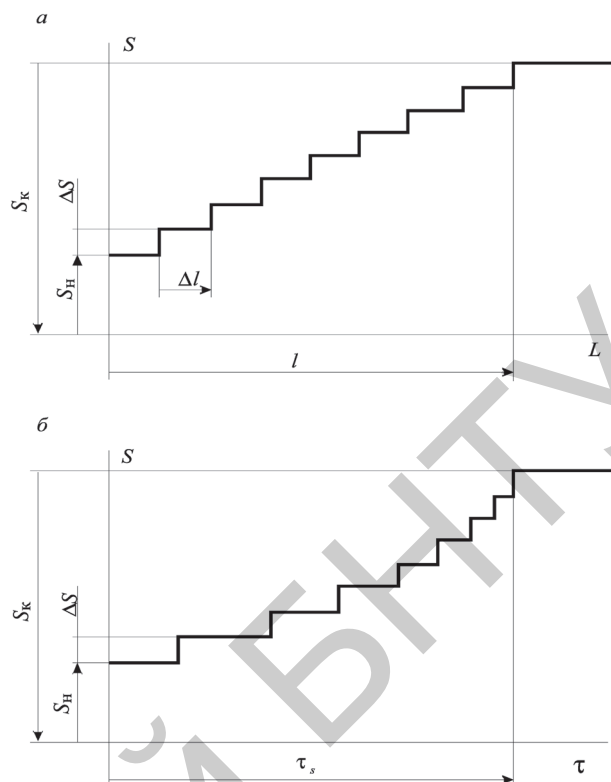


Рис. 2. Диаграммы изменения скорости подачи в функции пути (а) и в функции времени (б)

Из выражений (1) и (2) получим

$$l_{\tau_s} = \frac{\Delta l}{\Delta S} \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H \right). \quad (3)$$

Если предположить, что время одного оборота заготовки $\tau_0 = \tau_s - \tau'_s$, то разность пути l_{τ_s} , пройденного за время τ_s , и пути $l_{\tau'_s}$, пройденного за время τ'_s , является подачей на оборот S_0 :

$$S_0 = l_{\tau_s} - l_{\tau'_s}. \quad (4)$$

Используя зависимость (3), выражение (4) можно представить в следующем виде:

$$S_0 = \frac{\Delta l}{\Delta S} \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H \right) - \frac{\Delta l}{\Delta S} \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau'_s} S_H + \Delta S - S_H \right). \quad (5)$$

После замены в зависимости (5) τ'_s на разность $\tau_s - \tau_0$ и преобразований получим

$$S_0 = \frac{S_H \Delta l}{\Delta S} \left(1 - 1/e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_0} \right) e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s}. \quad (6)$$

В случае уменьшения подачи время обработки может быть представлено в виде суммы

$$\tau_s = \sum_{k=1}^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H - (k-1)\Delta S},$$

тогда S_0 определяется зависимостью

$$S_0 = \frac{S_H \Delta l}{\Delta S} \left(\frac{e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_0} - 1}{e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s}} \right).$$

Область применения программного модуля, реализующего представленный алгоритм линейного изменения подачи, достаточно обширна. Например, на станках с ЧПУ токарной группы регулированием подачи можно добиться повышения точности формы нежесткой детали в продольном сечении, сократить время на формообразование некоторых элементарных поверхностей детали (канавок фасонного профиля, фасок, конусов и т. п.), предотвратить явление выкрашивания кромок заготовки при выходе режущего инструмента из зоны резания, которым, как правило, сопровождается обработка хрупких материалов с постоянной подачей.

При формообразовании закон изменения подачи в каждом случае определяется конструктивными параметрами детали, ее жесткостью, схемой базирования и закрепления. Существует множество законов изменения подачи, которые с приемлемой точностью могут быть аппроксимированы отрезками прямых, реализуемыми по представленному алгоритму изменения минутной подачи в функции пути. Включается режим линейного изменения подачи путем задания параметров $S_H, \Delta S, \Delta l$ в кадре УП.

Модулированное изменение подачи заключается в периодическом ее увеличении от S_{\min} до S_{\max} с последующим снижением до первоначальной величины. Подача между ее пиковыми значениями изменяется приращениями на величину ΔS по мере обработки участков Δl между данными приращениями. Для этого устройство ЧПУ поочередно реализует зависимости $S_{\max} = S_{\min} + n_s \Delta S$ и $S_{\min} = S_{\max} - n_s \Delta S$, где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от S_{\min} до S_{\max} [3]. Длина пути разгона (замедления) при этом определяется из выражения $l_1 = n_s \Delta l$; значение ΔS выбирается кратным 0,1 мм/мин; величина Δl принимается кратной единице дискретности.

На рис. 3 представлена схема алгоритма модулированного изменения подачи. Алгоритм предусматривает выполнение следующих шагов. После очередного приращения скорости подачи, которое производится по аналогии с алгоритмом (рис. 1), проверяется, запрограммировано ли в кадре УП модулированное изменение подачи (содержимое ячейки $n'_s \neq 0$); если «да», то содержимое ячейки n'_s уменьшается на единицу и результат вычисления проверяется на равенство нулю. Если $n'_s = 0$, то число приращений скорости подачи в одном направлении отработано, далее изменение подачи должно идти в обратном направлении. Эта операция выполняется путем инвертирования знака буферной ячейки с переносом ее содержимого в ячейку текущего значения длины обработки между приращениями подачи $\Delta l'$ [4].

Диаграммы модулированного изменения подачи по данному алгоритму представлены на рис. 4.

Время разгона τ_b на участке длиной l_1 при реализации данного алгоритма может быть представлено следующим выражением:

$$\tau_b = \frac{\Delta l}{\Delta S} \left[\ln(S_{\min} + n_s \Delta S - \Delta S) - \ln S_{\min} \right], \quad (7)$$

где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от S_{\min} до S_{\max} .

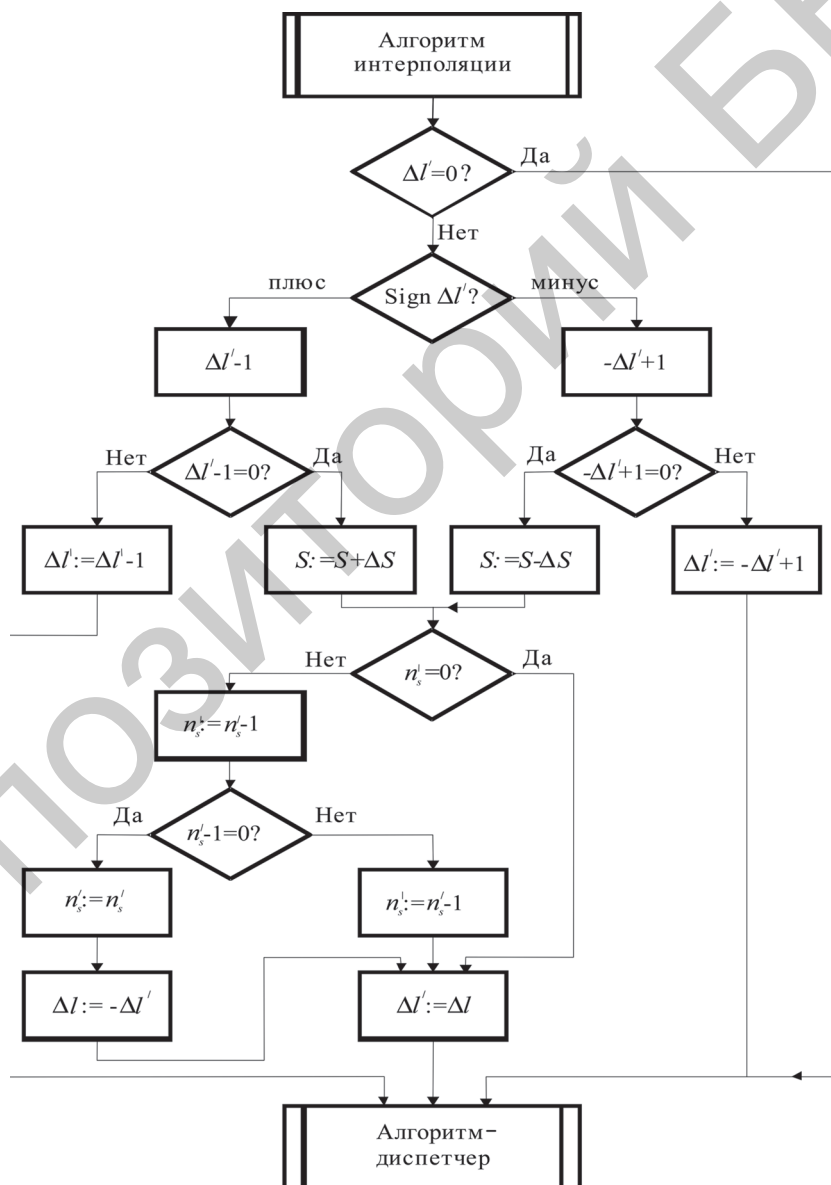


Рис. 3. Схема алгоритма: S' – текущее значение S ; $\Delta l'$ – текущее значение Δl ; n'_s – текущее значение n_s

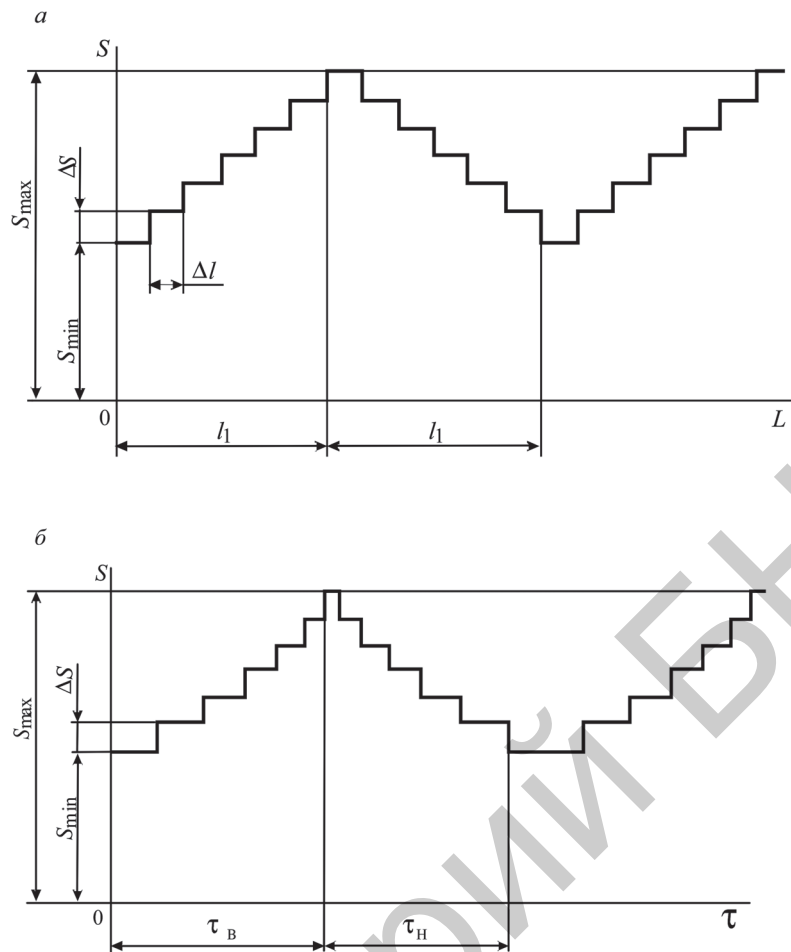


Рис. 4. Диаграммы модулированного изменения подачи в функции пути (а) и в функции времени (б)

Заменяв в зависимости (7) число n_s его значением из выражения $n_s = (S_{\max} - S_{\min}) / \Delta S$ и выполнив преобразование, получим

$$\tau_B = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln \frac{S_{\max} - \Delta S}{S_{\min}}. \quad (8)$$

Время замедления (изменения подачи от S_{\max} до S_{\min}) после соответствующих преобразований можно представить таким образом:

$$\tau_H = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln \frac{S_{\max}}{S_{\min} + \Delta S}. \quad (9)$$

Время одного цикла модулированного изменения подачи $\tau_{\text{ц}}^M$ можно определить используя зависимость $\tau_{\text{ц}}^M = \tau_B + \tau_H$. Подставляя в нее значение τ_B из выражения (8) и величину τ_H из выражения (9), после преобразования получаем величину

$$\tau_{\text{ц}}^M = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln \frac{S_{\max} (S_{\max} - \Delta S)}{S_{\min} (S_{\min} + \Delta S)}. \quad (10)$$

Зависимость (10) можно использовать при оценке производительности обработки с модулированной подачей.

Положительный результат от включения в процесс нестационарного резания модулированной подачи определяется, главным образом, соотношением ее пиковых значений [5, 6]. Для ко-

личественной оценки этого соотношения удобно использовать коэффициент модулированного изменения подачи $K_M = S_{0\min} / S_{0\max}$, где $S_{0\min}$ и $S_{0\max}$ – нижнее и верхнее пиковые значения подачи на оборот соответственно.

Преднамеренное введение в процесс резания кинематической нестабильности путем модулированного изменения подачи может быть эффективным для повышения виброустойчивости технологической системы при обработке заготовок на токарных станках с ЧПУ. Реализация предложенной математической модели модулированного изменения подачи позволяет добиться сдвига границы самовозбуждения колебаний в сторону увеличения глубины резания, при этом производительность обработки существенно возрастает (в отдельных случаях более чем в 2 раза) [7]. Режим модулированного изменения подачи включается путем задания параметров S_{\min} , ΔS , Δl , n_s в кадре УП либо путем их формирования автоматически в зависимости от уровня вибраций, измеряемых при резании.

Прерывание подачи. По алгоритму прерывания подачи управляющее устройство периодически через определенное число импульсов n_B , поступающих на привод подач, выдает импульсы n_A , которые на привод подач не поступают (отрабатываются фиктивно) [2, 4]. После перемещения исполнительного органа станка на величину $L_B = n_B Z_0$ устройство ЧПУ периодически подает сигнал на фиктивное перемещение $L_A = n_A Z_0$, где Z_0 – величина перемещения исполнительного органа станка при отработке одного импульса, выдаваемого устройством ЧПУ на привод подач.

Схема алгоритма прерывания подачи представлена на рис. 5. Работа по алгоритму происходит следующим образом. При поступлении заявки на интерполяцию анализируется, запрограммировано ли в кадре УП прерывание подачи (содержимое ячейки $L'_B \neq 0$), если «да», то содержимое ячейки L'_B уменьшается на единицу. Так происходит до тех пор, пока значение L'_B не станет равно нулю. Это равенство свидетельствует о том, что подача прекращается и управляющее устройство начинает отработку фиктивного перемещения на величину L'_A с заданной в УП

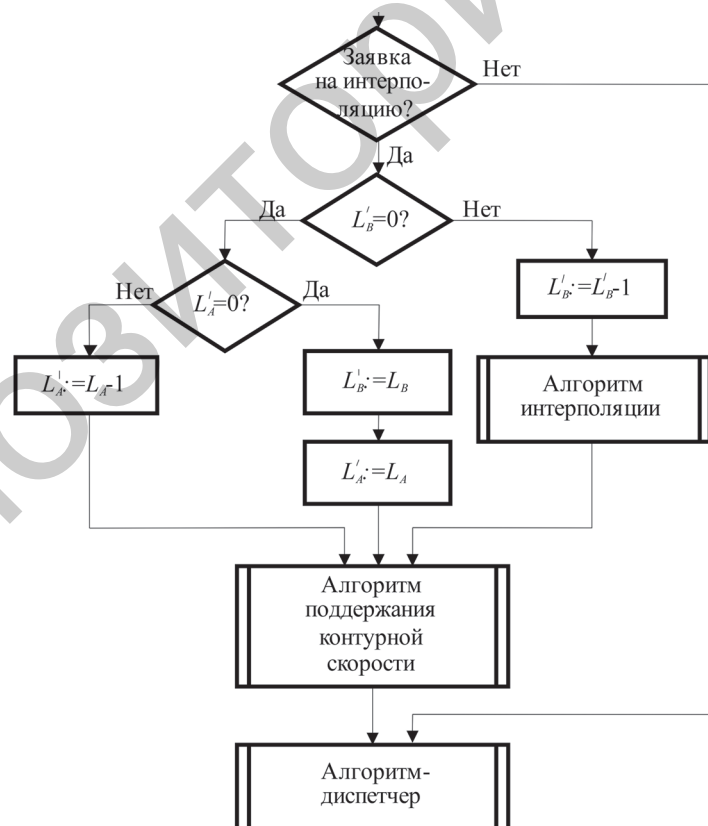


Рис. 5. Схема алгоритма прерывания подачи: L'_A – текущее значение фиктивного перемещения L_A ; L'_B – текущее значение перемещения между прерываниями подачи L_B

скоростью. Операции с величиной L'_A аналогичны описанным выше операциям с величиной L'_B . При $L'_A = 0$ формируются величины L_B и L_A для следующего цикла прерывания подачи.

Время τ_{L_B} на перемещение исполнительного органа станка на величину L_B и время τ_{L_A} на фиктивное перемещение на величину L_A (выдержка времени) определяются скоростью S минутной подачи, задаваемой в кадре УП: $\tau_{L_B} = L_B / S$; $\tau_{L_A} = L_A / S$.

Тогда время одного цикла $\tau_{\text{ц}}^{\text{п}}$ прерывания подачи можно определить, используя зависимость

$$\tau_{\text{ц}}^{\text{п}} = (L_A + L_B) / S, \quad (11)$$

которая применяется при оценке производительности обработки с прерыванием подачи.

Для сравнительной оценки процессов резания с прерыванием подачи могут быть введены коэффициенты K_A и K_B , устанавливающие взаимосвязь подачи на оборот S_0 с параметрами L_A и L_B . При этом $K_A = L_A / S_0$, $K_B = L_B / S_0$. Коэффициенты K_A и K_B характеризуют соответственно частоту и продолжительность прерывания подачи.

Включение в состав технологического программного обеспечения устройства ЧПУ программного модуля, реализующего алгоритм прерывания подачи, расширяет функциональные возможности станка (практически любого типа). Это выражается в возможности создания постоянных циклов с выдержкой времени, используемых для совершенствования процесса формообразования, а также в уменьшении затрат на разработку и отладку УП. Для станков с ЧПУ токарной группы прерывание подачи может быть реализовано также с целью кинематического дробления стружки. Режим прерывания подачи включается путем задания параметров L_A и L_B в кадре УП либо с пульта оператора.

Управление частотой вращения шпинделя и подачей в функции пути. Линейное увеличение (уменьшение) частоты вращения шпинделя $n_{\text{ш}}$ и минутной подачи S осуществляется приращениями $\Delta n_{\text{ш}}$ и ΔS соответственно по мере обработки участков Δl между ними. Управляющие устройства при этом реализуют следующие зависимости [8]:

$$n_{\text{шк}} = n_{\text{шн}} \pm l \Delta n_{\text{ш}} / \Delta l, \quad (12)$$

$$S_{\text{к}} = S_{\text{н}} \pm l \Delta S / \Delta l, \quad (13)$$

где $n_{\text{шн}}$ и $n_{\text{шк}}$ – начальная и конечная частоты вращения шпинделя, мин^{-1} ; $S_{\text{н}}$ и $S_{\text{к}}$ – начальная и конечная скорости подачи, мм/мин ; l – длина перемещения, на которой частота вращения шпинделя изменяется от $n_{\text{шн}}$ до $n_{\text{шк}}$, а подача – от $S_{\text{н}}$ до $S_{\text{к}}$, мм .

Величина ΔS принимается из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин и т. д. Значение Δl находится из выражения $\Delta l = \pm l \Delta S / (S_{\text{к}} - S_{\text{н}})$ и принимается кратным длине перемещения исполнительного органа станка при подаче устройством ЧПУ одного импульса. Знак «плюс» или «минус» указывает соответственно на увеличение или уменьшение частоты вращения шпинделя и подачи. Число приращений n_s подачи и частоты вращения шпинделя на участке длиной l определяется из соотношения $n_s = l / \Delta l$. Величина $\Delta n_{\text{ш}}$ находится из выражения $\Delta n_{\text{ш}} = \Delta l (n_{\text{шк}} - n_{\text{шн}}) / l$. Параметры переменных режимов резания (подачи и частоты вращения шпинделя) $n_{\text{шн}}, \Delta n_{\text{ш}}, S_{\text{н}}, \Delta S, \Delta l$ задаются в кадре УП совместно с другой информацией либо формируются в модуле, выполняющем аппроксимацию кривых изменения частоты вращения шпинделя и подачи в функции пути.

На рис. 6. представлена схема алгоритма, реализующего математическую модель изменения частоты вращения шпинделя и минутной подачи. Работа по алгоритму происходит следующим образом. После очередного цикла интерполяции определяется, запрограммировано ли в данном кадре УП линейное изменение частоты вращения шпинделя и подачи (содержимое ячейки $\Delta l' \neq 0$), если «да», то содержимое ячейки $\Delta l'$ уменьшается на единицу и результат вычисления проверяется на равенство нулю. Так происходит до тех пор, пока величина $\Delta l'$ не станет равной нулю. При этом по максимальной координате обрабатывается такое количество импульсов, которое равно числу дискрет, необходимому для увеличения (или уменьшения) частоты вращения шпинделя на величину $\Delta n_{\text{ш}}$, а скорости минутной подачи на ΔS .

Скорость резания v при заданных значениях частоты вращения шпинделя (заготовки) $n_{ш}$ и диаметра обработки D определяется по следующей формуле:

$$v = \pi D n_{ш} / 1000 . \quad (14)$$

Заменив в формуле (14) $n_{ш}$ значением $n_{шк}$ из зависимости (12), получим зависимость для определения текущего значения скорости резания при изменении частоты вращения шпинделя в функции пути

$$v = \pi D \left(n_{шн} \pm \frac{l}{\Delta l} \Delta n_{ш} \right) / 1000 . \quad (15)$$

Устройство ЧПУ по алгоритму управления, представленному на рис. 6, реализует минутную подачу. Однако процесс резания для большинства методов механической обработки характеризуется подачей на оборот S_0 . Зависимость для определения текущего значения S_0 при согласованном изменении частоты вращения шпинделя (заготовки) $n_{ш}$ и минутной подачи S в функции пути имеет вид

$$S_0 = \frac{S_H \pm n_s \Delta S}{n_{шн} \pm n_s \Delta n_{ш}} . \quad (16)$$

Зависимость (16) получена путем подстановки в формулу $S_0 = S / n_{ш}$ вместо S значения S_k из (13), а вместо $n_{ш}$ значения $n_{шк}$ из (12) и замены отношения $l / \Delta l$ на n_s . Знак «плюс» в числителе и знаменателе равенства соответствует режиму разгона, «минус» – режиму замедления.

Подставив значение n_s из (1) в (16) и выполнив преобразования, получим зависимость для определения текущего значения подачи на оборот заготовки (инструмента) S_0 в функции времени для режима разгона

$$S_0 = \frac{\left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S \right) \Delta S}{n_{шн} \Delta S + \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H \right) \Delta n_{ш}} . \quad (17)$$

Текущее значение скорости резания в функции времени при этом определяется соотношением

$$v = \frac{\pi D}{1000} \left[n_{шн} + \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H \right) \Delta n_{ш} / \Delta S \right] . \quad (18)$$

Зависимость (18) получена подстановкой в (15) значения n_s из (1) с учетом того, что $n_s = l / \Delta l$. Зависимости для определения текущих значений S_0 и v в режиме замедления могут быть получены аналогично формулам (17) и (18). Отличие состоит в том, что в формулах (15) и (16) принимается знак «минус».

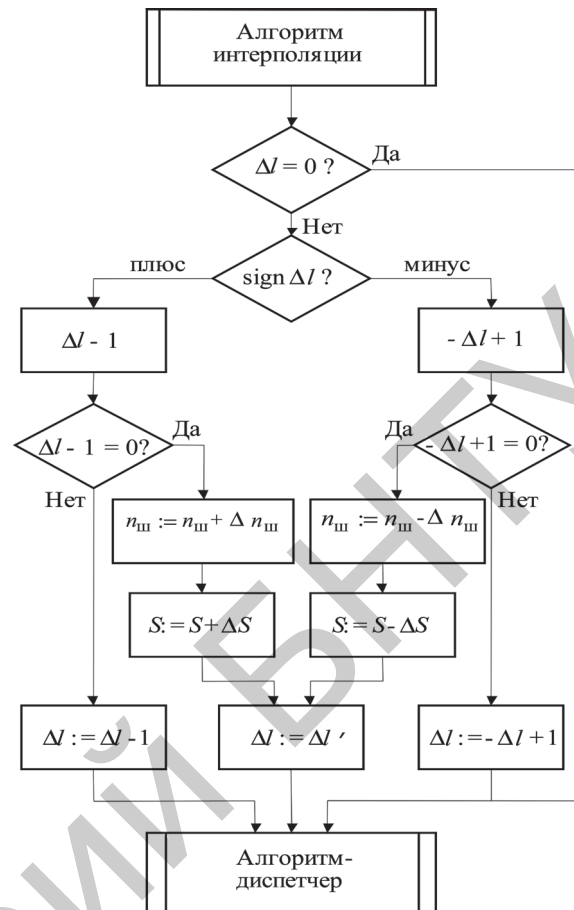


Рис. 6. Схема алгоритма управления частотой вращения шпинделя и подачи в функции пути

Программные модули, реализующие функцию управления нестационарными процессами резания. Программное обеспечение в значительной степени определяет уровень УЧПУ. Создание развитого ПО УЧПУ является весьма трудоемкой задачей, поэтому его построение осуществляется по блочно-модульному принципу с максимальной независимостью модулей и обеспечением их универсальности. Это обеспечивает «живучесть» разработанных модулей и УЧПУ в целом.

С точки зрения применения к различным видам оборудования условно ПО можно разделить на базовое ПО, общее для различных видов оборудования; групповое (технологическое) ПО, ориентированное на определенную группу станков [9, 10].

В функции базового ПО входят обеспечение взаимодействия аппаратуры и функциональных программ ЧПУ, а также определение стандартных способов взаимодействия между программами, выполняемыми в реальном времени. Ядро базового ПО (диспетчер) обеспечивает мультипрограммирование процессов ЧПУ: обработка прерываний, временные отсчеты, запуск и приостановка программ, обмен сообщениями и т.п.

В состав базового ПО входят ряд прикладных программных модулей и блоков, общих для станков различных групп. К ним относится модуль интерпретации УП, модуль управления электроавтоматикой, блоки интерполяции, управления приводами, ввода, вывода и редактирования УП и др. Основными элементами технологического ПО являются технологические циклы и макроопределения, реализуемые в виде подпрограмм подготовительных G-функций.

Увеличение объемов памяти и быстродействия УЧПУ позволяет создать развитые циклы для каждой группы станков, а внутри группы – циклы для различных видов обработки. При этом в память УЧПУ вводятся данные по режимам обработки применительно к используемым инструментам и алгоритмы их пересчета для ситуаций, свойственных определенным циклам.

Программные модули, реализующие математические модели и алгоритмы управления нестационарными процессами резания, входят в состав базового ПО. Структурно они объединены в блок управления нестационарными процессами резания (БУНПР), который является автономным, обладает алгоритмической структурой, собственными данными и интерфейсной оболочкой. Его взаимодействие с другими блоками УЧПУ осуществляется путем обмена информацией (рис. 7).

Информация каждого нового кадра поступает из блока ввода на преобразователь кодов (интерпретатор) в двоично-десятичном коде и в соответствии с адресами пересылается в блок интерполяции, блок задания скорости и БУНПР. В БУНПР информация будет заноситься при на-

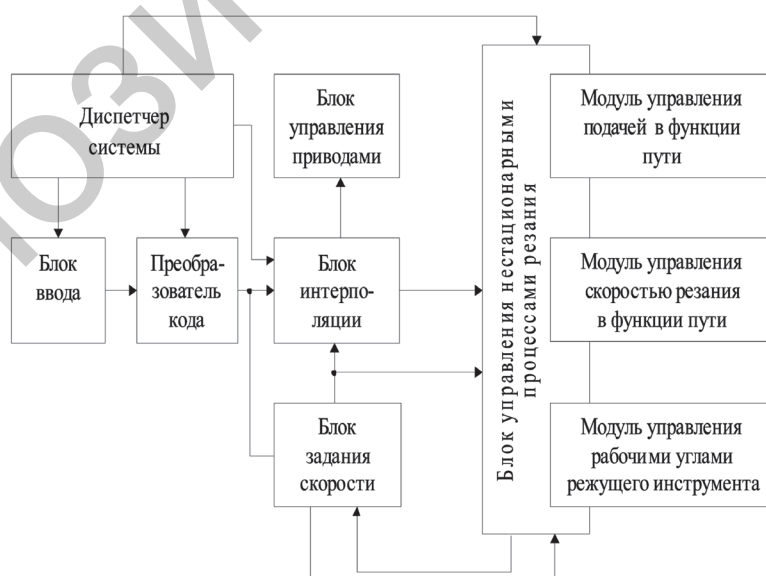


Рис. 7. Схема взаимодействия модулей управления нестационарными процессами резания с другими модулями микропроцессорного УЧПУ

личии в кадре УП адреса (адресов) параметра (параметров) кинематически нестабильного процесса резания.

При обработке каждого кадра УП блок интерполяции выдает импульсы унитарного кода на блок управления приводами с частотой, зависящей от частоты импульсов, поступающих из блока задания скорости. После каждого импульса из блока задания скорости текущее значение параметра в БУНПР увеличится на единицу. Когда оно станет равным величине параметра, поступающей на блок интерполяции из блока ввода через интерпретатор, в БУНПР управляющее воздействие (подача или частота вращения шпинделя) увеличится или уменьшится в соответствии со знаками на единицу дискретности. Новое значение параметра передается на блок задания скорости.

Интерфейс модулей, входящих в состав БУНПР (таблица), строится с помощью объектов первого класса объект – переменная и второго класса объект – процесс. Каждый объект первого класса соответствует одной из переменных модуля, каждый объект второго класса – одному конечному автомату, состояние которого есть состояние модуля, а переходы означают смену состояний.

Переходы при этом инициируются функциями внешних модулей (диспетчера) или органами управления УЧПУ. Такая структура интерфейса предполагает следующие возможности: модули БУНПР могут взаимодействовать с помощью собственных интерфейсов через единую коммуникационную среду, представляющую собой, по сути, виртуальную машину; одни модули могут управлять переходами других модулей в новое состояние (например, в состояние сброса, готовности запуска, работы, выхода из строя и др.). Каждый из модулей имеет свою область применения и включается путем задания соответствующих параметров (таблица).

Характеристика программных модулей

Модуль	Назначение модуля	Включение модуля
Модуль линейного изменения подачи в функции пути	Повышение производительности и точности обработки	Параметры S_n , ΔS , Δl задаются в кадре УП либо формируются автоматически (при наличии обратной связи)
Модуль модулированного изменения подачи	Снижение уровня вибраций при обработке нежестких деталей, дробление стружки	Параметры S_{min} , S_{max} , ΔS , Δl задаются в кадре УП либо формируются автоматически в зависимости от уровня вибраций
Модуль прерывания подачи	Дробление стружки, организация циклов с выдержкой времени	Параметры L_A , L_B задаются в кадре УП либо вводятся с пульта оператора
Модуль линейного изменения скорости резания в функции пути	Повышение стойкости режущего инструмента	Параметры v_n , Δv , Δl задаются в кадре УП либо формируются автоматически (при наличии обратной связи)
Модуль поддержания постоянства скорости резания и подачи на оборот	Повышение производительности обработки при торцовом и фасонном точении	В кадре УП задаются подготовительная функция G96, скорость резания v и подача S

В качестве идентификаторов этих параметров выбираются символы адресов кода ИСО-7 бит, которые не использованы для кодирования стандартных функций управления для конкретного сочетания станок – УЧПУ. При этом параметры задаются в кадре УП при детерминированном управлении либо формируются автоматически в системах адаптивного управления. При организации циклов механической обработки с включением в процесс резания кинематической нестабильности взаимодействие модулей БУНПР с модулями технологического программного обеспечения осуществляется посредством аппарата параметрического программирования с использованием формальных параметров, а также условных и безусловных переходов [11].

Заключение. Обосновано, что для повышения эффективности использования токарных станков с ЧПУ необходимо реализовать законы изменения управляющего воздействия, которые могут быть описаны в одном кадре управляющей программы и использованы как типовые решения при выполнении технологических переходов различной структуры. К таким законам от-

носятся: линейное изменение минутной подачи в функции пути; модулированное изменение подачи; прерывание подачи; линейное изменение скорости резания (частоты вращения шпинделя) и подачи в функции пути; поддержание постоянства скорости резания и подачи на оборот при торцовом и фасонном точении. В соответствии с выбранной стратегией управления разработаны инвариантные математические модели и алгоритмы указанных законов изменения управляющего воздействия с учетом особенностей современных устройств ЧПУ и требований, предъявляемых к ним, которые использованы при создании программных модулей для систем управления токарными станками.

Список использованной литературы

1. Старков, В. К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1984. – 120 с.
2. Каштальян, И. А. Математические модели и алгоритмы управления нестационарными процессами формообразования на станках с ЧПУ / И. А. Каштальян // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 6. – С. 18–24.
3. Устройство числового программного управления: а.с. 1160368 СССР, МКИ G 05 B 19/18 / В.И. Резниченко, И. А. Каштальян, Р. Б. Торбочкин, А. А. Боганов; Минское ПО по выпуску автомат. линий. – № 3680917/24-24; заявл. 23.12.83; опубл. 07.06.85 // Открытия. Изобрет. – 1985. – № 21. – С. 189–190.
4. *Kashtalyan, I. A. Increase in Efficiency of Flexible Lathe Production Modules in Quantity Production / I. A. Kashtalyan, A. P. Parkhutik // Motauto'99: Proceedings of the International Conference, Plovdiv, 13–15 October 1999: 5 vol. / Union of Mechanical Engineering, – Plovdiv, 1999. – Vol. 5. – P. 9–12.*
5. Устройство числового программного управления: пат. 5129 Респ. Беларусь, МПК G 05B 19/18, 19/416 / В. И. Резниченко, И. А. Каштальян, С. И. Романчук; заявитель Белорусский национальный технический ун-т. – № а 19981075; заявл. 26.11.98; опубл. 30.06.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 2. – С. 209.
6. Устройство числового программного управления: пат. 5130 Респ. Беларусь, МПК G 05B 19/18, 19/416 / И. А. Каштальян, В. И. Резниченко, С. И. Романчук; заявитель Белорусский национальный технический ун-т. – № а 1998200; заявл. 30.12.98; опубл. 30.06.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 2. – С. 209–210.
7. *Kashtalyan, I. A. Improvement in Machining of Spherical Surfaces by Numerically-controlled Lathes / I. A. Kashtalyan // Proceedings of the 38-th International Conference, Bratislava, Slovak Republic, 8–10 September 1997.*
8. Каштальян, И. А. Реализация функции согласованного управления скоростью резания и подачей на станках с ЧПУ / И. А. Каштальян // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 35–40.
9. Соломенцев, Ю. М. Построение персональных систем ЧПУ (PCNC) по принципу открытых систем / Ю. М. Соломенцев, В. Л. Сосонкин, Г. М. Мартинов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 1997. – № 3. – С. 68–75.
10. Сосонкин, В. Л. Некоторые принципы разработки систем ЧПУ нового поколения / В. Л. Сосонкин // СТИН. – 2000. – № 9. – С. 24–29.
11. Гжиров, Р. И. Программирование обработки на станках с ЧПУ: справ. / Р. И. Гжиров, П. П. Серебrenицкий. – Л.: Машиностроение, 1990. – 588 с.

Поступила в редакцию 09.07.2015