

настройки станков. Требуемая функциональная зависимость между перемещениями связываемых рассматриваемой кинематической цепью исполнительных органов определяется на основе анализа математической модели схемы формообразования обрабатываемой поверхности.

Изложенные принципы построения кинематики формообразующих систем носят универсальный характер и могут быть использованы при проектировании станков для механической и физико-технической обработки с различными системами управления. На их основе построены, например, кинематические структуры формообразующих систем станков с механическими и немеханическими связями для обработки некруглых поверхностей деталей профильных моментопередающих соединений, некруглых зубчатых колес, колес с бочкообразными зубьями и др. [7-9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1982. – 358 с.
2. Смирнов А.И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении / А.И. Смирнов. – М.: НИИМаш, 1982. – 49 с.
3. Данилов В.А. Синтез и оптимизация кинематической структуры станков с использованием типовых модулей / В.А. Данилов // СТИН.– 1999.– №7.– С. 9 – 15.
4. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компнететики) / Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
5. Данилов В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов // Мир технологий. – 2003. №1. – С. 61–71.
6. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
7. Данилов В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер – механик. –2003. –№3(20). – С. 26-31.
8. Данилов В.А. Синтез внутренних связей кинематических групп при проектировании металлорежущих станков / В.А. Данилов // Машиностроение: Республиканский межведомственный сб. научных трудов, Вып. 25. – Мн: БНТУ, 2010. – С. 312–318.
9. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов – Мн.: Наука и техника, 1995. – 264 с.

УДК 621.9.06

Каштальян И.А.

### РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ РЕЗАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Рассмотрена задача повышения эффективности использования станков с числовым программным управлением (ЧПУ) путем создания адаптивных систем управления нестационарными процессами резания. Представлены математические модели и алгоритмы управления подачей в функции пути. Описано взаимодействие программных модулей, реализующих математические модели и алгоритмы управления подачей, с другими модулями микропроцессорной системы ЧПУ. Приведены примеры использования разработанных программных модулей при разработке систем адаптивного управления нестационарными процессами резания на токарных станках с ЧПУ.*

**Введение.** Современный этап развития машиностроительного производства характеризуется широким внедрением станков и станочных комплексов с 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 нестабильность процесса резания, которая обусловлена рядом систематических и случайных факторов (нестабильность структуры и физико-механических свойств заготовок, нестабильность припуска, неоднородность пластической деформации при резании, изнашивание режущего инструмента). Однако современные станки с ЧПУ оснащены системами управления, которые ориентированы на управление процессами резания без учета факторов

нестабильности. 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 нестационарными процессами резания позволит снизить негативное влияние факторов нестабильности на выходные параметры обработки (производительность, точность, качество поверхности) и расширить функциональные возможности оборудования с ЧПУ.

**Основная часть.** На основе анализа широкой номенклатуры деталей различных классов, изготавливаемых на станках с ЧПУ, установлено, что для повышения эффективности их использования необходимо реализовать законы изменения управляющего воздействия, которые могут быть описаны в одном кадре управляющей программы и использованы как типовые решения при выполнении различных технологических операций механической обработки. К таким законам относятся: линейное изменение минутной подачи в функции пути; модулированное изменение подачи; прерывание подачи; поддержание постоянства скорости резания и подачи на оборот при торцовом и фасонном точении. В соответствии с выбранной стратегией управления [1] разработаны инвариантные математические модели и алгоритмы указанных законов изменения управляющего воздействия с учетом особенностей современных систем ЧПУ и требований, предъявляемых к ним, которые использованы при создании программных модулей для систем управления станками различных технологических групп [1, 2].

Линейное изменение минутной подачи осуществляется приращениями величиной  $\Delta S$  по мере обработки участка траектории длиной  $\Delta l$ . Управляющее устройство при этом реализует зависимость:  $S_k = S_n \pm \Delta S / \Delta l$ , 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  $\Delta S$  выбирают из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин; значение  $\Delta l$  задают со знаком «плюс» или «минус» и принимают кратным единице дискретности перемещения (длине перемещения исполнительного органа станка при подаче от устройства ЧПУ 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 начальной скоростью подачи  $S_n$ , а угол наклона – отношением  $\Delta S / \Delta l$ .

Модулированное изменение подачи заключается в периодическом ее увеличении от  $S_{\min}$  до  $S_{\max}$  с последующим снижением до первоначального значения. Подача между ее пиковыми значениями изменяется приращениями на величину  $\Delta S$  по мере обработки участков  $\Delta l$  между этими 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  $S_{\max}$ . Длина пути разгона (замедления) при этом определяется из выражения  $l_1 = n_s \Delta l$ ; значение  $\Delta S$  выбирается кратным 0,1 мм/мин;  $\Delta l$  принимается кратной единице дискретности.

Программные модули, реализующие математические модели и алгоритмы управления подачей, включены в состав базового программного обеспечения микропроцессорного устройства ЧПУ мод. КМ 65 [3]. Структурно они объединены в блок управления нестационарными процессами резания (БУНПР), который является автономным, обладает алгоритмической структурой, собственными данными и интерфейсной оболочкой. 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 наличии в кадре УП адреса (адресов) параметра (параметров) кинематически нестабильного процесса резания (рис. 1.).

В процессе обработки 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 значению параметра, поступающего 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. Его новое значение передается на блок задания скорости.

Взаимодействие БУНПР с другими блоками устройства ЧПУ осуществляется путем обмена информацией. Каждый из модулей имеет свою область применения и включается путем задания соответствующих параметров. В качестве идентификаторов этих параметров выбираются символы адресов кода ИСО-7 бит, которые не использованы для кодирования стандартных функций управления для конкретного сочетания станок – устройство ЧПУ. Причем параметры задаются в кадре УП при детерминированном управлении, либо формируются автоматически в системах адаптивного управления.

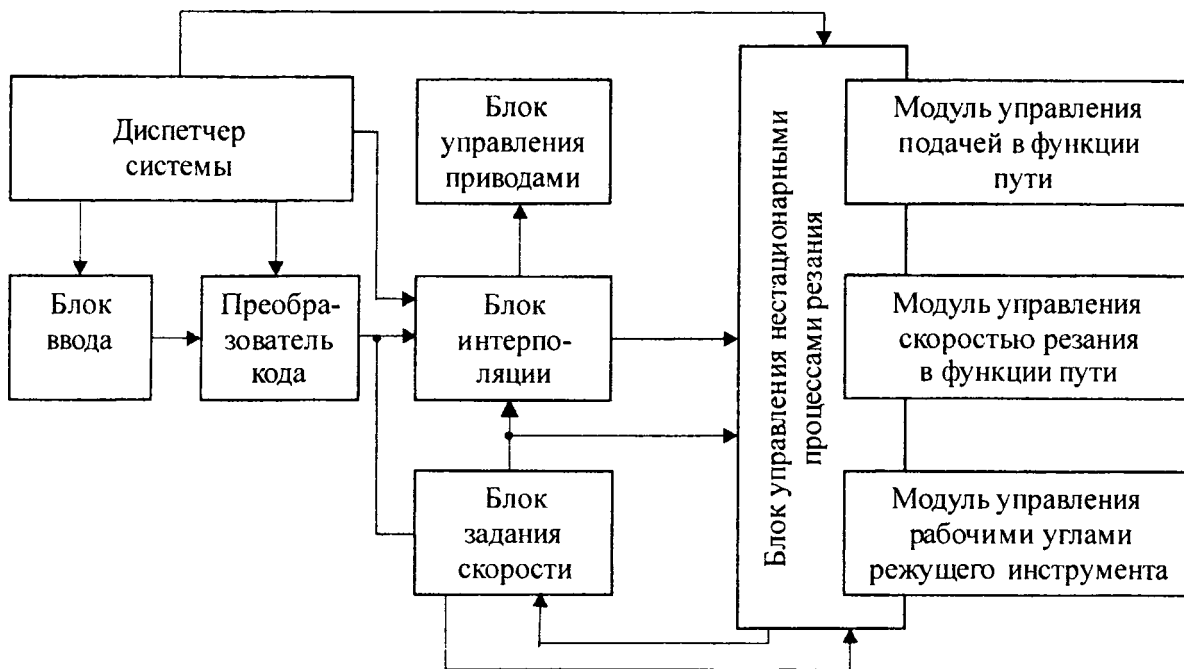


Рис. 1. – Схема взаимодействия модулей управления нестационарными процессами резания с другими модулями микропроцессорного устройства ЧПУ

На базе программного модуля, реализующего функцию линейного изменения подач в функции пути, разработана адаптивная система управления токарным станком с ЧПУ мод. 1А734ФЗ. Система позволяет реализовать любой закон изменения силы резания в функции пути и поддерживать его при случайных колебаниях глубины резания  $t$  и твердости материала детали  $HB$  [4]. Ее настройка выполняется при вводе соответствующего закона изменения составляющей силы резания  $P_z$  в функции пути, который определяется заранее расчетом либо экспериментально.

Вследствие технических трудностей непосредственного измерения величины  $P_z$  на многоинструментальных станках в качестве измеряемого параметра выбрана потребляемая двигателем главного движения активная мощность  $N_d$ , которая связана с тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  зависимостью

$$N_d = N_x + P_z \omega_{ш} R, \quad (1)$$

где  $N_x$  – активная мощность, потребляемая двигателем шпинделя в режиме холостого хода, кВт;  $\omega_{ш}$  – угловая скорость вращения шпинделя, рад/с;  $R$  – радиус обработки (расстояние от вершины режущей кромки резца до оси вращения заготовки), м.

Система (рис. 2.), включающая блок 1 задания программы, блок 2 интерполяции и блок 3 задания скорости подачи, управляет станком 4 путем воздействия на привод 5 продольной подачи, привод 6 поперечной подачи и двигатель привода 7 шпинделя. Кроме того, на процесс резания оказывают возмущающие воздействия глубина резания  $t$  и твердость материала детали  $HB$ . Активная мощность  $N_d$ , потребляемая двигателем привода 7 шпинделя, измеряется датчиком 8 и преобразуется им в напряжение  $U_{N_d}$ , пропорциональное величине  $N_d$ . Компенсатор 9 после каждого включения двигателя привода 7 формирует на выходе и запоминает напряжение  $U_{N_x}$ ,

пропорциональное активной мощности  $N_x$ , потребляемой этим двигателем в режиме холостого хода. Счетчик 10 содержит в виде двоичного кода  $K_R$  информацию о радиусе обработки. Начальная информация записывается в счетчик при нахождении суппорта поперечной координаты в опорной точке. Изменение этой информации происходит под действием приводных импульсов поперечной координаты, поступающих с одного из выходов блока 2 интерполяции на вход реверсивного счетчика 10. Ввод в счетчик 10 информации, соответствующей величине вылета резца, осуществляется под действием управляющей программы, формируемой блоком 1. Для этого в программе записывается специальная команда вылета резца (номер коррекции) и необходимая величина перемещения по поперечной координате. Под действием команды вылета резца блок 1 задания программы блокирует прохождение приводных импульсов через ключ 11, в результате чего информация реверсивного счетчика 10 изменится при неподвижном суппорте поперечной координаты (приводится в соответствие с истинным радиусом обработки).

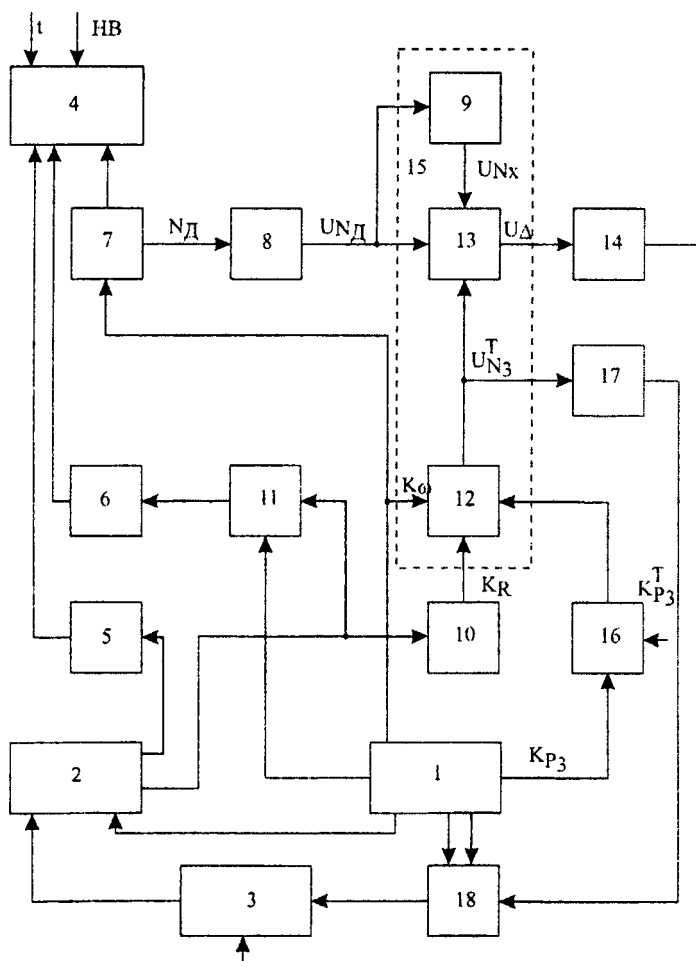


Рис. 2. -- Структурная схема адаптивной системы управления

Код радиуса обработки  $K_R$  с выхода счетчика 10 поступает на вход вычислительного блока 12, на другие входы которого из блока 1 задания программы поступает код угловой скорости вращения шпинделя  $K_\omega$ , который образуется под воздействием управляющей программы, и текущее значение заданной силы резания  $K_{P_3}^T$ , которое формируется в блоке 16 реализации закона преобразования силы резания с устройством ввода. Начальное значение  $K_{P_3}$  образуется под воздействием управляющей программы и поступает на вход блока 16 реализации закона преобразования силы резания с устройством ввода. В этом блоке она изменяется в соответствии с законом, информация о котором поступит с устройства ввода. На выходе вычислительного блока 12 формируется напряжение  $U_{N_3}^T$ , пропорциональное текущему произведению значений кодов  $K_{P_3}^T$ ,  $K_\omega$ ,  $K_R$ , а

следовательно, пропорциональное и заданной текущей мощности резания  $N_3^T$ , которая определяется из равенства (1) при условии  $P_z = P_3^T$ .

$$N_3^T = P_3^T \omega_{ш} R \quad (2)$$

Напряжение, пропорциональное текущему значению мощности резания с выхода вычислительного блока 12 поступает на вход блока 17 изменения тактовой частоты и на вход блока 13 сравнения. На выходе блока 17 формируется текущее значение кода тактовой частоты, которое поступает на вход блока 3 задания скорости при условии, что на вход второго ключа 18, связанного с одним из выходов блока 1 задания программы, не поступит команда блокировки (признак быстрого хода). В противном случае ключ 18 пропускает на вход блока 3 задания скорости код тактовой частоты, соответствующий быстрому ходу, сформированному в блоке 1 задания программы.

Блок 13 сравнения формирует на своем выходе напряжение рассогласования  $U_{\Delta}$  в соответствии с равенством

$$U_{\Delta} = U_{N_d} - U_{N_x} - U_{N_3^T} \quad (3)$$

Анализируя равенства (1), (2) и (3), можно заключить, что  $U_{\Delta} = 0$  при  $P_z = P_3^T$ .

Регулятор подачи 14, воздействуя на блок 3 задания скорости, корректирует тактовую частоту работы блока 2 интерполяции таким образом, чтобы  $U_{\Delta}$  было равно нулю. При этом блок 3 задания скорости формирует результирующее значение тактовой частоты.

Экспериментальная проверка систем управления точностью формообразования нежестких деталей проводилась с использованием станка мод. 1A734Ф3, оснащенного микропроцессорным УЧПУ КМ 65 [3]. Обработывалась партия заготовок из стали 40Х при консольном закреплении в трехкулачковом патроне (диаметр заготовки 42 мм, длина консоли 120 мм). Обработка наружной поверхности велась подрезно-проходным резцом с механическим креплением трехгранной режущей пластины из твердого сплава Т15К6 при скорости резания  $v = 120$  м/мин и глубине  $t = 2$  мм.

Измерение диаметральных размеров в фиксированных поперечных сечениях заготовки осуществлялось электронной скобой «Micromaster» фирмы «TESA» (Швейцария) с ценой деления 0,001 мм (диапазон измерений 25–50 мм).

Одну заготовку из партии обрабатывали с постоянной радиальной составляющей силы резания  $P_{y_{max}}$ , определяемой мощностью привода, прочностью механической системы и требованиями к шероховатости обрабатываемой поверхности. Максимальной величине  $P_{y_{max}}$  соответствует и максимальная величина подачи на оборот  $S_{o_{max}}$ . Последняя соответствует верхнему значению при ее регулировании. Заготовку, обработанную с  $P_{y_{max}} = \text{const}$ , измеряли в ряде фиксированных поперечных сечений. Причем измерение осуществляли без отвода резца от заготовки. Затем производили выхаживание (резцу сообщалась обратная подача) и повторный обмер заготовки. Величину силы  $P_y$ , необходимой для компенсации погрешности диаметрального размера в  $i$ -м сечении заготовки, подсчитывали по следующей зависимости

$$P_{y_i} = \frac{D_{o_{min}} - D_{B_i}}{D_{o_i} - D_{B_i}} P_{y_{max}}, \quad (4)$$

где  $D_{o_i}$  – диаметральный размер в  $i$ -м сечении после обработки с  $P_{y_{max}} = \text{const}$ , мм;

$D_{o_{min}}$  – минимальный диаметральный размер послеобработки с  $P_{y_{max}} = \text{const}$ ;  $D_{B_i}$  – диаметральный размер в  $i$ -м сечении после выхаживания, мм.

На основании известной зависимости можно записать [5]

$$P_{y_{max}} = C_{P_y} t^{x_{P_y}} S_{o_{max}}^{y_{P_y}} v^{z_{P_y}} K_{P_y}; \quad P_{y_i} = C_{P_y} t^{x_{P_y}} S_{o_i}^{y_{P_y}} v^{z_{P_y}} K_{P_y},$$

где  $C_{P_y}$  – постоянная, характеризующая определенные условия резания для конкретной марки обрабатываемого материала;  $t$  – глубина резания, мм;  $S_{0_i}$  – значение подачи на оборот в  $i$ -м сечении заготовки, мм/об;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $K_{P_y}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние различных факторов на  $P_y$ ;  $x_{P_y}, y_{P_y}, z_{P_y}$  – показатели степени.

Используя эти зависимости, выражение (4) записываем в виде

$$S_{0_i} = S_{0_{\max}} \sqrt[y_{P_y}]{\frac{D_{0_{\min}} - D_{B_i}}{D_{0_i} - D_{B_i}}} \quad (5)$$

Выражение (5) применяется при расчете величины подачи, необходимой для компенсации погрешности диаметрального размера в каждом фиксированном сечении заготовки.

По диаметральным размерам заготовки в фиксированных поперечных сечениях были определены законы изменения подачи на оборот  $S_0$  и радиальной составляющей силы резания  $P_y$  в функции пути. Тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  определялась из соотношения  $P_y = 0,4P_z$  [5]. Полученные законы были введены в оперативную память УЧПУ и использованы при обработке заготовок. Причем заготовки были разделены на три группы (по 30 в группе). Первая группа заготовок обрабатывалась с переменной подачей, которая изменялась в пределах от 0,5 мм/об до 0,1 мм/об по мере перемещения резца в сторону установочных элементов патрона. При обработке второй группы заготовок поддерживался установленный закон изменения радиальной составляющей силы резания  $P_y$  в функции пути. Третья группа заготовок обрабатывалась с постоянной подачей  $S_0 = 0,3$  мм/об, что соответствует среднему значению подачи на оборот при обработке заготовок первой группы.

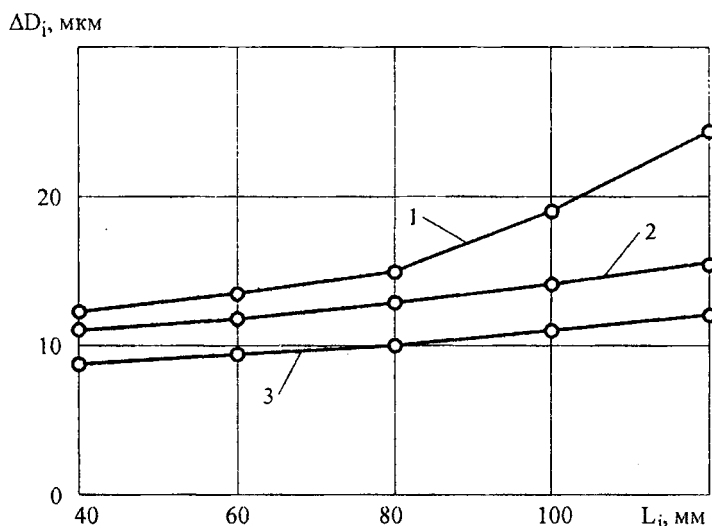


Рис. 3. – Закономерности изменения отклонений диаметрального размера заготовки  $\Delta D_i$  в фиксированных сечениях  $L_i$  от номинального  $D = 42$  мм: 1 – точение с постоянной подачей; 2 – поддержание расчетного закона изменения подачи на оборот в функции пути; 3 – поддержание расчетного закона изменения радиальной составляющей силы резания в функции пути адаптивной системой управления

Законы изменения отклонений диаметрального размера  $\Delta D_i$  от номинального  $D = 42$  мм в фиксированных сечениях заготовки представлены на рис. 3.

Из графиков видно, что при линейном изменении подачи в функции пути точность формы детали в продольном сечении увеличивается более чем в два раза по сравнению с обычной обработкой (с постоянной подачей). Это объясняется тем, что регулированием подачи учитывается

целый ряд факторов, оказывающих влияние на точность формы детали в продольном сечении. К таким факторам в первую очередь относятся: изменение положения точки, в которую прикладывается составляющая силы резания  $P_y$ , по длине рабочего хода; изменение траектории перемещения настроечной точки режущего инструмента, вызванное суммарной геометрической погрешностью станка, измеренной в направлении действия составляющей силы резания  $P_y$ . Эффект повышения точности формы детали в продольном сечении наиболее ярко проявляется при использовании адаптивной системы, обеспечивающей поддержание заданного закона изменения силы резания в функции пути. Данное явление можно объяснить тем, что при управлении процессом формообразования детали, кроме указанных ранее систематических факторов, учитывается ряд случайных. Прежде всего, это относится к колебаниям припуска по длине обработки и твердости материала заготовки.

Среди многочисленных и разнообразных причин, снижающих надежность станков с ЧПУ и как следствие эффективность их использования, следует выделить вибрации, возникающие в процессе резания. Вибрации вызывают ухудшение качества обработанной поверхности, повышают износ и выкрашивание режущего инструмента, снижают точность и долговечность станка. Возникновение вибраций при обработке резанием характеризуется свойствами упругой системы и возникающими силами. Соотношение между этими параметрами определяет как саму возможность возникновения вибраций, так и их интенсивность (амплитуду и частоту). Управляя указанным соотношением, можно добиться снижения уровня вибраций или исключить их полностью [6].

Необходимость в снижении уровня вибраций наиболее часто возникает при обработке нежестких заготовок. Когда процесс формообразования выполняется на токарных станках с ЧПУ, устойчивость технологической системы к автоколебаниям при доминирующей не жесткости заготовки может быть повышена за счет введения в кинематическую схему обработки дополнительного движения (например, модулированного изменения подачи) [2]. Обработку с модулированной подачей следует рассматривать как вариант обработки с вибрациями в направлении подачи. При этом амплитуда  $A_p$  изменения силы резания, вызываемая модулированным изменением подачи, должна соответствовать условию [7]

$$A_p \geq \frac{a_0(\omega_d^2 - f_m^2)m_d}{1,41}, \quad (6)$$

где  $a_0$  – величина установившейся амплитуды колебаний при отсутствии модулированного изменения подачи, м;  $\omega_d$  – частота автоколебаний, Гц;  $f_m$  – частота модулированного изменения подачи, Гц;  $m_d$  – приведенная масса заготовки, кг.

Зависимость (6) описывает условия гашения автоколебаний при доминирующей не жесткости заготовки и используется для установления взаимосвязи параметров вибраций с параметрами асинхронной силы, вызванной модулированным изменением подачи.

Включение режима модулированного изменения подачи может осуществляться путем задания в кадре УП совместно с геометрической и технологической информацией параметров  $\Delta S$ ,  $\Delta l$ ,  $S_{\min}$ ,  $n_s$ , либо путем формирования этих параметров автоматически в зависимости от уровня вибраций, определяемых в процессе резания.

Вариант автоматического формирования параметров модулированной подачи является предпочтительным [7]. При его использовании исключается необходимость в предварительном исследовании вибраций, упрощается подготовка УП. Кроме того, появляется возможность использовать режим модулированного изменения подачи с целью снижения уровня вибраций при обработке любых по сложности заготовок независимо от размера партии. Для реализации этого варианта станок с ЧПУ оснащается системой управления, обеспечивающей измерение мощности резания и интенсивности вибраций (амплитуды и частоты), а также преобразование этих параметров в цифровые коды [8]. Структурная схема такой системы управления представлена на рис. 4.

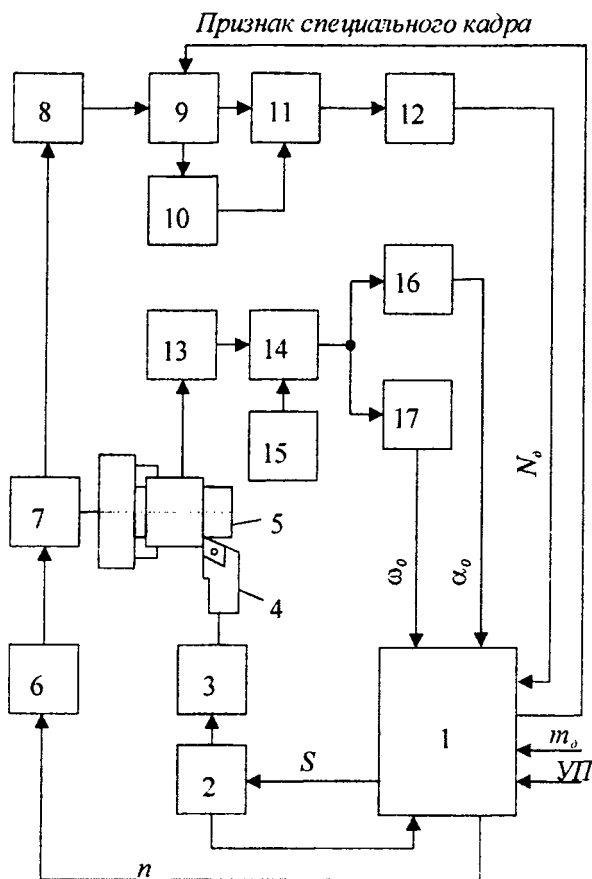


Рис. 4. – Структурная схема системы управления уровнем вибраций

Система работает следующим образом. Устройство числового программного управления 1 в соответствии с УП вырабатывает управляющие импульсы, которые поступают на блок 2 управления приводом подачи и блок 6 управления приводом главного движения. В результате привод 3 подачи осуществляет перемещение резца 4 с заданной скоростью подачи  $S$ , а привод 7 главного движения осуществляет вращение заготовки 5 с частотой  $n_{ш}$ . Активная мощность  $N_d$ , потребляемая двигателем привода 7 главного движения, измеряется датчиком 8 мощности и преобразуется им в напряжение  $U_{N_d}$ , пропорциональное величине  $N_d$ . Функцию автоматической компенсации мощности холостого хода при этом выполняют ключ 9 и компенсатор 10. Режим холостого хода устанавливается с помощью ключа 9 при наличии признака специального кадра УП, в котором задана необходимая частота вращения заготовки. Компенсатор 10 формирует и запоминает напряжение, пропорциональное активной мощности, потребляемой двигателем в режиме холостого хода  $U_{N_x}$ . В результате из входов сумматора 11 поступает напряжение  $U_{N_d}$ , пропорциональное активной мощности  $N_d$ , потребляемой двигателем под нагрузкой, а на второй – напряжение  $U_{N_x}$ , пропорциональное мощности холостого хода  $N_x$ . После операции вычитания ( $U_{N_d} - U_{N_x}$ ) на выходе сумматора получаем напряжение, пропорциональное мощности резания  $U_{N_p}$ , которое с помощью аналого-цифрового преобразователя 12 преобразуется в цифровую форму и поступает на один из входов устройства ЧПУ. Если уровень вибраций, а следовательно, и сигнал с выхода датчика 13 меньше величины зоны нечувствительности усилителя 14, определяемой сигналом с датчика 15, сигнал на выходе усилителя равен нулю. Следовательно, равны нулю значения амплитуды  $a_0$  на выходе аналого-цифрового преобразователя 16 и частоты  $\omega_d$  на выходе определителя частоты 17. При этом привод подачи 3 с блоком управления приводом подачи 2 обеспечивает заданное в УП значение подачи. Когда уровень вибраций возрастет и сигнал с выхода датчика 13 станет больше величины зоны нечувствительности усилителя 14, на выходе последнего появится сигнал, величина



которого определяет значения параметров  $a_0$  и  $\omega_d$ . После преобразования в цифровую форму эти параметры вводятся в память устройства ЧПУ и совместно с данными о массе детали  $m_d$  и мощности резания  $N_p$  используются для определения частоты  $f_m$  и амплитуды  $A_p$  изменения силы резания и последующего формирования параметров модулированного изменения подачи  $S_{\min}, \Delta S, \Delta l, n_s$ .

Обобщенный алгоритм формирования параметров модулированного изменения подачи заключается в следующем:

1. Определяется тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  по зависимости  $P_z = 30N_p / \pi n_{ш} R$ . При этом частота вращения заготовки  $n_{ш}$  задается в УП и ее текущее значение хранится в оперативной памяти устройства ЧПУ. Текущее значение радиуса обработки  $R$  определяется положением настроечной точки реза в системе координат детали, которое непрерывно отслеживается устройством ЧПУ (память положения).

2. Выбирается амплитуда  $A_{P_z}$  тангенциальной составляющей силы резания в % к полученному значению  $P_z$  (например, с дискретностью 5 %). Максимальное значение  $A_{P_z}$  при этом не может превышать 50 % от  $P_z$ .

3. Вычисляются пиковые значения силы резания  $P_z$ :  $P_{z\min} = P_z - A_{P_z}$ ;  $P_{z\max} = P_z + A_{P_z}$ .

4. Определяются пиковые значения подачи на оборот по известным зависимостям [5]

$$S_{0\min} = \left( \frac{P_{z\min}}{C_{P_z} t^{x_{P_z}} v^{z_{P_z}} K_{P_z}} \right)^{\frac{1}{y_{P_z}}}; \quad S_{0\max} = \left( \frac{P_{z\max}}{C_{P_z} t^{x_{P_z}} v^{z_{P_z}} K_{P_z}} \right)^{\frac{1}{y_{P_z}}}.$$

Значения постоянного коэффициента  $C_{P_z}$ , поправочного коэффициента  $K_{P_z}$  и показателей степени  $x_{P_z}, y_{P_z}, z_{P_z}$  выбираются из таблицы соответствия, представленной в памяти устройства ЧПУ. Глубина резания  $t$  задается в УП. Скорость резания  $v$  определяется устройством ЧПУ автоматически по текущим значениям частоты вращения шпинделя  $n_{ш}$  и радиуса обработки  $R$ .

5. Определяются пиковые значения минутной подачи:  $S_{\min} = S_{0\min} n_{ш}$ ;  $S_{\max} = S_{0\max} n_{ш}$ . Принимается значение  $\Delta S$  из ряда: 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин и т.д. и определяется число приращений подачи  $n$ , при ее изменении от  $S_{\min}$  до  $S_{\max}$ :  $n_s = (S_{\max} - S_{\min}) / \Delta S$ .

6. Определяется частота  $f_m$  модулированного изменения подачи

$$f_m \geq \sqrt{\omega_d^2 - \frac{1,41 K_p A_{P_z}}{a_0 m_d}},$$

где  $K_p$  - коэффициент, учитывающий отношение равнодействующей силы резания  $P$  к тангенциальной составляющей  $P_z$  ( $K_p = 1,1-1,15$ ).

7. Определяется период колебания силы резания  $T_s$ :  $T_s = 1 / f_m$ .

8. Определяется  $\Delta l$ :

$$\Delta l = T_s \Delta S / 60 \ln \frac{S_{\max} (S_{\max} - \Delta S)}{S_{\min} (S_{\min} + \Delta S)}.$$

9. Выполняется проверка условия  $\Delta l \geq Z_0$ , где  $Z_0$  - единица дискретности. Если условие не выполнено, то принимается очередное значение  $\Delta S$  (см. пункт 5) и определяется новое значение  $\Delta l$ . В противном случае полученное значение  $\Delta l$  округляется до ближайшего кратного одной дискрете.

10. Полученные значения  $S_{\min}, \Delta l, \Delta S, n_s$  подаются на вход алгоритма модулированного изменения подачи. Если при этом уровень вибраций не снизился, то выбирается очередное значение амплитуды  $A_{P_z}$  (см. пункт 2) и определяются новые значения  $S_{\min}, \Delta l, \Delta S, n_s$ . Так происходит до тех пор, пока вибрации не снизились до уровня, определяемого задатчиком 15 (рис. 4.).

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием станка мод. 1А734ФЗ, оснащенного микропроцессорным устройством ЧПУ КМ85. Обработывалась наружная поверхность втулок из стали 40ХН (длина втулки 145 мм, наружный диаметр 150 мм, внутренний 135 мм). Заготовка крепилась в патроне консольно. Обработка велась подрезно-проходным резцом с механическим креплением трехгранной пластины из твердого сплава Т15К6. Выполнялась серия пробных проходов с постоянной и модулированной подачей. Постоянная подача принималась равной 0,3 мм/об. Параметры модулированной подачи устанавливались автоматически в зависимости от уровня вибраций, измеряемых в процессе резания. Границы виброустойчивости оценивались по предельной глубине резания  $t$ . Для этого при фиксированных значениях скорости резания и подачи (постоянной и модулированной) устанавливалась глубина резания, при которой появляются вибрации (рис. 5.).

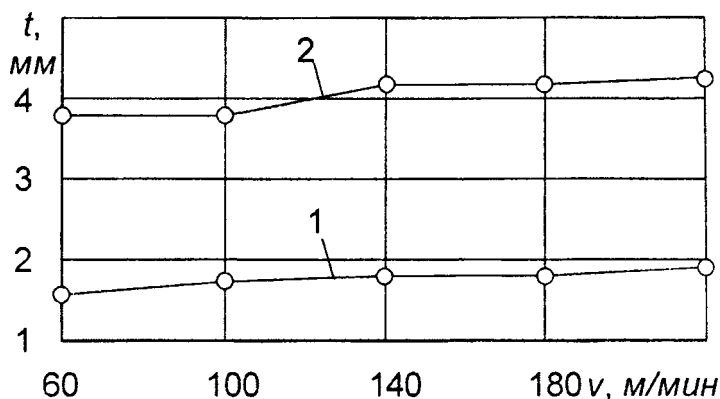


Рис. 5. – Границы виброустойчивости технологической системы при обработке с постоянной подачей (1) и с модулированной подачей (2)

В результате определено, что устойчивость технологической системы при точении с модулированной подачей существенно повышается в широком диапазоне скоростей резания. Это позволяет за счет увеличения глубины резания повысить более чем в два раза производительность обработки нежестких заготовок.

**Выводы.** На токарных станках с микропроцессорными устройствами ЧПУ функция управления точностью формообразования нежестких деталей может быть реализована путем линейного изменения минутной подачи в функции пути. Причем параметры переменной подачи могут формироваться автоматически в соответствии с заданным законом изменения силы резания, контролируемой датчиками адаптивной системы. При обработке сравнительно больших и часто повторяющихся партий заготовок закон изменения подачи (или силы резания) в функции пути может устанавливаться экспериментально по методике, которая базируется на определении диаметральных размеров заготовки в ряде фиксированных поперечных сечений после продольного точения с максимально допустимой радиальной составляющей силы резания и после выхаживания (сообщения резцу обратной подачи).

Преднамеренное введение в процесс резания кинематической неустойчивости путем модулированного изменения подачи в функции пути может быть эффективно использовано с целью повышения виброустойчивости технологической системы при обработке нежестких заготовок. Реализация предложенной математической модели модулированного изменения подачи в адаптивной системе управления токарным станком с ЧПУ позволяет добиться сдвига границы самовозбуждения колебаний в сторону увеличения глубины резания, при этом производительность обработки нежестких заготовок существенно повышается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Подураев В.Н. Динамическая модель элементов технологической системы с учетом кинематической неустойчивости процесса резания / В.Н. Подураев, В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – С. 18–23.
3. Устройство числового программного управления: пат. 5128 Респ.

Беларусь, МПК G05B 19/18, 19/416 / И.А. Каштальян В.И. Резниченко, А.П. Пархутик; заявитель Белорусский национальный технический университет. - № а 19981074; заявл. 26.11.1998; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. - 2003. - №2. - С. 208. 4. Адаптивная система управления станком: пат. 6148 Респ. Беларусь, МПК G 05B 19/39 / И.А. Каштальян, М.К. Цыркунов; заявитель Белорусский национальный технический ун-т. - № а 20000537; заявл. 09.06.00; опубл. 30.06.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. - 2004. - № 2. - С. 229-230. 5. Ящерицин П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. - Минск: Выш. шк., 1990. - 512 с. 6. Санкин Ю.Н. Устойчивость токарных станков при неопределенной характеристике процесса резания / Ю.Н. Санкин Н.Ю. Санкин // СТИН. - 1998. - № 10. - С. 7-11. 7. Адаптивная система управления станком: пат. 8437 Респ. Беларусь, МПК G 05B 19/00 / И.А. Каштальян, М.К. Цыркунов, Ю.М. Цыркунов, П.К. Жуковский; заявитель Белорусский национальный технический ун-т. - № а 20030651; заявл. 26.06.03; опубл. 30.12.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. - 2006. - № 4. - С. 119-120. 8. Кочинеев Н.А. Измерение относительных колебаний заготовок и инструмента датчиками абсолютных колебаний / Н.А. Кочинеев, А.Х. Хачатурян // Станки и инструмент. - 1991. - № 4. - С. 14-16.