

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТЬЮ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Канд. техн. наук, доц. КАШТАЛЬЯН И. А.

Белорусский национальный технический университет

Для повышения точности обработки нежестких деталей на токарных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) нашли применение методы, основанные на коррекции управляющих программ по результатам измерений обработанных деталей или их предсказания на этапе подготовки [1]. Однако их широкое использование сдерживается простотой станков при измерении деталей и коррекции программ, а также большой трудоемкостью разработки. Поэтому необходим поиск менее трудоемких методов управления точностью обработки. Наибольший интерес представляют методы, основанные на программном изменении рабочей подачи в соответствии с закономерностями, предусмотренными алгоритмами работы устройства числового программного управления (УЧПУ). На базе таких алгоритмов могут быть построены также адаптивные системы управления, у которых в качестве управляющего воздействия используется подача.

Анализ широкой номенклатуры деталей малой жесткости, а также схем их базирования и закрепления позволил выявить ряд расчетных закономерностей изменения подачи, которые целесообразно реализовать с целью повышения точности обработки [2]. Однако все многообразие расчетных закономерностей изменения подачи реализовать достаточно сложно. Поэтому был предложен вариант решения этой задачи, по которому УЧПУ обеспечивает кусочно-линейное изменение минутной подачи в координатах «подача – длина обработки» с последующей аппроксимацией любой кривой в этих координатах отрезками, каждый из которых в определенной степени приближен к прямой линии.

Программный модуль, реализующий предложенный вариант регулирования подачи в

функции пути, был включен в технологическое программное обеспечение микропроцессорного УЧПУ. При этом увеличение (уменьшение) минутной подачи в координатах «подача – длина обработки» осуществляется приращениями величиной ΔS по мере обработки участков Δl между приращениями подачи. Управляющее устройство реализует зависимость $S_k = S_n \pm \Delta S / \Delta l$, где S_n и S_k – соответственно начальная и конечная скорости подачи, мм/мин; l – длина обработки, на которой подача изменяется от S_n до S_k . Величина ΔS назначается из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин и т. д. Значение Δl находится из выражения $\Delta l = \pm \Delta S / (S_k - S_n)$ и принимается кратным длине перемещения исполнительного органа станка при подаче УЧПУ одного импульса. Знак «плюс» или «минус» указывает соответственно на увеличение или уменьшение подачи. Параметры переменной подачи S_n , ΔS , Δl и направление изменения подачи (знак «плюс» или «минус») задаются в кадре управляющей программы (УП) совместно с геометрической и технологической информацией либо формируются в модуле, выполняющем аппроксимацию кривых изменения подачи в координатах «подача – длина обработки». При этом информация, которая касается переменной подачи, изменяется в процессе отработки кадра УП автоматически в каждой опорной точке аппроксимируемой кривой. Взаимодействие модуля регулирования подачи в функции пути с модулем, выполняющим функцию линейной интерполяции, и другими модулями УЧПУ описано в [3...5].

Время обработки участка поверхности заготовки длиной l при реализации данного алгоритма следует рассматривать как сумму време-

ни обработки участков длиной Δl на различной скорости подачи и может быть представлено в виде суммы t_s ряда.

Для случая возрастания скорости подачи (разгона) t_s равно:

$$t_s = \frac{\Delta l}{S_H} + \frac{\Delta l}{S_H + \Delta S} + \frac{\Delta l}{S_H + 2\Delta S} + \dots + \frac{\Delta l}{S_H + n_s \Delta S}$$

или

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

где n_s – число приращений подачи на участке длиной l ; k – переменная.

Для изменения подачи в сторону уменьшения (замедления)

$$t_s = \sum_{k=1}^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H - (k-1)\Delta S}. \quad (2)$$

УЧПУ реализует минутную подачу. Но процесс резания связывают с подачей на оборот S_o . В опорных точках аппроксимируемой траектории в координатах «подача – длина обработки» подача на оборот определяется из из-

вестного соотношения $S = S_o n$, где n – частота вращения шпинделя. Для определения текущего значения подачи на оборот S_o между соседними опорными точками аппроксимируемой кривой разработан и реализован алгоритм. Схема алгоритма представлена на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: Δl – длина участка между приращениями подачи; S_H – начальное значение минутной подачи; ΔS – величина приращения минутной подачи; t_s – текущее время обработки с переменной подачей; t_o – время одного оборота шпинделя; t'_s – текущее время обработки с переменной подачей при его отсчете с дискретностью t_o ; n_s – число приращений скорости подачи за время t_s ; n'_s – то же за t'_s ; Δl_1 – перебег на предыдущем цикле расчета подачи на оборот; Δl_2 – перебег на текущем цикле расчета подачи на оборот; n_k – число приращений скорости подачи при ее изменении от S_H до S_K . Расчетная схема для определения перебогов Δl_1 и Δl_2 при расчете подачи на оборот S_o представлена на рис. 2.

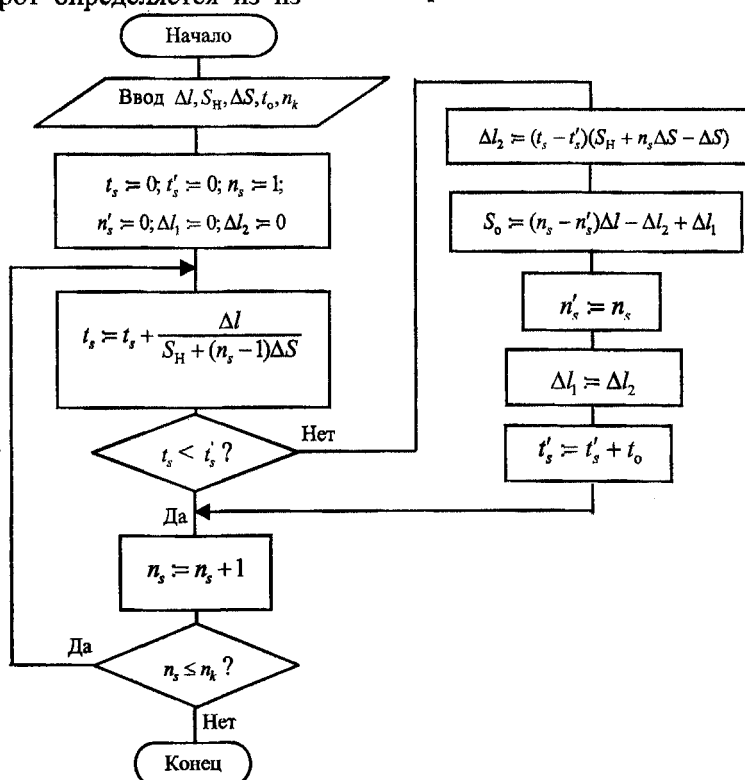


Рис. 1. Схема алгоритма расчета текущего значения подачи на оборот S_o .

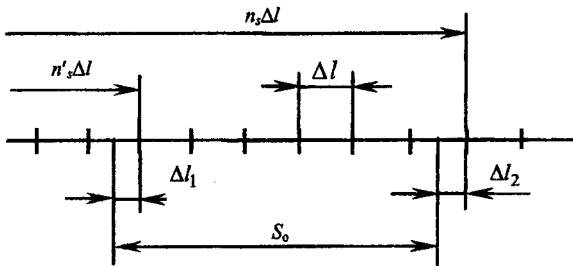


Рис. 2. Расчетная схема для определения перебогов Δl_1 и Δl_2 при расчете текущего значения подачи на оборот S_0 .

Обобщенный алгоритм регулирования подачи в функции пути заключается в следующем.

1. В оперативную память УЧПУ вводится информация о закономерности изменения минутной подачи в функции пути, которая задается аналитически или табличными данными.

2. Закономерность аппроксимируется отрезками, которые реализуются по алгоритму кусочно-линейного изменения минутной подачи в функции пути. Рассчитываются координаты опорных точек аппроксимации.

3. Определяются параметры кусочно-линейного изменения минутной подачи в функции пути ($S_H, \Delta S, \Delta l, n_s$) для участка аппроксимации между первой и второй опорными точками.

4. Осуществляется отработка первого участка аппроксимации по алгоритму кусочно-линейного изменения минутной подачи в функции пути. Рассчитывается текущее значение подачи на оборот.

5. Определяются параметры $S_H, \Delta S, \Delta l, n_s$ для очередного участка аппроксимации и осуществляется его отработка.

6. Действия, описанные в пунктах 3...5, повторяются до тех пор, пока не будут отработаны все участки аппроксимируемой кривой.

Система управления, реализующая обобщенный алгоритм регулирования минутной подачи, имеет существенный недостаток. Он заключается в том, что при оценке точности формообразования детали не учитывается случайная составляющая погрешности, вызванная колебаниями глубины резания t и твердости материала заготовки HB . Этот недостаток не позволяет использовать систему управления, когда к детали предъявляются повышенные требования по точности, а заготовки имеют

существенное рассеяние физико-механических свойств и припуска на обработку.

Разработанная адаптивная система (рис. 3) позволяет реализовать практически любую закономерность изменения силы резания в функции пути и поддерживать ее при случайных колебаниях глубины резания t и твердости материала детали HB [6]. При этом настройка системы фактически выполняется при вводе соответствующей закономерности изменения составляющей силы резания P_z в функции пути, которая определяется заранее расчетным либо экспериментальным способом.

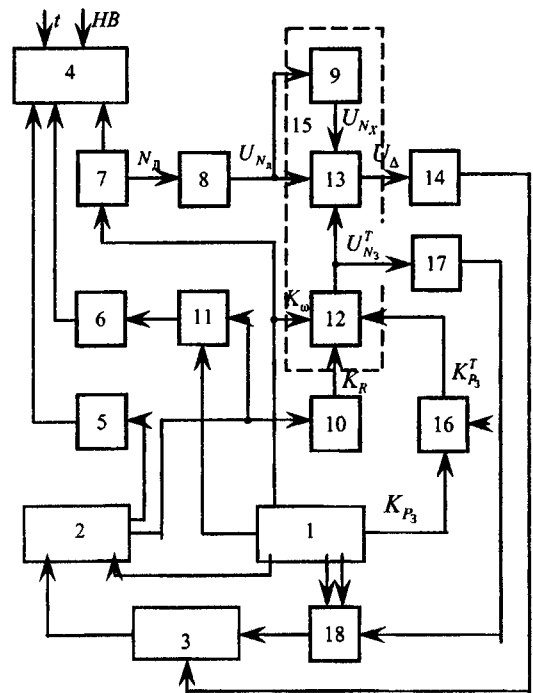


Рис. 3. Блок-схема адаптивной системы управления

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

$$N_d = N_x + P_z \omega_{\text{ш}} R, \quad (3)$$

где N_x – активная мощность, потребляемая двигателем шпинделя в режиме холостого хода; $\omega_{\text{ш}}$ – угловая скорость вращения шпинделя; R – радиус обработки (расстояние от вершины

режущей кромки резца до оси вращения детали).

Система содержит (рис. 3) блок задания программы 1, блок интерполяции 2, блок задания скорости подачи 3, станок 4, привод продольной подачи 5, привод поперечной подачи 6, привод шпинделя 7, датчик мощности 8, компенсатор 9, реверсивный счетчик 10, ключ 11, вычислительный блок 12, блок сравнения 13, регулятор подачи 14, устройство коррекции 15 (его образуют блоки 9, 12, 13), блок реализации закономерности преобразования силы резания с устройством ввода 16, блок изменения тактовой частоты 17, второй ключ 18.

Система, включающая блок задания программы, блок интерполяции и блок задания скорости подачи, управляет станком путем воздействия на привод продольной подачи, привод поперечной подачи и двигатель привода шпинделя. Кроме того, на процесс резания оказывают возмущающие воздействия глубина резания t и твердость материала детали $HВ$. Активная мощность N_d , потребляемая двигателем привода шпинделя, измеряется датчиком и преобразуется им в напряжение U_{N_d} , пропорциональное величине N_d . Компенсатор после каждого включения двигателя привода формирует на выходе и запоминает напряжение U_{N_x} , пропорциональное активной мощности N_x , потребляемой этим двигателем в режиме холостого хода. Счетчик 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 интерполяции на вход реверсивного счетчика. Ввод в реверсивный счетчик информации, соответствующей величине вылета резца, осуществляется под действием управляющей программы, формируемой блоком 1. Для этого в программе записываются специальная команда вылета резца (номер коррекции) и необходимая величина перемещения по поперечной координате. Под действием команды вылета резца

блок задания программы блокирует прохождение приводных импульсов через ключ, в результате чего информация с реверсивного счетчика изменится при неподвижном суппорте поперечной координаты (приводится в соответствие с истинным радиусом обработки).

Код радиуса обработки K_R с выхода реверсивного счетчика поступает на вход вычислительного блока, на другие входы которого из блока задания программы поступает код угловой скорости вращения шпинделя K_ω , который образуется под воздействием управляющей программы, и текущее значение заданной силы резания K_R^T , которое формируется в блоке реализации закономерности преобразования силы резания с устройством ввода. Начальное значение K_R^T образуется под воздействием управляющей программы и поступает на вход блока реализации закономерности преобразования силы резания с устройством ввода. В этом блоке она изменяется в соответствии с закономерностью, информация о которой поступает с устройства ввода. На выходе вычислительного блока формируется напряжение $U_{N_3}^T$, пропорциональное текущему произведению значений кодов $K_{R_3}^T$, K_ω , K_R , а следовательно, пропорциональное и заданной текущей мощности резания N_3^T , которая определяется из равенства (1) при условии $P_2 = P_3^T$

$$N_3^T = P_3^T \omega_{ш} R. \quad (4)$$

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

Блок сравнения формирует на своем выходе напряжение рассогласования U_{Δ} в соответствии с равенством

$$U_{\Delta} = U_{N_d} - U_{N_x} - U_{N_3^T}. \quad (5)$$

Анализируя равенства (5)...(3), можно заключить, что $U_{\Delta} = 0$ при $P_z = P_3^T$.

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

Экспериментальная проверка систем управления точностью формообразования нежестких деталей проводилась с использованием станка мод. 1А34Ф3, оснащенного микропроцессорным УЧПУ КМ 65. 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. Геометрические параметры режущей части: $\phi = 95^\circ$; $\phi_1 = 5^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 12^\circ$; $\lambda = 8^\circ$; $r = 0,8$ 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 детали. Затем производили выхаживание (резцу сообщалась обратная подача) и повторный обмер заготовки. Величину силы

P_{y_i} , необходимую для компенсации погрешности диаметрального размера в i -м сечении заготовки, подсчитывали по следующей зависимости

$$P_{y_i} = \frac{D_{o_{\min}} - D_{B_i}}{D_{o_i} - D_{B_i}} P_{y_{\max}}, \quad (6)$$

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

На основании известной из теории резания зависимости можно записать [7]:

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

$$P_{y_i} = C_{P_y} t^{x_{P_y}} S_{o_i}^{y_{P_y}} v^{z_{P_y}} K_{P_y},$$

где S_{o_i} – значение подачи на оборот в i -м сечении заготовки; t – глубина резания; v – скорость резания; C_{P_y} – постоянная, характеризующая определенные условия резания для конкретной марки обрабатываемого материала; 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 (6) можно записать в виде

$$S_{o_i} = S_{o_{\max}}^{y_{P_y}} \sqrt[y_{P_y}]{\frac{D_{o_{\min}} - D_{B_i}}{D_{o_i} - D_{B_i}}}. \quad (7)$$

Полученное выражение используется при расчете величины подачи, необходимой для компенсации погрешности диаметрального размера в каждом фиксированном сечении заготовки.

Таблица 1

Значения диаметральных размеров заготовки в фиксированных поперечных сечениях

Диаметр поперечного сечения, мм	Длина консоли L_i , мм				
	120	100	80	60	40
D_{o_i}	42,028	42,022	42,018	42,015	42,014
D_{B_i}	42,006	42,005	42,005	42,004	42,003
$D_{o_{\min}}$	42,014				

Значения диаметральных размеров заготовки в фиксированных поперечных сечениях после обработки с постоянной силой резания $P_{y_{max}}$ и после выхаживания представлены в табл. 1. По этим размерам определены закономерности изменения подачи на оборот S_o и радиальной составляющей силы резания P_y в функции пути (рис. 4). Тангенциальная составляющая силы резания P_z определялась из соотношения $P_y = 0,4P_z$ [7]. Полученные закономерности 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 до 0,1 мм/об по мере перемещения реза в сторону установочных элементов патрона. При обработке второй группы заготовок поддерживалась установленная закономерность изменения радиальной составляющей силы резания P_y в функции пути. Третья группа заготовок обрабатывалась с постоянной подачей $S_o = 0,3$ мм/об, соответствующей среднему значению подачи на оборот при обработке заготовок первой группы. Закономерности изменения отклонений диаметрального размера ΔD_i от номинального $D = 42$ мм в фиксированных сечениях заготовки представлены на рис. 5. Графики строились по средним значениям тридцати замеров. Интервальная оценка среднего значения, а также сравнение дисперсий и средних производились согласно [8].

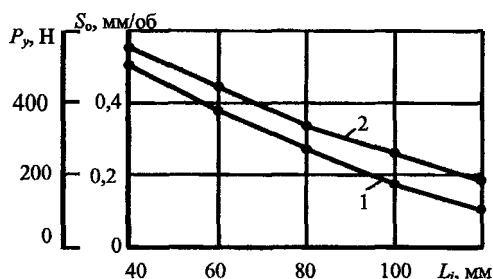


Рис. 4. Закономерности изменения в функции пути: 1 – подачи на оборот S_o ; 2 – радиальной составляющей силы резания P_y

Из графиков видно, что при линейном изменении подачи в функции пути точность формы детали в продольном сечении увеличивает-

ся более чем в два раза по сравнению с обычной обработкой (с постоянной подачей). Это объясняется тем, что регулированием подачи учитывается 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 заданной закономерности изменения силы резания в функции пути.

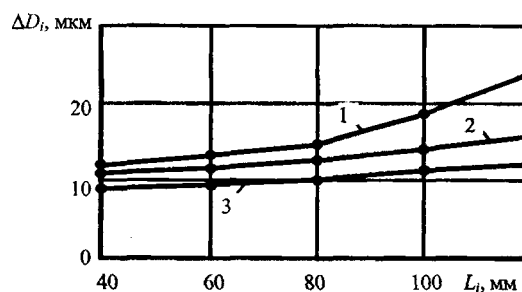


Рис. 5. Закономерности изменения отклонений диаметрального размера заготовки ΔD_i в фиксированных сечениях от номинального $D = 42$ мм: 1 – точение с постоянной подачей $S_o = 0,3$ мм/об; 2 – поддержание расчетной закономерности изменения подачи на оборот S_o в функции пути; 3 – то же радиальной составляющей силы резания P_y в функции пути адаптивной системой управления

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.

ВЫВОДЫ

На токарных станках с микропроцессорными УЧПУ функция управления точностью формообразования нежестких деталей может быть реализована путем кусочно-линейного изменения минутной подачи в координатах «подача –

длина обработки» с последующей аппроксимацией любой закономерности в этих координатах отрезками, каждый из которых в определенной степени приближен к прямой линии. Причем параметры переменной подачи могут задаваться в кадре управляющей программы совместно с другой геометрической и технологической информацией либо формироваться автоматически в соответствии с заданной закономерностью изменения силы резания, контролируемой датчиками адаптивной системы. При обработке сравнительно больших и часто повторяющихся партий заготовок закономерность 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).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гжиров Е. И., Серебrenицкий П. П. Программирование обработки на станках с ЧПУ: Справ. – Л.: Машиностроение, 1990. – 588 с.

2. Каштальян И. А. Эффективные кинематически неустойчивые процессы формообразования на станках с ЧПУ // Машиностроение. – Мн., 2002. – Вып. 18. – С. 310–318.

3. Каштальян И. А., Кочергин А. И., Зайцев В. Б. Поддержание заданного закона изменения подачи на токарных станках с ЧПУ // Машиностроение. – Мн., 1979. – Вып. 2. – С. 83–90.

4. А. с. СССР 732817, МКИ G 05B 19/18. Устройство для числового программного управления / И. А. Каштальян, В. Б. Зайцев, В. С. Лосев. Заявл. 20.12.1977; Опубл. 05.05.1980 // Открытия и изобретения. – 1980. – № 17. – С. 225.

5. Пат. ВУ 5128 С2, МПК G 05B 19/18, 19/416. Устройство числового программного управления / И. А. Каштальян, В. И. Резниченко, А. П. Пархутик. Заявл. 26.11.1998; Опубл. 30.06. 2003 // Открытия и изобретения. – 2003. – № 2. – С. 208.

6. Пат. ВУ 6248 С2, МПК G 05B 19/39. Адаптивная система управления станком / И. А. Каштальян, М. К. Цыркунов. Заявлено 09.06.2000. Опубл. 30.06.2004 // Открытия и изобретения. – 2004. – № 2. – С. 229 – 230.

7. Ящерицин П. И., Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э. Теория резания: Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов. – Мн.: Вышэйш. шк., 1990. – 512 с.

8. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288 с.