

УДК 621.9.06:536.75

**ЯВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ УПРАВЛЕНИИ
НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА СТАНКАХ
С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

канд. техн. наук, доц. И.А. КАШТАЛЬЯН

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрена задача дискретного управления нестационарными процессами резания на станках с ЧПУ. Показано, что реакцию системы резания на управляющее воздействие следует рассматривать с позиции теории синергетики. Обоснована возможность использования фазовой характеристики составляющей силы резания P_z для оценки продолжительности восстановления равновесного состояния в зоне стружкообразования после отработки устройством ЧПУ управляющего воздействия. Приведены некоторые результаты экспериментальных исследований.

Максимальная эффективность механической обработки заготовок деталей машин может быть достигнута при использовании систем управления, обладающих свойствами изменять свои параметры и управляющие воздействия в зависимости от условий процесса резания. В настоящее время такие системы строятся на базе микропроцессорных устройств числового программного управления (УЧПУ).

Взаимодействие УЧПУ с объектом управления – станком – связано с решением ряда задач. Среди них: геометрическая (управление формообразованием детали); логическая (управление дискретной автоматикой станка) и технологическая (управление рабочим процессом станка).

Технологическая задача состоит в достижении требуемого качества деталей с наименьшими затратами на их изготовление и реализуется путем поиска и поддержания параметров рабочего процесса, удовлетворяющих критерию оптимизации и действующим ограничениям. Параметры, которые определяют процесс резания, делят на входные, функциональные и выходные (рис. 1).

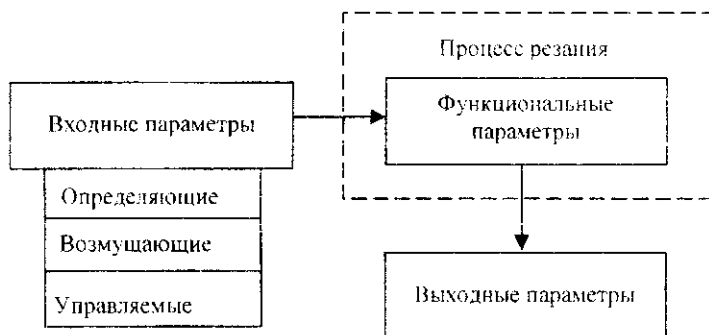


Рис. 1. Модель управления процессом резания

Среди входных параметров выделяют: определяющие, возмущающие и управляемые [1].

При управлении процессом резания в реальном масштабе времени к определяющим относятся параметры, которые выбираются конструктором изделия (марка материала, конфигурация детали) и технологом на этапе разработки технологического процесса (метод обработки, модель станка, схема базирования, марка инструментального материала, конструкция режущего инструмента и его геометрия и т.д.).

Возмущающие параметры делят на систематические и случайные. К систематическим параметрам относят закономерные изменения скорости резания, геометрии инструмента и др., которые вызваны конструктивными особенностями обрабатываемой заготовки. В состав параметров, имеющих случайную природу, входят неконтролируемые изменения физико-химических свойств заготовки и инструмента, статических и динамических характеристик технологической системы, припуска на обработку.

Определяющие и возмущающие (систематические и случайные) параметры формируют комплекс внешних условий системы резания. Поскольку все многообразие внешних условий можно свести к конечному числу $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_L$, то справедливо ввести в рассмотрение конечное множество $\Theta = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_L\}$. Элементы ϑ_i множества Θ являются многомерными величинами $\vartheta_i = (\vartheta_i^{(1)}, \dots, \vartheta_i^{(l)})$, $i = \overline{1, L}$.

В группу управляемых входят параметры, которые допускают целенаправленные изменения (коррекцию) в процессе резания. К таким параметрам относятся: скорость резания v , скорость подачи S , кинематические углы режущего лезвия инструмента.

В процессе формообразования обычно приходится использовать несколько управляющих воздействий $u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(r)}$, в результате управление u представляет собой многомерную величину $u = (u^{(1)}, \dots, u^{(r)})$. Обозначим через U множество всех значений управления u , которое удовлетворяет поставленным ограничениям. При этом любое $u \in U$ будет допустимым управлением. В задаче управления процессом резания множество U допустимых управлений является конечным множеством:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_R\}.$$

Функциональные параметры являются связующим звеном между входными и выходными параметрами и определяются совокупным действием многих физических явлений. К их числу относятся действующие напряжения в зоне стружкообразования, время деформирования, температура и др. [1]. Эти параметры количественно характеризуют физико-химический процесс резания и могут быть использованы для оценки составляющих силы резания, удельной энергоёмкости процесса, относительной деформации, глубины упрочнения и др.

В общем случае состояние объекта (процесса резания) будет описываться многомерной переменной $x = (x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)})$, которую называют вектором состояния объекта управления. Множество допустимых значений переменной x обозначим через X . Когда величина $x^{(j)}$ принимает конечное множество значений, множество X будет также конечным и будет иметь вид $X = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$, где $x_j = (x_j^{(1)}, \dots, x_j^{(m)})$, $j = \overline{1, M}$.

Выходные параметры определяются как результат воздействия процесса резания на заготовку (точность обработки и качество поверхности), инструмент (стойкость и прочность), станок и приспособление (долговечность). Они зависят от состояния объекта управления x , используемого управления u и внешних условий \mathcal{G} .

Уравнение для выходной переменной в общем случае имеет вид:

$$g = g(x, u, \mathcal{G}). \quad (1)$$

Данное выражение можно рассматривать как целевую функцию, выраженную в явном виде.

В реальных условиях на элементы технологической системы оказывают действие контролируемые и неконтролируемые возмущающие факторы. Как следствие, процесс резания сопровождается рассеянием во времени функциональных и выходных параметров обработки и его следует рассматривать как стохастический. Задача нахождения управления процессом резания при этом является вероятностной и решается с использованием теории случайных процессов. Например, в работе [2] протекание процесса резания считается нормальным, если выполняется условие, по которому относительное перемещение реза и заготовки $y(t)$ в определенный момент времени t меньше по модулю некоторого допустимого значения y_0 , т.е. $|y(t)| < y_0$. Тогда функция надежности при резании определяется как вероятность того, что некоторое значение y не превышает y_0 за время обработки T .

$$p(T) = \begin{cases} \sup |y(t)| < y_0 \\ 0 < t < T \end{cases}.$$

Независимо от условия, используемого для оценки процесса резания, его описывают системой уравнений конечно-разностного типа

$$X_{k+1} = F_k(X_k, U_k, \Theta_k), \quad (2)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$ – моменты изменения состояния системы (процесса резания); X_k, U_k, Θ_k – вектора параметров функциональных, параметров управления и параметров, определяющих внешние условия системы резания соответственно в момент времени k . Эти вектора должны удовлетворять системе технологических ограничений

$$G(X, U, \Theta) \leq 0, \quad (3)$$

где $G = (g_1, g_2, \dots, g_s)$ – заданная вектор функция.

Тогда задача нахождения оптимального управления процессом формообразования может быть сформулирована следующим образом. Для процесса, который описывается разностным уравнением (2), требуется найти дискретную функцию управления $U = \{u_1, u_2, \dots, u_R\}$ таким образом, чтобы выполнялись ограничения (3) и математическое ожидание целевой функции (1) достигало оптимального значения.

В качестве управляющего воздействия, как правило, используют подачу S скорость резания v , которая связана с частотой вращения заготовки n известной зависимостью $v = \pi Dn/100$, где D – диаметр обрабатываемой поверхности. Причем из всего многообразия возможных изменений этих параметров целесообразно реализовать те, которые могут быть использованы как типовые решения при выполнении различных технологических операций механической обработки.

Анализ конструктивных особенностей широкой номенклатуры деталей различных классов, формообразование которых производится на станках с ЧПУ, позволил выявить эти изменения. К ним относятся: линейное изменение минутной подачи и (или) скорости резания (частоты вращения заготовки) в функции пути, модулированное изменение подачи, прерывание подачи.

Программные модули, реализующие указанные изменения подачи и частоты вращения заготовки (скорости резания), были включены в технологическое программное обеспечение устройства ЧПУ КМ 65. В их разработке принята стратегия управления, согласно которой параметр, используемый в качестве управляющего воздействия (подача или частота вращения шпинделя), изменяется приращениями в функции пути, а уровень сигнала управления между приращениями остается постоянным и определяемым частотой управляющих импульсов (формируется в функции времени) [3]. Фактически увеличение (уменьшение) подачи и частоты вращения шпинделя осуществляется приращениями ΔS и Δn соответственно. В связи с этим каждый раз при формировании управляющего воздействия возникает задача выбора значений параметров, определяющих его величину ($\Delta S, \Delta n$) и частоту (Δt). Эта задача может быть решена на основе синергетического подхода к процессам, происходящим в зоне резания.

Современные представления о физических явлениях, происходящих в зоне резания, базируются на теории дислокаций [1, 4]. Согласно этой теории в зоне стружкообразования происходит непрерывное увеличение плотности ρ дислокаций, затем их перестройка во фрагментированные (ячеистые) структуры. При достижении критической плотности ρ_k дислокаций на верхней границе зоны стружкообразования происходит разрушение этих структур по границам фрагментов с образованием вязких микротрещин и сдвиг элемента стружки.

Дальнейшее развитие представлений о процессе резания связано с изучением процессов деформирования на различных структурных уровнях обрабатываемого материала [5]. При этом структура материала рассматривается как система, состоящая из отдельных структурных элементов, распределенных по иерархическим уровням. В такой структуре каждый элемент верхнего уровня включает структурные элементы нижнего уровня (рис. 2).

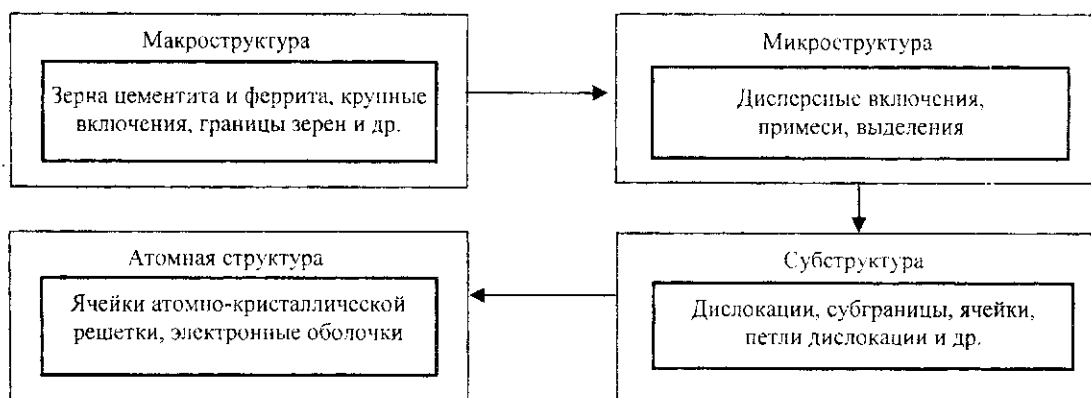


Рис. 2. Структурные уровни углеродистых сталей

Для машиностроительных материалов (в том числе углеродистых сталей) условия структурной однородности и стабильности дефектов, как правило, не выполняются. В связи с этим при их обработке характерным является проявление неоднородности деформаций, а также наличие взаимосвязи деформаций на различных структурных уровнях. Например, неоднородность деформаций на уровне субструктуры (уровень дислокаций) может инициировать ротации на более высоком структурном уровне

(разворот микрообъемов материала), и наоборот. В результате в пластическое течение вместе с дислокационным скольжением вовлекаются ротационные (поворотные) моды. При увеличении степени деформации и плотности дислокационных дефектов локальная сдвиговая устойчивость снижается и, происходит переход к гидродинамическому режиму пластического течения структурных элементов на различных уровнях. В этих условиях процесс резания может быть рассмотрен на основе термодинамических представлений как результат запасаения и диссипации в системе энергии деформации, структурной перестройки в зоне стружкообразования и формирования диссипативных структур [5, 6]. Система резания при этом имеет все признаки открытой, термодинамически неустойчивой системы, обменивающейся энергией и энтропией с внешней средой.

Работа A_p сил резания в такой системе затрачивается на запасание энергии деформации ΔU_d в зоне стружкообразования, прирезцовых слоях стружки и обработанной поверхности, а также на образование теплоты Q и определяется по следующей зависимости:

$$A_p = \Delta U_d + Q. \quad (4)$$

Условие динамического равновесия деформированных объемов в зоне резания в данном случае описывается уравнением:

$$\frac{\sigma d\varepsilon}{dt} - \frac{d\Delta U_d}{dt} - \frac{dQ}{dt} = 0, \quad (5)$$

где σ – напряжение; ε – степень деформации; t – время.

Анализ зависимостей (4) и (5) показывает, что напряжение σ , приложенное к деформируемым объемам в зоне резания, совершая деформацию ε , выполняет работу A_p , которая направлена на перестройку структур на различных уровнях, запасание энергии деформирования ΔU_d и образование теплоты Q . Причем для достижения системой равновесного состояния запасенная энергия деформирования ΔU_d должна полностью поглощаться или рассеиваться. Продолжительность восстановления равновесного состояния при этом характеризуется временем релаксации t_p [7, 8].

Поскольку система резания является открытой, термодинамически неустойчивой и обменивается энергией и энтропией с окружающей средой (кислородом воздуха), то для определения времени релаксации t_p справедливо выражение

$$t_p = (S_3 - S_3^*) / \dot{S}_3, \quad (6)$$

где S_3 – накопленная энтропия; S_3^* – энтропия в состоянии равновесия; \dot{S}_3 – локальное производство энтропии.

Однако известные зависимости для определения энтропии S_3 и скорости ее производства \dot{S}_3 применимы при оценке процесса обработки по действительным значениям режимов резания. Вследствие этого использование формулы (6) с целью определения t_p при изучении процессов в зоне резания на уровне дислокационных представлений не представляется возможным.

В работах [8, 9] показано, что время релаксации t_p соизмеримо со временем запаздывания t_3 пластических деформаций в зоне стружкообразования, которое оценивается по времени активируемого преодоления дислокациями силовых барьеров при повышении скорости деформирования. Для определения t_3 при этом используется зависимость

$$t_3 = \varepsilon / \dot{\varepsilon},$$

где ε – деформация в локальном объеме; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформирования.

Величина ε зависит от плотности дислокаций ρ и средней длины их пробега \bar{L} и определяется по формуле

$$\varepsilon = \rho b \bar{L},$$

где b – вектор Бюргера.

На скорость деформирования $\dot{\epsilon}$ влияет скорость \bar{v} движения дислокаций. Эта функциональная связь описывается следующим выражением:

$$\dot{\epsilon} = \rho b \bar{v}.$$

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленных в работах [7, 8], показал, что время запаздывания деформирования t_3 составляет миллисекунды и соизмеримо со временем запаздывания $t_3^{P_2}$ составляющей силы резания P_2 . Например, при обработке стали 45 ($\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $b = 2,48 \cdot 10^{-6} \text{ см}$, $\bar{L} = 10^{-4} \text{ см}$, $\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ с}^{-1}$) $t_3 = 2,48 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что фазовая характеристика составляющей силы резания P_2 (время запаздывания) может быть использована для оценки продолжительности восстановления равновесного состояния в зоне стружкообразования после отработки устройством ЧПУ управляющего воздействия.

Экспериментальные исследования по определению времени запаздывания $t_3^{P_2}$ составляющей силы резания P_2 при различных значениях ΔS и Δl выполнялись с использованием токарного станка мод. 1А734ФЗ, оснащенного микропроцессорным устройством ЧПУ КМ 65. Обработывалась партия образцов из стали 45. В нее были включены образцы гладкой цилиндрической формы диаметром 80 мм и длиной 100 мм, а также образцы, имеющие форму ступенчатого вала (пять ступеней длиной 15 мм каждая). Диаметры ступеней были подобраны так, что при частоте вращения $n = 500$ об/мин обеспечивался ряд скоростей резания в диапазоне от 80 до 280 м/мин.

Формообразование цилиндрических поверхностей образцов производилось подрезно-проходным резцом с механическим креплением пластины из твердого сплава Т15К6 при глубине резания равной 1,8 мм. Геометрические параметры режущей части: $\phi = 95^\circ$; $\phi_1 = 5^\circ$; $\alpha = 5^\circ$; $\gamma = 12^\circ$; $\lambda = 8^\circ$; $r = 0,8$ мм.

Образцы гладкой цилиндрической формы были разбиты на две группы. Первая группа этих образцов и все образцы ступенчатой формы обрабатывались с постоянной частотой вращения $n = 500$ об/мин ($v = 120$ м/мин) и подачей, которая периодически скачкообразно увеличивалась на величину ΔS , а затем также скачкообразно снижалась до первоначального значения. Начальное значение минутной подачи S_n , заданное в кадре управляющей программы, было равно 100 мм/мин (0,2 мм/об). Величина ΔS принималась из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин и т.д. Приращение подачи на оборот ΔS_0 при этом определялось по известной зависимости $\Delta S_0 = \Delta S / n$.

При обработке образцов второй группы постоянной оставалась подача $S = 100$ мм/мин ($S = 0,2$ мм/об), а периодически скачкообразно на величину Δl изменялась частота вращения шпинделя n . Ее начальное значение было принято равным 500 об/мин, величина Δl принималась из ряда 0,1, 0,2, 0,3 об/мин и т.д.

Приращение скорости резания Δv определялось из соотношения $\Delta v = \pi D \Delta n / 1000$, где D – диаметр обрабатываемой поверхности. Длина пути l между приращениями подачи и частоты вращения образца во всех случаях была равна 5 мм.

Измерение составляющей силы резания P_2 производилось с помощью проволочных тензодатчиков, наклеенных на теле резца и включенных в мостовую цепь. Изменение тока в одной из диагоналей моста, возникающее вследствие изменения сопротивления тензодатчика при деформации державки, регистрировалось шлейфовым осциллографом.

Частота вращения образца измерялась тахогенератором ТП75-20-02, встроенным в привод главного движения. Текущие значения скорости подачи и частоты вращения заготовки выводились на экран дисплея панели оператора УЧПУ. На экране отображались также характеристики переходных процессов в приводах подачи и главного движения при отработке ими управляющего воздействия ступенчатой формы величиной ΔS и Δl соответственно. По ним оценивалась реакция привода на управляющий импульс (время переходного процесса).

Анализ полученных экспериментальных данных (рис. 3, 4) показал, что с ростом величины управляющего воздействия (ΔS и Δl) время восстановления равновесного состояния в зоне стружкообразования (время релаксации t_p) увеличивается. Это явление косвенно подтверждается характером переходных процессов в приводах подачи и главного движения и характером зависимостей, устанавливающих взаимосвязь времени запаздывания $t_3^{P_2}$ составляющей силы резания P_2 с величиной управляющего воздействия ΔS и Δl (см. рис. 3). Наиболее ярко рост $t_3^{P_2}$ проявляется при больших скоростях резания

(см. рис. 4), что можно объяснить проявлением диффузионного механизма деформирования при высоких температурах резания [5].

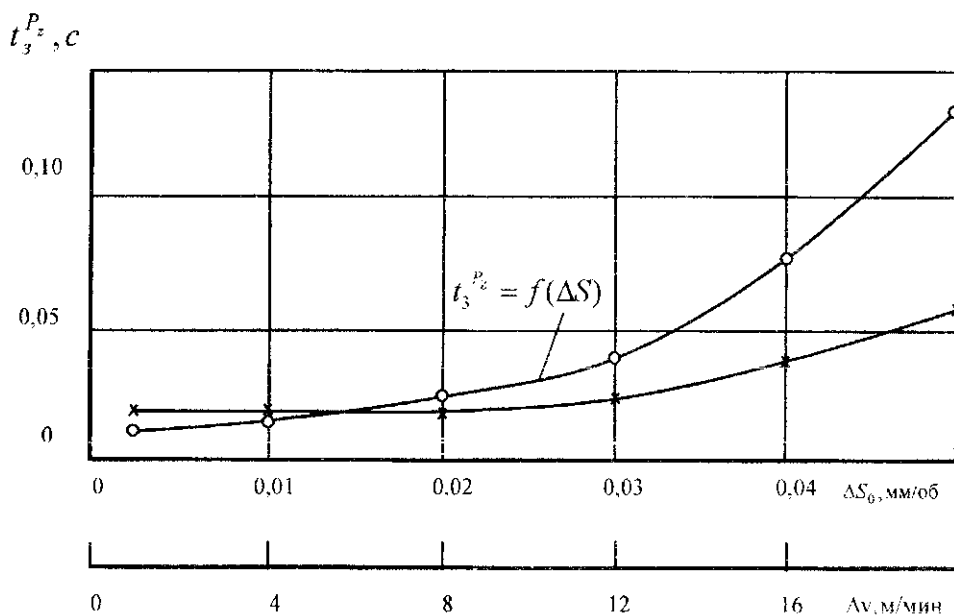


Рис. 3. Зависимости времени запаздывания $t_3^{P_z}$ составляющей силы резания P_z от величины управляющих импульсов ΔS и Δv

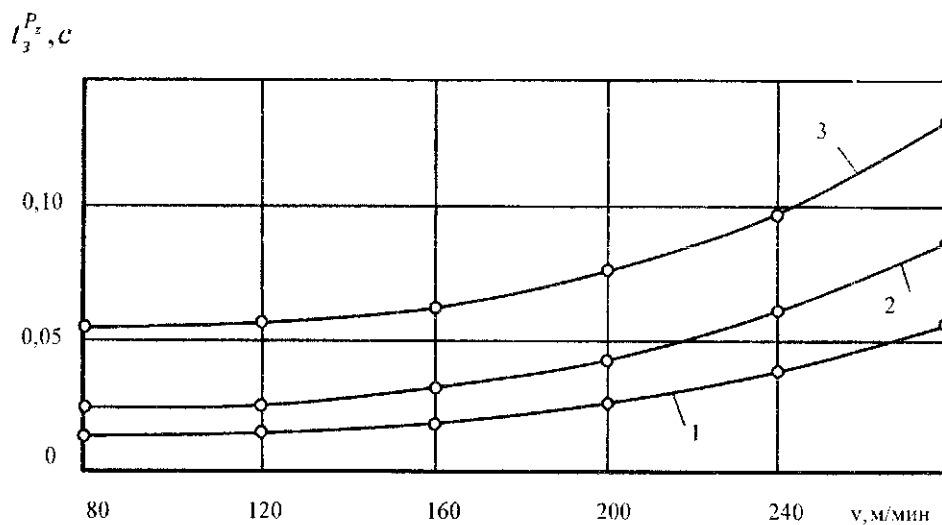


Рис. 4. Зависимости времени запаздывания $t_3^{P_z}$ составляющей силы резания P_z от скорости резания v при различных значениях ΔS :
1 – $\Delta S = 5$ мм/мин; 2 – $\Delta S = 10$ мм/мин; 3 – $\Delta S = 20$ мм/мин

Действительно, повышение скорости главного движения сопровождается ростом температуры резания. Как следствие, механические напряжения в зоне стружкообразования вызывают диффузию точечных дефектов (вакансий) и перемещение дислокаций путем перемешивания.

В результате энтропия S_3 и время релаксации t_p возрастают, а переход системы в равновесное состояние становится менее вероятным. Фактически с повышением скорости резания на перестройку дислокаций требуется больше времени.

Выводы

Реакция системы резания на управляющее воздействие сопровождается явлениями самоорганизации, которые проявляются через запасание и диссипацию энергии деформации, структурную перестройку стружкообразования и формирование диссипативных структур.

Продолжительность восстановления равновесного состояния в зоне стружкообразования (время сачии) может быть установлена по фазовой характеристике составляющей силы резания P_z .

При выборе величины управляющего воздействия необходимо учитывать основной принцип синергетики, который заключается в наименьшем вмешательстве в процесс резания. Вследствие этого пары ΔS , Δn и Δl следует выбирать минимально возможными по величине с учетом ограничений, которые определяются требуемым режимом разгона (замедления).

Результаты исследований будут полезны при создании адаптивных систем, у которых в качестве управляющего воздействия используются подача и (или) скорость резания (частота вращения заготовки).

ЛИТЕРАТУРА

- Тарков В.К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1984. – 120 с.
- Соловьев В.Н. Надежность и долговечность случайного процесса резания // Резание и инструмент. Вып. 15. – Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1976. – С. 61 – 65.
- Аштальян И.А. Реализация функции согласованного управления скоростью резания и подачей на станках с ЧПУ // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 35 – 40.
- Сыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 24 с.
- Абалдин Ю.Г. К вопросу об адиабатическом сдвиге элемента стружки при резании // Вестник машиностроения. – 1988. – № 6. – С. 29 – 35.
- Абальман М.О., Суховилов Б.М. Некоторые вопросы самоуправления процесса резания пластичных металлов // Вестник машиностроения. – 1997. – № 10. – С. 39 – 42.
- Абалдин Ю.Г., Шпилев А.М., Бурков А.А. Солитонный механизм возмущения вибраций в технологических самоорганизующихся системах обработки резанием // Вестник машиностроения. – 2000. – № 3. – С. 31 – 37.
- Абалдин Ю.Г. Повышение устойчивости процесса резания // Вестник машиностроения. – 1997. – № 10. – С. 39 – 42.
- Судинов А.В. Синергетика малых перемещений в сверхточных станках // СТГН. – 2005. – № 8. – С. 6 – 12.