

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОКАРНЫМ
СТАНКОМ С ЧПУ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНОГО ХАРАКТЕРА ВНЕШНЕГО
ВОЗМУЩЕНИЯ**

Болтян А.В., Болтян М.А., Ермоленко А.С. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Аннотация. В работе предложен вариант реализации системы адаптивного управления токарным станком с ЧПУ с применением в качестве движителя пьезоэлектрических актуаторов. Разработана математическая модель системы адаптивного управления. Внешним возмущением модели принят вектор силы резания, представленный в виде случайного процесса, обладающего свойствами «белого шума».

В качестве регулятора системы адаптивного управления предложено использовать пропорциональный интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. Разработанная система адаптивного управления позволяет значительно снизить неравномерность силы резания при токарных работах на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: управления, шум, белый, модель, пьезоактуатор, регулятор.

1. Введение. Важными аспектами современного машиностроения являются повышение качества выпускаемой продукции и увеличение производительности труда. Точность обработки представляется как один из показателей качества. Требования к точности изделий обуславливаются повышением требований потребителя и поэтому постоянно возрастают. Еще с 40-х годов прошлого столетия известно, что основным фактором, влияющим на точность обработки, является отклонение значений силы резания от заданного уровня, которые, в свою очередь, обуславливают упругие перемещения режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности заготовки.

Как показали исследования [1, 2], управление упругими перемещениями инструмента позволяет повысить в 2 – 6 раз точность обработки заготовок на станках при одновременном увеличении производительности на 20 – 300 %. Такое управление возможно реализовать в конструкции современных станков с ЧПУ, устройства числового программного управления которыми позволяют реализовать программным способом стабилизацию силы резания, а, следовательно, и упругие перемещения инструмента. Однако задача стабилизации силы резания усложняется при учете совокупного воздействия на режущий инструмент ряда случайных и систематически действующих факторов, таких, как неравномерность глубины резания, неравномерность твердости поверхности заготовки и т.д.

В работах, посвященных стабилизации силы резания при обработке заготовок деталей машин, например, в [3], внешнее возмущение представляется как сумма постоянной и периодической составляющих. На этой основе разработаны рекомендации по стабилизации силы резания и конструкции аналого-цифровых регуляторов режимов металлообработки. Однако, как известно, [2, 4], глубина резания при точении, особенно исходных заготовок, является величиной случайной и определяется законом распределения вероятностей исходных размеров заготовок, полученных тем или иным способом. Поэтому внешнее возмущение процесса резания необходимо рассматривать как случайный процесс.

Целью данной работы является разработка модели системы адаптивного управления процессом резания на станке с ЧПУ и реализация способа управления процессом резания.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи: разработать модель процесса резания с внешним возмущением в виде случайного про-

цесса; доказать адекватность модели реальному процессу; предложить вариант системы адаптивного управления процессом резания; оценить эффективность предложенного варианта управления на полученной модели.

2. Основное содержание и результаты работы. Система адаптивного управления процессом резания основывается на непрерывной компенсации возмущающих воздействий. В основе такого управления лежит стабилизация какого-то выходного параметра процесса резания, например, силы резания. Таким образом, ставится задача регулирования и поддержания значения силы резания на уровне, рассчитанном на этапе проектирования технологической операции. В качестве управляемого параметра в адаптивной системе принимаем скорость подачи. Закон изменения продольной подачи при наружном продольном точении, будет определяться зависимостью:

$$s = \left(\frac{P_z}{10C_P t^x v^n} \right)^{1/y}, \quad P_z \longrightarrow const,$$

где P_z – сила резания; C_P – постоянная силы резания; x, y, n – показатели степени; t – глубина резания; v – скорость резания.

При моделировании процесса резания на токарном станке с ЧПУ будем представлять суппортную часть станка в виде идеально упругого тела, [5]. Тогда для вершины резца можно указать три взаимно перпендикулярные главные оси жесткости, в которых векторы приложенных сил и соответствующих упругих смещений будут коллинеарными. Поведение динамической модели можно будет описать следующими дифференциальными уравнениями движения:

$$m_i \ddot{y}_i + \beta_i \dot{y}_i + \sum_{j=1}^3 y_i \sum_{m=1}^3 C_m \delta_{mi} \delta_{mj} = P_z \eta_i,$$

где m_i – приведенные к вершине резца инерционные коэффициенты суппортной части металлорежущего станка; C_m – приведенные коэффициенты жесткости в направлении главных осей жесткости; $\delta_{mi(j)}$ – элементы матрицы перехода от системы координат, связанной с главными осями жесткости, к исходной системе координат; β_i – коэффициенты внешнего вязкого трения; η_i – тригонометрические функции углов, связывающих силу резания с ее проекциями на оси исходной системы координат; y_i – перемещения вершины резца в направлениях главных осей жесткости.

Следует также рассмотреть математическую модель двигателя постоянного тока, т.е. привода подачи станка. Электромагнитный момент двигателя, [6]:

$$M_M = c_M \cdot \psi_E \cdot i_A,$$

где c_M – машинная константа; ψ_E – поток возбуждения; i_A – ток в обмотке якоря.

В соответствии со схемой замещения электродвигателя можно записать:

$$u_A - u_Q = R_A \cdot (1 + pT_A) \cdot i_A;$$

$$u_E = R_E \cdot (1 + pT_E) \cdot i_E;$$

$$M_M - M_W = pJ_M \cdot \omega_M = \frac{R_A}{(c_M \cdot \psi_E)^2} \cdot pT_M \cdot \omega_M.$$

Здесь и далее: u_A, u_Q, u_E – соответственно напряжения питания, на якоре двигателя и в обмотке возбуждения; R_A, L_A – сопротивление и индуктивность цепи якоря; R_E, L_E – сопротивление и индуктивность цепи возбуждения; i_E – ток в обмотке возбуждения; J_M – приведенный момент инерции ротора; M_W – момент сил сопротивления на валу двигателя; ω_M – частота вращения вала двигателя; p – аргумент функции комплексного переменного (преобразования Лапласа); T_A – постоянная времени якоря; T_M –

электромеханическая постоянная времени; T_E – постоянная времени возбуждения, причем

$$T_A = L_A / R_A; \quad T_M = J_M R_A / (c_M \psi_E)^2; \quad T_E = L_E / R_E.$$

Приведенная математическая модель электромеханической системы реализована с помощью библиотеки Simulink пакета Matlab.

Внешнее возмущение (силу резания) динамической модели электромеханической системы перемещения режущего инструмента будем представлять в виде трех слагаемых: статической, обусловленной средним значением припуска на обработку и режимами резания, периодической, а также случайной составляющей, имеющей характеристики «белого шума», [7]. В этом случае подсистема, задающая силу резания, будет иметь вид, показанный на рис. 1.

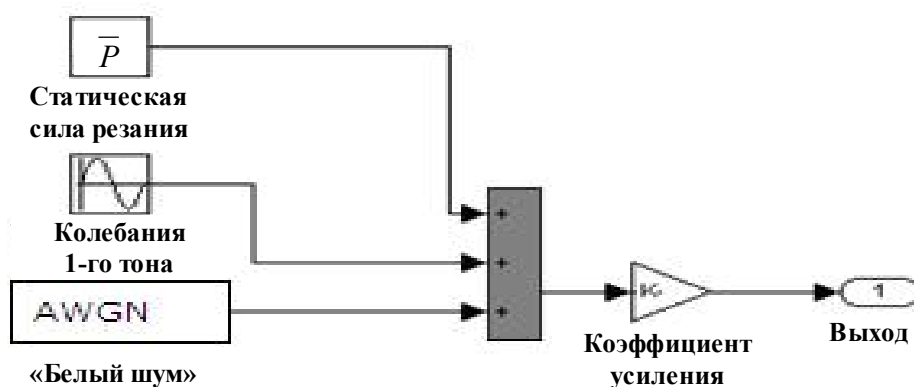


Рис. 1. Подсистема задания силы резания

В результате моделирования были получены значения модельного вектора внешнего возмущения и корреляционная функция этого вектора, рис. 2.

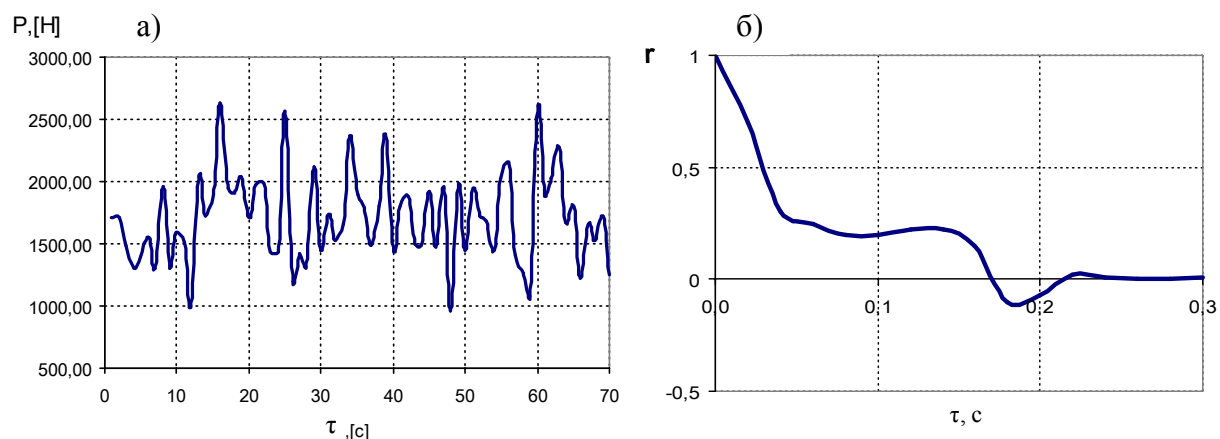


Рис. 2. Фрагмент реализации модельной нагрузки (а) и ее корреляционная функция (б)

Из полученных данных следует, что отклонение математического ожидания силы резания, рассчитанной с помощью предложенной модели, не превышает 5% от математического ожидания силы, полученной экспериментальным путем. Кроме того, нормированная корреляционная функция модельного вектора внешнего возмущения также может быть описана зависимостью вида:

$$r = \exp(-\alpha|\tau|),$$

где α – параметр, характеризующий скорость убывания ординат корреляционной функции; τ – аргумент корреляционной функции.

Указанная функция при $\alpha \rightarrow \infty$ превращается в функцию, равную нулю повсюду, кроме $\tau = 0$, т.е.

$$r = \delta(\tau),$$

где $\delta(\tau)$ - дельта-функция, что соответствует стационарному «белому шуму».

Таким образом, разработанная математическая модель динамической системы привода продольной подачи токарного станка с ЧПУ является адекватной реальному процессу.

Указанная модель позволяет оценивать эффективность предложенных вариантов адаптивного управления процессом резания с целью поддержания стабильным величины силы резания в условиях действия различных возмущающих факторов.

Поскольку, как указано выше, регулирование продольной подачи резца при обработке будет производиться путем малых перемещений суппортной части станка, то в качестве движителя системы адаптивного управления процессом резания можно применять пьезоэлектрические приводы, или актуаторы, [8]. Обеспечивая перемещения от нескольких единиц до сотен микрометров с высокой точностью, современные пьезоактуаторы способны развивать усилия до 100 кН и более. В таких актуаторах механическое перемещение рабочего органа осуществляется за счет пьезоэлектрического или пьезомагнитного эффекта, наблюдаемого в сегнетоэлектрических или ферромагнитных материалах. Указанные актуаторы в настоящее время используют для прецизионного контроля и точного позиционирования технологического оборудования в различных областях техники, в приводах адаптивной оптики, при активном демпфировании рам самолетов и др. Пьезоэлектрические двигатели имеют ряд преимуществ перед электромагнитными, а именно: высокий выходной момент, широкий диапазон регулирования частот вращения, малое энергопотребление, высокий тормозной момент при обесточивании, безинерционность, бесшумная работа, малые габариты и масса. Недостатком двигателей является то, что пьезоэлектрические материалы могут создавать рабочее усилие только в одном направлении – в направлении увеличения своей длины. Поэтому в конструкции пьезоэлектрических преобразователей предусматривают механическое упругое устройство возвратного движения. Следует также отметить, что пьезоактуаторы имеют частоты собственных колебаний выше 10 кГц, что не будет оказывать существенное влияние на динамическую систему привода подачи станка с ЧПУ.

Конструктивно пьезоактуатор может располагаться на корпусе резцедержки токарного станка с ЧПУ. Для увеличения значений перемещения рабочего органа можно использовать рычажную систему мультипликации перемещений. Для рассматриваемой в статье задачи расчетным путем были определены параметры актуатора, которые обеспечивают максимальное перемещение крайней точки его рабочего органа до 1,44 мм и усилие на конечной точке рабочего органа – до 6 кН, что является достаточным для системы адаптивного управления, в которой необходимо компенсировать продольные перемещения резца до 1 мм и силы резания до 3 кН.

Динамическую модель пьезоактуатора представим в виде одномассовой системы, которая состоит из массы m_a , звена рассеяния энергии с коэффициентом демпфирования β , и упругого звена с коэффициентом жесткости c_a , [8]. Электрическое напряжение U , действующее на актуатор, вызывает силу F_i , величина которой пропорциональна величине входного напряжения:

$$F_i = m_a \cdot \ddot{x} + \beta \cdot \dot{x} + c_a \cdot x = aU,$$

где x – продольное перемещение рабочего органа актуатора; a – коэффициент пропорциональности.

Тогда, приведенную схему пьезоактуатора можно представить в виде звена запаздывания электрической части системы и колебательного механического звена.

В качестве системы управления двигателем продольной подачи суппорта примем каскадную структуру регуляторов, которая состоит из пропорционально-интегрального регулятора напряжения, пропорционально-интегрального регулятора частоты вращения двигателя и пропорционального регулятора положения рабочего органа. Таким образом, пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор системы управления актуатором может обеспечить необходимую динамичность системы, [8].

Объединив модели электромеханической системы привода, пьезоактуатора, а также ПИД регулятора, получим модель системы адаптивного управления процессом резания токарного станка с ЧПУ, которая была реализована с помощью программы Simulink и имеет вид, представленный на рис. 3.

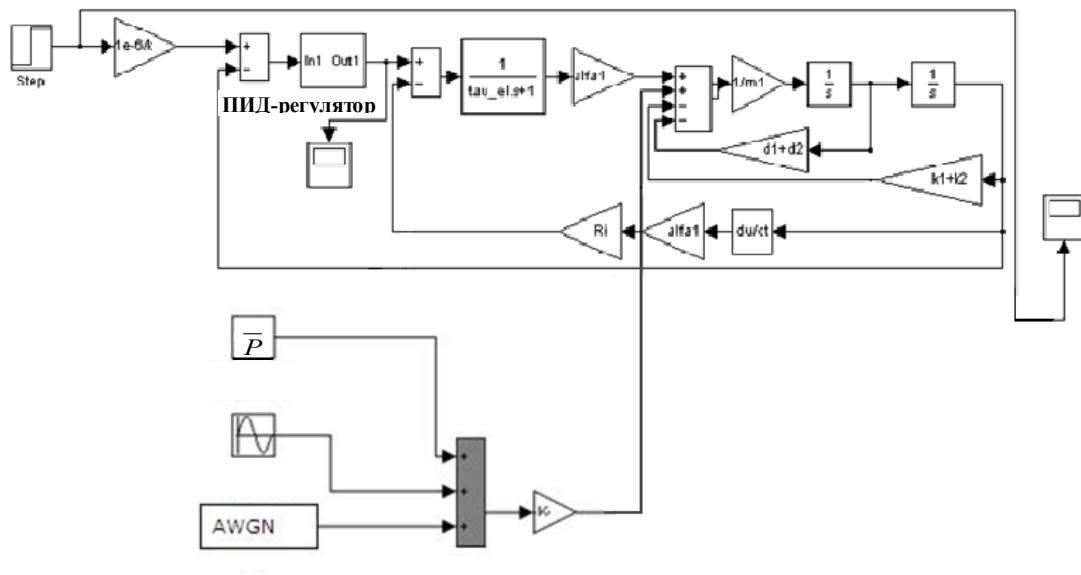


Рис. 3. Модель системы стабилизации силы резания

В результате проведенных на модели экспериментов, получены графики, рис. 4, изменения фактической мгновенной глубины резания, t ; усредненной на интервале суммирования значений ПИД регулятором глубины резания, $\bar{t}$; значения продольной подачи s , задаваемой системой стабилизации с целью снижения неравномерности силы резания, а также мгновенной силы резания P .

Стабилизация силы резания происходит по следующей схеме. За период реализации T_p , величина которого определяется минимальным значением частоты в реализации мгновенной силы резания, рассчитываем значение усредненной глубины резания:

$$\bar{t} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} t(\tau) d\tau.$$

По вычисленному значению $\bar{t}$ рассчитывается значение скорости продольной подачи s , и далее – значение силы резания, задаваемое регулятором. Дальнейшее сравнение мгновенной силы резания производится со значением, заданным регулятором, и средним значением силы резания, рассчитанным по исходным режимам резания.

Установлено, что при использовании предложенной системы параметрической стабилизации силы резания неравномерность силы при обработке исходных заготовок,

полученных методом свободнойковки, уменьшилась на 30% (коэффициент неравномерности снизился с 1,88 до 1,45).

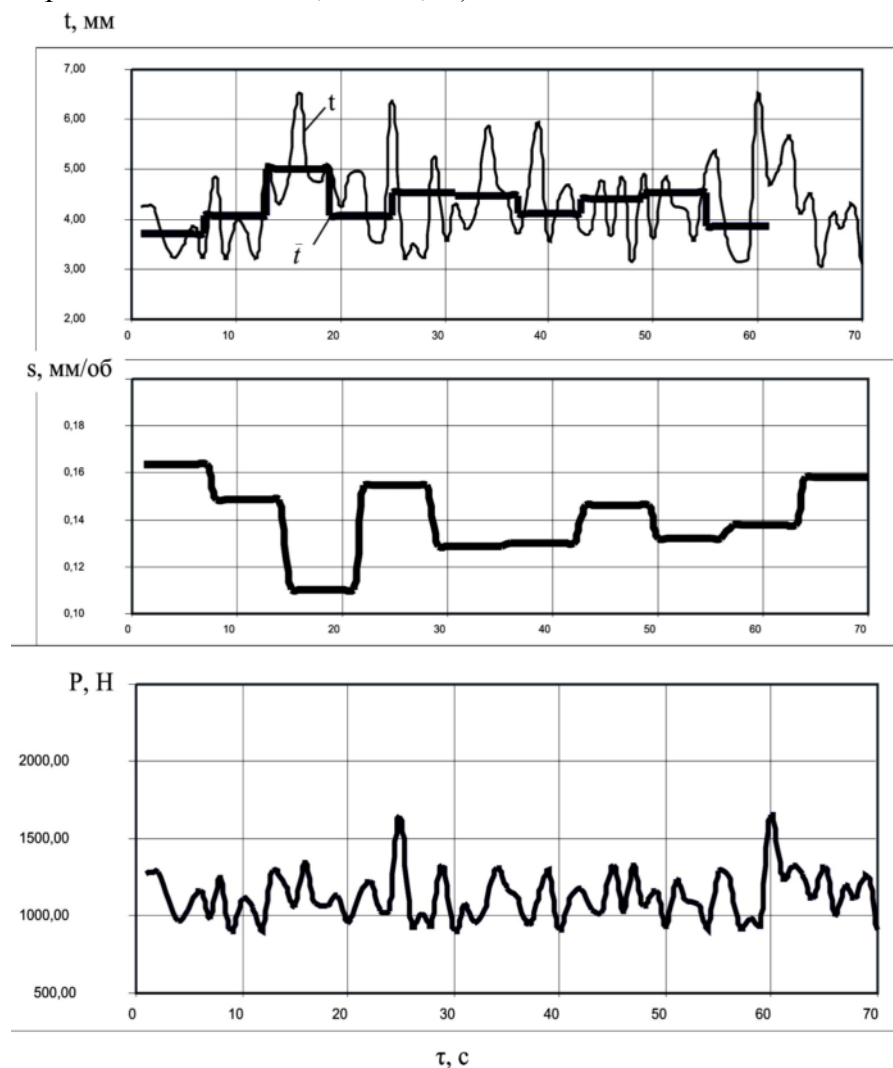


Рис. 4. Графики изменения режимов резания в процессе обработки заготовки

ляющий собой случайный процесс, обладающий свойствами «белого шума». Данная динамическая модель адекватна реальным процессам при обработке заготовок. В качестве регулятора системы адаптивного управления предложено использовать ПИД регулятор, который может обеспечить заданную динамичность системы.

Результаты моделирования разработанной системы управления показали, что система адаптивного управления позволяет снизить неравномерность силы резания на величину до 30%, что обуславливает повышение стойкости инструмента, а также производительности и точности токарной обработки.

Список литературы: 1. Теория автоматического управления / В.Н. Брюханов, М.Г. Косов и др./ Под ред. М.Ю. Соломенцева. – М.: Высш. шк., 2000. – 268 с. 2. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Маш-ние, 1989. – 296 с. 3. Водічев В.А. Автоматизовані системи управління робочими рухами верстатів для підвищення ефективності технологічних процесів металообробки: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.- О.: Одес. нац. полі-

Выводы.

Таким образом, в работе представлена математическая модель системы адаптивного управления процессом резания токарного станка с ЧПУ. Указанная модель состоит из динамической модели электромеханической системы привода продольной подачи станка, связанной с динамической моделью пьезоэлектрического актуатора, который использован в качестве двигателя системы адаптивного управления скоростью продольной подачи. В качестве возмущающего усилия на входе модели принят вектор силы резания, представля-

техн. ун-т, 2005.- 37 с. 4. Болтян А.В., Лисичкина А.В., Болтян М.А. Распределение припуска заготовок, полученных методом свободнойковки // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: Материалы десятого научно-практического семинара, г.Донецк, 4-7 мая 2009 г.- В 2-х томах.- Т.2- Донецк, ДонНТУ, 2009.- С. 15-18. 5. Болтян А.В., Горобец И.А. Теория инженерных исследований: Учебное пособие (издание 2-е переработанное и дополненное).- Донецк: ДонНТУ, 2004.- 162 с. 6. Каган А.В. Математическое моделирование в электромеханике. Ч.2: Письменные лекции. - СПб.: СЗТУ, 2002. - 73 с. 7. Болтян А.В., Болтян М.А., Лисичкина А.В. Параметры системы адаптивного управления токарным станком с ЧПУ// Известия ТТИ ЮФУ-ДонНТУ. Материалы Одиннадцатого Международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». В 3 кн.- Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ.- Кн.3, 2010, № 10.- С. 40-45. 8. Bayu Jayawardhana, Hartmut Logemann, Eugene P. Ryan. PID control of second-order systems with hysteresis// International Journal of Control.- Vol. 81, No.8, August 2008.- P. 1331-1342.

MODELLING OF SYSTEM OF ADAPTIVE CONTROL BY THE TURNING NC MACHINE WITH A GLANCE OF CASUAL CHARACTER OF EXTERNAL DISTURBANCE

Boltian A. V., Boltian M.A. (DonNTU, Donetsk, Ukraine)

Abstract. In work the variant of realization of system of adaptive control by the the turning NC machine with application of piezo-electric actuators as a propulsion devise is offered. The mathematical model of system of adaptive control is developed. External disturbance of model applies as a vector of cutting force, presented in the form of the casual process with the properties of "white noise". Proportional, integral and derivative (PID) regulator is offered to use as a regulator of system of adaptive control. The developed system of adaptive control allows lowering considerably of irregularity of cutting force at works on turning NC machine tools.

Keywords: control, noise, white, model, piezo-electric actuator, regulator.

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ТОКАРНИМ ВЕРСТАТОМ З ЧПК З ВРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВОГО ХАРАКТЕРУ ЗОВНІШНЬОГО ЗБУРЕННЯ

Болтян А.В., Болтян М.А., Ермоленко О.С. (ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)

Анотація. В роботі запропонований варіант реалізації системи адаптивного управління токарним верстатом з ЧПК з використанням в якості рушія п'єзоелектричних актуаторів. Розроблено математичну модель системи адаптивного управління. Зовнішнім обуренням моделі прийнятий вектор сили різання, представлений у вигляді випадкового процесу з властивостями «білого шуму». В якості регулятора системи адаптивного управління запропоновано використовувати пропорційний інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор. Розроблена система адаптивного управління дозволяє значно знизити нерівномірність сили різання при токарних роботах на верстатах з ЧПК

Ключові слова: управління, шум, білий, модель, п'єзоактуатор, регулятор.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОКАРНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНОГО ХАРАКТЕРА ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Болтян А.В., Болтян М.А., Ермоленко А. С. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Аннотация. В работе предложен вариант реализации системы адаптивного управления токарным станком с ЧПУ с применением в качестве движителя пьезоэлектрических актуаторов. Разработана математическая модель системы адаптивного управления. Внешним возмущением модели принят вектор силы резания, представленный в виде случайного процесса, обладающего свойствами «белого шума».

В качестве регулятора системы адаптивного управления предложено использовать пропорциональный интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. Разработанная система адаптивного управления позволяет значительно снизить неравномерность силы резания при токарных работах на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: управления, шум, белый, модель, пьезоактуатор, регулятор.

Надійшла до редколегії 18.01.2011.