

УДК 621.941

Ю.О. Стреляная, доцент, канд. техн. наук,

А.А. Ярошенко, доцент, д-р физ.-мат. наук

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053

joulia.bayrakova@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ЗВЕНА МОДЕЛИРУЮЩЕГО ДИНАМИКУ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ НА ТЯЖЕЛЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКАХ

Разработана модель динамического звена моделирующего динамику отклонений формы заготовки в статистическом режиме, которые имеют случайный характер и порождают шум возбуждения системы.

Ключевые слова: отклонения формы заготовки, износ резца, возмущения, токарный станок, качество поверхности.

Введение. В связи с требованиями рынка, при изготовлении широкого класса деталей машин, необходимо стремиться, как к повышению производительности, так и выдерживать высокие требования по качеству получения геометрических размеров, шероховатости и физико-механическому состоянию поверхностного слоя.

Важнейшими факторами, определяющими потребительские качества, долговечность, надежность и точность работы машин, являются погрешности размеров, отклонения формы, шероховатость, волнистость поверхностей и др.

Применение новых способов получения заготовок, уменьшение припусков на механическую обработку, совершенствование конструкций инструмента, создание станков с ЧПУ повышенной и особо высокой точности, высокое качество предварительной обработки позволили в качестве финишной операции использовать процессы чистового точения.

В сравнении с традиционной обработкой прецизионное точение на тяжелых станках является более сложным. Поверхности преобразуются от заготовки до готовой детали за более или менее длительный промежуток времени, в течение которого изменяются взаимное расположение исполнительных механизмов станка, элементы режима резания, состояние рабочей поверхности инструмента. В этих условиях обеспечение стабильного качества обработки и эффективности операций возможно только на основе динамических моделей, которые должны учитывать влияние внешних возмущений за время обработки детали; деформации приспособления, детали и инструмента; наличие вибраций в технологической системе и т. д.

Целью данной статьи является разработка динамического звена моделирующего динамику отклонений формы заготовки и износ резца.

Основное содержание работы. Анализ исследований процесса показал, что основными возмущающими факторами являются: отклонения формы заготовки и износ резца. Для описания процесса необходимо: математическое описание возмущений, при наличии которых может быть расширена модель объекта.

Заготовка характеризуется отклонениями формы и дисбалансом, которыми обычно и объясняют появление периодически изменяющихся сил, возникающих при точении. Инструмент в процессе работы изнашивается, совершает закономерные и случайные колебания, амплитуда, частота и фаза которых изменяются за период стойкости инструмента, что приводит к изменению качества поверхности детали.

Отклонения формы заготовки могут быть учтены путем введения в состав системы процесса точения [(1) 1] дополнительного звена – соответствующего формирующего фильтра, который синтезирует шум с заданными статистическими характеристиками из белого шума. Для определения параметров последнего использованы материалы экспериментальных исследований [2] и собственных работ автора на станке модели STU3500M(H) TORNИ TACCHИ.

Для анализа состояния заготовки использован метод профилографирования поверхности. Круглограммы снимались в направлении, перпендикулярном вектору скорости резания непосредственно на станке, оборудованном сканирующим устройством; общий вид станка и отдельные элементы изображены на рисунках 1, 2.

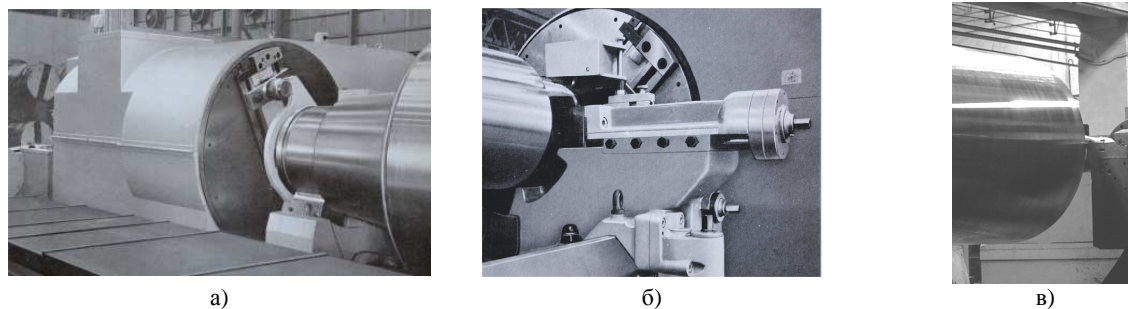


Рисунок 1 – Тяжелый станок для чистового точения СТУ3500М (Н) TORNI TACCHI, с системой ЧПУ Sinumeric 840D: а) передняя бабка станка; б) элемент устройства для профилографирования; в) процесс точения

Профиль поперечного сечения записывали после совершения 1, 2, 3 и 5 проходов и по мере износа инструмента через 5, 10, 15, 25, 40 минут работы.

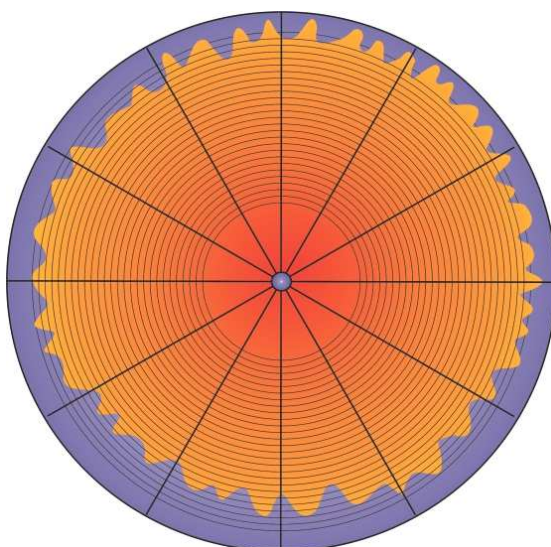


Рисунок 2 – Пример круглограммы поперечного сечения валка

Спектральный состав отклонений профилей исследовался с помощью гармонического анализа круглограмм. В результате расчетов получены для исследуемых частот соответствующие значения амплитуд и фаз, позволяющие описать профили в различные моменты времени тригонометрическим полиномом Фурье:

$$r(\varphi) = r_o + \sum (A_k \cos k\varphi + B_k \sin k\varphi)$$

или

$$r(\varphi) = r_o + \sum C_k \cos(k\varphi + \psi_k)$$

A_k, B_k – соответственно амплитуда косинусной и синусной составляющих; $C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$, k – номер гармоники; ψ_k – эквивалентная фаза.

Результаты гармонического анализа, показывают, что при чистовом точении валков значима 1-я и 2-я гармоники. С течением времени вследствие износа инструмента постепенно растут амплитуды преобладающих гармоник. Высшие частоты обусловлены износом лезвия инструмента. По мере износа инструмента наблюдается рост амплитуд C_k преобладающих частот. С течением времени увеличиваются также средняя W_{kcp} и максимальная W_{kmax} высоты волнистости и их отклонения от средних значений.

В силу того, что отклонение формы от заданной определяется большим количеством неконтролируемых независимых случайных факторов; они относительно стабильны в процессе обработки каждой детали, а отклонение формы может характеризоваться квазистационарным гауссовским случайным процессом. Такой процесс определяется математическим ожиданием (параметрами формы заготовки) и отклонениями формы, описываемыми корреляционной функцией (см. рисунок 3). Корреляционная функция построена непосредственно по кругограмме

$$R_{xx}(\theta) = E\{x(\varphi) \cdot x(\varphi + \theta)\}, \quad (1)$$

где E – операция взятия математического ожидания; $x(\varphi)$ – характеристики случайного процесса, φ, θ – абсцисса и ордината профилограммы.

Для конечных реализаций всегда существуют спектральные плотности, определяемые в виде преобразований Фурье по формулам Виннера – Хинчина [3]:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\theta) e^{-j2\pi\omega\theta} d\theta.$$

Численными методами получены графики зависимостей $R_{xx}(\theta)$ и $S_{xx}(\omega)$ (см. рисунки 3, 4, 5)

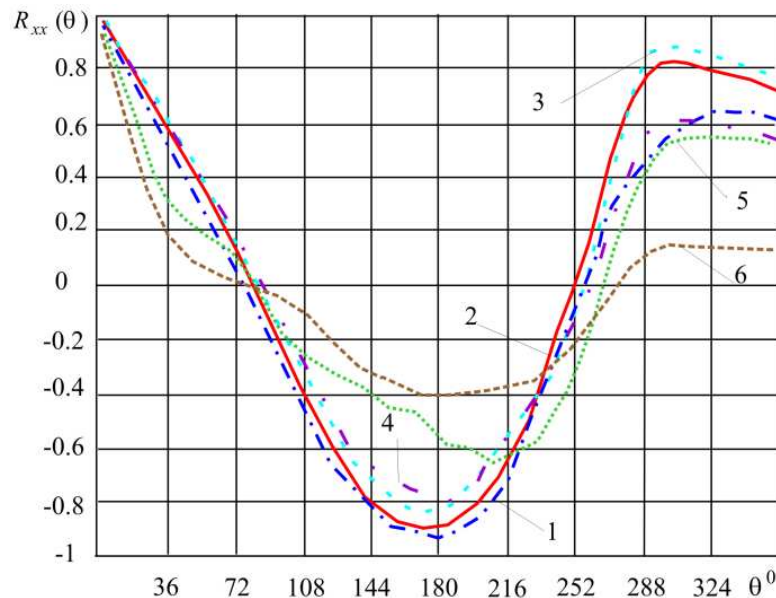


Рисунок 3 – Корреляционные кривые профиля заготовки $R_{xx}(\theta)$ за период стойкости инструмента:
 1 – $\tau = 5$ мин; 2 – $\tau = 10$ мин; 5 – $\tau = 25$ мин; 3 – $\tau = 0$ мин; 4 – $\tau = 15$ мин;
 6 – $\tau = 40$ мин

Корреляционная функция отклонения формы заготовки $R_{xx} = R(x)$ должна удовлетворять условиям применимости преобразования Фурье $\int_{-\infty}^{\infty} |R(x)| dx < \infty$, где для заготовки, вращающейся со скоростью, $x = v\tau$.

Для заготовок, обрабатываемых на тяжелых станках, она с достаточной степенью точности может аппроксимироваться зависимостью:

$$R_f(v\tau) = D_0 e^{(-\alpha \cdot v|\tau|)} \cos(\beta v\tau), \quad (2)$$

где D_0 – дисперсия высот неровностей рельефа заготовки, v – скорость ее движения, α, β – соответствующие коэффициенты корреляции.

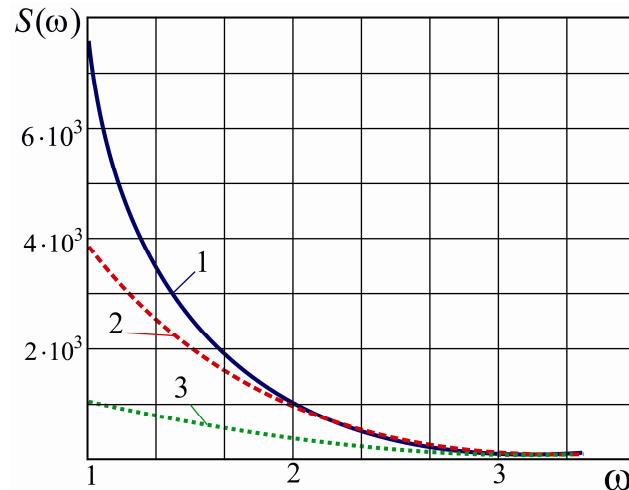


Рисунок 4 – Спектрограммы профиля заготовки по проходам $S_{xx}(f)$ после ее обработки неизношенным резцом: 1 – после снятия припуска за один проход; 2 – после снятия припуска за два прохода; 3 – после снятия припуска за три прохода.

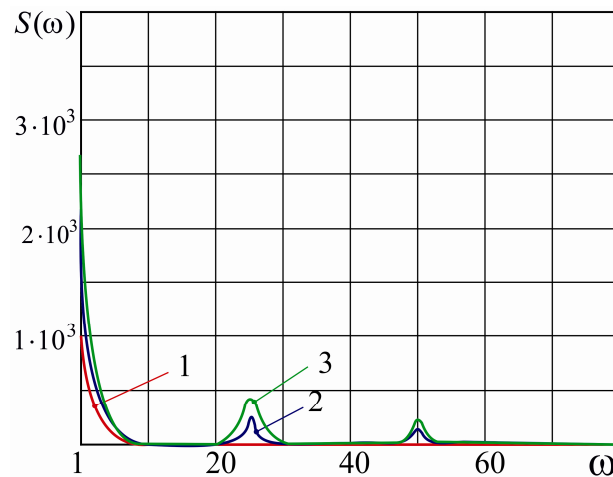


Рисунок 5 – Спектрограммы профиля заготовки $S_{xx}(f)$ за период стойкости инструмента после совершения трех проходов: 1 – $\tau = 1$ мин; 2 – $\tau = 25$ мин; 3 – $\tau = 40$ мин

Формально операция перехода от корреляционной функции к спектральному представлению может быть осуществлена применением преобразования Лапласа

$$S(p) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-p_1 \cdot i \cdot \tau} d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-p_2 \cdot i \cdot \tau} d\tau, \quad (3)$$

где в рассматриваемом случае $p_1 = i\omega$, $p_2 = -i\omega$.

Подстановка (2) в (3) приводит к результату:

$$S(\omega) = \frac{D(i\omega + \alpha v)}{(i\omega + \alpha v)^2 + \beta^2 v^2} + \frac{D(-i\omega + \alpha v)}{(-i\omega + \alpha v)^2 + \beta^2 v^2}, \quad (4)$$

и после соответствующих упрощений выражение для спектральной плотности (4) приобретает вид:

$$S(y) = D \frac{a + by}{y^2 + cy + d} \quad (5)$$

где $a = 2\alpha^3 v^3 + 2\alpha v^3 \beta^2$; $b = 2\alpha v$; $c = 2\alpha v^2 (\alpha^2 - \beta^2)$; $y = \omega^2$; $d = v^4 (\alpha^2 + \beta^2)$.

Как известно, экстремумам функции $S(\omega)$ соответствуют нули ее производной. После дифференцирования $S(y)$ по y , восстановления $y = \omega^2$ и приведения к общему знаменателю, получим:

$$\dot{S}(\omega) = 2\omega D \left(\frac{b(\omega^4 + c\omega^2 + d) - (a + b\omega^2)(2\omega^2 + c)}{(\omega^4 + c\omega^2 + d)^2} \right). \quad (6)$$

Полюса функции (6) совпадают с нулями ее числителя. Кроме того, должен быть учтен ноль, соответствующий $\omega_{1,2} = \pm\infty$ и $\omega_3 = 0$.

Нулями числителя (6) являются:

$$\omega_{4,5} = \pm v \sqrt{-\alpha^2 - \beta^2 + 2\beta\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$$

$$\omega_{6,7} = \pm Iv \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + 2\beta\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$$

Условиям физической реализуемости экстремумов удовлетворяют корни ω_1, ω_4 и ω_3 – при условии $\beta > \frac{1}{3}\sqrt{3\alpha}$.

Результаты анализа показывают, что максимуму функции (5)

$$S(\omega)_{\max} = \frac{1}{2} D \frac{\alpha\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}}{v\beta\left(\beta^2 + \alpha^2 - \beta\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}\right)} \quad (7)$$

соответствует частота

$$\omega = v \sqrt{-\alpha^2 - \beta^2 + 2\beta\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}. \quad (8)$$

Структура формирующего фильтра может быть определена методом факторизации дробно-рациональной функции (5) с выделением нулей и полюсов, лежащих в левой полуплоскости [3, 4]. Передаточная функция для соответствующего динамического звена имеет вид:

$$W(p) = \frac{K(T_3 p + 1)}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (9)$$

в котором необходимо определить параметры K, T_1, T_2, T_3 .

Известно, что спектральная плотность входного и выходного сигналов динамического звена связаны между собой соотношением [3]

$$S_{\text{вых}}(\omega) = S_{\text{вх}}(\omega) |W(j\omega)|^2, \quad (10)$$

где $|W(j\omega)|^2$ – квадрат модуля передаточной функции динамических характеристик технологической системы, $S_{\text{вх}}(\omega)$ – спектральное представление отклонения профиля заготовки, определяемое как преобразование Фурье корреляционных функций.

В соответствие с (5)

$$|W(j\omega)|^2 = \frac{K^2(T_3^2\omega^2 + 1)}{T_1^2\omega^4 + (-2T_1 + T_2^2)\omega^2 + 1}. \quad (11)$$

Пример графика модуля частотных характеристик системы и спектральных характеристик случайной составляющей отклонений профиля заготовки приведены на рисунках 6 и 7.

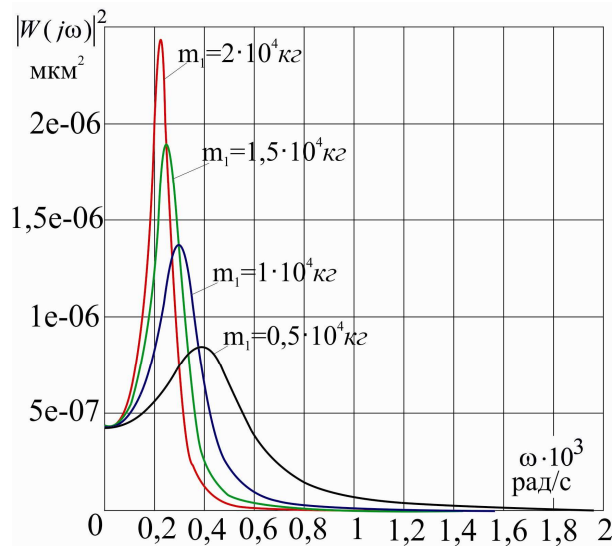


Рисунок 6 – Зависимости квадратов модулей передаточной функции от частоты для разных значений массы заготовки

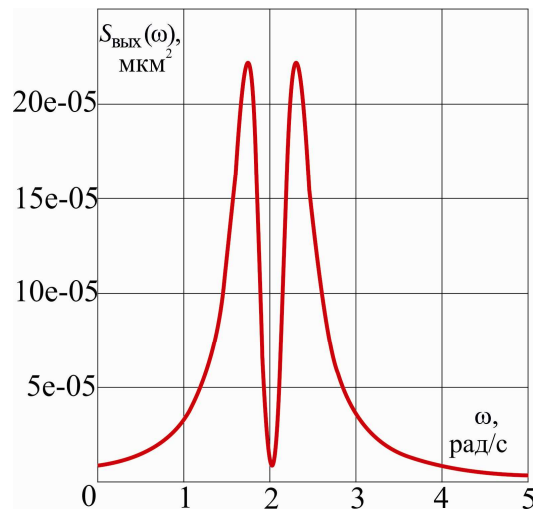


Рисунок 7 – Спектр на выходе системы

Для белого шума с единичной интенсивностью $S_{\text{вх}}(\omega) \equiv 1$ неизвестные коэффициенты в (9) могут быть определены по параметрам спектральной плотности (5), что позволяет получить соответствующую форму в пространстве состояний в виде уравнений состояния (12) и наблюдения (13)

$$\dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1, \quad (12)$$

$$y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2, \quad (13)$$

где $G_1 = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$; $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix}$; $B_1 = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2 T_3 \end{bmatrix}$; $D_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$; $E_2 = \rho$; w_1, v_2 – некоррелированные

единичные порождающие гауссовские белые шумы; $T_1 = \frac{1}{v^2(\alpha^2 + \beta^2)}$; $T_2 = \frac{2\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}$; $T_3 = \frac{1}{v(\alpha^2 + \beta^2)}$;

$K = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}}$; D – дисперсия высот неровностей рельефа заготовки, v – скорость ее движения;

α, β – соответствующие коэффициенты корреляции.

С учетом $W = y_1$ при введении формирующего фильтра (12), (13) система процесса точения [(1) 1] приобретает вид:

$$\begin{cases} \dot{Y}_0 = A_0 Y_0 + B_0 W + C_0 U \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1 \\ y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2 \\ z = D z + E v \end{cases}, \quad (14)$$

откуда непосредственно следует

$$\begin{cases} \dot{Y}_0 = A_0 Y_0 + B_0 D_1 G_1 + B_0 E_2 v_2 + C_0 U \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1 \end{cases},$$

что позволяет представить уравнения состояния процесса точения с учетом возмущений, определяемых статистическими характеристиками заготовки как состояния расширенного объекта в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{G}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 D_1 \\ 0 & A_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_0 \\ G_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0 E_2 & 0 \\ 0 & B_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_2 \\ w_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_0 \\ 0 \end{bmatrix} \times U$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1 + c_3}{m_1} & -\frac{h_1 + h_3}{m_1} & \frac{c_3}{m_1} & \frac{h_3}{m_1} & -\frac{c_3}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{c_3}{m_2} & \frac{h_3}{m_2} & -\frac{c_2 + c_3}{m_2} & -\frac{h_2 + h_3}{m_2} & \frac{c_3}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{c_3}{m_1} \rho & -\frac{h_3}{m_1} \rho \\ 0 & 0 \\ \frac{c_3}{m_2} \rho & -\frac{h_3}{m_2} \rho \\ 0 & k_1 T_3 \\ 0 & -1 - k T_2 T_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_2 \\ w_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{c_1}{m_1} & \frac{h_1}{m_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S \\ \dot{S} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Векторно-матричные уравнения (15) представляют стандартную форму описания динамической системы в терминах теории пространства состояний, что позволяет ее использовать для исследования характеристик и поведения процесса, а также для синтеза систем управления этим процессом.

Выводы.

1. Основным источником возмущений в технологической системе являются вариации формы заготовки.
2. Отклонения формы заготовки в статистическом режиме имеют случайный характер и порождают шум возбуждения системы.
3. Вследствие воздействия на технологическую систему возмущающих факторов, фазовые координаты объекта могут быть измерены с существенными случайными ошибками. Для реализации оптимального управления процессом необходимо оценивать его состояние.

Перспективы дальнейших исследований в данной области. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что обеспечение стабильного качества обработки и эффективности операций возможно только за счет введения адаптивных систем с обратной связью, адекватно оценивающих текущее состояние технологической системы.

Библиографический список использованной литературы

1. Братан С.М. Обеспечение стабильности параметров качества изделий за счет разработки систем адаптивного управления / С.М. Братан, Ю.О. Стреляная, М.Г. Ступко // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. — Севастополь, 2013. — Вип. 139. — С. 22 – 27.

2. Ковалев В.Д. Исследование точности тяжелых станков с гидростатическими направляющими с учетом жесткости несущих систем / В.Д. Ковалев, О.Ф. Бабин, А.И. Донченко, С.А. Кузьменко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — Донецк, 2000. — Вып. 12. — С. 111–115.
3. Брамлер К. Фильтр Калмана–Бьюси. Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация / К. Брамлер, Г. Зифлинг. — М.: Мир, 1982. — 200 с.
4. Калман Р. Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арbib. — М.: Мир, 1971. — 398 с.

Поступила в редакцию 23.01.2014 г.

Стреляна Ю.О., Ярошенко А.А. Побудова динамічної ланки яка моделює динаміку відхилень форми заготовки при чистовому точінні на важких токарних верстатах.

Розроблено модель динамічної ланки яка моделює динаміку відхилень форми заготовки в статистичному режимі, що мають випадковий характер і породжують шум збудження системи.

Ключові слова: відхилення форми заготовки, знос різця, збурення, токарний верстат, якість поверхні.

Strelyanaya Yu.O. , Yaroshenko A.A. Building dynamic link dynamics modeling deviations form the workpiece when finish turning on heavy lathes.

A model simulating the dynamic link dynamic deviations form the workpiece in a statistical mode, which are random and generate noise excitation system.

Keywords: deviations form the workpiece, cutter wear, perturbations, lathe, surface quality.