

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ НЕЖЁСТКИХ ВАЛОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

© 2012 А. Ю. Набилкин, С. А. Кравченко, В. П. Бирюков

Балаковский институт техники, технологии и управления
(филиал Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина)

Предлагается система автоматического управления формой нежестких валов по продольному сечению при токарной обработке. Система предназначена для компенсации среднего смещения передней и задней бабок и деформации заготовки в процессе точения, а также низкочастотных неконтролируемых возмущений по жесткости передней и задней бабок, базированию заготовки, износу резца путём корректировки положения резца по поперечной оси.

Нежесткий вал, погрешности обработки, регрессионный анализ, многомерный стохастический линейно-квадратичный гауссов регулятор, формирующий фильтр, оптимальное управление.

Постановка задачи. Особенностью токарной обработки нежестких валов является их большая деформация под действием сил резания, что приводит к бочкообразности обработанных изделий и заставляет уходить на режимы с уменьшенными силами резания и, соответственно, пониженной производительностью [1]. Применение люнетов позволяет применять более жесткие режимы резания, однако требуются большие затраты времени на предварительную обработку шеек под люнет, переустановку люнетов, детали и т.д. Поэтому актуальной является задача создания системы управления, обеспечивающей компенсацию больших деформаций нежестких валов и позволяющей производить их обработку на более высоких скоростях [2]. В статье производится построение системы управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке в центрах путём отслеживания режущей кромкой резца деформации смещения вала в процессе точения.

Анализ погрешности обработки нежестких валов. Для выявления закономерностей погрешностей обработки нежестких валов был проведён следующий эксперимент. На токарном станке с ЧПУ 16A20 Ф3 протачивалась группа заготовок длиной 325 мм на диаметры 27 мм (3 шт.), 26,5 мм (2 шт.), 24,8 мм (3 шт.) при режимах резания: подача - 0,25 мм/об, глубина резания - 0,6 мм, скорость резания - 46,3 м/мин. Затем микрометром МКЦ 50 с точностью 0,001 мм с шагом 25 мм производился замер диаметров получившихся в результате обработки

деталей. На рис. 1 приведены графики отклонений диаметров от номинальных значений.

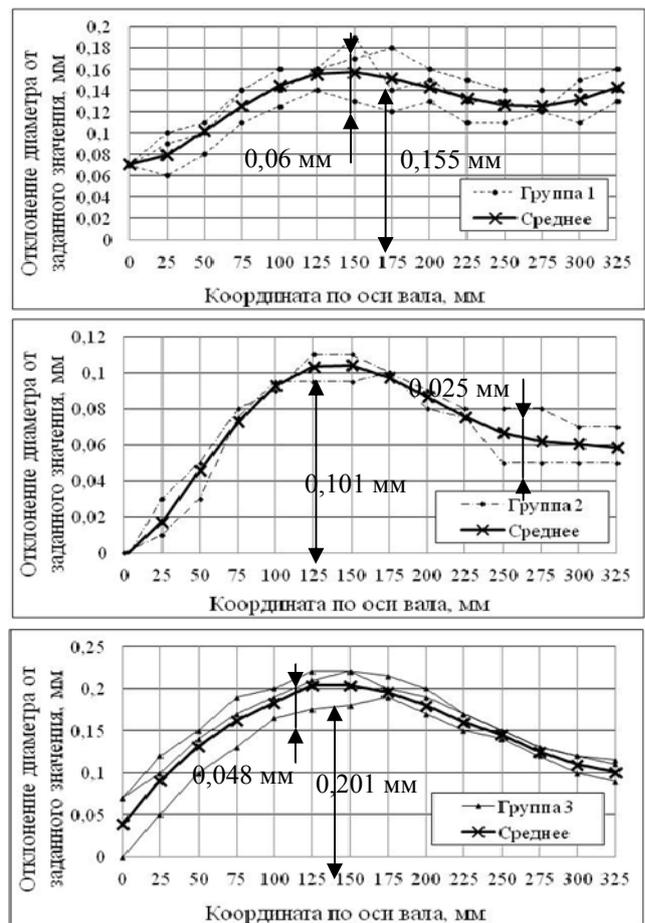


Рис. 1. Анализ погрешности формы вала для номинальных диаметров 26,8 (вверху); 25,3 (в середине); 23,6 (внизу)

Графики показывают наличие для каждой группы валов систематической составляющей погрешности диаметра вала, которая принимает максимальные значения 0,155; 0,101; 0,201 мм в средней части валов. Кроме

систематической погрешности группы валов имеют случайный разброс величиной от 0,025 до 0,06 мм.

Экспериментальные образцы имели точки перегиба на расстоянии 25-30 мм от левого и 50-75 мм от правого края заготовки, что не позволило описать погрешность классической моделью деформации нежёсткого вала [1,3] и систематическая погрешность

была описана полиномиальным регрессионным уравнением [4]

$$\delta(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5, \quad (1)$$

где x - координата анализируемой точки по длине вала.

Полученные оценки коэффициентов моделей, показателей адекватностей и ошибок прогноза приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сводные данные по регрессионному анализу

Группа №	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	R^2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$2s_{ост}$
1	0,071	-0,000132	$2,379 \cdot 10^{-5}$	$-2,09 \cdot 10^{-7}$	$6,42 \cdot 10^{-10}$	$-6,6 \cdot 10^{-13}$	0,853	19,21	1,5	0,02
2	-0,0019	0,00039	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$-1,98 \cdot 10^{-7}$	$6,47 \cdot 10^{-10}$	$-7,07 \cdot 10^{-13}$	0,95	50,26	1,61	0,0094
3	0,064	0,0016	$2,34 \cdot 10^{-6}$	$-7,34 \cdot 10^{-8}$	$2,17 \cdot 10^{-10}$	$-1,73 \cdot 10^{-13}$	0,95	19,21	1,5	0,019

Регрессионные уравнения имеют вид ($u_i = x^i$)

$$\hat{\delta}_1 = 0,071 - 0,00013u_1 + 2,38 \cdot 10^{-5}u_2 - 2,09 \cdot 10^{-7}u_3 + 6,42 \cdot 10^{-10}u_4 - 6,61 \cdot 10^{-13}u_5,$$

$$\hat{\delta}_2 = -0,0019 + 0,00039u_1 + 1,96 \cdot 10^{-5}u_2 - 1,98 \cdot 10^{-7}u_3 + 6,5 \cdot 10^{-10}u_4 - 7,1 \cdot 10^{-13}u_5,$$

$$\hat{\delta}_3 = 0,064 + 0,0016u_1 + 2,34 \cdot 10^{-6}u_2 - 7,34 \cdot 10^{-8}u_3 + 2,2 \cdot 10^{-10}u_4 - 1,73 \cdot 10^{-13}u_5.$$

Экспериментальные и рассчитанные по моделям погрешности обработки приведены на рис. 2. Анализ графиков и показатели адекватности подтверждают, что построенные модели с достаточной для практики точностью описывают систематические погрешности обработки групп валов. Анализ разброса экспериментальных диаметров вокруг систематических составляющих показывает, что существуют пять участков, на которых случайные составляющие имеют максимальные значения: это правый и левый края, середина вала и точки перегиба (выделенные зоны на рис. 2.). Это позволяет сделать вывод: если обеспечить отработку систематических погрешностей и добиться допустимых значений погрешностей обработки в этих пяти точках, то весь вал будет иметь требуемую точность обработки. Данное положение положено в основу построения системы управления с распределённым по длине вала управляемым параметром.

Сделаем допущение, что случайные составляющие имеют низкочастотный спектр при переходе последовательно от детали к детали. Это позволяет предложить струк-

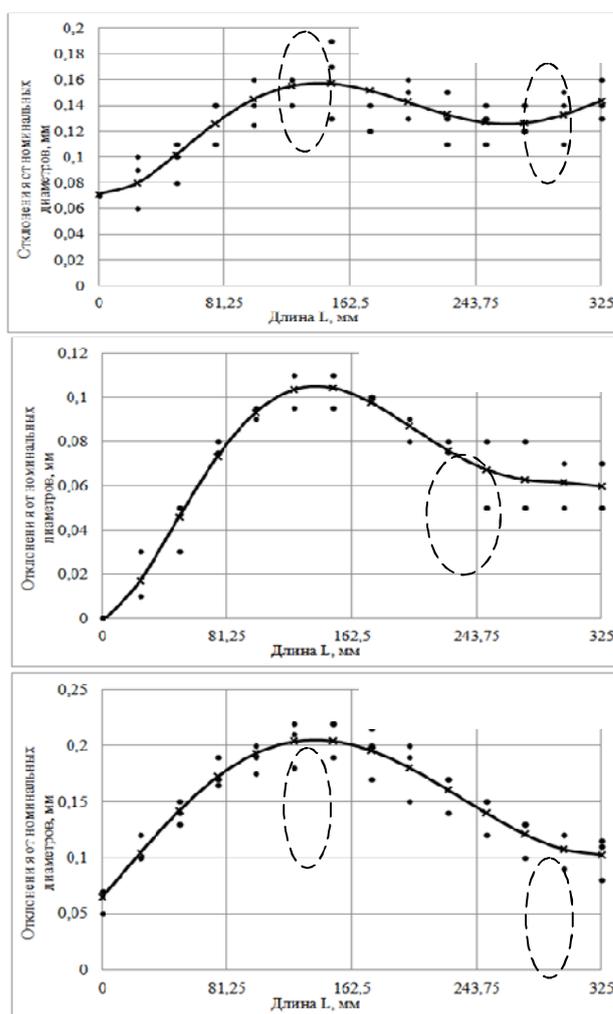


Рис. 2. Экспериментальные и рассчитанные по модели деформации валов:

• - экспериментальные данные, —x— - аппроксимация по модели

турную схему системы управления, обеспечивающую отработку данных погрешностей в процессе токарной обработки. После построения системы проведём проверку данного допущения путём анализа точности рабо-

ты системы методом математического моделирования.

Выбор структуры системы управления. На рис. 3 приведена функциональная схема системы управления продольным

профилем нежёсткого вала в процессе токарной обработки, позволяющая путём отслеживания режущей кромкой резца деформации заготовки производить обработку при повышенных значениях силы резания.

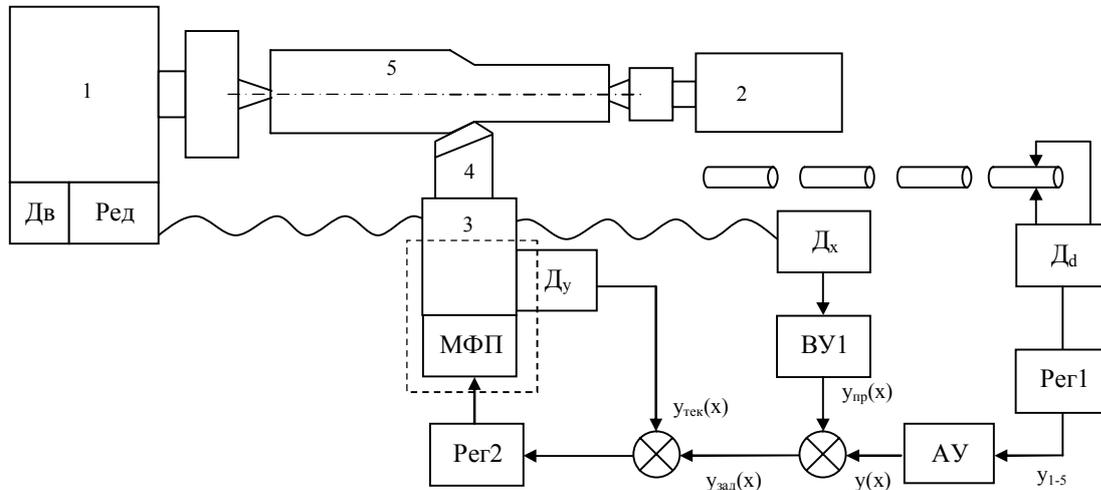


Рис. 3. Функциональная схема системы управления продольным профилем нежёсткого вала в процессе токарной обработки: 1 – передняя бабка, 2 – задняя бабка, 3 – суппорт, 4 – режущий инструмент, 5 – заготовка, МФП – многоступенчатый фрикционный привод, ВУ1 – вычислительное устройство, ЛКГ – ЛКГ-регулятор, Рег2 – ПИД-регулятор, D_d – устройство для измерения геометрической формы валов, D_x – датчик положения режущей кромки по оси x , D_y – датчик положения режущей кромки по оси y

Система управления является комбинированной каскадной. Она включает прямой канал управления для компенсации систематической ошибки и контур обратной связи для отработки случайной составляющей ошибки путём дополнительной корректировки положения режущей кромки резца по поперечной оси.

Вычислительное устройство ВУ1 для каждого положения резца по продольной оси, измеряемого датчиком D_x , по построенной математической модели систематической ошибки определяет траекторию движения режущей кромки резца по продольной оси $y_{np}(t)$ и выдает её в виде задания системе управления положением резца по поперечной подаче, являющейся внутренним контуром каскадной системы. Объектом управления внутреннего контура является система привода поперечной подачи и процесс резания (формирующий момент сопротивления данному приводу).

Пятиканальный регулятор Рег1 по результатам измерения датчиком D_d диаметра обработанных деталей в выбранных пяти точках определяет управляющее воздействие в виде корректировок координат положения режущей кромки в каждой из этих точек. Аппроксимирующее устройство (АУ) преоб-

разует дискретную траекторию в непрерывную и выдает её в виде поправки $y(t)$ к управляющему воздействию прямого канала управления $y_{np}(t)$. Объектом управления внешнего контура является система управления положением режущей кромки резца по поперечной оси; процесс резания; процесс измерения диаметров в заданных пяти точках группы обработанных деталей, вносящих во внешний контур обратной связи транспортное запаздывание. Величина запаздывания зависит от количества обработанных деталей до получения результатов измерений, т.е. зависит от используемых технических средств и организации процесса контроля. Таким образом формируется заданная траектория движения режущей кромки резца по поперечной оси в процессе течения $y_{зад}(t)$, обеспечивающая отработку систематической и части случайной составляющей погрешностей обработки нежёстких валов.

Данная схема только показывает принцип работы системы и не предназначена для анализа динамики системы. Это связано с тем, что внешний и внутренний контуры работают в различных временных масштабах. Внешний контур является дискретным. Цикл расчёта управляющего воздействия внешнего контура производится после ввода дан-

ных измерения диаметра в контролируемых точках очередной детали. Внутренний контур работает непрерывно в процессе обработки очередной детали. При этом система управления положением режущей кромки по поперечной оси отрабатывает последнее управляющее воздействие внешнего контура.

Построение математической модели объекта управления по управляющему воздействию. Для удобства анализа за период дискретизации принята продолжительность обработки одной детали $t_{обр} = 6$ мин. Тогда период дискретизации в относительных единицах равен $\Delta T=1$, а параметры по переходам системы внешнего контура (диаметр обработанных деталей, значения управляющих воздействий) можно рассматривать как последовательные значения временных рядов с относительным шагом, равным единице. Корреляционные функции также будут иметь сдвиг в относительных единицах вре-

мени, а спектральная плотность будет иметь относительную частоту и измеряться в количестве колебаний на период дискретизации ($f/\Delta T$).

Для управления продольным профилем нежёсткого вала используются 5 базовых точек по длине вала, в которых возможны наибольшие отклонения диаметров от заданных значений. Транспортное запаздывание z в зависимости от используемого оборудования и организации процесса контроля примем от 1 до 4 деталей. На начальном этапе синтеза примем $z = 4$, а затем исследуем повышение эффективности управления при запаздывании $z=3, z=2, z=1$, что может быть обеспечено лучшей организацией процесса измерения обработанных изделий. Тогда структурная схема объекта управления продольным профилем по значениям диаметров в пяти точках деталей имеет вид, показанный на рис. 4.

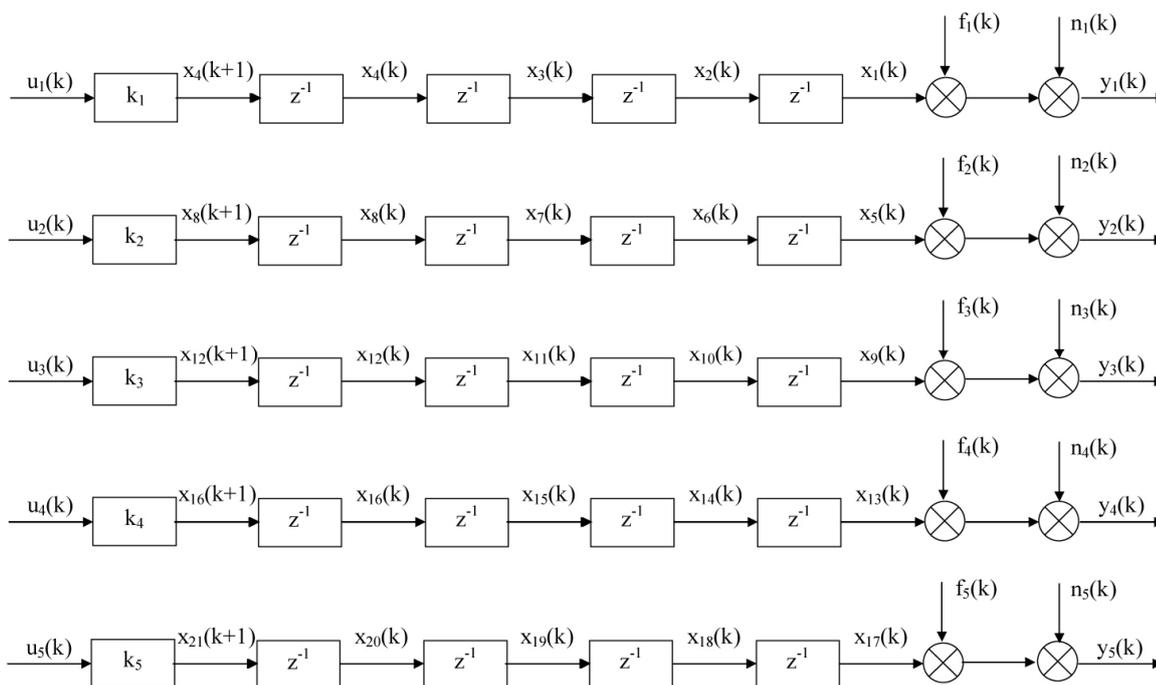


Рис. 4. Структурная схема модели объекта управления

На схеме обозначено: z^{-1} – звено транспортного запаздывания на 1 шаг, равный продолжительности обработки одной детали; $k_i=2, i = 1,5$ – коэффициент передачи перемещения режущей кромки резца по поперечной оси на диаметр обработанного вала; $x_{1..20}(k)$ – переменные состояния, необходимые для описания транспортного запаздыва-

ния стадии измерения диаметров обработанных валов; $y_1(k) - y_5(k)$ – выходные переменные – измеренные на k -м шаге диаметры очередного обработанного вала; $u_1(k) - u_5(k)$ – управляющие воздействия – рассчитанные значения положения режущей кромки инструмента в используемых для управления

точках по длине заготовки; $n_1(k) - n_5(k)$ – сигналы шума измерения.

На основании построенной структурной схемы модель объекта управления по управляющему воздействию является дискретной и имеет вид

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= x_2(k) & x_{11}(k+1) &= x_{12}(k) \\ x_2(k+1) &= x_3(k) & x_{12}(k+1) &= k_3 \cdot u_3(k) \\ x_3(k+1) &= x_4(k) & x_{13}(k+1) &= x_{14}(k) \\ x_4(k+1) &= k_1 \cdot u_1(k) & x_{14}(k+1) &= x_{15}(k) \\ x_5(k+1) &= x_6(k) & x_{15}(k+1) &= x_{16}(k) \\ x_6(k+1) &= x_7(k) & x_{16}(k+1) &= k_4 \cdot u_4(k) \\ x_7(k+1) &= x_8(k) & x_{17}(k+1) &= x_{18}(k) \\ x_8(k+1) &= k_2 \cdot u_2(k) & x_{18}(k+1) &= x_{19}(k) \\ x_9(k+1) &= x_{10}(k) & x_{19}(k+1) &= x_{20}(k) \\ x_{10}(k+1) &= x_{11}(k) & x_{20}(k+1) &= k_5 \cdot u_5(k) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} y_1(k) = x_1(k) + f_1(k) + n_1(k) \\ y_2(k) = x_5(k) + f_2(k) + n_2(k) \\ y_3(k) = x_9(k) + f_3(k) + n_3(k) \\ y_4(k) = x_{13}(k) + f_4(k) + n_4(k) \\ y_5(k) = x_{17}(k) + f_5(k) + n_5(k) \end{cases} \quad (2)$$

В пространстве состояния модель объекта управления будет иметь вид [5-12]

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k),$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + f(k) + n(k),$$

где x – вектор параметров состояния размерностью $n=20$; u – вектор управляющих воздействий размерностью $r=5$ (u_1-u_5); y – вектор управляемых переменных размерностью $m=5$ (y_1-y_5); f – вектор возмущающих воздействий размерностью $m=5$; n – вектор белого шума ошибки измерения управляемых переменных.

Матрицы состояния $A_{20 \times 20}$, управления $B_{20 \times 5}$, выхода $C_{5 \times 20}$, проходная $D_{5 \times 5}$ получают из уравнений (2) и ввиду их громоздкости не приводятся.

Для построения пятиканального регулятора была использована хорошо известная процедура синтеза дискретного линейно-квадратичного стохастического регулятора выхода [5-12]. Во-первых, это обеспечивает синтез многоканального регулятора, во-вторых, получается оптимальный с точки зрения отработки статистических возмущений с заданными характеристиками регулятор.

Построение математической модели возмущающих воздействий на продольный профиль вала. Для построения формирующих фильтров возмущающих воздействий получены теоретические оценки спектральных плотностей возмущений при изменении температуры элементов станка, износе инструмента и ошибки измерения диаметра обработанных деталей.

Оценка частотного диапазона возмущающего воздействия при прогреве элементов механической системы станка проведена при следующих исходных данных: разогрев станка идет по линейному закону; продолжительность разогрева оборудования принята $t_{разог} = 60$ минут, что составляет $N = 10$ шагов дискретности; максимальная температурная погрешность при разогреве, даваемая всеми элементами станка, $\delta_{max} = 0,004$ мм. Скорость роста ошибки за счёт повышения температуры $\nu = 0,0004$ мм/ΔT.

Для перехода в частотную область аппроксимируем линейную зависимость синусоидальной $\delta_{тем}(t) = A \cdot \sin(\omega_{тем} \cdot t)$.

Тогда скорость изменения $\dot{\delta}_{тем}(t) = \omega_{тем} \cdot A \cdot \cos(\omega_{тем} \cdot t)$, максимальная скорость $\dot{\delta}_{тем}(t)_{max} = \omega_{тем} \cdot A$. Ограничим линейную зону $\delta_{лин} = 0,8 \cdot A$, тогда $A = 1,25 \cdot \delta_{max}$.

Отсюда круговая частота основной гармоники возмущающего воздействия

$$\omega_{тем} = \frac{\dot{\delta}(t)_{max}}{1,25 \delta_{max}} = \frac{0,0004}{1,25 \cdot 0,004} = 0,08 \text{ рад} / \Delta T,$$

$$\text{частота } f_{тем} = \frac{0,08}{2\pi} = 0,012 \text{ кол} / \Delta T.$$

Для учёта возможных высокочастотных изменений температуры частотная область при анализе расширена $f_{тем} \leq 0,024 \text{ кол} / \Delta T$.

Аналогично для линейной модели износа режущей кромки резца при исходных данных: период работы инструмента принят $t_{рез} = 30$ мин, то есть 5 периодов дискретизации; максимально допустимое скалывание режущей кромки $\delta_{pmax} = 0,002$ мм, что по диаметру составляет 0,004 мм, получена верхняя граница частоты возмущения по причине износа резца $f_{\delta} \leq 0,025 \text{ кол} / \Delta T$.

Ошибка измерения диаметра представлена случайным процессом типа белый шум

с дисперсией, определяемой классом точности прибора. При ошибке прибора, взятой с 95-процентной доверительной вероятностью $\delta = 0,001$ мм, дисперсия белого шума будет равна $\delta = 0,25 \cdot 10^{-6}$ мм². При анализе системы дисперсия белого шума повышена вследствие возможности наличия других возмущающих воздействий с характеристиками типа белый шум.

На основании полученных данных прием показанный на рис. 5 вид графика спектральной плотности. Спектральная плотность включает полученные диапазоны частот, а также белый шум, учитывающий ошибку измерения диаметра и другие возможные возмущения. Вид спектральной плотности в области низких частот на данном этапе не играет большой роли, т.к. эффективность системы управления с обратной связью при любом виде спектральной плотности возмущения имеет максимальную эффективность в области низких частот. Кроме того, эффективность системы управления обычно оценивается относительным снижением дисперсии выходной переменной при замыкании системы управления.

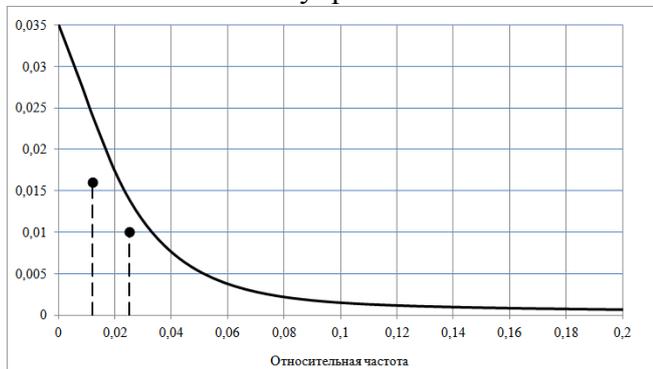


Рис. 5. График спектральной плотности возмущающего воздействия, рассчитанный аналитически

Математическая модель формирующего фильтра получена на основании известных методик [13-15] путём аппроксимации спектральной плотности дробно-рациональной функцией с чётными степенями частоты с дальнейшей факторизацией полученной аппроксимации. Полученная модель фильтра уточнялась путём минимизации суммы квадратов отклонений расчётной спектральной плотности от экспериментальной путём решения задачи нелинейного про-

граммирования. Получена модель формирующего фильтра:

$$W_{\phi\phi}(z) = \frac{0.001z^2 - 0.0006z - 0.0004}{z^3 - 2.024z^2 + 1.08z - 0.0561}.$$

Корни характеристического уравнения находятся в пределах единичного круга: 0.9969, 0.9692, 0.0580, что говорит об устойчивости формирующего фильтра.

Модель расширенного объекта управления получена путём включения модели формирующего фильтра в математическую модель исходного объекта управления:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k),$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + n(k),$$

где x – вектор параметров состояния размерностью $n=40$; u – вектор входных воздействий, включающий управляющие воздействия размерностью; $r=5$ (u_1-u_5) – случайный процесс типа белый шум размерностью $f=5$ для формирования возмущающих воздействий; y – вектор управляемых переменных размерностью $m=5$ (y_1-y_5); n – белый шум размерностью $f=5$ ошибки измерения управляемых переменных.

Матрицы состояния $A_{40 \times 40}$, управления $B_{40 \times 5}$, выхода $C_{5 \times 40}$, проходная $D_{5 \times 5}$ ввиду их громоздкости не приводятся.

Синтез многомерного стохастического линейно-квадратичного гауссова регулятора.

Линейно-квадратичный стохастический регулятор включает две составляющие [5-12]:

- оптимальный фильтр, вычисляющий оценку состояния объекта управления в виде условного среднего при заданных значениях управляющих воздействий и наблюдений выходного сигнала;
- оптимальный детерминированный регулятор, определяющий линейную обратную связь относительно оцениваемого состояния объекта.

В качестве критерия оптимальности используется среднее значение квадратичного функционала

$$J(u) = E \sum_{k=1}^N y[k]^T R_1 y[k] + u[k]^T R_2 u[k], \quad (3)$$

где R_1 – диагональная матрица размерности $m \times m$ весовых коэффициентов вклада координат выхода управления в минимизируе-

мую квадратичную ошибку системы; R_2 - диагональная матрица размерности $r \times r$ весовых коэффициентов мощности управляющих воздействий, $r_{ii} > 0, r_{ij} = 0$ при $i \neq j$.

Данный функционал является обобщённым критерием, объединяющим квадратичную интегральную ошибку (первый элемент) и расход энергии на управление (второй элемент). Выбор соотношений матриц весовых коэффициентов R_1 и R_2 обеспечивает получение минимально возможной ошибки для заданных координат при допустимых диапазонах изменения управляющих воздействий.

Синтез ЛКГ-регулятора и наблюдателя проведён в системе MatLab. С помощью функции `lqg` получена матрица регулятора, а с помощью функции `kalman` - модель наблюдающего устройства на основе фильтра Калмана, обеспечивающая фильтрацию измеряемых параметров пространства состояний объекта как условных средних при заданных значениях управляющих воздействий и выходных переменных.

Формирование многомерного регулятора (ММО регулятора) произведено путём объединения фильтра Калмана и регулятора. Структурная схема полученного многомерного регулятора приведена на рис. 6.

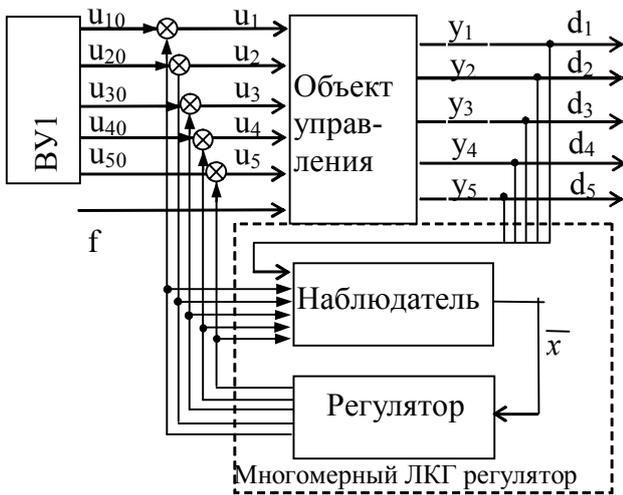


Рис. 6. Структурная схема многомерной системы управления

Анализ эффективности построенного регулятора продольного профиля. Анализ эффективности построенного регулятора проведен методом математического моделирования работы системы в MatLab при пода-

че возмущающих воздействий с полученными характеристиками.

На рис. 7 приведены результаты моделирования в виде графиков случайной составляющей погрешности обработки вала для разомкнутой и замкнутой систем для одной из исследуемых точек по длине вала при различных значениях транспортного запаздывания $z = 4, 3, 2, 1$.

Для оценки эффективности работы системы использовался коэффициент эффективности, показывающий во сколько раз дисперсия разомкнутой системы при действии возмущения больше дисперсии замкнутой системы: $k_{эф} = \frac{s_p^2}{s_{зп}^2}$, $s_p^2, s_{зп}^2$ - дисперсии регулируемой переменной для разомкнутой и замкнутой систем, соответственно.

В табл. 2 приведены показатели эффективности системы для различных транспортных запаздываний. Из графиков рис. 7 и табл. 2 видно, что при уменьшении величины запаздывания с 4 до 1 происходит существенное увеличение эффективности работы регулятора.

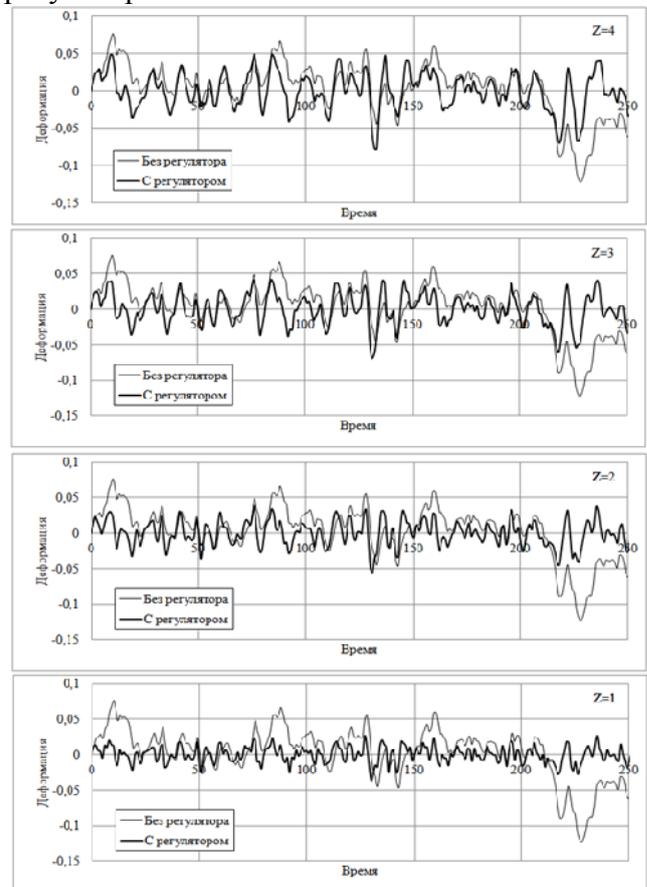


Рис. 7. Временные ряды выходного сигнала при замкнутой и разомкнутой системах для разных запаздываний

Таблица 2. Значения дисперсий и коэффициента эффективности при разомкнутой и замкнутой системах

z	s_p^2	s_z^2	$k_{эфф}$
1	0,0013	0,00013	10,02
2	0,0013	0,00031	4,23
3	0,0013	0,00047	2,84
4	0,0013	0,00059	2,25

Полученный диапазон изменения управляющих воздействий по положению резца по поперечной оси является допустимым для технологического процесса и показывает правильность выбора матриц R_1, R_2 .

Выводы

1. Показаны актуальность и возможность создания системы управления профилем нежёстких валов в процессе токарной обработки, позволяющей повысить производительность их обработки.

2. Предложены структурная схема, математическая модель объекта управления и возмущающих воздействий, алгоритм управления комбинированной каскадной системы управления, обеспечивающей компенсацию систематической и низкочастотной случайной погрешности токарной обработки нежёстких валов путём корректировки положения резца по поперечной оси.

3. На основе методики построения стохастического линейно-квадратичного регулятора создан многоканальный регулятор с дальнейшей аппроксимацией управляющих воздействий, что позволило по измерениям диаметров обработанных валов в пяти базовых точках управлять профилем нежёсткого вала по всей его длине.

4. Методом компьютерного моделирования показана эффективность разработанной системы управления.

Библиографический список

1. Маталин, А.А. Технология машиностроения [Текст] / А.А. Маталин - Л.: Машиностроение, 1985. - 496 с.
 2. Невельсон, М.С. Автоматическое управление точностью металлообработки [Текст] / М.С. Невельсон. - Л.: Машиностроение, 1973. - 176 с.
 3. Перельгина, Т.И. Технологическое обеспечение точности токарной обработки

нежёстких валов с применением Mathcad [Текст] / Т.И. Перельгина // Сб. тр. всерос. науч. конф. «Информационные технологии, системы автоматизированного проектирования и автоматизация», - Саратов: СГТУ, 2010.

4. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст] / Н. Дрейпер, Г. Смит - М.: Диалектика, 2007. - 912с.

5. Квакернак, Х. Линейные оптимальные системы управления [Текст] / Х. Квакернак, Р. Сиван. - М.: Мир, 1977. - 654с.

6. Стрейц, В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления [Текст] / В. Стрейц. - М.: Наука, 1985. - 294 с.

7. Медведев, В.С. Control System Toolbox [Текст] / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. - М.: Диалог МИФИ, 1999. - 287с.

8. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст]: Т.3. Синтез регуляторов систем управления / Под ред. К.А. Пупкова, - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 616с.

9. Мирошник, И. В. Теория автоматического управления линейными системами [Текст] / И.В. Мирошник. - СПб.: Питер, 2005. - 336с.

10. Деруссо, П. Пространство состояния в теории управления [Текст] / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз - М.: Наука, 1970. - 620с.

11. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB [Текст] / Ю. Лазарев - СПб.: Питер, Изд. Группа BHV, 2005.-512с.

12. Перемутьер, В.М. Пакеты расширения Matlab. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox. [Текст] / В.М. Перемутьер. - М.: САЛОН-ПРЕСС, 2008. - 224с.

13. Бакалов, В.П. Цифровое моделирование случайных процессов [Текст] / В.П. Бакалов - М.: Сайнс-пресс, 2002. - 90с.

14. Венгеров, А.А. Прикладные вопросы оптимальной линейной фильтрации [Текст] / А.А. Венгеров, А.А. Щаренский. - М.: Энергоиздат, 1982. - 192с.

15. Мурин, С.В. Построение формирующего фильтра для генерации случайного сигнала [Текст] / С.В. Мурин, В.П. Бирюков // Проблемы прочности, надежности и эффективности: Сб. науч. тр. - Саратов: СГТУ, 2007. - С. 222-225.

**THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM
OF FORM OF NONRIGID SHAFTS IN LATHING**

© 2012 A. U. Nabilkin, S. A. Kravchenko, V. P. Birukov

Balakovo Institute of Technique, Technology and Management
(branch of Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin)

The system of automatic control of nonrigid shafts form in longitudinal section in lathing offered in the article. The system is intended for compensation workpiece's deformation in lathing and compensation shifting motions of a head stock and a poppet by reason of limited rigidity, and also low-frequency uncontrollable perturbation actions in instability of rigidity of a head stock and a poppet, basing of a workpiece, wear of a cutting tool by correction of position of a cutting tool in Y-dimension.

Nonrigid shaft, working error, regression analysis, LQG compensator, generating filter, self-optimizing control.

Информация об авторах

Набилкин Артем Юрьевич, ассистент кафедры «Технология и автоматизация машиностроения», Балаковский институт техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина). E-mail: nabilkin42@rambler.ru. Область научных интересов: теория управления, идентификация систем управления, математическое моделирование.

Кравченко Станислав Алексеевич, аспирант кафедры «Технология и автоматизация машиностроения», Балаковский институт техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина). E-mail: stanislove.kravchenko@mail.ru. Область научных интересов: теория управления, идентификация систем управления, математическое моделирование.

Бирюков Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и автоматизация машиностроения», Балаковский институт техники, технологии и управления (филиал Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина). E-mail: bvp-bittu@mail.ru. Область научных интересов: теория управления, идентификация систем управления, математическое моделирование.

Nabilkin Artyom Yurievich, assistant of the Department «Technology and automatization of machine building» of Balakovo institute of technique, technology and management (branch of Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin). E-mail: nabilkin42@rambler.ru. Area of Research: control engineering, identification of control systems, mathematic simulation.

Kravchenko Stanislav Alekseevich, postgraduate of the Department «Technology and automatization of machine building» of Balakovo institute of technique, technology and management (branch of Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin). E-mail: stanislove.kravchenko@mail.ru. Area of Research: control engineering, identification of control systems, mathematic simulation.

Birukov Vladimir Petrovich, doctor of technical sciences, professor of the Department «Technology and automatization of machine building» of Balakovo institute of technique, technology and management (branch of Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin). E-mail: bvp-bittu@mail.ru. Area of Research: control engineering, identification of control systems, mathematic simulation.