

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ НЕЖЁСТКИХ ВАЛОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

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

Балаковский институт техники, технологии и управления

(филиал Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина)

Решается задача повышения эффективности работы системы автоматического управления формой нежёстких валов. Показано, что случайная составляющая погрешности обработки типа белый шум может быть результатом влияния коррелированного случайного процесса изменения силы резания. Произведён синтез многомерной системы стабилизации силы резания и управления положением резца по поперечной оси при связанности данных параметров через объект управления и методом компьютерного моделирования показана её эффективность.

Нежёсткий вал, погрешности обработки, сила резания, многомерный стохастический линейно-квадратичный гауссов регулятор, эффективность регулятора, белый шум, цветной шум.

Постановка задачи. Особенностью токарной обработки нежёстких валов является их большая деформация под действием сил резания, что приводит к бочкообразности обработанных изделий и заставляет уходить на режимы с меньшими силами резания и, соответственно, с меньшими производительностями [1,2]. В [3] поставлена задача повышения производительности при токарной обработке нежёстких валов методами управления, построена математическая модель объекта управления и возмущающих воздействий, произведён синтез многоканального регулятора, обеспечивающего управление продольным профилем нежёстких валов путём отслеживания режущей кромкой резца деформации вала в процессе точения. Создание алгоритма управления по пяти базовым точкам вала, имеющим максимальные погрешности обработки, и их интерполяция позволили создать систему управления профилем нежёсткого вала по всей его длине. Анализ эффективности работы построенной системы методом компьютерного моделирования при полученных оценках спектральных плотностей возмущающих воздействий показал, что в зависимости от величины временной задержки системы измерения диаметров обработанных изделий ($z = 4 \div 1$) система позволяет уменьшить влияние возмущающих воздействий по дисперсии в 2,2 - 13,4 раза.

Однако требования к качеству обрабатываемых изделий постоянно ужесточаются, что повышает и требования к точности

управления процессом резания. В данной работе рассматривается задача повышения точности отработки рассмотренной системой управления случайной составляющей возмущающих воздействий. Цель достигается путём выявления влияния среднечастотных составляющих возмущающего воздействия на ошибку управления и обеспечения отработки влияния переменной составляющей силы резания.

Влияние частоты возмущающего воздействия на эффективность его отработки системой управления с обратной связью. Дисперсия ошибки системы управления определяется выражением [4,5]:

$$\sigma_{f_2}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Phi_f(j\omega)|^2 S_f(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где $S_f(\omega)$ - спектральная плотность неконтролируемого возмущения.

$\Phi_f(j\omega)$ - частотная характеристика замкнутой системы по возмущающему воздействию

$$\Phi_f(j\omega) = \frac{1}{1+W(j\omega)}, \quad (2)$$

где $W(j\omega)$ - частотная характеристика разомкнутой системы управления.

Выражения (1), (2) показывают, что эффективность системы управления с обратной связью зависит от взаимного расположения спектральной плотности возмущающего воздействия и амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы по возмущающему воздействию (АЧХ). Для разомкнутой систе-

мы АЧХ по возмущению во всём диапазоне частот равна единице (линия 1 на рис. 1). При замыкании системы АЧХ в области низких частот становится меньше единицы. В [6,7] на основании теоремы об интеграле логарифма АЧХ показано, что если ординаты АЧХ

замкнутой системы на низких частотах меньше единицы, то на более высоких частотах они обязательно больше единицы и АЧХ замкнутой системы имеет вид, представленный на рис. 1 (линия 2).

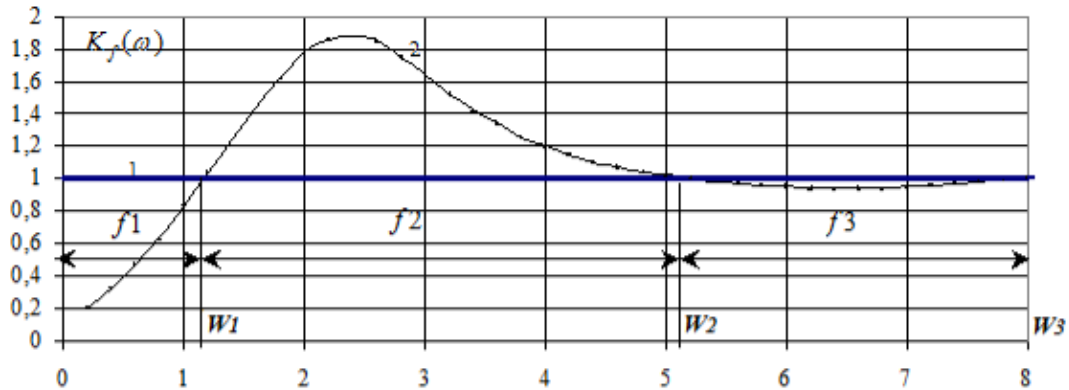


Рис. 1. АЧХ разомкнутой (1) и замкнутой (2) систем управления по возмущающему воздействию

При этом на АЧХ по возмущению можно выделить три участка [6-8]. На низкочастотном участке $\omega < \omega_1$ коэффициент передачи замкнутой системы по возмущающему воздействию меньше единицы. Дисперсия компонентов возмущающего воздействия с такими частотами при наличии управления уменьшается. Это зона эффективного действия обратной связи. При этом эффективность управления максимальна на самых низких частотах и снижается по мере увеличения частоты возмущающего воздействия.

На среднечастотном участке $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$ коэффициент больше единицы и система увеличивает дисперсию компонентов неконтролируемого возмущения с такими частотами. Высокочастотный участок $\omega > \omega_2$ соответствует безразличному действию системы управления, т.е. система управления на такие возмущения не оказывает никакого воздействия.

Тогда удобно для анализа эффективности системы управления разложить неконтролируемые возмущения по спектру на три составляющие - низкочастотную f_1 , среднечастотную f_2 и высокочастотную f_3 , находящиеся в соответствующих частотных зонах АЧХ системы по возмущению (рис. 1.)

Результаты проведённого моделирования работы системы управления согласуются с данным положением. Система уменьшает влияние низкочастотных и увеличивает влия-

ние среднечастотных составляющих возмущающих воздействий [3].

В качестве примера на рис. 2 приведены АЧХ разработанной системы управления по каналу: возмущающее воздействие – выходная регулируемая переменная для различных транспортных запаздываний в объекте управления.

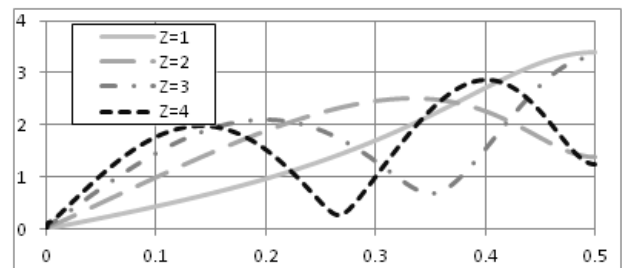


Рис. 2. АЧХ по возмущению при разных запаздываниях

Графики показывают, что с уменьшением транспортного запаздывания расширяется частотный диапазон эффективной работы системы управления с $f = 0,05 \text{ кол} / \Delta T (z = 4)$ до $f = 0,22 \text{ кол} / \Delta T (z = 1)$ и снижается линия АЧХ в области эффективной работы. Этот факт и обуславливает повышение эффективности работы системы управления при уменьшении транспортного запаздывания.

Анализ механизмов влияния интенсивности среднечастотных возмущающих воздействий на эффективность системы управления. Анализ механизмов влияния интенсивности среднечастотного возмущающего воздействия проведён путём сравнительного анализа АЧХ по возмущению

оптимальных систем управления для возмущающих воздействий с различной интенсивностью в области средних частот. Результаты расчёта представлены на рис. 3. Здесь линиями 1, 2 обозначены спектральная плотность исходного возмущающего воздействия и АЧХ по возмущению оптимального регулятора, построенного с учётом характеристик данного возмущения. Область эффективной работы регулятора, в которой модуль частотной характеристики по возмущению меньше единицы и система уменьшает влияние возмущений, равна $0 \leq f_{эф1} \leq 0,03$. Линиями 3,4 обозначены спектральная плотность возмущающего воздействия с уменьшенной интенсивностью в области средних частот и АЧХ по возмущению оптимального регулятора, построенного с учётом изменения спектральной плотности. Область эффективной работы регулятора расширилась до $0 \leq f_{эф2} \leq 0,05$. Дополнительно опущилась вниз кривая АЧХ в области эффективной работы системы. Следовательно, уменьшение интенсивности возмущения в среднечастотной области позволяет повысить эффективность как вследствие снижения интенсивности возмущения, так и вследствие расширения по частоте эффективной зоны системы и снижения коэффициента передачи по возмущению в области низкочастотных возмущений (стало возможным повышение АЧХ в области средних частот).

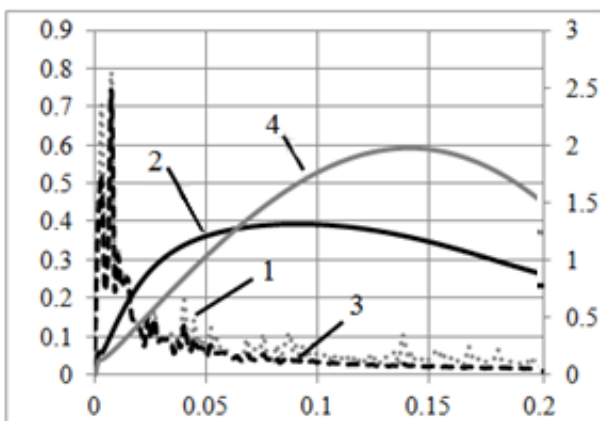


Рис. 3. АЧХ системы управления при разном уровне шума в возмущениях

Таким образом, одним из путей повышения точности обработки нежёстких валов является уменьшение интенсивности среднечастотного возмущающего воздействия.

Обоснование влияния переменной составляющей силы резания на точность обработки нежёстких валов. Влияние неустойчивости силы резания на погрешность обработки выражается в колебаниях элементов узлов станка, приводящих к относительным колебаниям обрабатываемой поверхности заготовки и режущей кромки резца.

Однако при исследовании конкретного процесса эту зависимость необходимо выявить и подтвердить количественно, т.к. могут быть и другие доминирующие факторы. В процессе обработки нежёсткого вала длиной 325 мм и диаметром 30 мм при неизменных режимах резания имели место колебания силы резания в пределах ± 30 Н (рис. 4, а), ± 20 Н (рис. 4, б), что соответствует диапазону изменения от 40 до 60 Н. При этом имели место случайные колебания диаметра обработанных изделий от 0,01 до 0,06 мм, что соответствует перемещению режущей кромки инструмента относительно заготовки от 0,005 до 0,03 мм. Для этих данных оценка коэффициента передачи по каналу сила резания - деформация режущей кромки равна $k_{Pe} = \frac{e}{P} = \frac{0,005}{40} \div \frac{0,03}{60} = 0,000125 \div 0,0005 \frac{мм}{Н}$, что соответствует экспериментальной амплитудной частотной характеристике для данного процесса резания, представленной на рис. 5 [9].

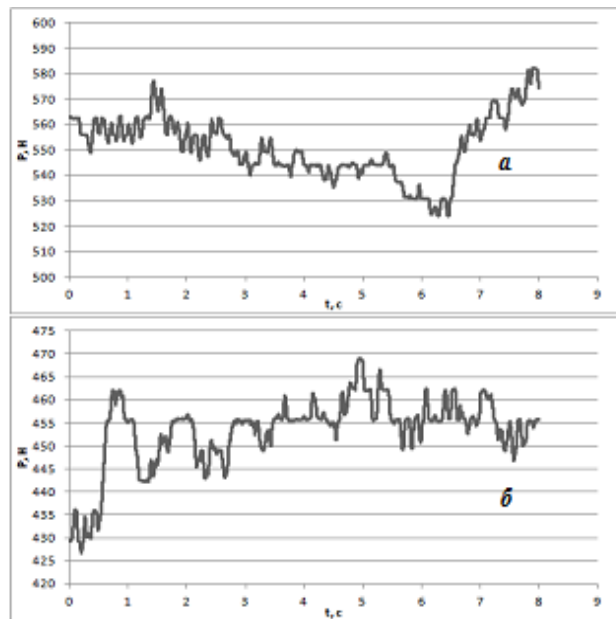


Рис. 4. Графики силы резания

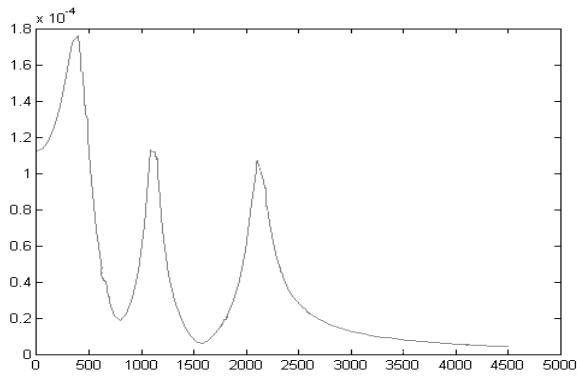


Рис. 5. АЧХ упругой системы станка

Данное положение также подтверждается результатами регрессионного анализа зависимости изменения профиля обработанного изделия от силы резания. Для этого в процессе обработки вала производилась запись тангенциальной силы резания. Затем с помощью профилографа снимался продольный профиль получившейся обработанной поверхности. Временные ряды силы резания и профиля поверхности приводились к одному временному масштабу (рис. 6).



Рис. 6. Графики силы резания в процессе точения и получившегося продольного профиля поверхности образца

График зависимости диаметра обработанной поверхности от силы резания и уравнение регрессии приведены на рис. 7 [10]. Оценка коэффициента регрессии соответствует полученному выше, оценка коэффициента детерминации равна 0,41.



Рис. 7. Графики связи колебания диаметра обработанной детали и силы резания

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают, что колебания силы резания могут быть причиной возникновения среднечастотных и высокочастотных погрешностей обработки исследуемых изделий.

Анализ взаимосвязи силы резания в процессе обработки и диаметра обработанных изделий. Анализ в используемых для управления точках по длине вала проведён методом корреляционного анализа. На рис. 8 представлены две оценки автокорреляционных функций двух экспериментальных временных рядов силы резания, приведённых на рис. 4.

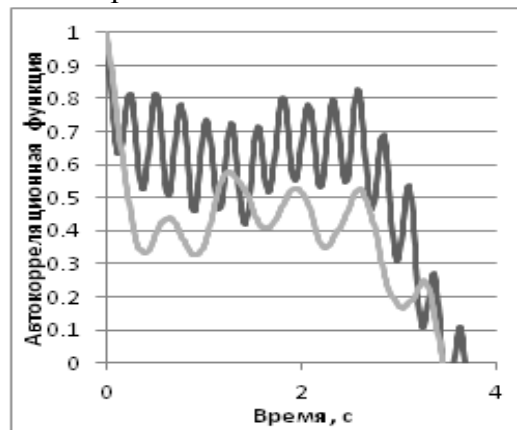


Рис. 8. Графики оценок автокорреляционной функции для силы резания

Как видно из рис. 8, время затухания автокорреляционной функции силы резания равно 3,5 с. За это время при точении анализируемого нежёсткого вала длиной 325 мм на скорости 500 об/мин с подачей 0,2 мм/об будет обработано 5,83 мм. Таким образом, составляющие погрешности обработки, определяемые изменением силы резания, будут коррелированы только при выборке по длине заготовки с шагом менее 5,83 мм. Следовательно, при длине заготовке 325 мм (что эквивалентно периодичности выборки 325 мм) погрешность, обусловленная изменением силы резания в точках вала, используемых для управления, будет случайным процессом типа «белый шум».

Следовательно, влияние нестабильности силы резания не может быть отработано системой управления продольным профилем нежёстких валов. Но при данном времени корреляции спектр возмущения по силе резания может оказаться в зоне эффективной работы системы стабилизации силы резания. Поэтому следующим этапом является разра-

ботка контура обратной связи для стабилизации силы резания в процессе точения, которая может уменьшить «белый шум» в погрешности обработки нежестких валов.

Система стабилизации силы резания.

Функциональная схема системы представлена на рис. 9. Механическая система станка включает шпиндельную бабку 1, заднюю бабку 2, привод продольной подачи суппорта 3, суппорт с резцом 4 и обрабатываемую деталь 5.

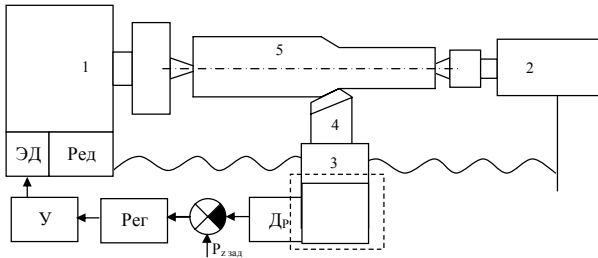


Рис. 9. Функциональная схема системы управления тангенциальной составляющей силы резания при токарной обработке длинного вала: D_p - датчик тангенциальной силы резания P_z ; U - усилитель (преобразователь); ЭД - асинхронный электрический двигатель; Red - редуктор; Reg - регулятор

Тангенциальная составляющая силы резания измеряется тензодатчиком, сигнал с которого поступает на контроллер. При отклонении силы от заданного значения контроллер, изменяя сигнал управления, подаваемый через усилитель на двигатель привода суппорта, уменьшает или увеличивает подачу, возвращая силу резания к заданному значению.

Возмущающими воздействиями в данной системе являются изменение припуска обрабатываемой детали, наличие следа предыдущей обработки, нестабильность характеристик материала, износ инструмента, изменение характеристик упругой системы станка (рис. 10). Всё это приводит к изменению тангенциальной силы резания и относительному смещению рабочей кромки резца и

обрабатываемой поверхности детали и снижению точности обработки.

Идентификация моделей усилителя, асинхронного электропривода, редуктора станка и датчика силы проводилась на основе паспортных данных. Идентификация модели процесса резания производилась на основании результатов активных экспериментов по врезанию резца в заготовку, точению заготовки с переменной глубиной резания, исследованию амплитудной частотной характеристики замкнутой механической системы станка импульсным методом с использованием моментного молотка и акселерометров.

Построение регулятора силы резания и анализ его эффективности производились в системе MatLab [11-14]. На рис.11-12 приведены модели объекта и системы управления силой резания с линейно-квадратичным гауссовым стохастическим регулятором, построенные в Simulink.

На рис. 13 приведены результаты моделирования работы системы управления при подаче возмущающих воздействий, соответствующих характеристикам возмущающих воздействий, действующих на технологический процесс. Дисперсия силы резания разомкнутой системы управления равна $s_{раз}^2 = 37,7 Н^2$, дисперсия для замкнутой системы управления $s_{зам}^2 = 1,32 Н^2$. Коэффициент эффективности системы равен $k = 28,55$. Таким образом, построенная система позволяет обеспечить стабильность силы резания и снимает часть возмущающих воздействий на точность обработки в среднечастотной области системы управления продольным профилем нежесткого вала.

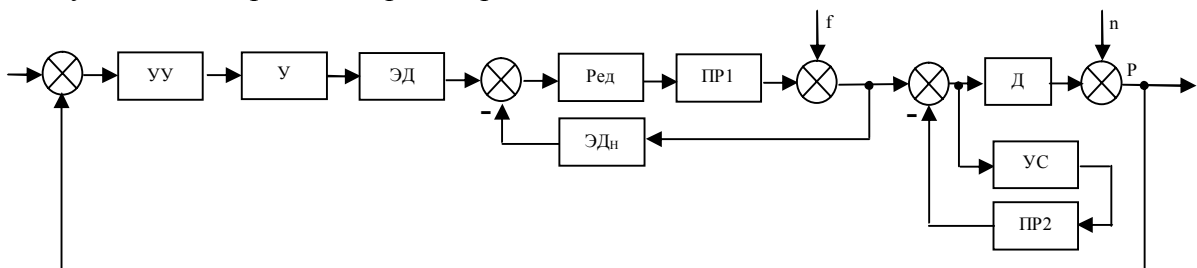


Рис. 10. Структурная схема системы стабилизации силы резания: УУ - устройство управления, У - усилитель, ЭД - электродвигатель, Red - редуктор, передаточные механизмы привода продольной подачи, ПР - процесс резания (ПР1 - влияние подачи на силу резания, ПР2 - влияние глубины резания на силу резания), УС - упругая система станка, Д - датчик силы

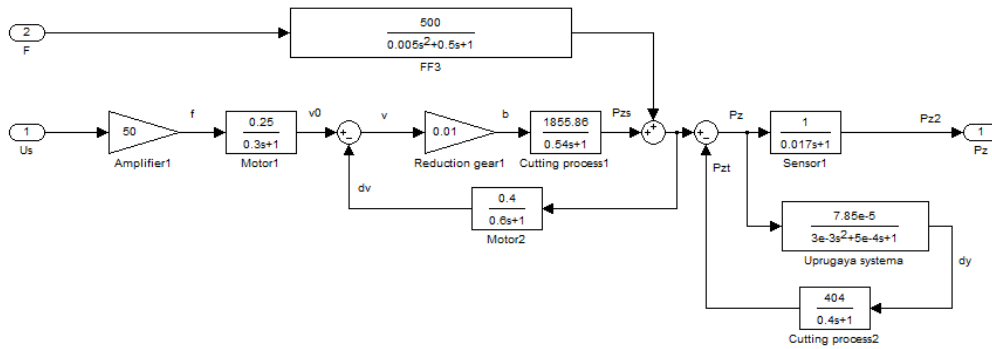


Рис. 11. Модель объекта управления в Simulink

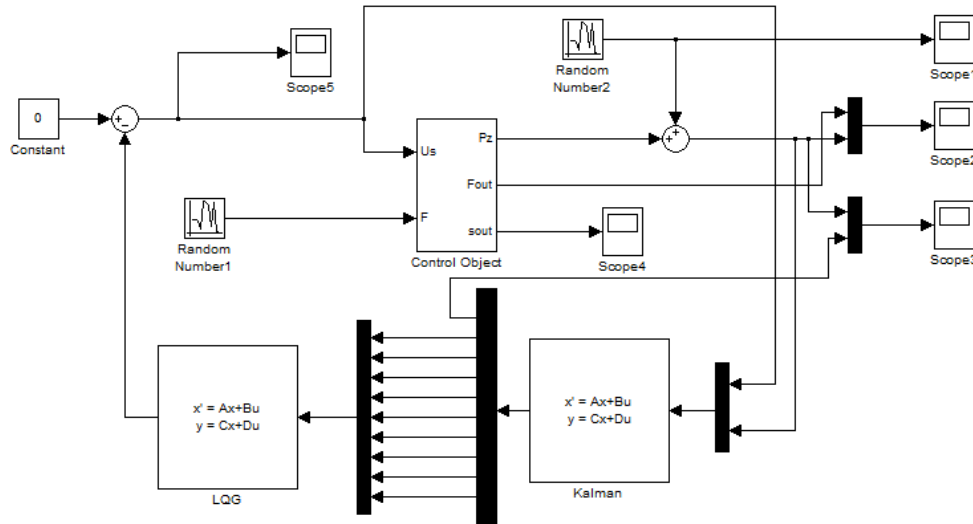


Рис. 12. Схема моделирования работы ЛКГ-регулятора

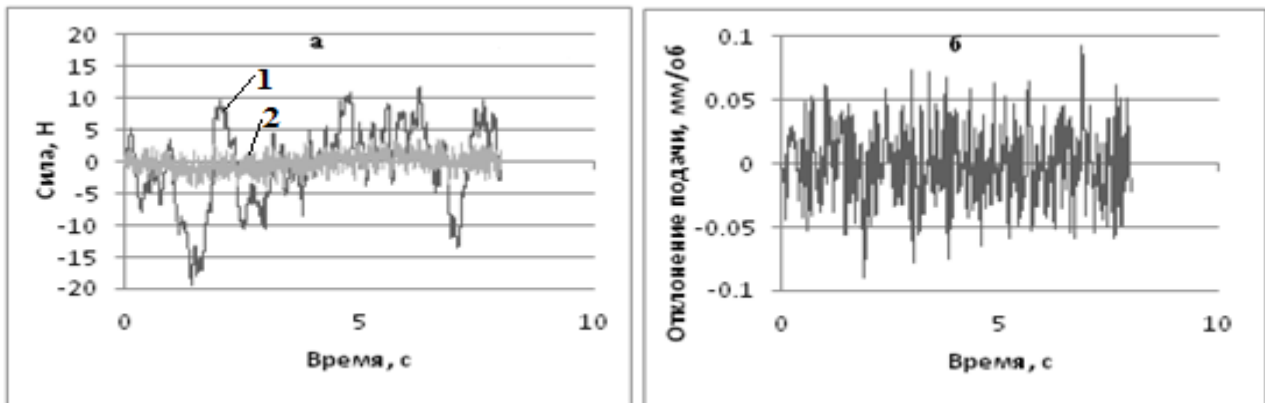


Рис. 13. Временные ряды возмущения по силе резания и выхода системы (а) (1 – возмущающее воздействие, 2 – выходной сигнал системы) и изменения подачи в процессе работы системы (в отклонениях от номинального значения) (б)

Многосвязная система управления силой резания и положением резца по поперечной оси. В системе управления процессом резания существует взаимосвязь между каналами управления силой резания и положением резца по поперечной оси. Поэтому представляет интерес разработка многосвязного регулятора данными параметрами и анализ его эффективности в условиях

взаимосвязи. На рис. 14 показана функциональная схема системы управления продольным профилем вала при токарной обработке с дополнительным контуром стабилизации силы резания.

На рис. 15 показаны структурная схема систем управления силой резания и положение резца по поперечной оси с учётом их многосвязности через объект управления.

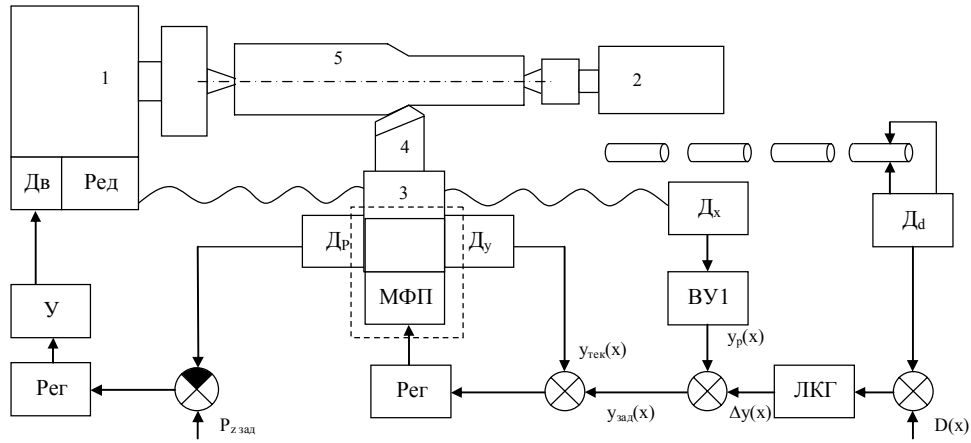


Рис. 14. Функциональная схема системы управления продольным профилем вала при токарной обработке с дополнительным контуром стабилизации силы резания

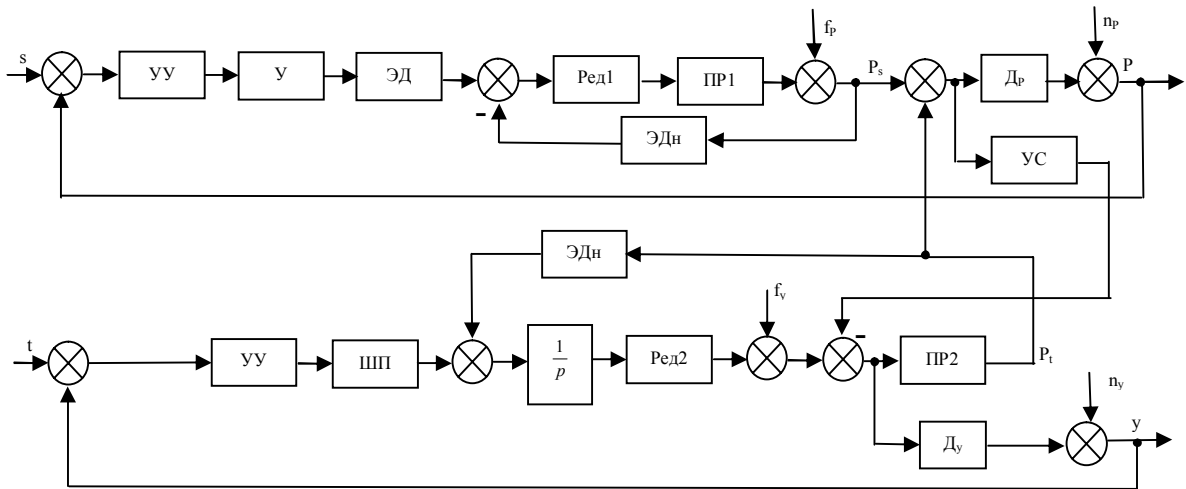


Рис. 15. Структурная схема системы управления силой резания и положением резца по поперечной оси: У – усилитель, УУ – устройство управления, ЭД – электродвигатель, ШП – шаговый привод, Ред1 – редуктор, передаточные механизмы привода продольного перемещения суппорта, Ред2 – передаточные механизмы привода поперечного перемещения суппорта, ПР – процесс резания (ПР1 – влияние подачи на силу резания, ПР2 – влияние глубины резания на силу резания), УС – упругая система станка, Др – датчик силы, Дд – датчик положения резца по оси у

Математическая модель формирующего фильтра возмущения для контура управления положением резца по поперечной оси построена на основе временных рядов задающих воздействий системы управления продольным профилем, полученных при моделировании её работы [3].

Синтез многомерного ЛКГ-регулятора силы резания и положения резца по поперечной оси проведен в системе MatLab [11-14]. Анализ эффективности построенной системы управления проведён путём моделирования работы системы в Simulink (рис. 16,17) при подаче возмущающих воздействий, соответствующих характеристикам возмущающих воздействий, действующих на технологический процесс.

На рис. 18 приведены временные ряды силы резания и положения резца по попе-

речной оси для разомкнутой и замкнутой системы управления.

Для канала стабилизации силы резания дисперсия системы управления разомкнутой системы равна $s_{раз}^2 = 46,2 \text{ Н}^2$, замкнутой - $s_{зам}^2 = 4,6 \text{ Н}^2$, коэффициент эффективности канала стабилизации силы резания равен $k = 10,1$.

Для канала стабилизации положения резца дисперсия разомкнутой системы равна $s_{раз}^2 = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$, замкнутой - $s_{зам}^2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$, коэффициент эффективности канала стабилизации силы резания равен $k = 42,54$.

Коридоры изменения значений управляющих воздействий приведены на рис. 19.

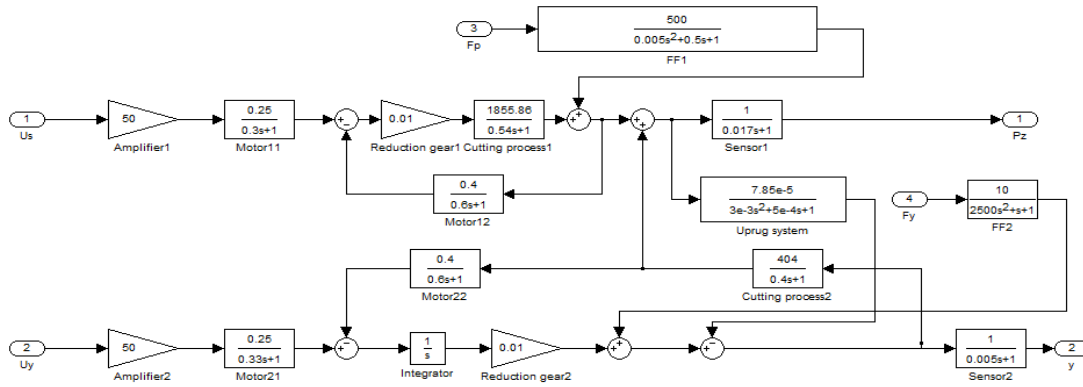


Рис. 16. Модель многомерного объекта управления в Simulink

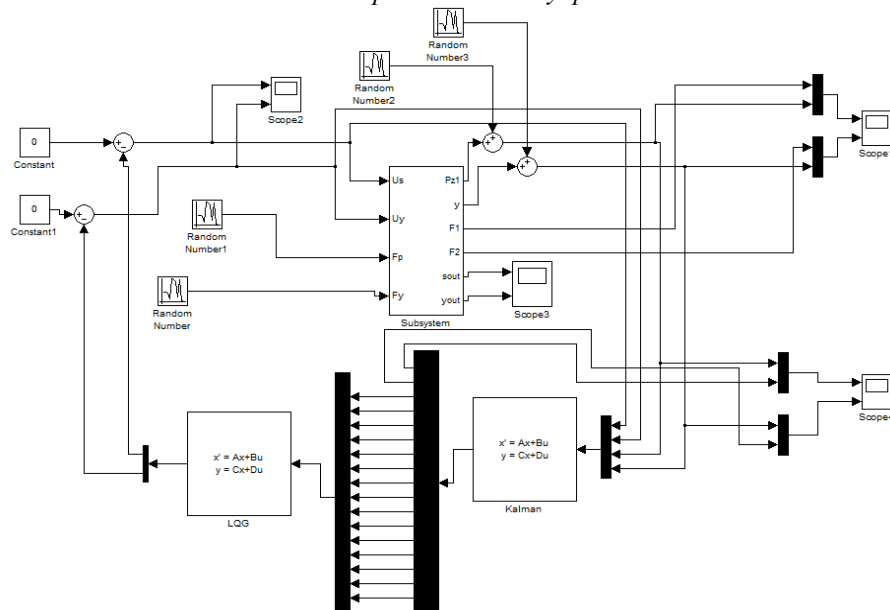


Рис. 17. Схема моделирования работы многомерного ЛКГ-регулятора в Simulink

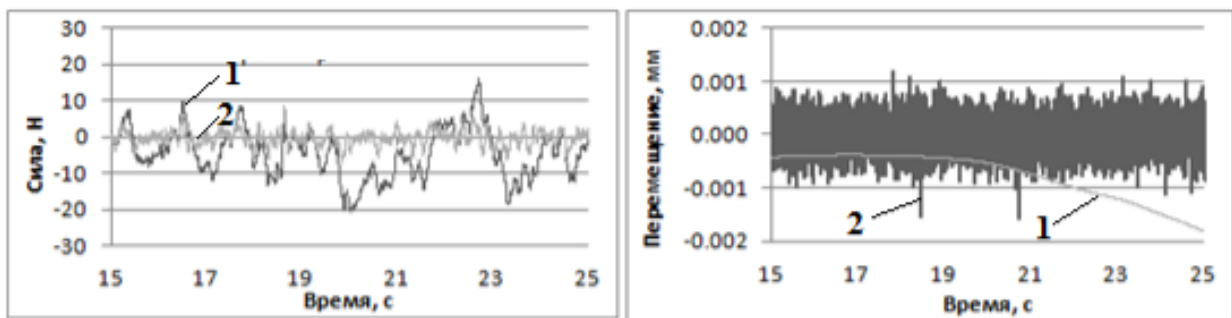


Рис. 18. Временные ряды возмущения (1) и выхода системы (2) по силе резания и перемещению инструмента по оси у

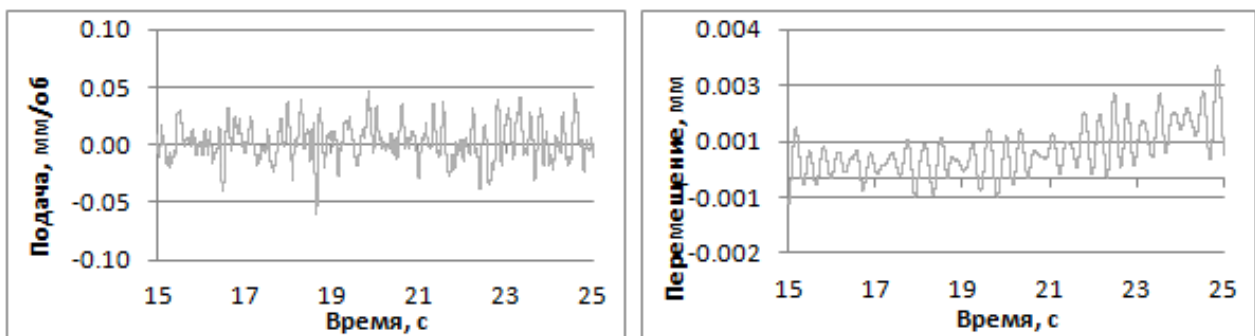


Рис. 19. Временные ряды управляющих воздействий (подача, мм/об и положение суппорта по оси у, мм) в процессе функционирования системы управления

Данные диапазоны находятся в допустимых пределах, что говорит о правильном выборе весовых матриц при синтезе ЛКГ-регулятора и обуславливает техническую реализуемость системы управления.

Выводы

1. Показано, что случайная составляющая погрешности обработки нежёстких валов типа белый шум может быть результатом влияния коррелированного случайного процесса изменения силы резания.

2. При наличии возмущающего воздействия типа белый шум возможным путём его устранения может быть выявление и стабилизация образующего его цветного возмущающего воздействия на более ранних технологических переходах.

3. Проведён синтез и методом компьютерного моделирования показана эффективность многомерной системы стабилизации силы резания и управления положением резца по поперечной оси при связанности данных параметров через объект управления.

Библиографический список

1. Маталин, А.А. Технология машиностроения [Текст] / А.А. Маталин - Л.: Машиностроение, 1985. - 496 с.

2. 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.

3. Набилкин, А.Ю. Многомерная система управления токарной обработкой нежестких валов [Текст] / А.Ю. Набилкин, С.А.Кравченко, В.П. Бирюков // Математические методы в технике и технологиях 25: матер. междунар. науч. конф. - Саратов: СГТУ, 2012. -Т.10. - С. 17-18.

4. Бирюков, В.П. Расширенная задача управления технологическим процессом [Текст] / В.П. Бирюков // Вестник СГТУ. - 2005. - № 3(8). - С. 116-126.

5. Бирюков, В.П. Создание условий эффективной работы обратной связи систем

управления [Текст]: монография / В.П. Бирюков, В.В. Сотников. - Саратов: СГТУ, 2012. - 272 с.

6. Волгин, В.В. Некоторые свойства амплитудно-частотных характеристик линейных систем автоматического регулирования и качество регулирования при случайных воздействиях [Текст] / В.В. Волгин, Р.Н. Каримов // Изв. вузов. Электромеханика. - 1973. - №2. - С. 195-205.

7. Волгин, В.В. Учёт реальных возмущающих воздействий и выбор критерия качества регулирования тепловых процессов [Текст] / В.В. Волгин, Р.Н. Каримов, А.С. Карецкий // Теплотехника. - 1970. - №3. - С. 25-30.

8. Мордкович, Б.И. Системы питания технологических линий химических производств [Текст] / Б.И. Мордкович. - М.: Химия, 1975. - 174 с.

9. Создание научных основ разработки эффективных систем управления химико-технологическими процессами с неконтролируемыми широкополосными статистическими возмущающими воздействиями: отчет о НИР (заключ.) / БИГТУ; рук. В. П. Бирюков. - УДК 533.677.678; ГР 01200901035; Инв. 2.1.2/11168. - Саратов, 2011. - 188 с.

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

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

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

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

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

IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF NONRIGID SHAFTS SURFACE CONTOUR IN LATHING

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

Balakovo institute of technique, technology and management
(branch of Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin)

The problem of the automated control system of nonrigid shafts surface contour in lathing efficiency improvement is disclosed in the paper. It is shown, that random component of working error of white noise type can be the result of the influence of cutting force change correlated random process. The synthesis of the multidimensional system of cutting force stabilization and cutting tool position along the transverse axis control under the relatedness of these parameters through the control object is produced, and its efficiency is shown with a computer simulation.

Nonrigid shaft, working error, cutting force, LQG compensator, regulator efficiency, white noise, colored noise.

Информация об авторах

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.

Набилкин Артем Юрьевич, аспирант 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.

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.

Kravchenko Stanislav Alekseevich, postgraduate 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 theory, identification of control systems, mathematical modeling.

Nabilkin Artyom Yurievich, postgraduate 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 theory, identification of control systems, mathematical modeling.

Birukov Vladinir Petrovich, doctor of technical sciences, professor 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 theory, identification of control systems, mathematical modeling.