

**КОМПЕНСАЦИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ
ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧ НА ОСНОВЕ
РЕДУЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

В. Д. Мостовой, В. П. Бирюков

**COMPENSATION OF INTERRELATION
OF CONTROL CIRCUITS OF CROSS AND LONGITUDINAL
GIVING ON THE BASIS OF THE REDUCED MODEL
OF TURNING PROCESSING**

V. D. Mostovoy, V. P. Biryukov

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сложность, изменение закономерностей процессов резания, невозможность контроля параметров в процессе металлообработки затрудняют создание эффективных систем управления непосредственно качественными показателями обрабатываемых изделий, что привело к созданию большого количества систем стабилизации отдельных режимных параметров процессов резания и возмущающих воздействий. Отработка такими системами ограниченного количества возмущающих воздействий приводит к необходимости применения нескольких контуров управления. Однако наличие взаимосвязи контуров через объект управления снижает эффективность или приводит к невозможности их совместной работы. Цель данной работы – исследовать возможность обеспечения совместной работы системы стабилизации силы резания, компенсирующей влияния изменения припуска, характеристик материала заготовки, износа инструмента, и системы обработки нежестких валов по траектории предсказания, компенсирующей изменение жесткости упругой системы заготовки в процессе точения, взаимосвязанных через объект управления, что приводит к неустойчивости работы систем и возникновению автоколебаний, путем построения динамического компенсатора для развязки каналов на основе упрощенной методики синтеза компенсирующих звеньев с использованием аппроксимационного подхода. *Материалы и методы.* Решение данной задачи достигнуто путем построения на основе теории инвариантности и аппроксимационного подхода вторых каналов передачи информации, компенсирующих взаимную передачу сигналов с одного контура на другой вследствие их взаимосвязи через объект управления. *Результаты.* В работе произведен динамический синтез системы управления силой резания путем корректировки продольной подачи и следящей системы отработки режущей кромкой резца траектории предсказания, задаваемой системой управления верхнего уровня. Методом математического моделирования показана невозможность нахождения параметров управляющих устройств, обеспечивающих их совместную устойчивую работу при наличии взаимосвязи контуров через объект управления. На основании теории инвариантности методом аппроксимации сложных динамических систем системами пониженного порядка построены корректирующие звенья, обеспечивающие развязку каналов управления по продольной и поперечной подаче. *Выводы.* Результаты математического моделирования показали возможность эффективной работы систем управления силой резания и продольным профилем обрабатываемого изделия при компенсации взаимосвязи систем через объект управления.

Ключевые слова: процессы резания, адаптивные системы, взаимосвязанные системы, математическое моделирование, динамические характеристики, теория инвариантности, квадратичное приближение.

Abstract. Background. Complexity, changes in the regularities of cutting processes, inability to control quality in the process: automation of processes controlling technological processes and removing impacts. The development of such systems of a limited number of disturbing effects leads to the need for several control loops. However, the presence of the relationship of contours through the object of management of efficiency or results to the impossibility of their joint work. The purpose of this work is to investigate the possibility of ensuring the joint operation of the cutting force stabilization system, compensating for the effect of changes in the allowance, the characteristics of the workpiece material, tool wear, and the system for processing non-rigid rolls along the pre-distortion path compensating for the change in the rigidity of the elastic system of the workpiece during turning, interconnected through the control object, which leads to instability of the operation of the systems and the appearance of self-oscillations, by constructing a dynamic compensator for the decoupling of the channel in based on a simplified methodology for the synthesis of compensating links using the approximation approach. **Materials and methods.** The solution of this problem is achieved by constructing, on the basis of invariance theory, second information transmission channels that compensate for the mutual transmission of signals from one circuit to another due to their interrelation through the control object. **Results.** In this work, a dynamic synthesis of the cutting force control system is made by adjusting the longitudinal feed and tracking system of the cutting edge of the pre-distortion trajectory cutter set by the upper level control system. The method of mathematical modeling shows the impossibility of finding the parameters of control devices that ensure their joint stable operation in the presence of interconnection of contours through the control object, based on the theory of invariance by the method of approximation of complex dynamical systems by systems of reduced order, correcting links are created ensuring the isolation of the control channels along the longitudinal and transverse feed. **Conclusions.** The results of mathematical modeling showed the possibility of effective operation of the cutting force control systems and the longitudinal profile of the workpiece when compensating the interconnection of systems through the control object.

Key words: turning process, adaptive systems, interrelated systems, mathematical modeling, dynamic properties, invariance theory, quadratic approximation.

Введение

Применение в металлообработке станков с ЧПУ приводит к существенному повышению производительности и снижению количества брака. Однако возникающие в процессе металлообработки случайные изменения силовых параметров резания при изменении припуска, характеристик срезаемого слоя, износе инструмента и т.д. приводят к дополнительным деформациям упругих систем заготовки и инструмента и дополнительным погрешностям обработки. Это приводит к необходимости ограничивать режимные параметры обработки в пределах, гарантирующих получение требуемой точности обработки при наличии данных возмущений, что снижает эффективность использования современного дорогостоящего металлообрабатывающего оборудования.

Эффективным методом решения проблемы влияния случайных факторов является создание систем адаптивного управления АдСУ, учитывающих изменение параметров технологического процесса непосредственно в процессе обработки [1–6]. Даже при использовании современных токарных станков ведущих фирм производителей, позволяющих достигать точности обра-

ботки до единиц микрон, данный подход является единственным, обеспечивающим компенсацию влияния изменения силовых воздействий при колебаниях припуска, характеристик материала, износе инструмента и влиянии других неконтролируемых возмущающих воздействий. Особое значение автоматизированные системы управления имеют при обработке нежестких валов, компенсируя деформации смещения задней и передней бабок и изгиба заготовки и обеспечивая высокую точность обработки без снижения производительности [2–6].

Существующая мировая практика показывает, что современные системы числового программного управления металлорежущими станками позволяют внедрять АдСУ программными методами. Примером являются системы управления типа ACM OMATIVE, работающие с CNC SINUMERIK на станках от фирмы DMG MORI по ПИ, ПИД и другим законам регулирования [7]. Это позволяет реализовать системы адаптивного управления в качестве надстройки над системами ЧПУ станка.

Однако сложность, нелинейность, изменение закономерностей процессов резания, невозможность контроля параметров в процессе обработки не позволяют создавать эффективные системы управления непосредственно качественными показателями обрабатываемых изделий, что привело к созданию большого количества систем стабилизации отдельных режимных параметров и возмущающих воздействий [1–6]. Отработка такими системами ограниченного количества возмущающих воздействий приводит к необходимости применения нескольких контуров управления [3–6, 8], что при наличии взаимосвязи параметров через объект управления снижает эффективность или приводит к невозможности их совместной работы.

В данной работе рассматривается задача обеспечения совместной работы системы обработки нежестких валов по траекториям предсказания для компенсации изменения жесткости упругой системы заготовки в процессе точения и системы стабилизации силы резания для компенсации влияния изменения припуска, характеристик материала заготовки, износа инструмента и других возмущающих воздействий.

Исходная двухконтурная взаимосвязанная система управления процессом токарной обработки

На рис. 1 представлена функциональная схема рассматриваемой двухконтурной системы управления процессом токарной обработки: 1 – передняя бабка; 2 – задняя бабка; 3 – обрабатываемый нежесткий вал; 4 – суппорт; 5 – резец.

Система включает два контура управления с отрицательной обратной связью. Первый контур производит стабилизацию силы резания путем корректировки продольной подачи. Он включает датчик силы резания P_z , аналого-цифровой преобразователь АЦП1, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор $Reg1$, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП1, электронный усилитель ЭУ1, двигатель продольной подачи, редуктор, шарико-винтовую пару (ЭД1, Ред1, ШВП1) и процесс резания как объект управления по каналу «продольная подача – сила резания».

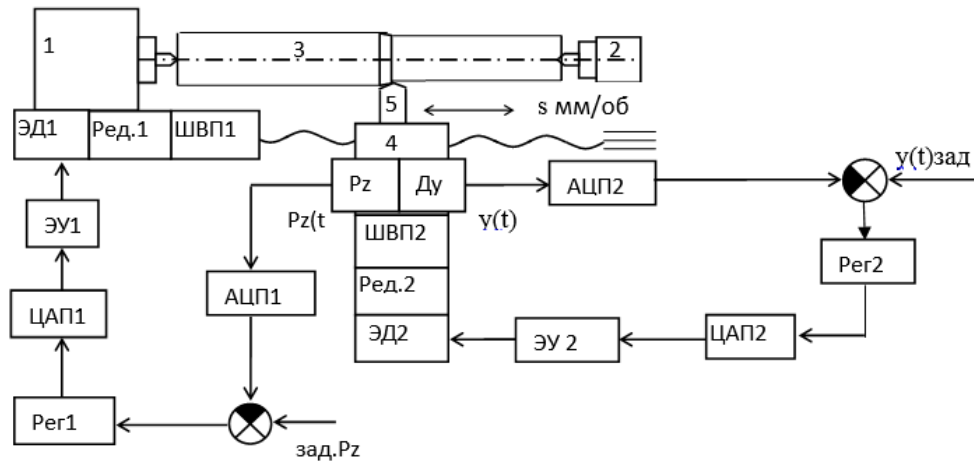


Рис. 1. Функциональная схема двухконтурной системы управления процессом токарной обработки нежестких деталей

Второй контур производит управление положением резца по поперечной оси. Он включает датчик положения суппорта по поперечной оси D_y , аналого-цифровой преобразователь АЦП2, ПИД регулятор Per_2 , цифро-аналоговый преобразователь ЦАП2, электронный усилитель ЭУ2, электрический двигатель, редуктор, шарико-винтовую пару (ЭД2, РЕД2, ШВП2). Данный контур является следящей системой и обрабатывает заданную траекторию предсказания $y(t)_{\text{зад}}$, задаваемую верхним контуром системы управления по математической модели деформации заготовки в процессе резания с корректировкой траектории по отклонению профиля заготовки от заданного [3, 5].

Математические модели элементов данной системы управления, включая модели объектов управления, определены на основании паспортных данных элементов, ранних работ авторов [2], работ [3-6] и приведены на структурной схеме (рис. 2).

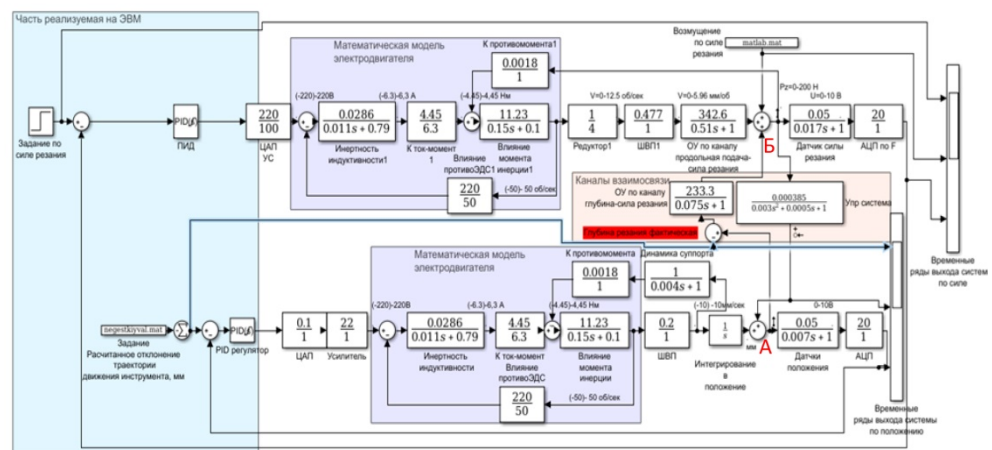


Рис. 2. Структурная схема двухконтурной системы управления с учетом взаимосвязи контуров двухконтурной системы управления в Simulink

На данной схеме дополнительно к системе, приведенной на рис. 1, показаны динамические элементы взаимосвязи контуров через объект управления. Динамическое звено второго порядка

$$W(p) = \frac{0,000385}{0,003p^2 + 0,0005p + 1}$$

отображает влияние изменения силы резания на упругие системы заготовки и инструмента и положение режущего инструмента по поперечной оси для токарно-винторезного станка 16K20 [3–6].

Динамическое звено

$$W(p) = \frac{233,3}{0,075p + 1} \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}} \right]$$

отображает влияние изменения глубины резания на изменение силы резания. Структура и параметры данного элемента определялись на основании результатов активного эксперимента.

Введенные элементы взаимосвязи показывают влияние систем друг на друга с учетом их упругих свойств. При работе регулятора силы резания управляющее воздействие данного регулятора из точки «а» (рис. 3) через звенья прямого канала первой системы W_1 и динамическое звено связи W_3 приходит в точку «d» второй системы и тем самым генерирует возмущающее воздействие на вторую систему. Аналогично управляющее воздействие второго контура из точки «с» через звенья прямого канала данного контура W_2 и звено динамической связи W_4 приходит в точку «b» первой системы и генерирует возмущающее воздействие на объект управления силой резания. Данные сигналы через датчики, аналого-цифровые преобразователи, регуляторы вновь поступают в начальные точки контуров управления, создавая колебательные контуры и ухудшая качественные показатели работы системы управления.

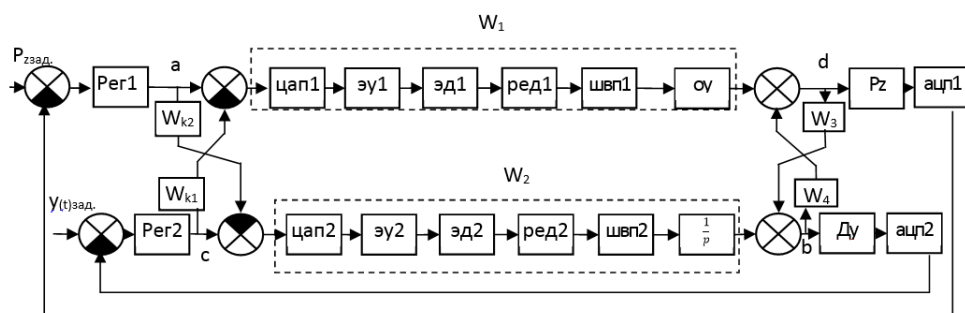


Рис. 3. Структурная схема двухконтурной системы управления с компенсацией

Моделирование контуров данной системы без учета взаимосвязей показало их работоспособность, устойчивость и достаточные качественные показатели. Моделирование системы с учетом взаимосвязей практически показало невозможность получения устойчивых режимов. При подаче ступенчатого задающего воздействия по силе резания (рис. 4,а) и стохастического возму-

щающего воздействия (рис. 4,б) не удалось найти параметры регуляторов (поиск с помощью функции PID Tuner в Simulink), обеспечивающие устойчивую работу контуров управления. На рис. 4,в представлен расходящийся процесс по силе резания, на рис. 4,е – расходящийся процесс по положению резца на поперечной оси, причиной которого является возмущающее воздействие на данную систему от колебаний силы резания (рис. 4,д).

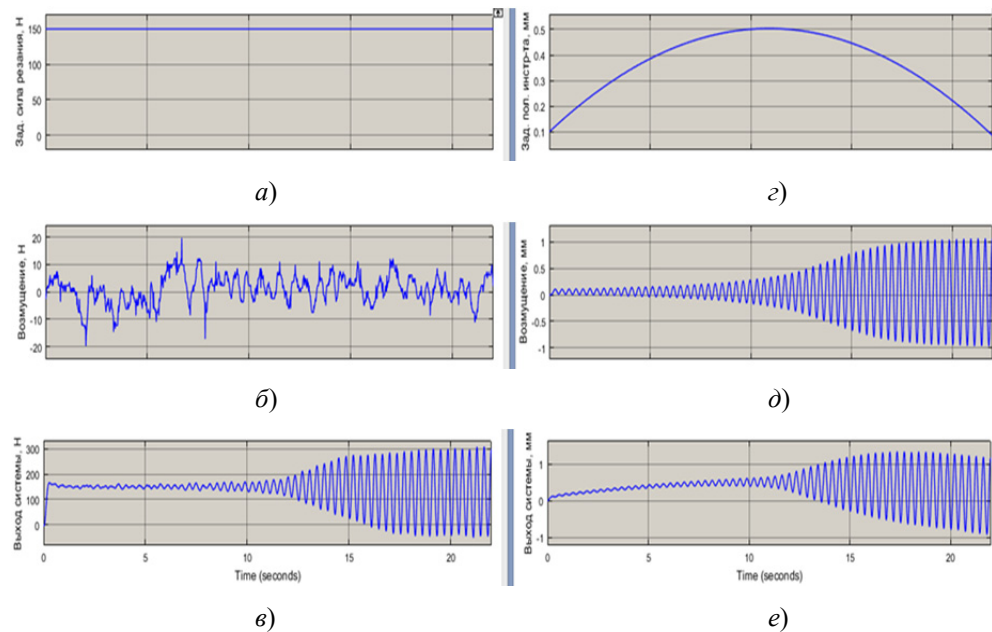


Рис. 4. Предварительные результаты моделирования разрабатываемой системы управления в Simulink

Этапы решения задачи компенсации взаимосвязи контуров управления силой резания и продольным профилем обрабатываемой детали

Для обеспечения работоспособности системы необходимо устранить взаимную генерацию возмущающих воздействий контуров друг на друга. На основании теории инвариантности для устранения данных взаимных возмущений введены компенсационные динамические звенья W_{k1} и W_{k2} , через которые образуются вторые каналы, обеспечивающие приход в точки d и b на рис. 3 сигналов от управляющих воздействий Рег.1 и Рег.2, равных указанным возмущениям в данных точках, но с противоположными знаками. Функциональная схема системы с взаимной компенсацией представлена на рис. 5.

Система 2 при наличии взаимосвязи W_3 становится инвариантной к выходному сигналу системы 1 при выполнении условия

$$W_1 W_3 = W_{k2} W_2.$$

Отсюда передаточная функция звена компенсации управляющего воздействия второго контура будет равна

$$W_{k2} = \frac{W_1 W_3}{W_2}.$$

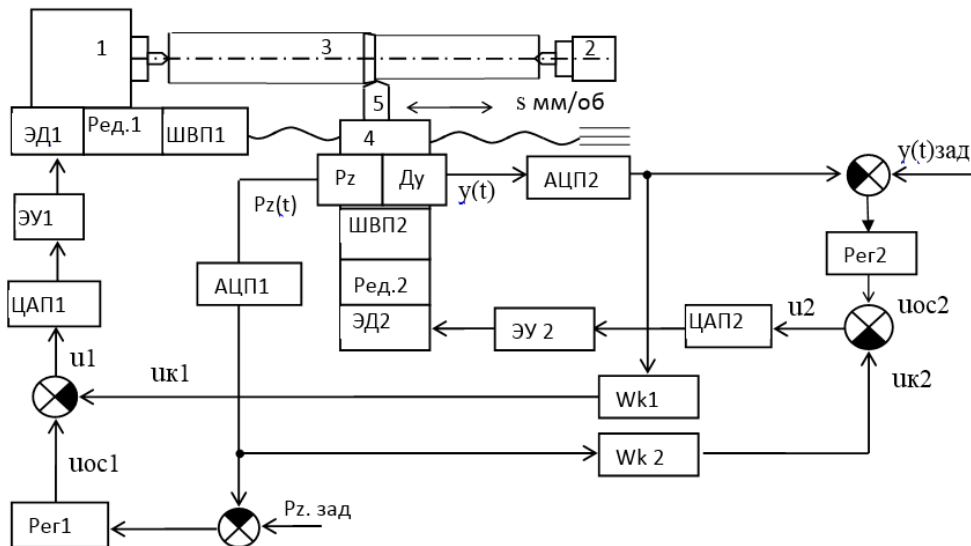


Рис. 5. Функциональная схема комбинированной взаимосвязанной системы управления токарной обработкой нежестких деталей

Соответственно, система 1 при наличии взаимосвязи W_4 становится инвариантной к выходному сигналу системы 2 при выполнении условия

$$W_2 W_4 = W_{k1} W_1.$$

Тогда передаточная функция звена компенсации управляющего воздействия первого контура будет равна

$$W_{k1} = \frac{W_2 W_4}{W_1}.$$

Нахождение передаточных функций компенсационных звеньев W_{k1} и W_{k2} производилось в несколько этапов.

На первом этапе звеньями первого и второго порядка аппроксимировались прямые каналы W_1 , W_2 систем управления путем квадратичного приближения реакций исходных моделей и аппроксимирующих звеньев на единичное ступенчатое воздействие [9].

W_1 аппроксимировано звеном

$$W_1 \approx \frac{11,79}{0,17p+1} \cdot \frac{1}{0,22p+1}.$$

Аналогично аппроксимировано W_2

$$W_2 \approx \frac{0,0438}{0,045p+1} \cdot \frac{1}{p}.$$

Структурная схема алгоритма решения задачи аппроксимации и ее результаты приведены на рис 6 и 7.

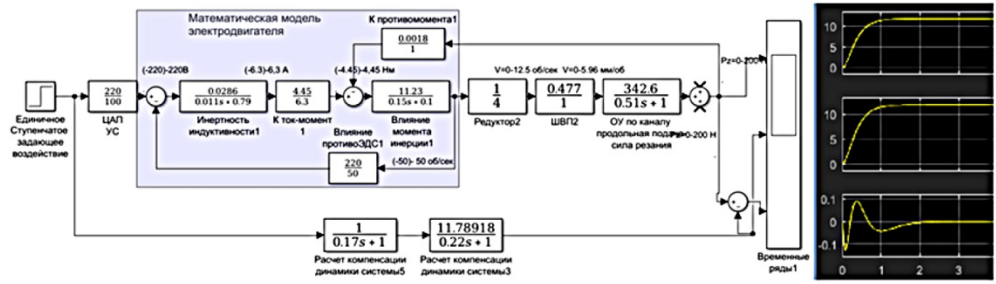


Рис. 6. Программа определения параметров W_1

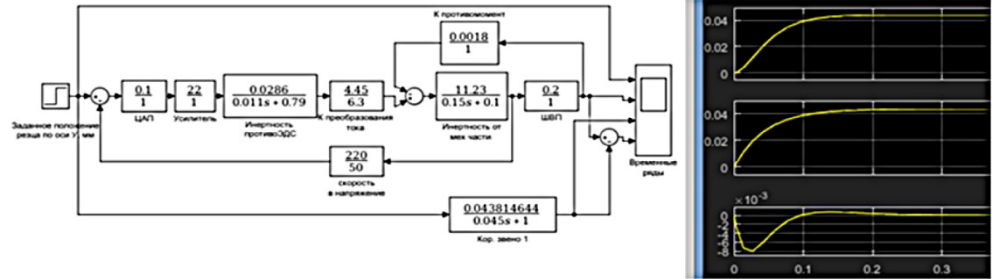


Рис. 7. Программа определения параметров W_2

На втором этапе методом нелинейного программирования находились аппроксимации обратных функций W_1^{-1} и W_2^{-1} . Структурные схемы решения данной задачи приведены на рис. 8 и 9.

При этом на динамическую систему W подавался единичный ступенчатый сигнал и фиксировалась его реакция. Данный сигнал подавался на интегро-дифференцирующее звено

$$\frac{1}{W} = \frac{(Tp+1)}{(Tp+1)} \cdot \frac{(Tp+1)}{(Tp+1)}.$$

Методом нелинейного программирования подбирались такие параметры данного звена, чтобы его выходной сигнал по квадратичному критерию приближался к единичному входному сигналу, подаваемому на вход W_1 (графики на рис. 8, 9). В качестве начального приближения данного звена использовалась обратная передаточная функция звена W_1 , в которую для выполнения условия физической реализуемости в знаменатель добавлялись множители $(Tp+1)$ с малыми постоянными времени.

При этом получены следующие модели аппроксимации обратных звеньев:

$$W_1 \approx \frac{1}{11,79} \cdot \frac{0,17p+1}{0,001p+1} \cdot \frac{0,22p+1}{0,001p+1},$$

$$W_2 \approx \frac{1}{0,0438} \cdot \frac{0,045p+1}{0,001p+1} \cdot \frac{dy}{dt}.$$


$$W_{k_2} \approx \frac{11,79}{0,17p+1} \cdot \frac{1}{0,22p+1} \cdot \frac{0,000385}{0,003p^2+0,0005p+1} \cdot \frac{1}{0,0438} \cdot \frac{0,045p+1}{0,001p+1} \cdot \frac{dy}{dt}.$$
$$W_{k1} \approx \frac{0,0438}{0,045p+1} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{233,3}{0,075p+1} \cdot \frac{1}{11,79} \cdot \frac{0,17p+1}{0,001p+1} \cdot \frac{0,22p+1}{0,001p+1}.$$

*Этапы исследования двухконтурной системы управления
с компенсацией взаимосвязи контуров через объект управления*

1. Произведена настройка ПИД регуляторов для контуров управления силой резания и положением режущего инструмента по поперечной оси без учета взаимосвязи контуров.

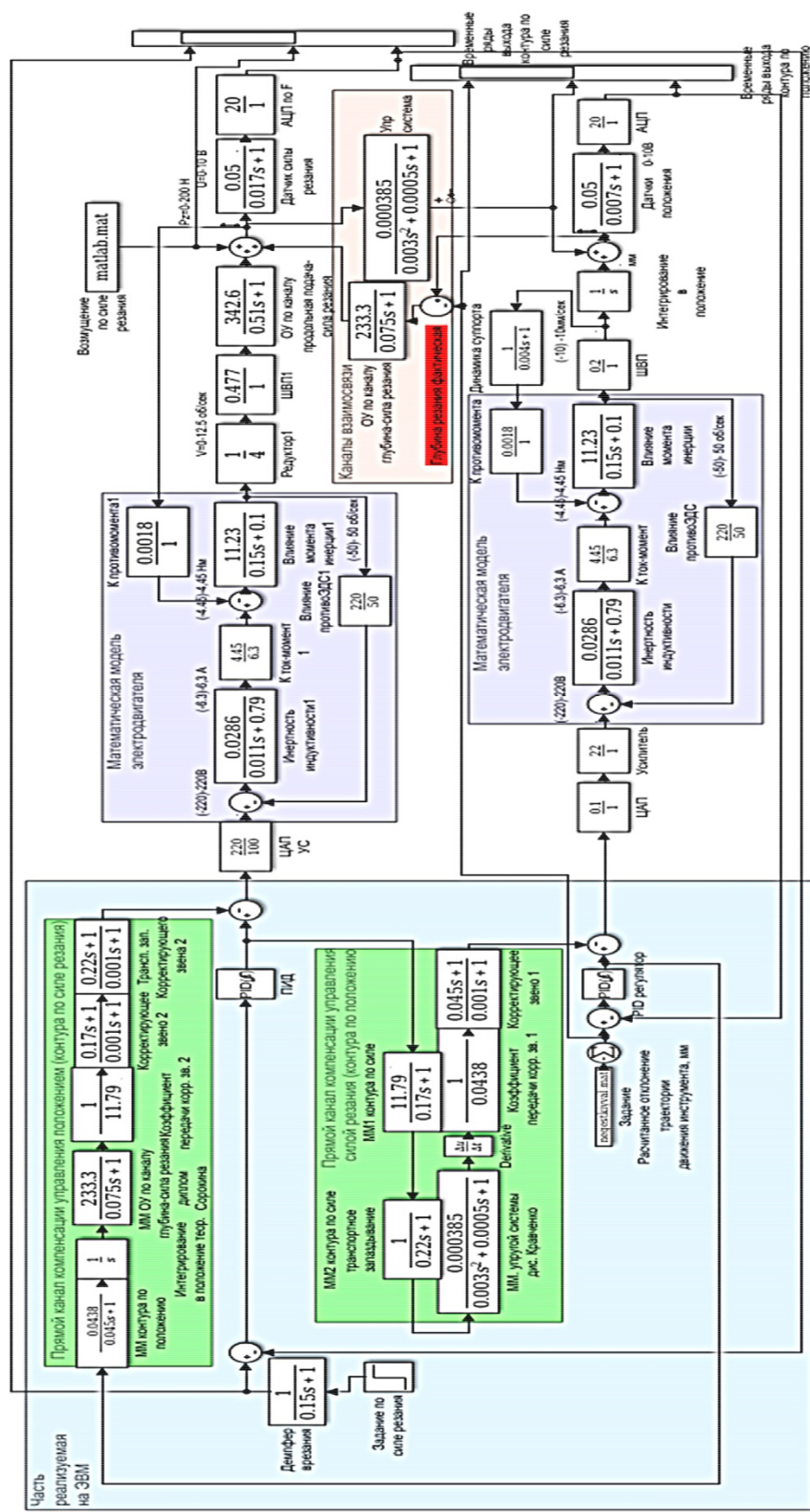


Рис. 10. Структурная схема двухконтурной системы управления с компенсацией взаимосвязи контуров через объект управления

2. Произведено моделирование работы данных контуров управления.
3. Произведено моделирование работы двухконтурной системы с учетом взаимосвязи контуров и поочередным подключением каналов компенсации взаимосвязи.
4. Произведено моделирование работы рассматриваемой взаимосвязанной системы с подключенными каналами компенсации взаимосвязи при подаче экспериментальных стохастических возмущающих воздействий по силе резания из файла `matlab.mat`. Параметры эксперимента, при котором проводилась фиксация временного ряда силы резания, приведены в [2].
5. Произведен анализ полученных данных.

Математическое моделирование проводилось методом `ode4` (Runge-Kutta) с шагом 0,00005 с.

Настройка ПИД регуляторов проводилась в диалоговом режиме с помощью функции `PID Tuner`. Тип регуляторов – непрерывный, ограничение регулятора по управляющему воздействию $\pm 100\%$ для двигателя постоянного тока, метод защиты от интегрального насыщения – `Clamping`. Результаты настройки ПИД регулятора контура управления положением режущего инструмента и кривая переходного процесса на единичное задающее воздействие представлены на рис. 11.

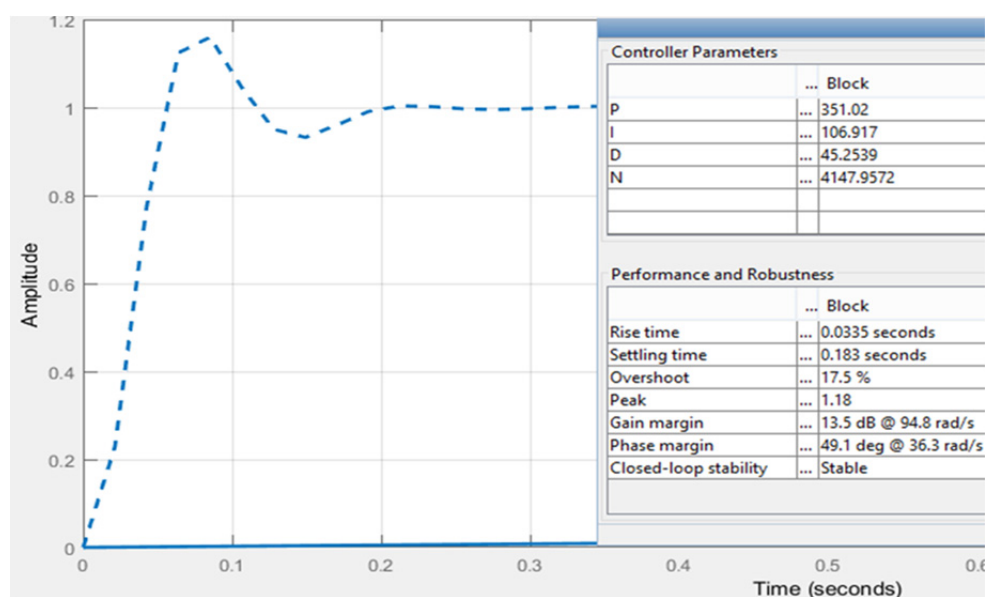


Рис. 11. Параметры настройки ПИД регулятора для контура управления положением

Параметры ПИД регулятора контура управления силой резания и кривая переходного процесса при единичном задающем воздействии представлены на рис. 12.

Результат математического моделирования разрабатываемой системы управления при отключенном прямом канале управления положением инструмента приведен на рис. 13.

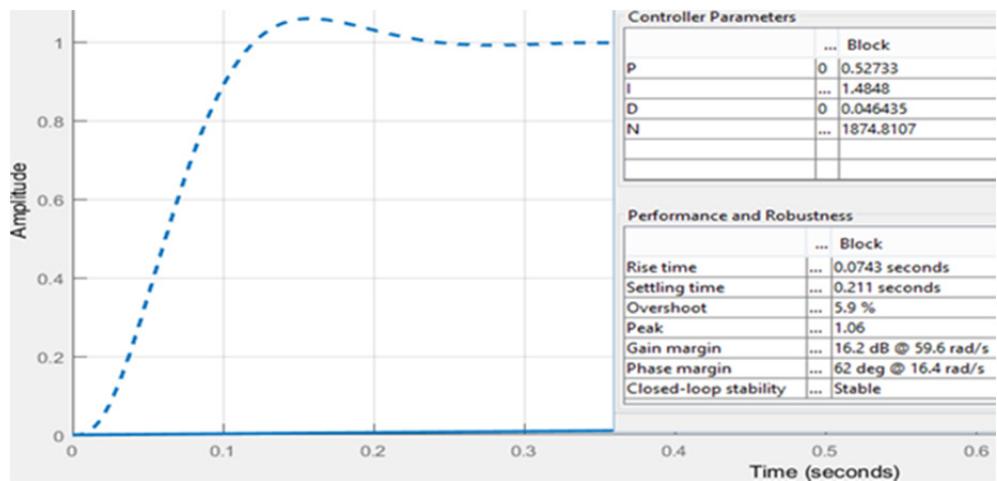


Рис. 12. Параметры настройки ПИД регулятора для контура управления силой резания

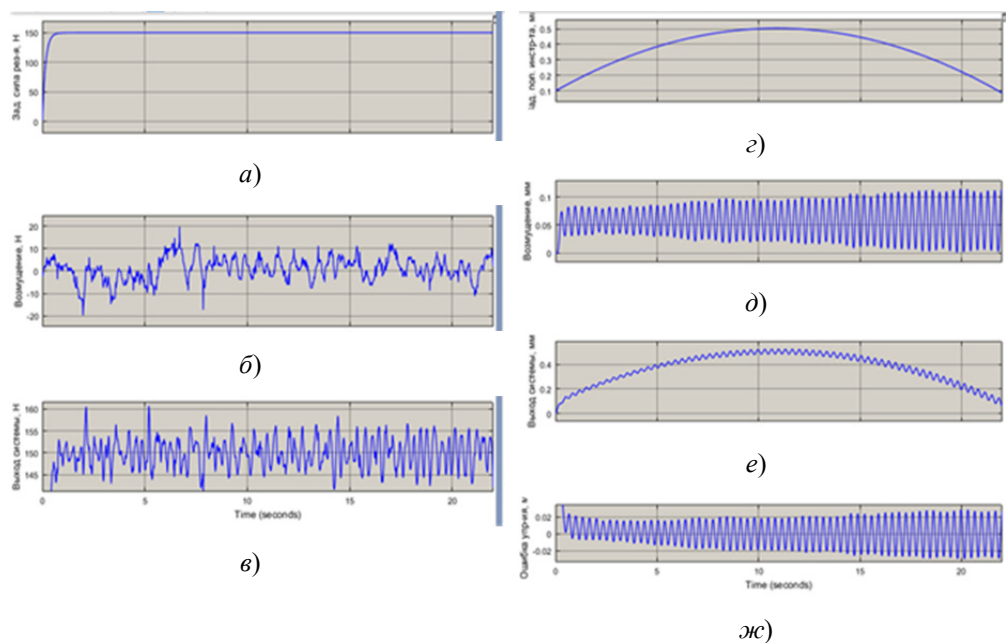


Рис. 13. Временные ряды контуров управления разрабатываемой системы управления: а – сила резания, Н; б – возмущение, Н; в – выход системы, Н; г – положение инструмента; д – возмущение, мм; е – выход системы, мм; ж – ошибка управления, мм

Результат математического моделирования разрабатываемой системы управления представлен на рис. 14–16.

Анализ результатов моделирования

Проведенный анализ результатов моделирования системы управления позволил выявить следующее.

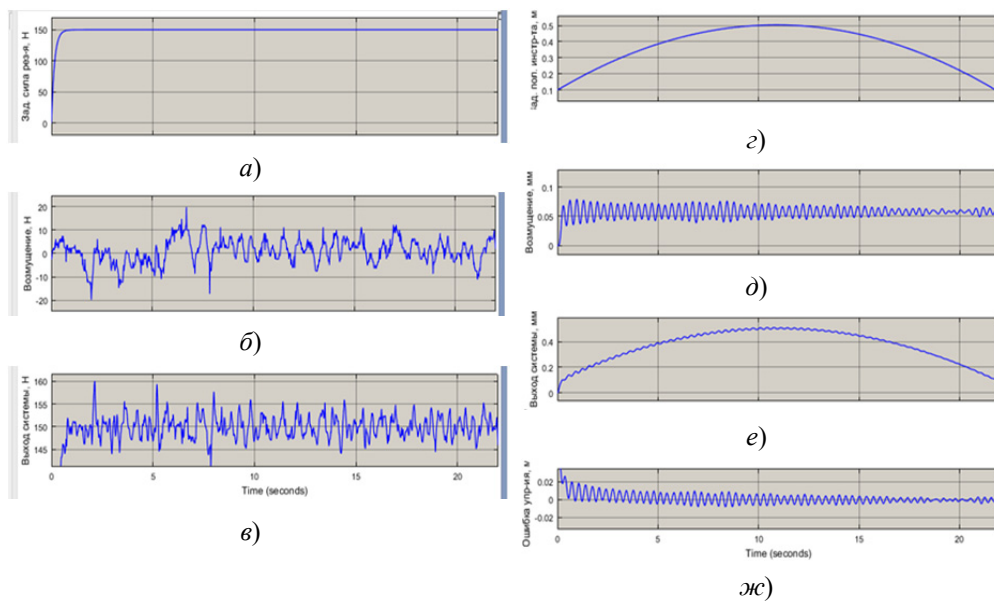


Рис. 14. Временные ряды контуров управления разрабатываемой системы управления: а – сила резания, Н; б – возмущение, Н; в – выход системы, Н; г – положение инструмента; д – возмущение, мм; е – выход системы, мм; ж – ошибка управления, мм

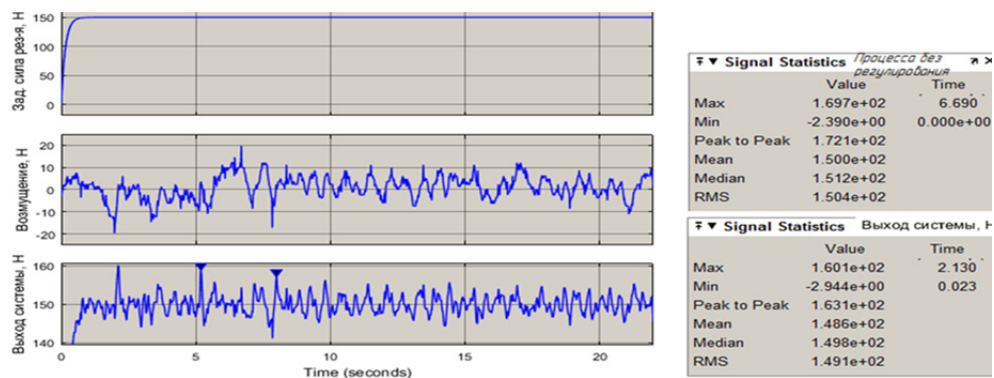


Рис. 15. Временные ряды контура по силе резания разрабатываемой системы

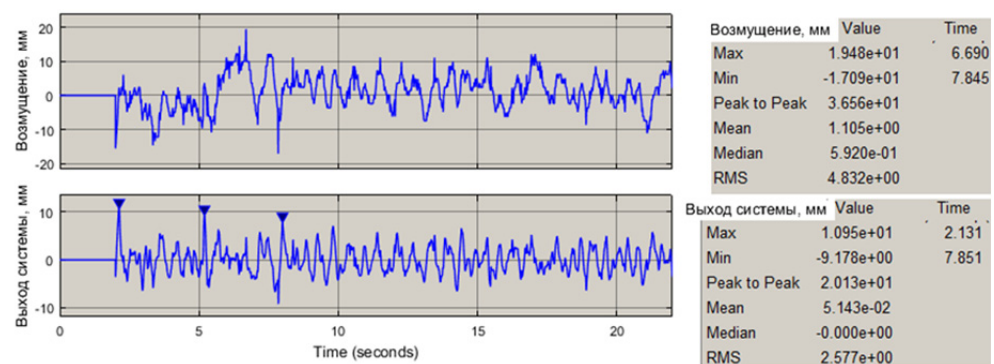


Рис. 16. Временные ряды ошибки управления и возмущения со 2-й секунды системы управления силой резания

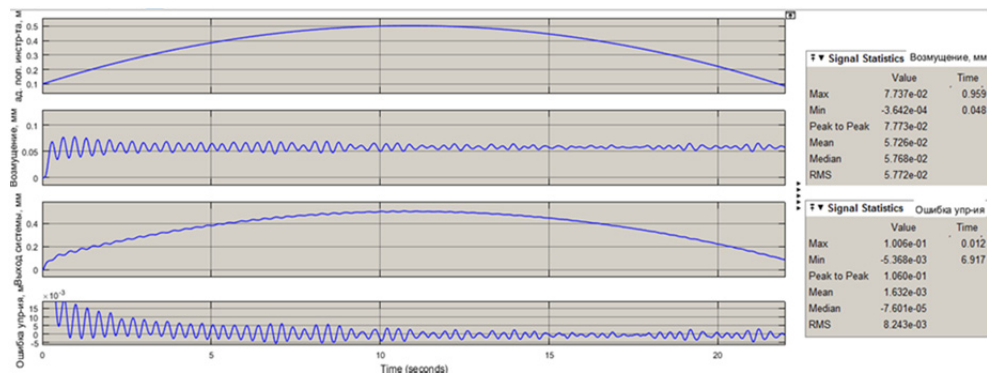


Рис. 17. Временные ряды контура по положению инструмента разрабатываемой системы

Разработанная система управления является устойчивой по двум замкнутым контурам (положения и силы резания) при включенных одновременно прямых каналах управления или при одном включенном прямом канале управления положением режущего инструмента (но с меньшей эффективностью), рис. 17. Система неработоспособна при одном включенном прямом канале управления силой резания – выход обоих контуров системы содержит расходящиеся колебания. При этом качество переходных процессов при плавном врезании позволяет избежать перерегулирования по силе резания и существенного снижения перерегулирования для контура по положению режущего инструмента.

Моделирование системы при подключенных каналах компенсации показало ее эффективность при стохастическом возмущающем воздействии. Среднеквадратическое отклонение СКО (RMS на рисунках) ошибки управления контура по силе резания (см. рис. 15) составляет 2,57 Н, СКО возмущения по силе резания – 4,83 Н, т.е. коэффициент эффективности равен

$$k_{эф} = \frac{\sigma_f}{\sigma_e} = 1,88,$$

где σ_f – СКО возмущения; σ_e – СКО ошибки управления.

СКО возмущения на контур управления положением режущего инструмента (см. рис. 16) составляет 0,0577 мм, а для ошибки управления – 0,0082 мм, коэффициент эффективности $k_{эф2} = 7$.

При этом контур управления положением режущего инструмента имеет почти в 2 раза меньшую величину СКО при учете взаимосвязи и с подключенными каналами компенсации при стохастическом возмущении по силе резания, чем тот же контур без учета взаимосвязи: $\sigma_1 = 0,0018$ мм и $\sigma_2 = 0,0032$ мм. Это обусловлено уменьшением СКО возмущения на систему управления положением контуром управления силой резания. Следовательно, точность позиционирования режущего инструмента при взаимосвязанной структуре системы управления почти в 2 раза выше, чем для контура по положению без учета взаимосвязи, и более чем в 3 раза выше, чем без управления.

Заключение

В работе методом компьютерного моделирования показана принципиальная возможность обеспечения эффективной работы двухконтурной взаимосвязанной системы управления процессом токарной обработки нежестких деталей путем их развязки через каналы прямого управления, что позволяет повысить качество процесса и уменьшить дисперсию регулируемых параметров.

Библиографический список

1. Балакшин, Б. С. Адаптивное управление станками / Б. С. Балакшин, Б. М. Базаров, И. М. Баранчукова. – М. : Машиностроение, 1973. – С. 687.
2. Мостовой, В. Д. Уменьшение дисперсии ошибки системы управления силой резания путем повышения быстродействия управления / В. Д. Мостовой // Актуальные проблемы автоматизации и управления в технических и организационных системах : сб. тр. Междунар. науч. конф. – 2016. – Саратов : Амирит. – С. 130–138.
3. Набилкин, А. Ю. Автоматизированная система управления формой нежестких валов при токарной обработке / А. Ю. Набилкин, С. А. Кравченко, В. П. Бирюков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 3 (34), ч. 1. – С. 321–330.
4. Кравченко, С. А. Повышение эффективности системы управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке / С. А. Кравченко, А. Ю. Набилкин, В. П. Бирюков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 3 (34), ч. 1. – С. 339–349.
5. Кравченко, С. А. Обеспечение точности автоматизированной системы управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке путем повышения эффективности обратной связи : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении) / Кравченко С. А. – Саратов : типография СГТУ, 2013. – С. 179.
6. Набилкин, А. Ю. Автоматизированная двухкашальная каскадная система управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении) / Набилкин А. Ю. – Саратов : типография СГТУ, 2013. – С. 188.
7. Официальный сайт компании OMATIVE Ltd. – URL: <http://www.omative.com/>
8. Бирюков, В. П. Создание условий эффективной работы обратной связи систем управления / В. П. Бирюков, В. В. Сотников. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. – 272 с.
9. Макаров, И. М. Линейные автоматические системы (элементы, теории, методы расчета и справочный материал) / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – М. : Машиностроение, 1977. – 464 с.

Мостовой Владимир Дмитриевич
аспирант,
Саратовский государственный
технический университет
имени Ю. А. Гагарина
E-mail: mvd-bkp@mail.ru

Mostovoy Vladimir Dmitryevich
postgraduate student,
Saratov State Technical University
named after Y. A. Gagarin

Бирюков Владимир Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра атомной энергетики,
Балаковский инженерно-
технологический институт
E-mail: bvp-bittu@mail.ru

Biryukov Vladimir Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of atomic energetics,
Balakovo Institute of Engineering
and Technology

УДК 681.514

Мостовой, В. Д.

Компенсация взаимосвязи контуров управления поперечной и продольной подач на основе редуцированной модели токарной обработки / В. Д. Мостовой, В. П. Бирюков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 151–166.