

В. М. Иванов, канд. техн. наук, доц., v.ivanov@ulstu.ru,
Ульяновский государственный технический университет

Имитационная модель системы стабилизации скорости резания для металлорежущих станков с ЧПУ

Разработана имитационная модель стабилизации скорости резания для токарных станков с числовым программным управлением. Режим стабилизации скорости резания позволяет решать ряд технологических задач, к числу которых относятся повышение производительности обработки и качества поверхности детали, увеличение стойкости режущего инструмента. Доступ к функциям базового программного обеспечения систем ЧПУ ограничен. С учетом этого в данной работе рассматриваются функциональные и алгоритмические особенности систем стабилизации силовых параметров как основа дальнейшей разработки интеллектуального алгоритмического и программного обеспечения. Существующие рекомендации, определяющие режим резания, основаны на эмпирических зависимостях, использование которых для непосредственного применения в алгоритмах автоматического управления затруднено, так как данные зависимости определяют прогнозируемые, а не текущие параметры. В качестве базовой структуры процесса формообразования детали принята нестационарная модель, основные параметры которой определены трехмерной кинематикой универсального станка. Обобщенный подход к системам силовых параметров и синтез регуляторов основных контуров позволили выявить наиболее простой вариант структур, основанный на использовании регуляторов с параметрической обратной связью. Функциональная модель содержит основные компоненты системы ЧПУ: интерполятор, сервоприводы подачи и главного движения, а также дополнительные модули цикла и анализа. Рассмотрены высокоскоростная обработка торцевых поверхностей и условия реализации цикловых задач управления. Приведены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность функциональных алгоритмов и возможность их использования в интеллектуальных системах ЧПУ.

Ключевые слова: скорость резания, формообразование, электропривод, интерполятор

Введение

За последние десятилетия произошли кардинальные изменения в области станкостроения, связанные как с разработкой многофункциональных станков, так и с разработкой нового поколения систем числового программного управления [1, 2]. Переход на системы PCNC (Personal Computer Numerical Control) сопровождался не только переходом на принципиально новое программное обеспечение, основанное на операционной системе WINDOWS NT, но и существенным расширением функций базового программного обеспечения ЧПУ [3, 4].

Лидирующие позиции в области современных систем с ЧПУ для металлообрабатывающего оборудования в настоящее время занимают ряд зарубежных фирм, к числу которых относятся FANUC, Siemens и HEIDENHEIN. Передовые технологические решения в области аппаратного и программного обеспечения систем с ЧПУ обеспечивают эффективность металлообработки. К числу таких решений относится пакет

"Dynamic Efficiency" фирмы HEIDENHAIN, который содержит функции управления AFC (Adaptive Feed Control — адаптивное управление подачей), обеспечивающие оптимальную подачу в процессе обработки. Для повышения качества обработки поверхности в системах с ЧПУ фирмы Siemens введены новые функции контроля состояния режущего инструмента, которые позволяют отказаться от финишной обработки деталей и тем самым повысить производительность. Алгоритм предварительного просмотра кадров Look-ahead позволяет обрабатывать контур с максимально возможной подачей и заблаговременно снижать скорость в критических ситуациях.

К расширенным функциям ЧПУ можно отнести функции, с помощью которых задают скорость резания и подачу на оборот привода главного движения станка. С одной стороны, это программный переход к кинематике универсального станка, а с другой — дополнительные возможности по обработке детали за счет оптимизации режимов резания. Режим ста-

билизации скорости резания (ССР) позволяет решать ряд технологических задач [5–7]. К их числу относится повышение производительности обработки и качества поверхности детали, увеличение стойкости режущего инструмента. Необходимо отметить, что доступ к функциям базового программного обеспечения ЧПУ ограничен, и работа с ними осуществляется, как правило, только в режиме пользователя. С учетом этого в работе рассматриваются структурные и функциональные особенности систем стабилизации силовых параметров резания как основы для дальнейшей разработки алгоритмического и программного обеспечения функций ЧПУ для станков токарной группы.

Кинематика процесса формообразования детали

Условия протекания процесса резания определяются как кинематической схемой резания, так и условиями снятия срезаемого слоя, обусловленными упругими и пластическими деформациями обрабатываемого материала, трением, тепловыми явлениями, химическими, электрическими и другими факторами. Существующие материалы, содержащие рекомендации по режимам резания [8, 9], основаны в большинстве случаев на эмпирических зависимостях, использование которых для непосредственного применения в алгоритмах автоматического управления процессом резания затруднено, так как данные зависимости определяют прогнозируемые, а не текущие параметры. Учитывая это, в качестве величин, характеризующих процесс резания, используют силы резания, моменты нагрузки, токи и мощность на валу двигателя. При этом возникает задача определения взаимосвязи данных величин, так как все они характеризуют параметры процесса резания.

Рассмотрим структурную схему процесса обработки резанием как совокупности одновременно совершающихся взаимосвязанных процессов, среди которых в первую очередь выделим механизм стружкообразования и силовые параметры резания.

В процессе обработки формообразование поверхности детали может быть записано следующим образом:

- для продольного точения

$$\Phi_{xy}(\tau) = a_y(V_x\tau + \Delta x);$$

- для поперечного точения

$$\Phi_{yx}(\tau) = a_x(V_y\tau + \Delta y),$$

где $a_x = a_x^* + \Delta a_x$, $a_y = a_y^* + \Delta a_y$ — величины, характеризующие припуск на сьем металла по координатам x , y ; $a_x^* = V_x\tau$, $a_y^* = V_y\tau$ — подача за время τ одного оборота шпинделя; V_x , V_y — скорости подачи инструмента; Δa_x , Δa_y — неравномерность припуска обработки детали.

При однокоординатной обработке Δa_x , Δa_y определяют соответственно глубину резания по соответствующей координате.

Текущее значение силы резания согласно работе [10] равно

$$F_i(\tau) = \Phi(\tau)H_w(\tau)C_{F_i}(\tau),$$

где H_w — твердость материала заготовки; C_{F_i} — коэффициент, характеризующий геометрические параметры режущего инструмента по координатам $i = x, y, z$ и неучтенные условия обработки.

Упрощенная структурная схема процесса формообразования детали приведена на рис. 1. Предполагается, что резец характеризуется коэффициентами, обусловленными геометрией резания и свойствами материала заготовки, механические передачи станка — передаточными числами механизмов, а путевой контур по координатам x , y описывается передаточной функцией

$$W_{x,y}(p) = \frac{X, Y}{V_{x,y}} = \frac{1}{p}.$$

Основное различие между моментами нагрузки на валах двигателей шпинделя ($D_{ш}$) и подачи суппорта ($D_{пх}$, $D_{пу}$) станка связано с радиусом обработки детали R . При постоянных условиях резания ($F = \text{const}$, $V_{x,y} = \text{const}$) основным режимом для приводов подачи является режим постоянства момента, а для главного привода — постоянства мощности.

Статические моменты на валу двигателей подачи определяются через коэффициенты приведения

$$M_{x,y} = F_{x,y}\rho_{x,y},$$

где $\rho_{x,y} = V_{x,y}/\omega_{x,y}$ — радиусы приведения по соответствующей координате.

Основной составляющей силы резания является тангенциальная составляющая F_z , которая определяет момент нагрузки привода главного движения. Рассмотрим процесс, вы-

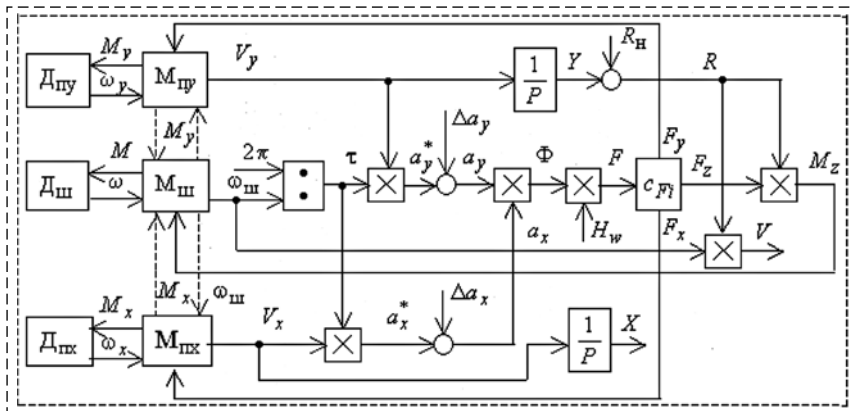


Рис. 1. Структурная схема процесса формообразования детали
Fig. 1. Block diagram of the process of forming parts

делив при этом величины, влияющие на стабилизацию основного параметра, в качестве которого примем мощность резания

$$N = M_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}} = F_z R \omega_{\text{ш}} = F_z V,$$

где $M_{\text{ш}}$ — момент нагрузки на валу шпинделя

Из рассмотрения структуры (рис. 1) видно, что каждая из промежуточных величин является функцией параметров, значения которых в наиболее общем случае имеют случайное распределение во времени. Каждый из параметров входит в выходную величину в виде множителя, и поэтому согласно свойствам множительного звена его состояние можно оценить переменным во времени коэффициентом передачи $k_i(t)$, а связь входной g и выходной y величин записать следующим образом:

$$y(p, t) = g(p) k(t),$$

где $k(t) = \prod_{i=1}^n k_i(t)$ — обобщенный коэффициент передачи является функцией изменения параметров μ_i во времени.

Выделим процесс резания (рис. 2, а), считая, что механизмы подачи и шпинделя связаны через коэффициент k_s , характеризующий подачу на оборот шпинделя. Структуры процесса резания относительно мощности резания (рис. 2, б) и скорости резания (рис. 2, в) при поперечном точении тождественны. Связь между переменными R и M_z осуществляется через значение F_z и, следовательно, система стабилизации скорости резания при соблюдении условия $F_z = \text{const}$ может быть реализована по силовому параметру.

Явная аналогия выходных координат систем прослеживается и при продольном точении. Для случая взаимосвязанного регулирования частоты вращения шпинделя и подачи суппорта процесс резания относительно N_z представлен на рис. 2, г. Координата $\omega_{\text{ш}}$ входит в величину, характеризующую мощность резания N_z относительно скорости подачи V_x , дважды и при этом взаимно компенсируется. Это согласуется с результатами работы [10], в которой экспериментально установлено, что коэффициент передачи по возмущению не зависит от частоты вращения шпинделя, а сдвиг фазы между глубиной резания и силами резания при всех режимах равен нулю. Следовательно, в первом приближении представление процесса резания в виде безынерционного звена согласно структуре (см. рис. 1) является правомерным.

Параметрические структуры стабилизации силовых параметров

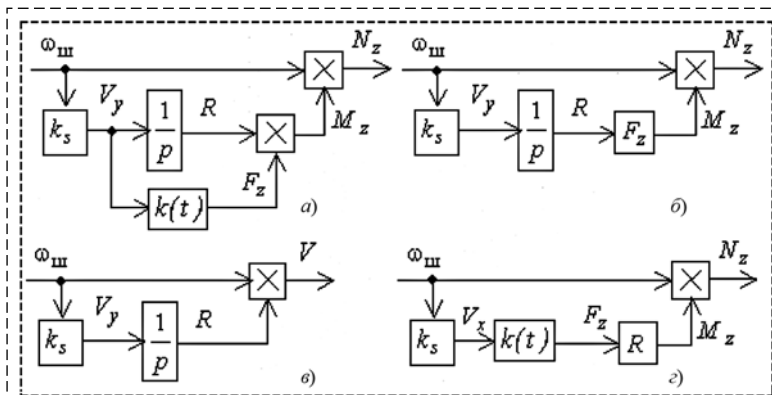


Рис. 2. Структура процесса резания относительно мощности резания
Fig. 2. The structure of the cutting process regarding cutting power

Основные особенности систем стабилизации силовых параметров (СССП) заключаются в параметрическом законе их функционирования [11]. Рассмотрим обобщенную систему (рис. 3, а), которая содержит регулятор силового параметра $W_p(p)$, электропривод с передаточной функцией $W_1(p)$, цепь формирования силового параметра y , представленную нестационарным звеном $W_2(p, t)$, и множительное звено $F(x, y)$ формирования основной обратной связи по силовому параметру.

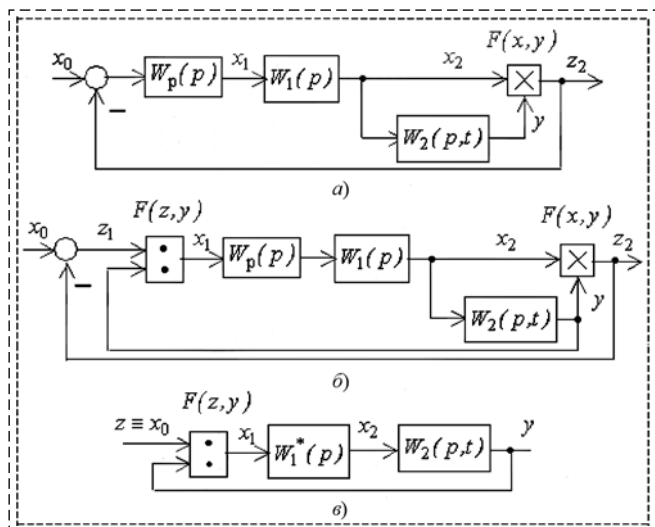


Рис. 3. Параметрические системы стабилизации силовых параметров

Fig. 3. Parametric systems of stabilizing power parameters

Коэффициент передачи множительного звена может изменяться в десятки и сотни раз, что является основной причиной неустойчивого поведения системы регулирования.

Компенсация влияния множительного звена на устойчивость системы показана на структурных схемах (рис. 3, б, в), где функциональные преобразователи $F(x, y)$, $F(z, y)$ представляют собой множительные и делительные устройства. При синтезе их можно рассматривать как взаимнообратные нестационарные звенья $k(t)$ и $1/k(t)$. С учетом этого в состав регулятора введено параметрическое звено $F(z, y)$ (рис. 3, б). При этом система с дополнительным параметрическим регулятором $F(z, y)$ (рис. 3, б) эквивалентна системе с параметрической обратной связью (рис. 3, в), где звено замыкания обратной связью является параметрическим, а внутренний контур описывается передаточной функцией

$$W_1^*(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_p(p)W_1(p)}.$$

В зависимости от выбора основной обратной связи можно получить ряд структур стабилизации силовых параметров. Предпочтительный вариант подсистемы для ЧПУ рассмотрен в работе [12] и основан на непосредственном измерении усилия резания.

Система стабилизации скорости резания

При обработке сложных поверхностей работа со сверхвысокими скоростями фактически

возможна лишь с соблюдением режима стабилизации скорости резания (ССР), так как из-за возможного отклонения в зону критических скоростей может произойти выход из строя режущего инструмента. В зависимости от целей управления, например при силовом резании, скорости подач могут варьироваться в функции параметров резания (усилий резания, токов, моментов, мощности). Если требуется получить заданную шероховатость, то на скорости подач необходимо наложить ограничения, позволяющие обеспечить поверхность заданного класса, или связать их со скоростями вращения шпинделя жестко. На рис. 4 показана модель системы ССР на токарных станках с ЧПУ. Стабилизация скорости резания осуществляется путем формирования частоты вращения электропривода шпинделя (ЭПШ) в соответствии с параметрической зависимостью $\omega = V/R$, где V — скорость резания, R — текущий радиус обработки относительно центра. Начало отсчета движения инструмента определяется при выходе суппорта на базовую точку. Этой точке соответствует начальный радиус R_0 относительно центра заготовки. При этом текущий радиус обработки определяется как $R = R_0 + \sum_{i=1}^n Y_i$, где Y_i — перемещение по поперечной координате суппорта, отрабатываемое на i -м кадре управляющей программы. Взаимосвязанное движение по координатам суппорта x, y осуществляется в функции текущей частоты вращения ω шпинделя. Это осуществляется путем пересчета скоростей подач $V_x^* = k_{sx} \omega$, $V_y^* = k_{sy} \omega$, где k_{sx} , k_{sy} — приведенные коэффициенты, характеризующие подачу на оборот шпинделя. При этом в отличие от традиционных алгоритмов интерполяции,

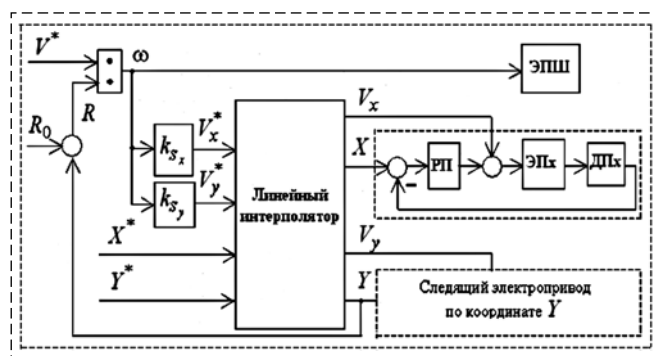


Рис. 4. Принцип организации системы стабилизации скорости резания на токарных станках с ЧПУ

Fig. 4. The principle of organization of the cutting speed stabilization system on CNC lathes

в которых можно выделить три характерных участка движения (разгон, движение с постоянной скоростью, торможение), интерполятор должен обрабатывать не заданные, а текущие значения скоростей подачи V_x^*, V_y^* . Один из распространенных вариантов реализации следящего электропривода основан на принципах комбинированного управления. В соответствии с этим, кроме основного формирования траектории движения по координатам X и Y , интерполятор дополнительно формирует задание на скорости перемещения V_x и V_y .

Обработка торцевых и конусных поверхностей в режиме ССР сопровождается непрерывным изменением частоты вращения шпинделя и скоростей подачи. Поэтому организация системы ССР предъявляет повышенные требования к динамике приводов подачи и главного движения. Резкое изменение скорости резания неблагоприятно влияет на стойкость инструмента. Алгоритмические особенности программ интерполяции в режиме ССР должны также предусматривать ускоренный отвод инструмента и холостые участки (торможения и реверса) для организации циклической обработки.

Модель системы ССР при торцевой обработке

Модель вычислительного процесса системы с ЧПУ (рис. 5) представлена следующими модулями:

1) модулем интерполятора, формирующим текущее положение координаты Y ;

2) модулем калькулятора, формирующим значение радиуса и его модуль по разности между его начальным значением и текущим значением координаты;

3) модулем цикла, определяющим точки перехода радиуса обработки через нуль и возврата в начальное положение.

Интерполятор в своем составе содержит два цифровых интегратора. На базе первого из них реализован задатчик интенсивности скорости подачи, а второй использован для формирования задающей координаты, поступающей совместно с сигналом задания частоты вращения на вход цифрового привода подачи. Дискретные передаточные функции интеграторов на программном уровне соответствуют их работе соответственно по методу прямоугольников и трапеций. Период квантования информации по времени интерполятора и привода подачи равен одной микросекунде. Это соответствует периоду прерывания современных систем с ЧПУ при выполнении основных задач управления и протоколов передачи информации по оптоволокну между системой с ЧПУ и цифровым приводом.

Структура цифрового сервопривода подачи включает в себя регулятор положения и соответствует комбинированной системе регулирования с подчиненными контурами скорости и тока.

При разработке модели привода шпинделя за основу принята система регулирования с контуром тока и двойным контуром скорости. Контур скорости в этом случае настроен

на модульный оптимум по управлению и на симметричный оптимум по возмущению.

Формирование гиперболической зависимости частоты вращения шпинделя от радиуса обработки осуществляется с помощью операции деления. При этом модули калькулятора и цикла исключают ситуации деления на ноль в моменты прохождения радиуса обработки через нулевые состояния. Формирование момента нагрузки для привода шпинделя осуществля-

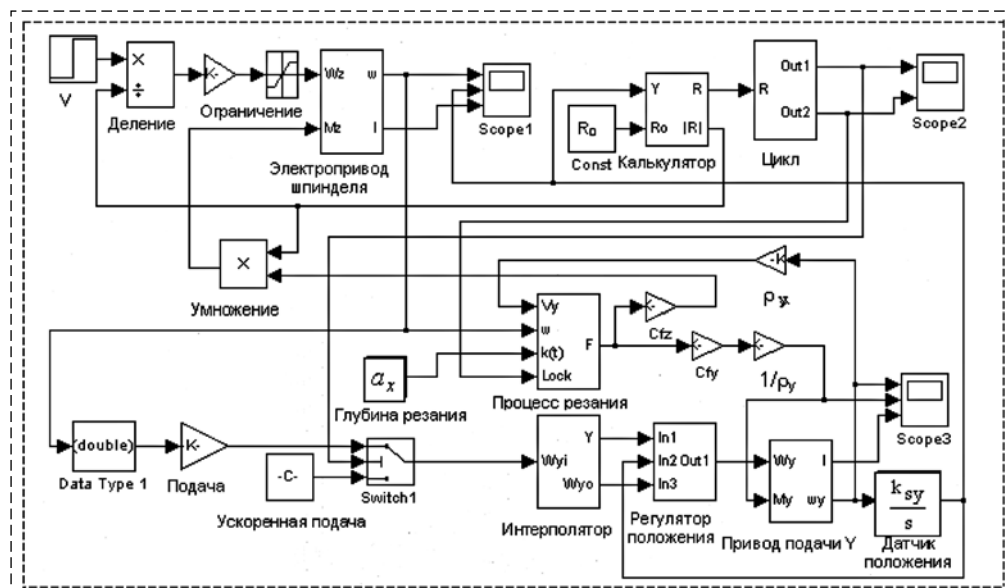


Рис. 5. Модель стабилизации скорости резания на станке с ЧПУ
Fig. 5. Model of stabilization of cutting speed on a CNC machine

ется с помощью операции умножения, представленной отдельным блоком. Модель электропривода шпинделя также содержит внутренний контур, имитирующий потери холостого хода.

Процесс резания при торцевой обработке в целом соответствует структуре, представленной на рис. 1. Исключение составляет подача по координате V_x , которая при формировании цикла обработки используется для отвода резца и задания припуска на обработку. Для упрощения припуск представлен величиной a_x , которая соответствует глубине резания при обработке торцевых поверхностей заготовки.

Результаты моделирования

Диаграммы работы представлены на рис. 6.

В диапазоне низких скоростей и темпа их изменения ток нагрузки I двигателя главного движения пропорционален текущему радиусу обработки.

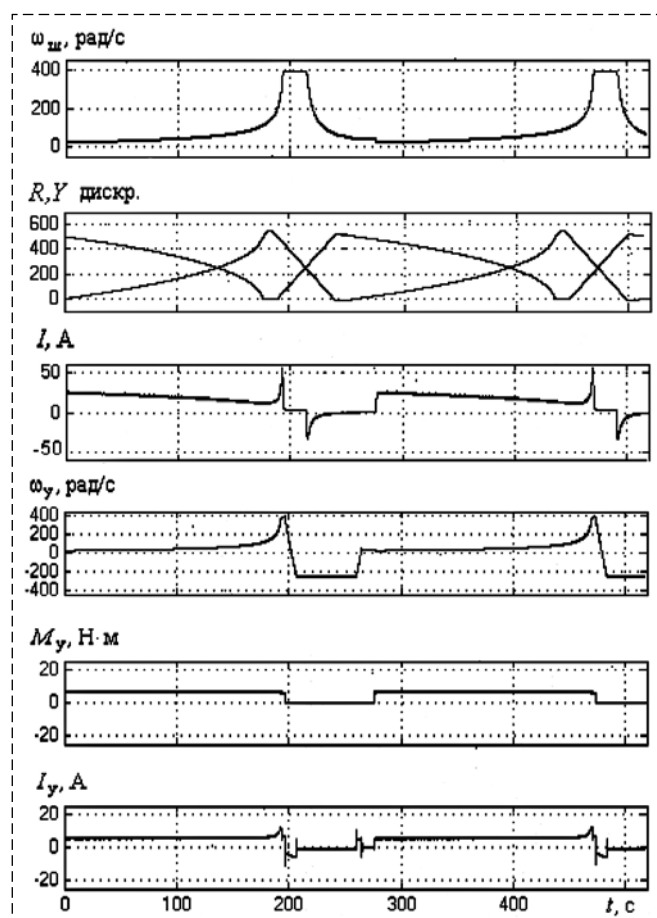


Рис. 6. Диаграммы работы модели системы с ЧПУ в режиме ССР
Fig. 6. Diagrams of the NC model in the cutting speed stabilization mode

При приближении к центру изделия увеличивается темп изменения частоты вращения шпинделя, и указанная пропорциональность нарушается за счет существенного возрастания динамического тока. Выход на участок движения, соответствующий ограничению скорости, сопровождается сбросом тока на значение потерь холостого хода. В точке перехода радиуса R через нуль происходит реверс движения по координате Y и переход на ускоренную подачу. За счет инерционности переходных процессов привод подачи переходит через центр дважды. Аналогичный процесс наблюдается на участке, соответствующем выходу на начальный радиус обработки. Таким образом, скоростная обработка должна сопровождаться разработкой алгоритмов, предусматривающих участки выбегов и циклической обработки изделий.

Заключение

Таким образом, рассмотренная модель системы ССР позволяет имитировать циклы скоростных режимов обработки, которые могут быть использованы для проработки дополнительных функций ЧПУ. Данную модель можно использовать как основу для других возможных вариантов обработки, в том числе многокоординатной обработки с изменением подач в зависимости от усилий резания. При скоростных режимах резания целесообразно использовать предварительный (визуальный) просмотр отработки кадра для исключения возможных коллизий. Для повышения быстродействия в этом случае целесообразно использовать стандартные методы решения дифференциальных и разностных уравнений с выводом графика отработки.

Список литературы

1. Тимирязев В. А., Дудко С. А., Хворов И. А. Повышение эффективности многоцелевых станков путем расширения состава применяемого режущего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 143–149.
2. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Системы числового программного управления. М.: Логос, 2005. 296 с.
3. Мартинов Г. М. Современные тенденции развития компьютерных систем управления технологического оборудования // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 1.
4. Григорьев С. Н. Принципы создания многофункциональной системы числового программного управления технологическим оборудованием на базе общего ядра с открытой модульной архитектурой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 5. С. 1–11.

5. Корытин А. М., Петров Н. К., Радимов С. Н., Шапарев Н. К. Автоматизация типовых технологических процессов и установок. М.: Энергоатомиздат, 1988. 432 с.
6. Alajmi M. S., Oraby S. E. On the influence of the speed-feed interaction on the wear rate and life of multiple coated carbide inserts considering rough turning process // *Applied mechanics and materials*. 2014. Vol. 575. P. 431–436.
7. Патент № 2420776 (РФ). Устройство для управления станком / В. М. Иванов. Оpubл. Бюл. № 16, 2011.
8. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сусллова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение-1, 2003. 944 с.

9. Ulsoy A. G., Koren Y. Control of Machining Processes // *Asme j. of dynamic systems, measurement and control*. 1993. Vol. 115, N. 2(B). P. 301–308.
10. Глушко В. В., Шумов В. А. Автоматическое регулирование режимов резания на двухсуппортных токарных станках // *Станки и инструмент*. 1973. № 6. С. 8–9.
11. Озерянный Н. А. Системы с параметрической обратной связью. М.: Энергия, 1974. 152 с.
12. Иванов В. М. Идентификация параметров и алгоритмы самонастройки в системах стабилизации усилия резания // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012. № 5. С. 56–64.

Simulation Model of the Cutting Speed Stabilization System for CNC Metal-Cutting Machine Tools

V. M. Ivanov, v.ivanov@ulstu.ru,

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation

Corresponding author: **Ivanov Vladimir M.**, Ph. D., Associate Professor Faculty of Power, of Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation, e-mail: v.ivanov@ulstu.ru

Accepted on October 10, 2019

In this paper a simulation model of cutting speed stabilization for numerical control machines was developed. The mode of cutting speed stabilization allows solving a number of technological problems, including the increase in machining productivity and the quality of the part surface, the increase in durability of the cutting tool.

Access to the functions of the basic software of CNC systems is limited. Taking this into account, this paper considers the functional and algorithmic features of the power parameter stabilization systems, as the basis for the further development of intelligent algorithmic support and software. The existing guidance on cutting conditions is based on empirical dependencies, the use of which for direct application in algorithms for the cutting process automatic control is difficult, since these dependencies determine the predicted, not the current, parameters. The non-stationary model was adopted as the basic structure of the process of shaping parts, the main non-stationary model parameters are determined by the three-dimensional kinematics of the universal machine. The generalized approach to the power parameter systems and the synthesis of the regulators of their main circuits made it possible to identify the simplest version of the structures based on the use of the regulators with parametric feedback. The functional model contains the main components of the CNC system: an interpolator, servo drives of feeds and main motion, as well as additional cycle and analysis modules. The high-speed processing of end surfaces and the conditions for the implementation of cyclic control tasks are considered. The simulation results confirming the performance of functional algorithms and the possibility of their use in intelligent CNC systems are presented.

Keywords: cutting speed, shaping, electric drive, interpolator

For citation:

Ivanov V. M. Simulation Model of the Cutting Speed Stabilization System for CNC Metal-Cutting Machine Tools, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 110–116.

DOI: 10.17587/mau.21.110-116

References

1. Timiryazev V. A., Dudko S. A., Khvorov I. A. Improving the efficiency of multi-purpose machines by expanding the composition of the used cutting tool, *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2016, no. 11, pp. 143–149 (in Russian).
2. Sosonkin V. L., Martinov G. M. Systems of numerical program control, Moscow, Logos, 2005, 296 p. (in Russian)
3. Martinov G. M. Modern trends in the development of computer control systems of process equipment, *Vestnik MGTU "Stankin"*, 2010, no. 1 (in Russian).
4. Grigor'yev S. N. Principles of creating a multifunctional system for numerical control of technological equipment based on a common core with an open modular architecture, *Pribory i Sistemy. Upravleniye, Kontrol', Diagnostika*, 2011, no. 5, pp. 1–11 (in Russian).

5. Korytin A. M., Petrov N. K., Radimov S. N., Shaparev N. K. Automation of typical technological processes and installations, Moscow, Energoatomizdat, 1988, 432 p. (in Russian).
6. Alajmi M. S., Oraby S. E. On the Influence of the Speed-Feed Interaction on the Wear Rate and Life of Multiple Coated Carbide Inserts Considering Rough Turning Process, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 575, pp. 431–436.
7. Патент № 2420776 (РФ). Device for controlling the machine / V. M. Ivanov. Opubl. Byul. No. 16, 2011 (in Russian).
8. Dal'skogo A. M., Suslov A. G., Kosilova A. G., Meshcheryakov R. K. ed. Directory technologist-mechanical engineer, vol. 2, Moscow, Mashinostroyeniye-1, 2003, 944 p. (in Russian).
9. Ulsoy A. G., Koren Y. Control of Machining Processes, *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1993, vol. 115, no. 2(B), pp. 301–308.
10. Glushko V. V., Shumov V. A. Automatic adjustment of cutting conditions on two-support lathes, *Stanki i Instrument*, 1973, no. 6, pp. 8–9 (in Russian).
11. Ozerianny N. A. Systems with parametric feedback, Moscow, Energiya, 1974, 152 p. (in Russian).
12. Ivanov V. M. Identification of Parameters and Algorithms of Self Adjustment in Systems of Stabilization of Cutting Force, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 5, pp. 56–64 (in Russian).