

УДК 62-529

И. А. Горобец, канд. техн. наук, проф.

ГОУ ВПО Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Приведено описание типов автоматизированных систем управления станков с ЧПУ. Определены входные и выходные параметры процессов резания для станков с ЧПУ. Дан анализ характера усилий резания при обработке деталей. Исследованы динамические параметры входных параметров. Определен случайный характер сил резания и критерий оптимизации системы управления станком с ЧПУ.

Ключевые слова: параметр, характер, резание, усилие, припуск, функция, критерий, оптимизация.

I. A. Gorobets

DETERMINATION OF OPTIMIZATION CRITERIA FOR A MANAGEMENT SYSTEM CNC LATHES

Description of types of automated control systems for CNC machines is given. Input and output parameters of cutting processes for CNC machines are defined. An analysis of the nature of the cutting forces in the processing of parts is given. The dynamic parameters of the input parameters are investigated. The random nature of the cutting forces and the criterion for optimizing the CNC machine control system are determined.

Keywords: parameter, character, cutting, effort, allowance, function, criterion, optimization

1. Постановка проблемы

Дальнейшее совершенствование машиностроительного производства связано с эффективным использованием металлообрабатывающих станков, в том числе и с числовым программным управлением (ЧПУ). Широкое использование современных станков с ЧПУ и станков типа «обрабатывающий центр», позволило повысить производительность обработки деталей на этих станках, снизить себестоимость их изготовления, повысить безопасность работ. Особенностью систем управления станков с ЧПУ при программировании режимов обработки является отсутствие учета особенностей обработки конкретных поверхностей детали. При этом, как правило, в программу закладываются режимы для наиболее тяжелых условий металлообработки. Кроме того, в системе управления станком не учитывается влияние непрерывно изменяющихся внешних воздействий и параметров системы привод-инструмент-заготовка, определяющих в большей степени производительность и точность металлообработки.

2. Анализ состояния проблемы

Стремление преодолеть недостатки станочного парка с ЧПУ привело к созданию систем адаптивного управления в станкостроении, которые позволяют повышать эффективность процесса обработки каждой детали благодаря использованию текущей информации о параметрах, определяющих условия и качество процесса резания.

Анализ использования адаптивных систем предельного регулирования показал, что эти системы не обеспечивают оптимизации режима резания по общепринятым в металлообработке критериям, вследствие чего существенно недоиспользуются возможности станков с ЧПУ, что приводит к экономическим потерям. Потери производительности системы предельного регулирования зависят от типа линии ограничения, на которой она работает.

Беспоисковые системы адаптивной системы оптимизации (АСО – adaptive control for optimisation) с аналитическим определением оптимального режима по

критерию минимальных приведенных затрат описаны в работе [1] (для токарной обработки) и в работе [2] (для фрезерования). Скорость изнашивания инструмента здесь оценивается с помощью полиномиальных зависимостей Тейлора, связывающих стойкость с параметрами резания. В этих системах применены два контура регулирования, реализующие условия оптимальности. В первом контуре воздействием на параметр s (подача) поддерживается заданный вращающий момент на шпинделе, что обеспечивает, как и в адаптивной системе предельного регулирования, заданную деформацию СПИД. Во втором контуре поддерживается стойкость, обеспечивающая минимизацию критерия приведенных затрат.

Аналогичная система разработана в Пизанском университете для фирмы «Olivetti» (Италия) [3]. В качестве критерия оптимизации принят критерий минимальной себестоимости. В системе используются датчики для измерения изгибающего и вращающего моментов, потребляемой мощности. Установленная связь между скоростью изнашивания инструмента и параметрами резания позволяет аналитически определить экспериментальную - точку на плоскости выходных переменных и поддерживать ее средствами автоматического управления. В целях упрощения алгоритма АСО разработчики системы пренебрегли стоимостью инструмента и свели работу системы к предельному регулированию (поддержанию условия постоянства момента и мощности или подачи). Упрощение задачи, связанное с исключением косвенного измерения износа и заменой его ограничением по мощности, привело к отказу от идеи оптимизации по экономическому критерию.

В работе [4] описана система АСО, обеспечивающая максимум производительности при условии получения заданной шероховатости поверхности. Особенностью системы является использование внешнего компьютера, в базе данных которого хранятся данные о свойствах обрабатываемого материала, параметрах режущих инструментов, конструктивные и технологические ограничения и т. д. На основе этих данных осуществляется первичная оптимизация металлообработки. Система оптимизации по показаниям датчиков подачи, частоты вращения шпинделя, силы резания и вибрации, а также по результатам вычислений на внешней ЭВМ обеспечивает оптимизацию металлообработки в соответствии с изменяющимися условиями.

Хотя применение АСО позволяет повысить на 30 – 50 % производительность металлообработки при черновых операциях фрезерования и точения, но такие системы не получили широкого применения в станкостроении [5].

В ряде исследований [2, 5] было установлено, что для обеспечения высокоточной оптимизации режима металлообработки параметрической самонастройки оказывается недостаточно во всем диапазоне возмущающих воздействий, возникающих, в частности, при изменении припуска или твердости материала заготовки. Поэтому, повышение требований к эффективности современного дорогостоящего металлообрабатывающего оборудования обусловило применение более современных адаптивных систем с самонастраивающейся структурой в случаях, когда самонастройка параметров управляющего устройства не может обеспечить выполнения условий оптимизации с заданной точностью.

Такие системы называют самонастраивающимися многоструктурными системами. Их применение для оптимизации процесса металлообработки требует предварительного определения всего множества структур управляющего устройства и включения их в программное обеспечение. В результате идентификации в процессе металлообработки неконтролируемого параметра (припуска) и сопоставления его с

заданными граничными значениями включается та или иная структура управления; Эффективность оптимизации металлообработки существенно возрастает, особенно при черновых режимах.

Решение задачи дальнейшего повышения эффективности токарных станков с ЧПУ связано с необходимостью выбора критерия, оптимизации, программной и аппаратурной реализацией системы автоматической оптимизации. Выбор критерия определяет стратегию оптимизации, которая в большинстве случаев связана с адаптивным управлением.

Целью исследований является определение критерия оптимизации, способствующего повышению эффективности обработки деталей на токарных станках с ЧПУ.

3. Исследование характера входных параметров

Процессы резания металлов характеризуются динамически изменяемыми силовыми параметрами резания, что оказывает влияние на дальнейший рост производительности, долговечности станков качества обрабатываемого поверхностного слоя материала, себестоимость изготовления продукции [6].

На процесс обработки заготовки оказывают влияние множество изменяющихся и неуправляемых факторов, зависящих от изменений формы, материала заготовки, режущего инструмента, параметров технологической системы и т.п. Более того, при реализации заготовительных операций на объект изготовления также воздействует множество факторов, влияющих на качество поверхностного слоя заготовки.

Общее уравнение обрабатываемой поверхности в поперечном сечении можно представить в виде ряда Фурье [6]:

$$y(\rho) = \rho(\tau) + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\rho + b_n \sin n\rho) \quad (1)$$

где $\rho(\tau)$ – текущий действительный радиус заготовки как функция времени (τ); a_n, b_n – числовые коэффициенты, характеризующие неровность поверхностей, пропорциональные углу поворота заготовки и ее длине; n – порядок неровности на рассматриваемом сечении профиля заготовки от какого-либо фактора, расположенный по степени убывания влияния каждого фактора на изменение глубины резания инструмента Δt (или припуска Z), ρ – действительный радиус кривизны поверхности заготовки.

Предполагая, что возникновение вынужденных колебаний сил резания обусловлено изменениями величины припуска, и ограничиваясь первым членом ряда Фурье, получим:

$$P(\tau) = C_p [p_0 + \Delta P(\tau) \cos(\lambda\tau + \varphi)] \quad (2)$$

где $\Delta P(\tau)$ – амплитуда силы резания; λ – частота изменения этой силы; φ – сдвиг фазы.

Кроме влияния величины припуска на усилия резания при обработке поверхности детали, на амплитуду силы резания будет оказывать влияние и изменение поверхностной твердости заготовки в процессе резания:

$$\Delta P = C_p S^\alpha t^\gamma HB^{H-1} v^m (\rho HB \Delta t + nt \Delta HB) \quad (3)$$

где α, γ, H, m – показатели степени; HB – твердость поверхности заготовки; S – подача инструмента; t – глубина резания; v – скорость резания; $\Delta HB, \Delta t$ – изменение,

соответственно, твердости поверхности и глубины резания. Изменения твердости поверхности, как правило, не превышают 8...10% средней твердости заготовки и носят случайный характер. Плотность распределения вероятностей твердости близка к нормальному закону.

Для определения характера величины общего припуска были проведены статистические исследования. Для проведения таких исследований были подобраны 2 типа деталей - «тел вращения»: вал-шестерня горного комбайна 4ПП-2М и седло клапана отопительного котла АОГВ [6]. По результатам статистической обработки полученных результатов был установлен случайный характер величины общего припуска заготовок.

В результате случайного характера распределения общего припуска заготовки, можно предположить о случайном характере и сил резания. В результате исследования такого допущения, в ходе натурного эксперимента - был выявлен случайный характер усилий резания, рис. 1,2.

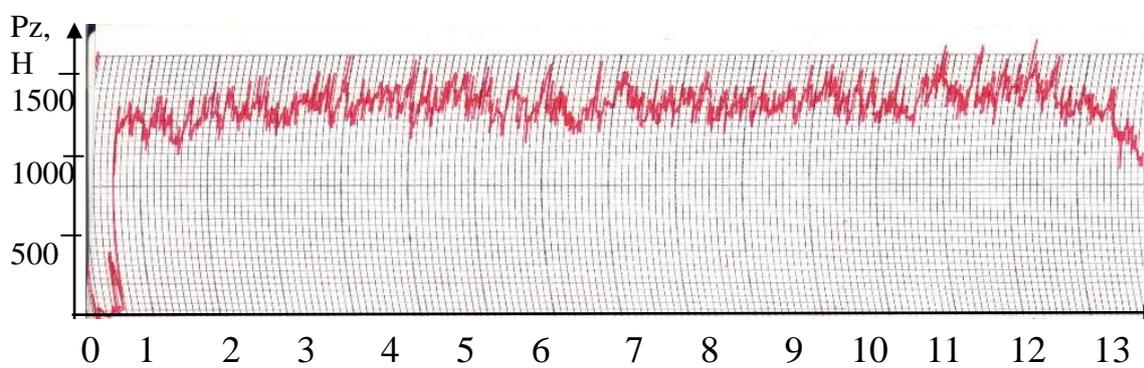


Рисунок.1. Фрагмент реализации усилия резания заготовки на токарно-винторезном станке 16К20.

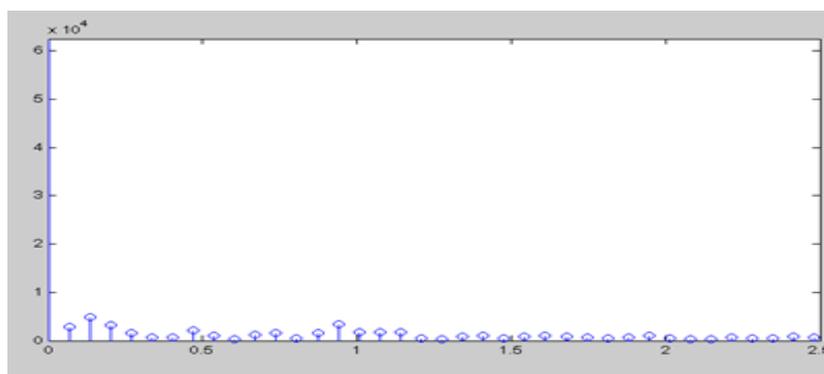


Рисунок. 2. График спектральной плотности усилия резания.

Из анализа графика спектральной плотности можно сделать вывод о наличии «белого шума» и детерминированных составляющих процесса, доля которых невелика. Таким образом, модель процесса резания при обработке заготовок на токарных станках с ЧПУ является динамической, а стандартный вид дифференциального уравнения математической модели процесса обработки заготовки в этом случае будет описывать динамическую систему со случайным возмущением.

4. Определение критерия оптимизации системы

Одним из влиятельных параметров станочного оборудования является производительность Q механической обработки при заданном качестве (точности, шероховатости, состояния поверхностного слоя и т.п.) и при минимальной себестоимости обрабатываемой детали. С этой целью необходимо решить задачу оптимизации процесса, в качестве критерия которого примем производительность Q механической обработки заготовки.

Для определения параметров регулирования системы представим штучную производительность изготовления детали Q на операции ее механической обработки обратно пропорционально штучному времени, т.е. $Q = 1/T_{шт}$. Штучное время определим как сумму времени, зависящего от режимов обработки $T_{шт.р}$ и организации производства $T_{шт.о}$.

Время, зависящее от режимов обработки детали представим в виде суммы машинного времени T_m , времени на подналадку и смену инструмента $T_{ни}$. Машинное время складывается из двух составляющих, основного времени T_o и времени холостого хода $T_{хх}$.

$$T_o = L \cdot i / n \cdot S, \tag{4}$$

$$T_{ни} = T_{см} \cdot T_o / T, \tag{5}$$

где L – длина обрабатываемых поверхностей, i – число проходов, n – частота вращения шпинделя станка, S – подача инструмента, $T_{см}$ – время смены инструмента, T – стойкость инструмента.

Поскольку $T_{хх} \ll T_o$, то

$$T_{шт.р} \approx (L \cdot i / n \cdot S)(1 + T_{см} / T) \tag{6}$$

Учитывая известные зависимости [7]

$$v = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \tag{7}$$

и

$$v = C_v \cdot K_v / T^m \cdot t^x \cdot S^y, \tag{8}$$

где C_v, K_v, m, x, y, w – постоянные коэффициенты и показатели степени, t – глубина резания, S – подача, T – стойкость инструмента, и выразив $T_{шт.р}$ через стойкость инструмента T , получим:

$$T_{шт.р} = K_1 T^m + K_1 T_{см} T^{m-1}, \tag{9}$$

где

$$K_1 = (\pi D L i^x S^y) / 1000 C_v K_v S \tag{10}$$

Определим экстремум функции (6), продифференцировав по T и приравняв нулю выражение.

$$\partial T_{шт.р} / \partial T = K_1 m T^{m-1} + K_1 (m-1) T_{см} T^{m-2} = K_1 T^{m-2} (Tm + T_{см}(m-1)) = 0$$

Тогда

$$T = T_{см}((1-m)/m), \tag{11}$$

где T – оптимальная величина стойкости инструмента.

Подставив (11) в (6), получим

$$T_{шт.р} = (L \cdot i / n \cdot S)(1 / (1-m)). \tag{12}$$

Максимальную производительность изготовления детали можно получить при выполнении условия:

$$Q = (n \cdot S) / (L \cdot i \cdot (1 / (1-m)) + T_{шт.о} (n \cdot S)^{-1}). \tag{13}$$

Представив $T_{шт.о} = K_2 T_{шт}$, получим

$$Q = (n \cdot S \cdot K_3) / L, \tag{14}$$

где

$$K_3 = (1-m) / i \cdot K_2 \tag{15}$$

Но при $t=const$ и $L=const$ $K_3=const$. Следовательно, при выполнении условия $Q \rightarrow Q_{max}$ необходимо выполнение условия:

$$\begin{cases} n \rightarrow n_{max} \\ S \rightarrow S_{max} \end{cases} \quad (16)$$

Таким образом, при проектировании автоматизированных систем управления металлорежущих станков, в качестве регулируемых параметров целесообразно использовать частоту вращения детали n , подачу инструмента S .

Для реализации условия $Q \rightarrow Q_{max}$ необходимо выполнение условия выполняется условие:

$$\begin{cases} P_z \rightarrow P_{zmax} \\ P_z < [P_z], \end{cases} \quad (17)$$

где $[P_z]$ - предельно допустимая сила резания P_z .

Но

$$P_z = C_p t^x S^y V^w, \quad (18)$$

где C_p, x, y, w – постоянный коэффициент и показатели степени, t – глубина резания, S – подача, V – скорость резания.

5. Заключение

В настоящее время большинство машиностроительных предприятий использует станки с ЧПУ, существенно повышающие производительность и точность обработки. Показан и описан случайный характер возмущающего воздействия при обработке металлов точением. Приведено направление дальнейшего совершенствования станков с ЧПУ, путем учета динамического характера сил резания и использования оптимизации режимов обработки. Предложен критерий оптимизации для системы управления процессом обработки заготовок на токарном станке с ЧПУ. Приведено описание реализации выполнения критерия оптимизации системы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Балакшин, Б. С. Теория и практика технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1982. – 239 с.
2. Usloy A., Principal Developments in the Adaptive control of machine tools / Usloy A., Koren J. // J. Of Dynamic system. – 1983. – Vol.105. – N2. – P. 107-112.
3. Theory and Design of CNC Systems / Suk-Hwan Suh, Seong Kyoon Kang, Dae-Hyuk Chung, Ian Stroud.-Springer Verlag London Limited, 2008. – 454 p.
4. Boer, C. Adaptive control optimization for numerically controlled milling Process / Boer C., De Matherbe M. C., Venter R. // Proc. 18th Int. Mach. Tool Des. and Res. Conf. London, May 1977. – London: Wiley, 1978. – P. 665-671.
5. Нестеров, С. А. Адаптивные системы управления: Конспект лекций. – СПб.: Факультет технической кибернетики СПбГПУ, 2005. – 90 с.
6. Gorobez, I. Adaptronsysteme in der Werkzeugmaschine für die spannabhebende Formung / I Gorobez, N. Golubov Entwicklungsmethoden und Entwicklungsprozesse im Maschinenbau. 5 Magdeburger Maschinenbau-Tage. – Berlin: Logos-Verl, 2001. – P. 45-51.
7. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С. В. Грубый. — Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 149 с.

Поступила в редколлегию 10.04.2019 г.