

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЛУБИНОЙ РЕЗАНИЯ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

В.Б. Богуцкий, Л.Б. Шрон

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

Показано, что внедрение шлифовальных станков с ЧПУ требует постоянной оценки состояния технологической системы с учётом динамики процесса на основе автоматического управления процессом обработки. В этой связи анализ параметров технологического процесса и управления, например, глубиной резания позволит обеспечить его устойчивость и заданное качество продукции. Для предложенной компоновки системы автоматического управления процессом обработки разработана математическая модель, представленная описанием ее звеньев в операторной форме и учитывающая динамику процесса шлифования. Для формирования обратной связи предлагается применить разностную рекуррентную схему. Для упрощения описания входного воздействия при необходимости вычисления реакции на сигнал произвольной формы (например, шумового воздействия) необходимо применение численных методов. В этом случае отпадает необходимость перехода к изображениям, что упрощает алгоритм решения задачи. Задача решается во временной области. Введение обратной связи на основе полученной передаточной функции может быть описано в изображениях по Лапласу, которые легко вычисляются как реакции на стандартные воздействия. Таким образом, по передаточной функции системы можно сразу получить решение во временной области для входного сигнала произвольной формы, заданного в любом виде (аналитически или таблично).

Ключевые слова: шлифование, процесс обработки, динамика процесса, система автоматического управления, синтез.

Введение. Качество продукции машиностроительного производства во многом определяется эксплуатационными свойствами входящих в ее состав деталей, а это в свою очередь, ведет к росту требований к изготавливаемой продукции по критериям точности, шероховатости поверхности, гарантированию ее физико-механических свойств и т. д. Одно из важнейших мест в ряду технологических процессов занимают технологические процессы финишной обработки, наиболее распространённым из которых является процесс шлифования [1–6]. Специфика развития машиностроительного производства, заключающаяся в широком внедрении в промышленную практику шлифовальных станков с ЧПУ, требует осуществлять автоматическое управление процессом обработки, т. е. необходима разработка систем автоматического регулирования параметров процесса шлифования в соответствии с выбранными критериями качества обработки. Решение данной задачи осложняется такими особенностями процесса шлифования, как нестационарность, недетерминированность и нелинейность [7–12], для учета которых необходимо выполнять постоянную оценку состояния технологической системы с учётом динамики процесса. Такую возможность дает применение системы автоматического управления процессом обработки. Из-за необходимости учета и описания ряда факторов, наиболее существенными среди которых является учет динамики процесса шлифования, синтез системы автоматического управления (САУ) процессом шлифования представляет собой достаточно сложную задачу [13–17].

Достаточно часто для уточнения характеристик модели управления процессом используют синтез системы обработки наблюдений, введение в контур управления адаптации по формальным [16, 18, 19] либо физическим параметрам [20–22]. При описании системы управления процессом круглого шлифования может быть представлен звеном задержки [17, 20, 22] либо его

упрощенной моделью – аperiodическим звеном первого порядка [16, 21], что является грубым приближением.

Целью статьи является поиск по известным параметрам звеньев технологической системы параметров коррекции, обеспечивающих устойчивость системы автоматического управления глубиной резания на операции круглого шлифования, при условии отсутствия колебательности процесса в случае изменения режимов обработки.

Материалы и методы. Рассмотрим систему управления подачей шлифовального станка (рис. 1), включающую в себя двигатель постоянного тока 1 (например серии 4ПБ), кинематически связанный со шлифовальной бабкой станка 4 через редуктор 2, и ходовой винт 3. Контроль снимаемого припуска производится устройством активного контроля 5, связанного с дифференциальным усилителем 6, на второй вход которого поступает сигнал, соответствующий размеру заготовки D_0 . Питание двигателя 1 осуществляется через усилитель-преобразователь 7. Обрабатываемая деталь 8 установлена в центрах 9 и приводится во вращение приводом 10.

От системы управления врезной подачей 11 через цифро-аналоговый преобразователь 12 напряжение $U_{вх}$, которое представляет в определенном масштабе значение нужной величины снятия припуска, поступает на сравнивающее устройство 13. На второй вход сравнивающего устройства 13 с дифференциального усилителя 6 поступает сигнал $U_{пр}$, значение которого пропорционально величине снятого припуска, информация о величине которого поступает на вход дифференциального усилителя 6 от прибора активного контроля 5. После сравнения сигналов $U_{вх}$ и $U_{пр}$ формируется сигнал ошибки ΔU , поступающий после обработки в усилителе-преобразователе 7 как напряжение U на двигатель 1, и, как результат, шлифовальная бабка 5 перемещается на величину, необходимую для обеспечения заданной глубины резания.

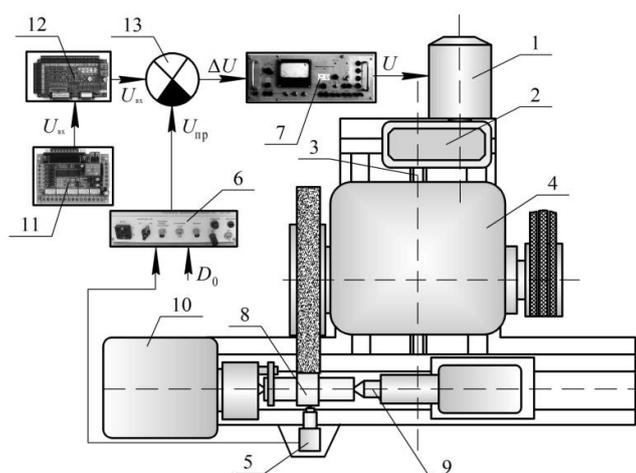


Рис. 1. САУ врезной подачи круглошлифовального станка

Для анализа САУ необходимо иметь ее математическое описание. Для системы управления, показанной на рис. 1, оно может быть представлено описанием ее звеньев в операторной форме [16–23]:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; \quad k_1 = 10..100; T_1 \leq 0,1 \text{ с};$$

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}; \quad k_2 = 1..3,5; T_e \leq 0,1 \text{ с}; T_m = 0,1..0,7 \text{ с};$$

$$W_3(p) = k_3; \quad k_3 = 0,01..0,1;$$

$$W_4(p) = k_4; \quad k_4 = (4..8) / 2\pi \text{ мм/об};$$

$$W_5(p) = k_5 \frac{\exp(-\tau p)}{p}; \quad \tau - \text{время одного оборота детали с}; k_5 \leq 1;$$

$$W_6 = k_6; \quad k_6 = 0,01..0,12;$$

$$W_7 = \frac{k_7}{T_7 p + 1}; \quad k_7 \leq 0,15; T_7 \leq 0,05 \text{ с}.$$

Для моделирования поведения системы при произвольном входном воздействии необходимо упростить выражение звена задержки $\exp(-\tau p)$, входящего в состав передаточной функции $W_5(p)$, описывающей технологический процесс удаления припуска. Среди возможных выберем наиболее общий подход, позволяющий уточнять модель по мере необходимости.

Представим звено задержки $\exp(-\tau p)$ приближенным выражением

$$e^{-\tau p} \approx \frac{\left(1 - p \frac{\tau\alpha}{n}\right)^n}{\left(1 + p \frac{1-\alpha}{n}\right)^n},$$

где α может выбираться в пределах $0 \leq \alpha \leq 1$. Положив $\alpha = 0$, получим

$$e^{-\tau p} \approx \frac{1}{\left(1 + \tau \frac{p}{n}\right)^n}.$$

Применив разложение по формуле бинома, перейдем к тождественной форме

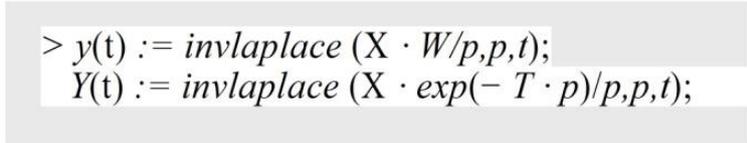
$$e^{-\tau p} = \frac{1}{\sum_{i=0}^n a_i p^i},$$

где $a_i = C_n^i (\tau/n)^i$, C_n^i – биномиальный коэффициент.

Реакцию звена, представленного в той или иной форме, можно получить на основе обратного преобразования Лапласа:

$$Y(t) = L^{-1}\{X(p) \exp(-\tau p)\}; \quad y(t) = L^{-1}\{X(p) W(p)\},$$

где $X(p)$ – изображение входа, описание которого в MAPLE-интерпретации (ZAD.mws) для единичного входного воздействия X имеет вид, показанный на рис. 2.



```
> y(t) := invlaplace (X · W/p,p,t);
Y(t) := invlaplace (X · exp(- T · p)/p,p,t);
```

Рис. 2. MAPLE-интерпретации для единичного входного воздействия X

На рис. 2 $W = 1/\left(1 + \frac{Tp}{n}\right)^n$ – результат аппроксимации звена задержки $\exp(-\tau p)$ звеном n -го порядка.

На рис. 3 показаны графики переходного процесса при единичном входном воздействии $X = 1(t)$, $T = \tau = 0,1$ с и разных значениях n , из которого видно, что, выбирая n , можно уточнять результат моделирования звена задержки, что решает одну из поставленных задач.

Таким образом, технологический процесс шлифования может быть описан линейным выражением, учитывающим процесс задержки врезной подачи $W_5(p) = \left(1 + \frac{Tp}{n}\right)^{-n}$ и процесс удаления припуска $W_{Pr}(p) = \frac{k_5}{p}$, имеющий интегральный характер. С учетом выполненных преобразований окончательно запишем для технологической операции шлифования

$$W_5(p) = W_S(p) W_{Pr}(p) = \frac{k_5 \left(1 + \frac{Tp}{n}\right)^{-n}}{p}.$$

Одной из основных является задача обеспечения устойчивости при заданном качестве переходного процесса. На устойчивость и качество работы САУ оказывают влияние изменения графика технологического процесса для деталей различного типа, настройки ЧПУ, параметров инструмента, заготовки, материала и другие факторы, вызывающие отклонение режима ее работы. Отдельный учет указанных факторов является трудоемкой задачей [17, 20, 21].

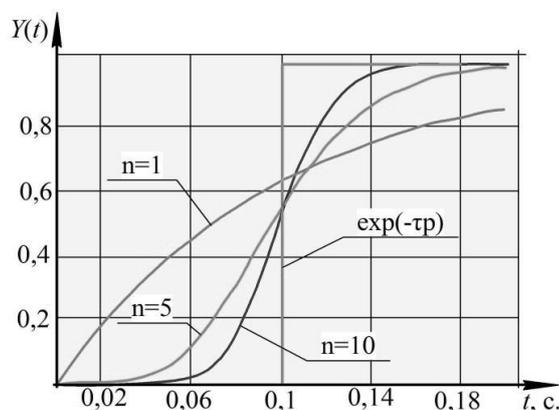


Рис. 3. Графики переходного процесса при единичном входном воздействии (приближение звена задержки)

Воспользуемся комплексным подходом, основанном на методе замещения коэффициентов операторной дробно-рациональной передаточной функции при выборе собственного оператора желаемой передаточной функции [18, 24]. Для этого введем последовательную коррекцию передаточной функции САУ (рис. 4), положив $W_0(p) = 1/W_C(p)$, где $W_C(p)$ – числитель нормализованной передаточной функции САУ $W(p)$, изображенной на рис. 1

$$W(p) = \frac{W_1(p) W_2(p) W_3(p) W_4(p) W_5(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) W_3(p) W_4(p) W_5(p) W_6(p) W_7(p)}.$$

В рассматриваемом случае после преобразований найдем

$$W_C(p) = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 (1 + T_7 p).$$

Выполнив коррекцию, запишем передаточную функцию САУ в дробно-рациональной форме

$$W_k(p) = \frac{W(p)}{W_C(p)} = \frac{1}{W_Z(p)},$$

где $W_Z(p) = \sum_{j=0}^n a_j p^j$.

Введем требование абсолютной устойчивости при апериодическом переходном процессе [23]:

$$W_Z(p) - W_Q(p) = (1 + \tau p)^n.$$

Приняв $W_Q(p) = \sum_{j=0}^n q_j p^j$, запишем

$$\sum_{j=0}^n a_j p^j - \sum_{j=0}^n q_j p^j = (1 + \tau p)^n.$$

Учтя, что $(1 + \tau p)^n = \sum_{j=0}^n c_j p^j$, где $c_j = \tau^j C_n^j$, получим условие реализации наложенного

требования в виде $q_j = a_j - c_j$, которое можно выполнить введением обратной связи (см. рис. 4).

Для формирования обратной связи U_k применим разностную рекуррентную схему [23, 24]. С введением обратной связи эквивалентная передаточная функция САУ приводится к виду

$$W_E(p) = \frac{1}{(1 + \tau p)^n},$$

где можно принять $\tau = \sqrt[n]{a_n}$.

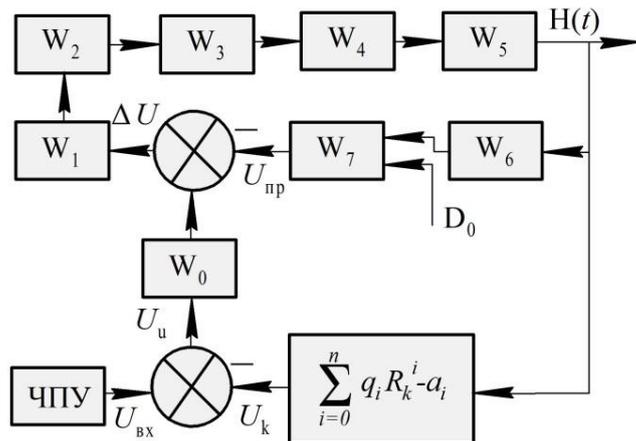


Рис. 4. Функциональная схема САУ

С помощью полученной передаточной функции легко вычисляется реакция на стандартные воздействия, которые могут быть описаны в изображениях по Лапласу.

$$X(t) = \begin{cases} H_1, & \text{if } 0 < t \leq T_1; \\ \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1} (t - T_1), & \text{if } T_1 < t \leq T_2; \\ H_2, & \text{if } T_2 < t \leq T_3; \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Для рассматриваемого примера алгоритмическая MAPLE-модель САУ (Shlif_10.mws) показана на рис. 5.

```
> with(inttrans):
  Tu := a[n]^(1/n); T0 := 20. * Tu; X := 1.;
  WE(p) := 1/sum('binomial(n, i) * Tu^i * p^i', i=0..n);
  Digits := 20.;
  Y(t) := invlaplace(X(p) * WE(p)/p, p, t);
  X(t) := invlaplace(X(p)/p, p, t);
```

Рис. 5. Алгоритмическая MAPLE-модель САУ

На рис. 6 а приведен график изменения входного воздействия X(t) и выходного сигнала Y(t), вычисленного при аппроксимации процесса шлифования аperiodическими звеньями первого (n = 1) и третьего (n = 3) порядков (реакция системы) в соответствии с MAPLE-описаниями, приведенными на рис. 6 б (Shlif_12.mws).

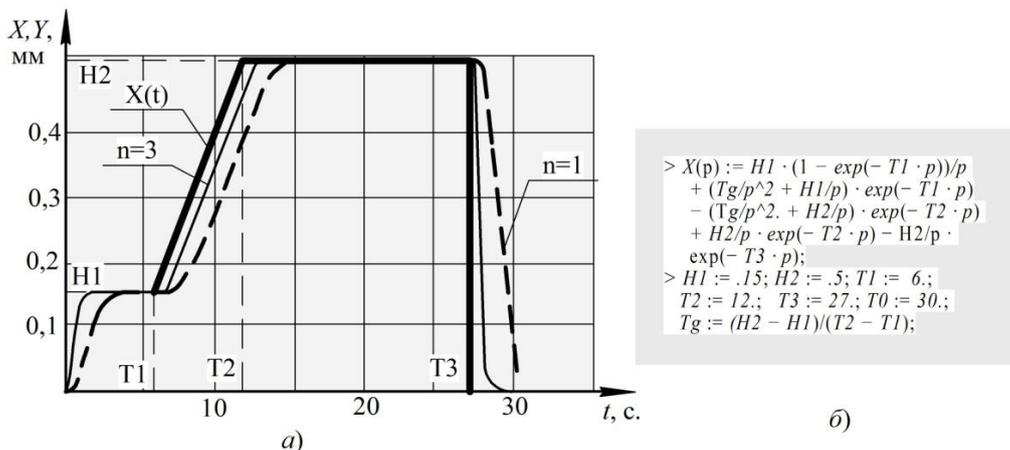


Рис. 6. График изменения входного воздействия X(t) и выходного сигнала Y(t), (реакция системы)

Для упрощения описания входного воздействия при необходимости вычисления реакции на сигнал произвольной формы (например, шумового воздействия) необходимо применение численных методов. В этом случае отпадает необходимость перехода к изображениям, что упрощает алгоритм решения задачи. Задача решается во временной области. Для передаточной функции рассматриваемого типа

$$W_k(p) = \frac{1}{\sum_{j=0}^n a_j p^j},$$

где по определению $W_k(p) = Y(p) / X(p)$, $Y(p)$ и $X(p)$ – изображения выходного и входного сигналов соответственно, получим [4] решение относительно изображения выхода:

$$Y(p) = \frac{1}{a_n p} (Y^{(n-1)}(p) - a_{n-1} Y(p)),$$

где $Y^{(n-1)}(p)$ – изображение производной $(n-1)$ -го порядка.

Изображение производной $(n-1)$ -го порядка находится по рекуррентной зависимости:

$$Y^{(j)}(p) = \frac{1}{p} (Y^{(j-1)}(p) - a_{j-1} Y(p)),$$

где $1 \leq j < n$; $Y^{(0)}(p) = X(p)$.

Результаты и обсуждение. Полученное решение во временной области приводится к рекуррентному виду

$$Y^j(k) = Y^j(k-1) + (Y^{j-1}(k) - a_{j-1} Y^n(k-1)) h; 1 \leq j < n,$$

$$Y^n(k) = Y^n(k-1) + (Y^{n-1}(k) - a_{n-1} Y^n(k-1)) h/a_n,$$

где k – номер шага, h – его величина.

Таким образом, по передаточной функции системы можно сразу получить решение во временной области для входного сигнала $U_{\text{вх}}$ произвольной формы, заданного в любом виде (аналитически или таблично). Алгоритмическое MAPLE-решение (Shlif_14. mws) показано на рис. 7 ($U_u := U_{\text{вх}} - U_k$).

```
> Y[0,k] := Uu;
for i to n-1 do
  Y[i,k] := Y[i,k-1.] + (Y[i-1.,k] - a[i-1.] * Y[n,k-1.]) * h; od;
Y[n,k] := Y[n,k-1.] + (Y[n-1.,k] - a[n-1.] * Y[n,k-1.]) * h/a[n];
```

Рис. 7. Алгоритмическое MAPLE-решение во временной области для входного сигнала $U_{\text{вх}}$ произвольной формы

Заключение. Предложена компоновка системы автоматического управления процессом обработки и разработана математическая модель, представленная описанием ее звеньев в операторной форме, которая учитывает динамику процесса шлифования.

Рассмотренный подход может быть использован при анализе процессов управления объектами, имеющими запаздывание, позволяя получить решение непосредственно во временной области.

Литература

1. Zhong, Z.W. *Recent developments in grinding of advanced materials* / Z.W. Zhong, V.C. Venkatesh // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 41 (5). – P. 468–480. DOI: 10.1007/s00170-008-1496-3.
2. Hou, Y. *Applications of high-efficiency abrasive process with CBN grinding wheel* / Y. Hou, Ch. Li, Y. Zhou // *Engineering*. – 2010. – Vol. 2. – P. 184–189
3. Werner, P.G. *Recent advances in grinding* / P.G. Werner // *Advances in Metal Processing*. Springer Publ. – 1981. – Vol. 25. – P. 229–255.

4. *Advances in centerless grinding technology* / F. Hashimoto, I. Gallego, João F.G. Oliveira, D. Barrenetxea // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2012. – Vol. 61(2). – P. 747–770.
5. *Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials* / W.B. Ding, B. Linke, Y. Zhu et al. // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2017. – Vol. 30. – No. 1. – P. 109–134.
6. *Industrial challenges in grinding* / J.F.G. Oliveira, E.J. Silva, C. Guo, F. Hashimoto // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 58, Iss. 2. – P. 663–680.
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. в 10 т. Т. 4. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов. / под ред. Ф.В. Новикова, А.В. Якимова. – Одесса: Изд-во ОНПУ, 2002. – 802 с.
8. *Tribology of abrasive machining processes* / I.D. Marinescu, W.B. Rowe, B. Dimitrov, I. Inasaki. – Publ. by Brent Beckley, Inc., Cover Art, 2004. – 764 p.
9. *Malkin, S. Grinding technology. Theory and applications of machining with abrasives. Second edition* / S. Malkin, C. Guo. – Publ. by Industrial press, 2008. – 320 p.
10. Аскалонова, Т.А. Обеспечение качества при абразивной обработке: вопросы теории и практики: моногр. / Т.А. Аскалонова, А.М. Иконников, С.Л. Леонов, Ю.К. Новоселов и др. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 219 с.
11. *Bogutsky, V. Evaluation of the effect of changing the geometry of the abrasive grains of the grinding wheel on the characteristics of the roughness of the grinded surface* / V. Bogutsky, L. Shron, E. Yagyaev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 709. DOI:10.1088/1757-899X/709/4/044117.
12. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
13. Медведев, А.С. Разработка САУ процессом тонкого шлифования на координатно-шлифовальном станке / А.С. Медведев // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. – 2007. – № 2 (20). – С. 147–152.
14. Penghui, L. *Automatic control system of grinding process* / L. Penghui, W. Jianmin // *Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2011*. – 2011. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021045.
15. Богуцкий, В.Б. Структура системы адаптивного регулирования процесса врезного шлифования по нормальной силе / В.Б. Богуцкий // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 58–64.
16. Тверской, М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
17. Петраков, Ю.В. Теория автоматического управления технологическими системами: учебн. пособие / Ю.В. Петраков, О.И. Драчев. – М.: Машиностроение, 2008. – 336 с.
18. Долгин, В.П. Автоматическое управление техническими и технологическими системами и объектами. Численные методы анализа и синтеза систем и объектов / В.П. Долгин. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – 320с.
19. *Designing optimal automatic cycles of round grinding based on the synthesis of digital twin technologies and dynamic programming method* / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar, D.V. Ardashev // *Mechanical Sciences*. – 2019. – Vol. 10. – P. 331–341. – <https://doi.org/10.5194/ms-10-331-2019>.
20. Новоселов, Ю.К. Обеспечение стабильности точности деталей при шлифовании / Ю.К. Новоселов, Е.Ю. Татаркин; под ред. А.В. Королева. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1988. – 128 с.
21. *Leonesio, M. Design criteria for grinding machine dynamic stability* / M. Leonesio, G. Bianchi, N.L. Cau // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 78. – P. 382–387. DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.070.
22. *Comparative stability analysis of chatter in grinding process* / M. Stegić, N. Vranković, M. Rastija et al. // *Advances in Mechanism and Machine Science. Proceedings of the 15th IFToMM*. – 2019. – P. 4025–4032.
23. Самарский, А.А. Теория разностных схем: учебное пособие / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1989. – 616 с.

24. Зубов, И.В. *Методы анализа динамики управляемых систем* / И.В. Зубов. – М.: Физматлит, 2003. – 224 с.

Богущий Владимир Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, bogutskivb@yandex.ru.

Шрон Леонид Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, shronlb@mail.ru.

Поступила в редакцию 13 апреля 2020 г.

DOI: 10.14529/engin200203

SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR DEPTH OF CUTTING OF THE ROUND GRINDING MACHINE

V.B. Bogutsky, bogutskivb@yandex.ru,

L.B. Shron, shronlb@mail.ru

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

It is shown that the introduction of CNC grinding machines requires a constant assessment of the state of the technological system taking into account the dynamics of the process based on automatic control of the machining process. In this regard, the analysis of the parameters of the technological process and its control, for example, by the depth of cutting, will ensure its stability and the desired quality of the products. For the proposed layout of the automatic control system for the machining process, has been developed a mathematical model, presented by a description of its links in operator form and taking into account the dynamics of the grinding process. For the formation feedback loop, it is proposed to use a difference recursive scheme. To simplify the description of the input effect, if necessary, calculate the response to an arbitrary waveform (for example, noise exposure), it is necessary to use numerical methods. In this case, there is no need to switch to images, which simplifies the algorithm for solving the problem. The introduction of feedback based on the obtained transfer function can be described in Laplace images, which are easily calculated as reactions to standard influence. Thus, by the transfer function of the system, you can immediately get a solution in the time domain for an input signal of arbitrary shape given in any form (analytically or tabular).

Keywords: grinding, the treatment process, the dynamics of the process, automatic control system, synthesis.

References

1. Zhong Z.W., Venkatesh V.C. Recent Developments in Grinding of Advanced Materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 41 (5), pp. 468–480. DOI: 10.1007/s00170-008-1496-3.
2. Hou Y., Li Ch., Zhou Y. Applications of High-Efficiency Abrasive Process with CBN Grinding Wheel. *Engineering*, 2010, vol. 2, pp. 184–189
3. Werner P.G. Recent Advances in Grinding. *Advances in Metal Processing. Springer Publ.* – 1981, vol. 25, pp. 229–255.
4. Hashimoto F., Gallego I., Oliveira João F.G., Barrenetxea D. Advances in Centerless Grinding Technology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2012, vol. 61(2), pp. 747–770.

5. Ding W., Linke B., Zhu Y. et al. Review on Monolayer CBN Superabrasive Wheels for Grinding Metallic Materials. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, vol. 30, no. 1, pp. 109–134.
6. Oliveira J.F.G., Silva E.J., Guo C., Hashimoto F. Industrial Challenges in Grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2009. vol. 58, iss. 2, pp. 663–680.
7. Novikov F.V. (ed), YAKimov A.V. (ed) *Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Teoriya abrazivnoj i almazno-abrazivnoj obrabotki materialov* [Physicomathematical theory of materials processing and engineering technology. T. 4. The theory of abrasive and diamond-abrasive processing of materials.]. Odessa, ONPU Publ., 2002. 802 p.
8. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I. Tribology of Abrasive Machining Processes. *Publ. by Brent Beckley, Inc.*, 2004. 764 p.
9. Malkin S., Guo C. Grinding Technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Second edition. *Industrial press Publ.*, 2008. 320 p.
10. Askalonova T.A., Ikonnikov A.M., Leonov S.L., Novoselov Yu.K. and all. *Obespechenie kachestva pri abrazivnoj obrabotke: voprosy teorii i praktiki: monogr.* [Quality assurance in abrasive processing: theory and practice: monograph]. Barnaul. AltGTU Publ., 2016. 219 p.
11. Bogutsky V., Shron L., Yagyaev E. Evaluation of the Effect of Changing the Geometry of the Abrasive Grains of the Grinding Wheel on the Characteristics of the Roughness of the Grinded Surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709. DOI:10.1088/1757-899X/709/4/044117.
12. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke* [Dynamics of forming surfaces during abrasive machining]. Sevastopol, SevNTU Publ., 2012. 304 p.
13. Medvedev A.S. [Development of an ACS for the Fine Grinding Process on a Coordinate Grinding Machine]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2007, no. 2 (20), pp. 147–152. (in Russ.)
14. Penghui L., Jianmin W. Automatic Control System of Grinding Process. *Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2011*. 2011. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021045.
15. Bogutsky V.B. [The structure of the adaptive control system of the mortise grinding process by normal force]. *Journal of Science and Education of North–West Russia*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 58–64. (in Russ.)
16. Tverskoj M.M. *Avtomaticheskoe upravlenie rezhimami obrabotki detalej na stankah* [Automatic control of the processing modes of parts on machines] Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 208 p.
17. Petrakov Yu.V., Drachev O.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi sistemami: uchebn. posobie* [The theory of automatic control of technological systems: textbook.]. Moscow. Mashinostroenie Publ, 2008. 336 p.
18. Dolgin V.P. *Avtomaticheskoe upravlenie tekhnicheskimi i tekhnologicheskimi sistemami i ob"ektami. Chislennye metody analiza i sinteza sistem i ob"ektov* [Automatic control of technical and technological systems and facilities. Numerical methods for the analysis and synthesis of systems and objects]. Sevastopol, SevNTU Publ., 2003. 320 p.
19. Pereverzev P.P., Akintseva A.V., Alsigar M.K., Ardashev D.V. Designing Optimal Automatic Cycles of Round Grinding Based on the Synthesis of Digital Twin Technologies and Dynamic Programming Method. *Mechanical Sciences*, 2019, vol. 10, pp. 331–341. <https://doi.org/10.5194/ms-10-331-2019>.
20. Novoselov Yu.K., Tatarkin E.Yu., Koroleva A.V. (ed) *Obespechenie stabil'nosti tochnosti detalej pri shlifovanii* [Ensuring stability of accuracy of parts during grinding]. Saratov. univ. Publ., 1988, 128 p.
21. Leonesio M., Bianchi G., Cau N.L. Design Criteria for Grinding Machine Dynamic Stability. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 78, pp. 382–387. DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.070.
22. Stegić M., Vranković N., Rastija M., Goja Ž., Barjašić D. Comparative Stability Analysis of Chatter in Grinding Process. *Advances in Mechanism and Machine Science. Proceedings of the 15th IFToMM*, 2019, pp. 4025–4032.
23. Samarskij A.A. *Teoriya raznostnyh skhem: uchebn. posobie* [Theory of difference schemes: textbook.]. Moscow. Nauka Publ., 1989. 616 p.

24. Zubov I.V. *Metody analiza dinamiki upravlyaemyh system* [Methods of analysis of the dynamics of controlled systems. Moscow. Fizmatlit, 2003. 224 p.

Received 13 April 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Богущий, В.Б. Синтез системы автоматического управления глубиной резания круглошлифовального станка / В.Б. Богущий, Л.Б. Шрон // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 27–36. DOI: 10.14529/engin200203

FOR CITATION

Bogutsky V.B., Shron L.B. Synthesis of Automatic Control System for Depth of Cutting of the Round Grinding Machine. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 27–36. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200203
