

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА

Игнатьева А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А.

*Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина,
г.Саратов*

Ключевые слова: динамическая система, шлифовальный станок, устойчивость, передаточная функция.

Аннотация. Рассматриваются вопросы моделирования динамической системы шлифовального станка для оценки ее устойчивости с учетом износа абразивного инструмента.

MODEL FOR SUSTAINABILITY ASSESSMENT DYNAMIC MACHINE SYSTEM

Ignatyev A.A., Dobryakov V.A., Ignatyev S.A.

Saratov state technical University named after Yuri Gagarin, Saratov

Keywords: dynamic system, grinding machine, stability, transfer function.

Abstract. Issues of simulating the dynamic system of the grinding machine are considered in order to assess its stability taking into account wear of the abrasive tool.

Устойчивость динамической системы (ДС) шлифовального станка является важной характеристикой при назначении параметров режима обработки [1, 2]. Запас устойчивости обладает высокой эффективностью для оценки динамического качества станков, что нашло подтверждение в ряде исследований, выполненных в СГТУ имени Гагарина Ю.А. [3,4]. Для оценки устойчивости ДС следует построить ее аналитическую модель на основе методов теории автоматического управления, причем необходимо рассмотреть два случая: модель ДС без учета износа инструмента и модель, учитывающую износ инструмента.

Модель ДС шлифовального станка без учета износа абразивного инструмента представлена в виде структурной схемы при врезном внутреннем шлифовании, где за основу принята схема, предложенная В.Н. Михелькевичем [2]. В схему внесен ряд изменений (рис. 1): не учитывается влияние износа круга (так как осуществляется регулярная правка круга), вместо постоянного коэффициента резания K_p в схему, согласно В.А.Кудинову [1], введена передаточная функция процесса резания

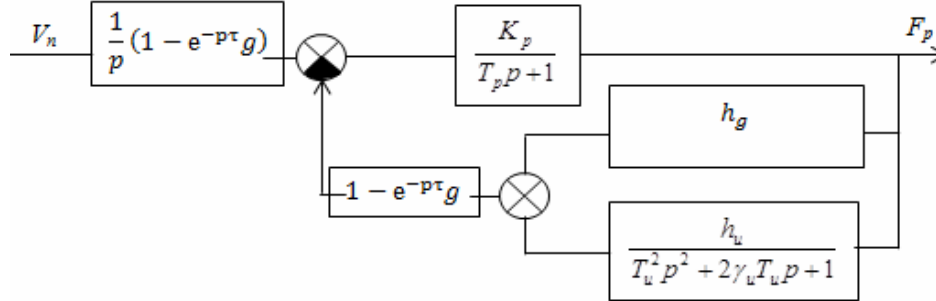
$$W(p) = \frac{K_p}{T_p p + 1}, \quad (1)$$

где K_p – коэффициент резания, T_p – постоянная времени стружкообразования.

Кроме того, упругая система рассматривается в виде параллельного соединения двух звеньев, соответствующих ШУ инструмента и ШУ детали, с передаточными функциями

$$\begin{cases} W_g(p) = h_g, \\ W_u(p) = \frac{h_u}{T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1}, \end{cases} \quad (2)$$

то есть одно звено (ШУ детали) – усилительное, а второе звено (ШУ инструмента) – колебательное. Это справедливо, если жесткость первого звена значительно больше жесткости второго.



V_n – подача инструмента, F_p – сила резания, τ_g – время одного оборота детали, h_g, h_u, T_u, γ_u – коэффициенты, описывающие ШУ детали и ШУ инструмент

Рис. 1. Структурная схема динамической системы станка при врезном шлифовании

При указанных условиях передаточная функция ДС $W(p)$ станка будет иметь следующий вид:

$$W(p) = \frac{\frac{1}{p}(1 - e^{-p\tau_g}) \frac{K_p}{T_p p + 1}}{1 + \frac{K_p}{T_p p + 1}(1 - e^{-p\tau_g}) \left(h_g + \frac{h_u}{T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1} \right)}. \quad (3)$$

После алгебраических преобразований (с учетом разложения экспоненты, в ряд $(1 - e^{-p\tau_g}) = p\tau_g$, имеем

$$W(p) = \frac{K_p \tau_g (T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1)}{(T_p p + 1)(T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1) + K_p \tau_g p [h_u + h_g (T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1)]}. \quad (4)$$

Характеристическое уравнение ДС, полученное из знаменателя передаточной функции (5), равно

$$(T_p T_u^2 + K_p \tau_g h_g T_u^2) p^3 + (2T_p \gamma_u T_u + T_u^2 + 2K_p \tau_g h_g \gamma_u T_u) p^2 + (T_p + K_p \tau_g h_u + 2\gamma_u T_u + K_p \tau_g h_g) p + 1 = 0. \quad (5)$$

Имеем уравнение 3-й степени, следовательно, для устойчивости ДС по критерию Гурвица необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты уравнения (5) были положительны, а произведение средних коэффициентов было больше произведения крайних коэффициентов [7]. Воспользовавшись значениями параметров $T_p, T_u, K_p, \tau_g, h_g, h_u, \gamma_u$, приведенными для аналогичных шлифовальных станков в работах Кудинова и Михелькевича, получаем, что рассматриваемая ДС устойчива.

Для построения модели ДС с учетом износа шлифовального круга рассмотрим структурную схему ДС станка при врезном шлифовании (рис. 2),

опираясь на схему, составленную В.Н. Михелькевичем [2], но с учетом двух условий: коэффициент износа круга $K_{ук}$ является переменной величиной (при тонком шлифовании без правки круга согласно исследованиям Г.Б. Лурье [5] $K_{ук}$ достаточно долго сохраняет почти постоянное значение, а затем падает до нуля); коэффициент резания K_p изменяет свое значение по мере износа круга, так что в структурной схеме вместо него следует использовать передаточную функцию

$$W_{рез}(p) = \frac{K}{p - \lambda}, \quad (6)$$

где $K=1/\tau_g K_0$; $K_p K_{рез} \tau_g = 1$ [1,2]; $K_{рез} = K_0 e^{-\lambda t}$ [5];
 $K_{рез}$ – коэффициент, характеризующих режущую способность круга,
 K_0 – режущая способность круга после правки.

Указанные условия были частично учтены в модели ДС, приведенной в [6].
 Передаточная функция ДС в этом случае имеет вид:

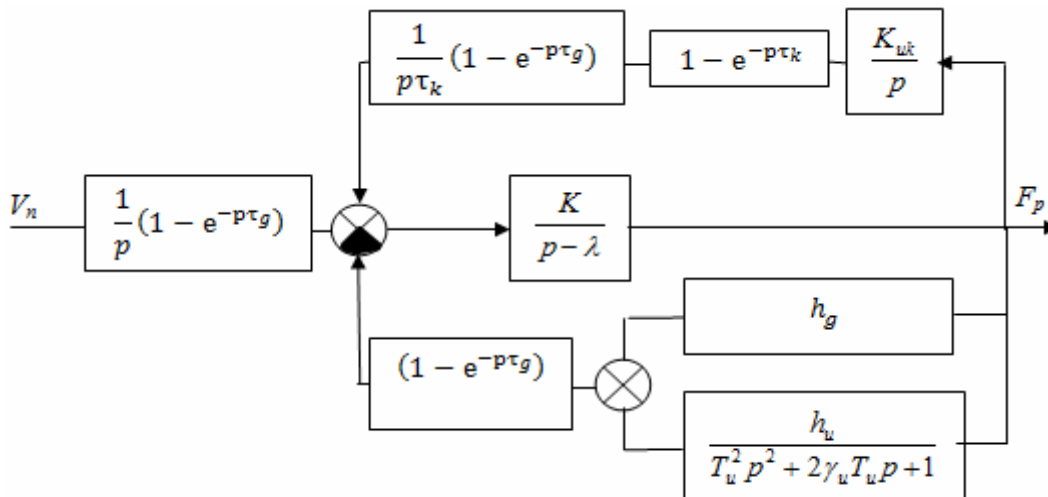
$$W(p) = \frac{\frac{K}{(p - \lambda)p} (1 - e^{-p\tau_g})}{1 + \frac{K}{(p - \lambda)p} (1 - e^{-p\tau_g}) \left[\left(h_g + \frac{h_u}{T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1} \right) p + \frac{K_{ук}}{p\tau_k} (1 - e^{-p\tau_k}) \right]}. \quad (7)$$

После алгебраических преобразований (с учетом разложения экспонент в ряд ($e^{-p\tau_g} = 1 - p\tau_g$, $e^{-p\tau_k} = 1 - p\tau_k$)), имеем

$$W(p) = \frac{K\tau_g (T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1)}{(p - \lambda)(T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1) + K\tau_g (h_g p + K_{ук})(T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1)}. \quad (8)$$

Характеристическое уравнение ДС в этом случае записывается:

$$(T_u^2 + K\tau_g h_g T_u^2) p^3 + (2\gamma_u T_u + T_u^2 \lambda + 2K\tau_g h_g \gamma_u T_u + K\tau_g K_{ук} T_u^2) p^2 + (K\tau_g h_g - 2\gamma_u T_u \lambda + 2K\tau_g K_{ук} \gamma_u T_u) p + (K\tau_g K_{ук} - \lambda) = 0. \quad (9)$$



V_n – подача инструмента, F_p – сила резания, τ_g – время одного оборота детали,
 h_g, h_u, T_u, γ_u – коэффициенты, описывающие ШУ детали и ШУ инструмента,
 τ_k – время одного оборота круга

Рис. 2. Структурная схема динамической системы станка при врезном шлифовании с учетом износа круга и изменения его режущей способности

Имеем уравнение 3-й степени. При вычислении значений коэффициентов получено, что все они положительны, а произведения средних коэффициентов больше произведения крайних, то есть в соответствии с критерием Гурвица ДС устойчива в начальном состоянии. По мере износа круга коэффициент K_{uk} , как указано выше, стремится к нулю, следовательно, коэффициент характеристического уравнения $(K\tau_g K_{uk} - \lambda)$ становится отрицательным, то есть ДС становится неустойчивой, что согласуется с выводами [6].

Таким образом, из анализа данной модели следует, что в случае тонкого шлифования без правки круга, когда снимаем припуск не более 100 мкм [5], запас устойчивости ДС по мере износа круга снижается и система переходит в неустойчивое состояние, сопровождаемое ростом вибраций и резким снижением качества обработки, что соответствует известным результатам исследований процесса шлифования [6]. В этом случае мерой качества процессов в ДС станка при резании является запас устойчивости, что согласуется с известными положениями ТАУ [7] и работ по динамике станков [1], что обосновывает его выбор в качестве информативного параметра.

Список литературы

1. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
2. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М.: Машиностроение, 1975. 304 с.
3. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков. Ч. 1 / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов. Саратов: Сарат. политехн. ин-т, 1992. 160 с.
4. Игнатьев А.А., Каракозова В.А., Игнатьев С.А. Стохастические методы в идентификации станков. Саратов: СГТУ, 2013. 124 с.
5. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 176 с.
6. Козлов Д.В., Игнатьев А.А. Экспериментальное исследование частоты правил шлифовального круга // Вестник СГТУ, 2011. № 21 (56). С. 80-84.
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

Сведения об авторах:

Игнатьев Александр Анатольевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Технология и системы управления в машиностроении" (ТСУ), СГТУ, г.Саратов;
Добряков Владимир Анатольевич – к.т.н., доцент кафедры ТСУ, СГТУ, г.Саратов;
Игнатьев Станислав Александрович – д.т.н., профессор кафедры ТСУ, СГТУ, г.Саратов.