

*к.т.н. Закутний А.С.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина, zakutnyu@gmail.com)*

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ И НЕОБХОДИМОСТЬ ФУНКЦИИ КОРРЕКЦИИ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*Наведені результати теоретичних досліджень, отримані залежності, які описують максимальне перерегулювання від стрибкоподібної зміни відносного коефіцієнта передачі процесу різання сортового прокату відрізною фрезею.*

**Ключові слова:** *система стабілізацій потужності різання, пила гарячого різання.*

*Приведены результаты теоретических исследований, получены зависимости, описывающие максимальное перерегулирование от скачкообразного изменения относительного коэффициента передачи процесса резания сортового проката отрезной фрезой.*

**Ключевые слова:** *система стабилизации мощности резания, пила горячего резания.*

В процессе разрезания металла пилой горячей резки сами параметры процесса резания могут изменяться. В частности при порезке сложных профилей (круг, рельс, уголок, швеллер, СВП) значительно изменяется длина дуги контакта диска с разрезаемой заготовкой, что приводит к соответствующему изменению коэффициента передачи процесса резания  $K_p$ . Как правило, для повышения производительности, применяют системы стабилизации мощности резания. В данных системах автоматического управления увеличение коэффициента передачи процесса резания может привести к значительному максимальному перерегулированию, что приводит к выходу из строя двигателя главного привода пилы горячей резки и простоям стана [1-3]. Анализ изменения коэффициента передачи процесса резания позволяет избежать аварийных режимов работы пилы горячей резки. Также это необходимо для конструирования функционала качества при синтезе нейросетевой системы автоматического управления.

Также, как и в случае выбора оптимальной скорости подачи при врезании [4], рассмотрим идеальный переходный процесс в безинерци-

онной АСУ с теми же допущениями. Структурная схема процесса резания представлена на рисунке 1 [1].

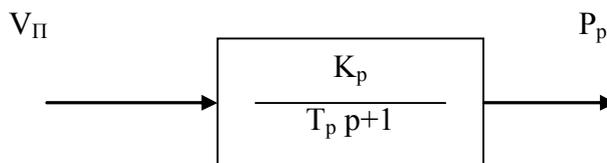


Рисунок 1 - Структурная схема процесса резания

На рисунке 1 введены следующие обозначения:

$P_p$  – мощность резания, кВт;

$V_{\Pi}$  – скорость подачи, мм/с;

$K_p$  – коэффициент передачи процесса резания, кВт·с / мм;

$T_p$  – постоянная времени процесса резания, с.

Требования, предъявляемые к системе автоматического управления, имеют вид (1), (2), (3) и (4)

$$P_p = P_{p \text{ CT}} = \text{const} , \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} \leq 40\% , \quad (2)$$

где  $P_{p \text{ CT}}$  – стабилизируемая мощность резания, кВт;

$\sigma_{\max}$  – максимальное перерегулирование, %.

На ускорение подачи необходимо наложить ограничение

$$a = \frac{dV_{\Pi}}{dt} \leq \frac{dV_{\Pi \max}}{dt} \quad \text{или} \quad a \leq a_{\max} . \quad (3)$$

Это вызвано механической прочностью механизма пилы горячей резки либо ограничением, накладываемым самим электроприводом:

$$a = \frac{dV_{\Pi}}{dt} = K_{МП} \frac{d\omega}{dt} = \frac{K_{МП}}{K_{Д} J} (I - I_C) , \quad (4)$$

где  $K_{МП}$  – коэффициент механизма подачи, мм;

$J$  – приведенный суммарный момент инерции, кг м<sup>2</sup>;

$K_{Д}$  – передаточный коэффициент двигателя, рад/В с;

$(I - I_C)$  – динамический ток двигателя, равный разнице тока якоря двигателя и статического тока, А.

При скачкообразном увеличении коэффициента передачи процесса резания наиболее целесообразно с максимально возможным ускорением соответственно уменьшить скорость подачи, что необходимо для

стабилизации мощности резания  $P_{PCT}$  на заданном уровне. Таким образом скорость подачи будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} V_{II}(t) &= at + V_{II0}, & \text{при } V_{II} > V_{IIK}; \\ V_{II}(t) &= V_{IIK}, & \text{при } V_{II} = V_{IIK}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $V_{II0}$  – подача в начальный момент резания;

$V_{IIK}$  – установившееся значение подачи в конце переходного процесса.

Основное отличие переходного процесса при увеличении  $K_P$  в процессе резания от случая при врезании пильного диска в обрабатываемую деталь заключается в определении начальных условий:

$$\left. \begin{aligned} V_{II0} &= V_{IIH}; \\ P_{PO} &= P_{PCT}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $V_{IIH}$  – установившееся, номинальное значение скорости подачи, соответствующее номинальному коэффициенту передачи процесса резания  $K_{PH}$ ;

$P_{PO}$  – мощность резания в начальный момент резания.

В связи с этим решение дифференциального уравнения [4]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_P(t)}{dt} + \frac{P_P(t)}{T_P} &= \frac{K_P}{T_P}(at + V_{II0}), & \text{при } V_{II} > V_{IIK}; \\ \frac{dP_P(t)}{dt} + \frac{P_P(t)}{T_P} &= \frac{K_P}{T_P}V_{IIK}, & \text{при } V_{II} = V_{IIK}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

будет иметь другой вид:

$$\left. \begin{aligned} P_P(t) &= [P_{PCT} + K_P(aT_P - V_{II0})]e^{-\frac{t}{T_P}} + K_P V_{II0} + K_P a(t - T_P), \\ &\text{при } V_{II} \geq V_{IIK}; \\ P_P(t) &= (P_{PKOH1} - P_{PCT})e^{-\frac{t}{T_P}} + P_{PCT}, \\ &\text{при } V_{II} = V_{IIK}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Учитывая, что:

$$V_{\Pi O} = V_{\Pi H} = \frac{P_{PCT}}{K_{PH}}, \quad (9)$$

$$K_P = K_{PH} K_P^*, \quad (10)$$

перепишем уравнение (8)

$$\left. \begin{aligned} P_P(t) &= \left[ P_{PCT} + K_{PH} K_P^* \left( aT_P - \frac{P_{PCT}}{K_{PH}} \right) \right] e^{-\frac{t}{T_P}} + \\ &\quad + K_P^* P_{PCT} + K_{PH} K_P^* a(t - T_P), \quad \text{при } V_{\Pi} \geq V_{\Pi K}; \\ P_P(t) &= (P_{PKOH1} - P_{PCT}) e^{-\frac{t}{T_P}} + P_{PCT}, \quad \text{при } V_{\Pi} = V_{\Pi K}. \end{aligned} \right\} (11)$$

где  $K_{PH}$  – номинальный коэффициент передачи процесса резания,  
 $K_P^*$  – относительный коэффициент передачи процесса резания.

Далее, рассуждая аналогично случаю при врезании [4], сначала найдем производную мощности резания на первом участке переходного процесса:

$$P_P'(t) = K_{PH} K_P^* a - \frac{1}{T_P} \left[ P_{PCT} + K_{PH} K_P^* \left( aT_P - \frac{P_{PCT}}{K_{PH}} \right) \right] e^{-\frac{t}{T_P}}. \quad (12)$$

Затем, приравняв ее к нулю, найдем время, при котором мощность достигает максимального значения:

$$t_{\max} = T_P \ln \left[ \frac{P_{PCT} + K_{PH} K_P^* \left( aT_P - \frac{P_{PCT}}{K_{PH}} \right)}{K_{PH} K_P^* aT_P} \right]. \quad (13)$$

Подставляя это выражение в формулу (11), найдем максимальную мощность за все время переходного процесса:

$$P_{P_{\max}} = K_P^* \left[ P_{P_{CT}} + K_{PH} aT_P \ln \left( \frac{P_{P_{CT}} + K_{PH} K_P^* \left( aT_P - \frac{P_{P_{CT}}}{K_{PH}} \right)}{K_{PH} K_P^* aT_P} \right) \right]. \quad (14)$$

Для более наглядного представления параметров переходного процесса определим максимальное перерегулирование в системе автоматического управления:

$$\sigma_{\max} = \left[ K_P^* \left[ 1 + \frac{K_{PH} aT_P}{P_{P_{CT}}} \ln \left( \frac{P_{P_{CT}} + K_{PH} K_P^* \left( aT_P - \frac{P_{P_{CT}}}{K_{PH}} \right)}{K_{PH} K_P^* aT_P} \right) \right] - 1 \right] 100\% . \quad (15)$$

На рисунке 2 приведен график зависимости максимального перерегулирования от относительного коэффициента передачи процесса резания  $\sigma_{\max}(K_P^*)$  со следующими параметрами:  $K_{PH}=5.71$  кВт·с/мм,  $T_P=0.061$ с,  $a = -900$  мм/с<sup>2</sup>,  $P_{P_{CT}}=200$  кВт,  $K_P^*=(1\div 5)$ .

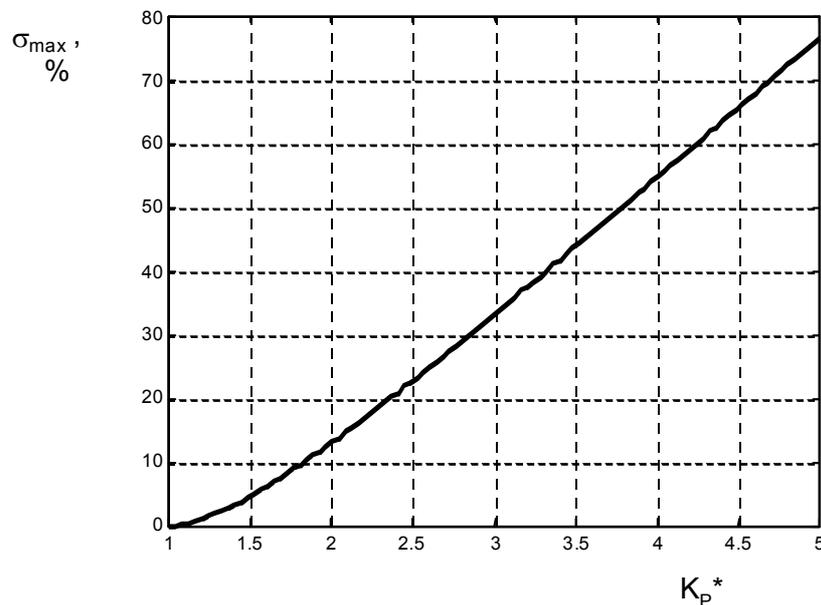


Рисунок 2 - График зависимости  $\sigma_{\max}(K_P^*)$

Как видно на приведенном выше графике с ростом относительного коэффициента резания возрастает максимальное перерегулирование. Причем характер этой зависимости носит практически линейный характер. Уже при скачкообразном увеличении коэффициента передачи про-

цесса резания в 3.31 раза максимальное перерегулирование достигает 40%. Данный переходный процесс представлен на рисунке 3.

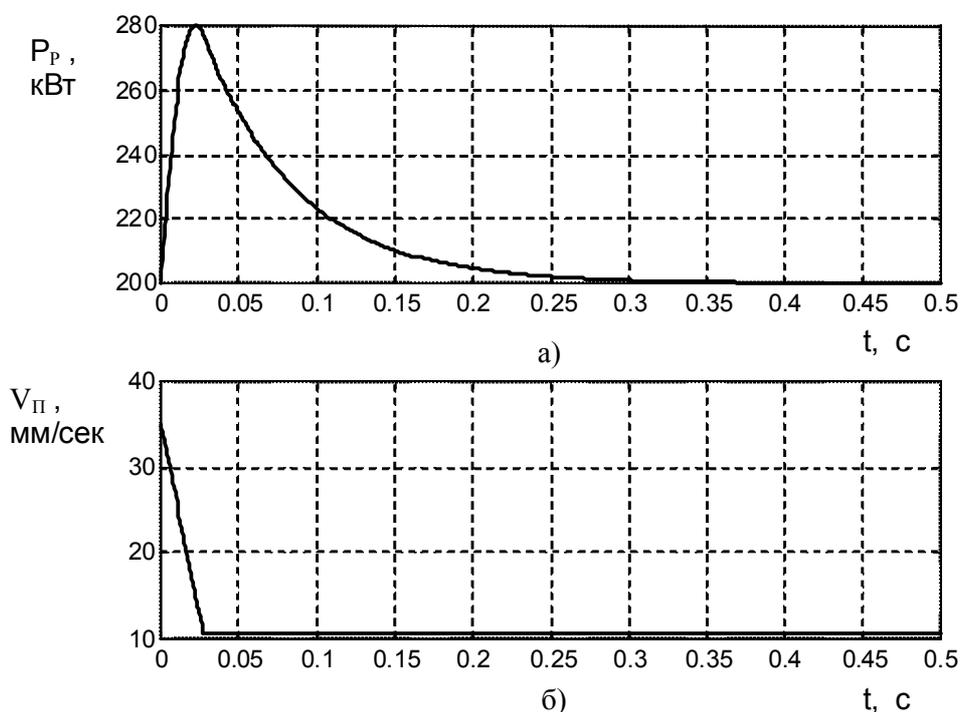


Рисунок 3 - Графики переходных процессов при  $K_p^* = 3.31$

Проведенный анализ носит ориентировочный характер, так как возмущающее воздействие (изменение коэффициента резания) и управляющее воздействие происходят одновременно. В действительности, системе автоматического управления для расчета управляющего воздействия необходимо дополнительное время, величина которого в основном определяется суммой всех инерционностей в канале управления. Данное обстоятельство необходимо учитывать при синтезе реальных систем автоматического управления. Несмотря на данный недостаток, данная методика позволяет определить предельные динамические характеристики автоматических систем в случае значительных возмущающих воздействий, объект управления которых описывается инерционным звеном.

Кроме этого видно, что при определенном скачкообразном увеличении коэффициента резания, система стабилизации мощности резания не сможет обеспечить требуемое максимальное перерегулирование по мощности. Поэтому, для уменьшения погрешности геометрической формы поверхности обрабатываемой детали, а также предотвращения возможной поломки механизма, при значительном перерегулировании по мощности резания, предлагается установить бесконтактный датчик

глубины резания, расположенный на небольшом расстоянии по ходу подачи режущего инструмента. Данная информация с датчика позволит заранее снизить скорость подачи и таким образом уменьшить величину максимального перерегулирования. В связи с этим необходимо в программном обеспечении системы числового программного управления ввести функцию коррекции ограничения скорости подачи, при прогнозируемом значительном увеличении коэффициента резания, на уровне программирования параметров станка. Это даст возможность увеличить диапазон изменения коэффициента резания в системе стабилизации мощности резания и таким образом увеличить производительность, улучшить качество металлообработки и защитить механизм от поломок.

### **Выводы**

1. Дан анализ влияния изменения коэффициента передачи процесса резания на максимальное перерегулирование. Установлено, что в системе управления скачкообразный рост относительного коэффициента резания приводит к практически пропорциональному увеличению максимального перерегулирования. Получены аналитические выражения, описывающие данную зависимость.

2. Обосновано применение бесконтактного датчика глубины резания, установленного на небольшом расстоянии по ходу подачи режущего инструмента. Это позволит заранее снизить скорость подачи и таким образом уменьшить величину максимального перерегулирования.

3. Рекомендуются ввести функцию коррекции ограничения скорости подачи в программное обеспечение системы числового программного управления, на уровне программирования параметров станка.

### **Библиографический список**

1. Шапарев Н.К. Расчет автоматизированных электроприводов систем управления металлообработкой: учеб. пособие. / Н.К. Шапарев. - 2-е изд., перераб. и доп. - К. : Лыбидь, 1992. - 272 с.

2. Закутний А.С. Анализ систем автоматического управления металлообработкой / А.С. Закутний, В.С. Коцюбинский, Р.А. Романец // Збірник доповідей НТК присвячений 100-річчю від дня народження вченого-електромеханіка Тихона Губенка. - Львів-Славськ: ДУ "Львівська політехніка", 1996. - С. 82-83.

3. Стабилизация мощности резания в системах с ограниченным ускорением / Р.А. Романец, А.Г. Хмелев, В.С. Коцюбинский, А.С. Закутний // Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник "Електромашинобудування та електроустаткування", Випуск 48. - Одеса: ОДПУ, 1996. - С. 27-30.

4. Закутний А. С. Выбор оптимальной скорости подачи при врезании / А. С. Закутний // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Зб. наук. пр. – Харків: ХДПУ, 1999. - Вип. 62. – С. 37-43.

*Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Заблоским Н.Н.*