

## НЕЧІТКЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНТУРА СТАБІЛІЗАЦІЇ ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ ЗБУРЕНЬ КОЛИВАЛЬНОГО ХАРАКТЕРУ

**А.В. Торопов**, канд.техн.наук, **А.В. Босак\***, канд.техн.наук  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. E-mail: [alla\\_koz@ukr.net](mailto:alla_koz@ukr.net)

*Вирішено задачу розробки нечіткого регулятора для системи стабілізації тангенціальної складової зусилля різання, що дає змогу підвищити продуктивність обладнання та надійність металообробних верстатів. Розроблено структуру нечіткого регулятора з вхідним сигналом заданого значення стабілізованої складової зусилля різання на підставі аналізу структури нечітких регуляторів з використанням різних методів виведення вихідного сигналу. Для врахування впливу зміни припуску під час обробки деталі запропоновано використовувати коливальну ланку, на вхід якої надходить послідовність імпульсних функцій. Проведено дослідження динамічних характеристик системи стабілізації зусилля методом цифрового моделювання з використанням прикладного пакета MATLAB із врахуванням гармонічних коливань припуску та нелінійної залежності зусилля різання від подачі. Проаналізовано отримані графіки перехідних процесів за тангенціальною складовою зусилля різання. Показано можливість практичної реалізації системи стабілізації зусилля різання у сучасних верстатах із напівпровідниковими перетворювачами та мікропроцесорним блоком керування. Бібл. 10, рис. 6, табл. 1.*

**Ключові слова:** система стабілізації зусилля різання, нечіткий регулятор, гармонічний характер збурень, інерційність процесу різання, моделювання.

**Вступ.** У сучасних системах керування технологічними параметрами процесу фрезерування деталей на металорізальних верстатах застосовуються різноманітні за структурою регулятори [1, 2]. В основному в таких системах використовуються ПД-регулятори, що забезпечують нульову статичну помилку за вихідною координатою [3]. Однак використання таких регуляторів є доцільним тільки за постійного характеру збурюючого впливу. У разі виникнення періодичних збурень застосування ПД-регуляторів призводить до погіршення характеристик системи керування. Для зменшення динамічної помилки регулювання під час фрезерування виникає необхідність використання алгоритмів нечіткого керування.

**Мета** даного дослідження полягає у розробці структури нечіткого регулятора для контура стабілізації зусилля різання металорізального верстата за наявності збурень коливального характеру, що забезпечить підвищення якості обробки деталей та збільшить продуктивність обладнання в цілому.

**Результати дослідження.** Для керування режимами роботи металорізальних верстатів сьогодні знаходять широке застосування програмовані контролери, що дають змогу реалізувати нечіткі системи керування [4, 5]. Доцільно використовувати можливості цих контролерів і для керування технологічними параметрами процесу фрезерування. Застосування нечіткого регулятора, що реалізується програмно, є доцільним, оскільки під час технологічного процесу зняття стружки під дією збурень змінюється коефіцієнт підсилення за подачею системи. У роботі [6] була запропонована реалізація нечіткого регулятора для слідкуючого приводу в програмному середовищі Codesys v.3.5. Проте питання застосування нечіткого регулятора для керування технологічним процесом металообробки у разі стабілізації зусилля різання за наявності гармонічних коливань припуску не досліджені.

Визначимо основні чинники, що впливають на зміну зусилля різання під час обробки деталей на металорізальних верстатах.

Відомо, що за низьких частот обертання шпинделя металорізального верстата зміна зусилля різання під час обробки деталей інерційна через запізнення набігання стружки на різець по відношенню до переміщення супорта. Для описання динамічних властивостей цього процесу та аналізу цього впливу на можливі коливання зусилля в математичних моделях використовується аперіодична ланка першого порядку, запропонована у [7]. Також на цих частотах обертання суттєвими стають коливання припуску деталі внаслідок її ексцентриситету, шорсткості її поверхні, неточності закріплення в кулачках токарного патрона. Шорсткість заготовки має випадковий характер із характеристиками «кольорового» шуму, в той час як ексцентриситет заготовки і неточність її закріплення мають ре-

гулярний характер, оскільки однозначно визначаються частотою обертання і поточним кутом повороту патрона [8]. У різних публікаціях [8, 9] збурення, що діють у контурі стабілізації зусилля різання, представлені сумою гармонійних складових різної частоти. Збурюючий вплив може бути описаний також диференціальним рівнянням другого порядку, запропонованим у роботі [3]

$$t_p'' + 2\xi\omega_u t_p' + \omega_u^2 t_p = \delta(t), \quad (1)$$

де  $\omega_u$  – частота хвильового збурення;  $\xi$  – показник коливальності ланки. У нашому випадку  $\omega_u$  – частота обертання вала електродвигуна приводу верстата;  $\delta(t)$  – послідовність невідомих імпульсних функцій, що визначаються періодом виникнення збурюючих впливів,  $t_p$  – припуск різання.

Передатна функція, що описує динамічні властивості збурення, в цьому випадку

$$W_e(p) = t_p(p) / \delta(p) = 1 / (p^2 + 2\xi\omega_u p + \omega_u^2), \quad (2)$$

Параметри цієї передатної функції є змінними для різних режимів обробки деталей. Це призводить до гармонійних коливань припуску під час обробки деталей і гармонійних коливань зусилля різання при сталій подачі [2]. Тому використання лінійних регуляторів, що забезпечують якісне регулювання вихідних величин для систем з параметричними збуреннями, є недоцільним. Для вирішення задачі підвищення продуктивності процесу різання за змінних параметрів контура стабілізації зусилля різання необхідно вирішити задачу розробки структури нечіткого регулятора. Найбільш важливим є отримання аналітичних залежностей вихідних змінних нечіткого регулятора. При цьому якість функціонування нечіткого регулятора характеризують, перш за все, методи виведення (методи Мамдані  $R_M$ , Ларсена  $R_L$  тощо). Порівняльний аналіз 12 методів виведення виконано в контексті нечіткого керування Mizumoto (1988) методом комбінованого моделювання [4]. У результаті досліджень було встановлено, що доцільно використовувати  $R_L$ -метод.

Вхідними сигналами нечіткого регулятора доцільно взяти помилку регулювання  $e(nT)$  (різницю між заданим і поточним значенням стабілізованої складової зусилля різання) та швидкість її зміни  $r(nT) = (e(nT) - e(nT - T)) / T$ . Після масштабування отримаємо

$$K_e \cdot e(nT) = K_e \cdot (U_3(nT) - y(nT)); \quad (3)$$

$$K_r \cdot r(nT) = K_e \cdot ((e(nT) - e(nT - T)) / T), \quad (4)$$

де  $K_e$  і  $K_r$  – коефіцієнти пропорційності похибки  $e$  та її похідної  $r$  відповідно;  $y(nT)$  – зміна вихідного сигналу за час  $nT$ ;  $e(nT - T)$  – приріст вхідного сигналу за період  $T$ ;  $U_3(nT)$  – зміна сигналу завдання за час  $nT$ .

Для приведення вхідного сигналу нечіткого регулятора (помилки або її похідної, які є нечіткими величинами) до потрібного діапазону значень здійснено його масштабування відповідно нечітким множинам рис. 1, а. Функція належності вихідного сигналу нечіткого регулятора, що отримана згідно з вибраним  $R_L$ -методом, представлена на рис. 1, б.

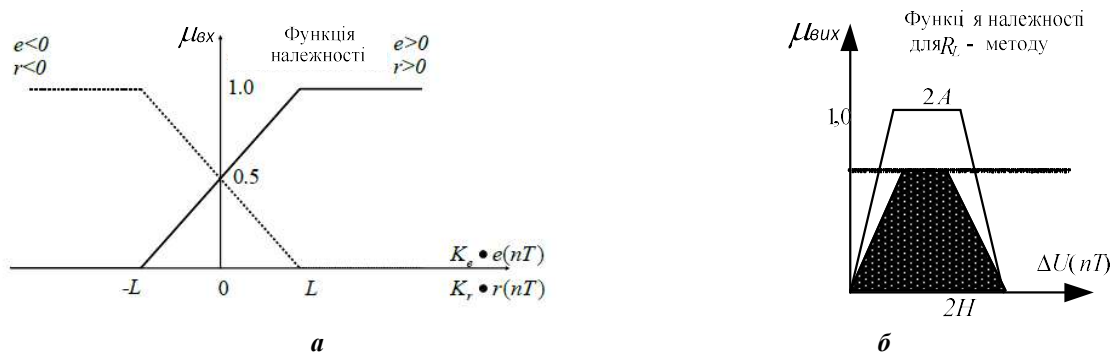


Рис. 1

На рис. 1, а, б наведено такі позначення:  $\mu_{vx}$ ,  $\mu_{vix}$  – функція належності нечітких множин вхідного та вихідного сигналів регулятора відповідно;  $L$  – максимальне значення масштабованої помилки та її похідної;  $2A$  та  $2H$  – верхні та нижні сторони трапеції відповідно;  $\Delta U(nT)$  – вихід нечіт-

кого регулятора. В середині інтервалу  $[-L, L]$  (рис. 1, а) функція належності  $\mu_{\text{вх}}$  збільшується або зменшується лінійно з масштабованою помилкою або її похідною. За межами  $[-L, L]$   $\mu_{\text{вх}}$  набуває значення 0 або 1.

Нечіткі множини вхідних сигналів регулятора для масштабованої позитивної  $\mu_{\text{вх}}^+$  та негативної  $\mu_{\text{вх}}^-$  помилок, а також її позитивної  $\mu_{\text{вх}}^+$  та негативної  $\mu_{\text{вх}}^-$  похідних, представлених на рис. 1, а, описуються наступними функціями належності :

$$\mu_{\text{вх}}^+ = \frac{L + K_e \cdot e(nT)}{2L} \quad \text{та} \quad \mu_{\text{вх}}^- = \frac{L - K_e \cdot e(nT)}{2L}, \quad (5)$$

$$\mu_{\text{вх}}^+ = \frac{L + K_r \cdot r(nT)}{2L} \quad \text{та} \quad \mu_{\text{вх}}^- = \frac{L - K_r \cdot r(nT)}{2L}. \quad (6)$$

Отже, використовуються чотири нечітких правила управління, а саме:

$$\left. \begin{aligned} \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) > 0 \quad \text{та} \quad K_r \cdot r(nT) > 0, \text{ то } \Delta U(nT) > 0; & (r_1) \\ \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) > 0 \quad \text{та} \quad K_r \cdot r(nT) < 0, \text{ то } \Delta U(nT) = 0; & (r_2) \\ \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) < 0 \quad \text{та} \quad K_r \cdot r(nT) > 0, \text{ то } \Delta U(nT) = 0; & (r_3) \\ \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) < 0 \quad \text{и} \quad K_r \cdot r(nT) < 0, \text{ то } \Delta U(nT) < 0. & (r_4) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Величина  $\Delta U(nT)$  визначається як координата центра ваги заштрихованої площини (рис. 1, б) залежно від функції належності  $\mu_{\text{вух}}$ . Згідно з наведеними правилами (7) можливі чотири варіанти співвідношення функції належності (таблиця, де  $\mu_{\text{вух}1} - \mu_{\text{вух}4}$  – функції належності відповідних чотирьох варіантів).

	1	2	3	4
$\mu_{\text{вух}1}$	$\mu_{\text{вх}}^+$	$\mu_{\text{вх}}^+$	$\mu_{\text{вх}}^+$	$\mu_{\text{вх}}^+$
$\mu_{\text{вух}2}$	$\mu_{\text{вх}}^+$	$\mu_{\text{вх}}^-$	$\mu_{\text{вх}}^+$	$\mu_{\text{вх}}^-$
$\mu_{\text{вух}3}$	$\mu_{\text{вх}}^+$	$\mu_{\text{вх}}^-$	$\mu_{\text{вх}}^+$	$\mu_{\text{вх}}^-$
$\mu_{\text{вух}4}$	$\mu_{\text{вх}}^-$	$\mu_{\text{вх}}^-$	$\mu_{\text{вх}}^-$	$\mu_{\text{вх}}^-$

тирьох варіантів).

У роботі розглянуто 4-й варіант. Значення активних площ обчислюється за формулами

$$\left. \begin{aligned} S(\mu_{\text{вух}1}) &= H \frac{L + K_r r}{2L}; & S(\mu_{\text{вух}2}) &= H \frac{L - K_r r}{2L}; \\ S(\mu_{\text{вух}3}) &= H \frac{L - K_e e}{2L}; & S(\mu_{\text{вух}4}) &= H \frac{L - K_e e}{2L}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Координата центра ваги

$$\Delta U(nT) = \frac{H \cdot S(\mu_{\text{вух}1}) + 0 \cdot (S(\mu_{\text{вух}2}) + S(\mu_{\text{вух}3})) - H \cdot S(\mu_{\text{вух}4})}{S(\mu_{\text{вух}1}) + S(\mu_{\text{вух}2}) + S(\mu_{\text{вух}3}) + S(\mu_{\text{вух}4})}. \quad (9)$$

Підставивши у (9) значення площ (8), отримаємо

$$\Delta U(nT) = 0,5H \frac{K_e e(nT) + K_r r(nT)}{2L - K_e e(nT)}. \quad (10)$$

Формулу (10) подамо у вигляді

$$\Delta U(nT) = \frac{0,5H}{2L - K_e e(nT)} U_{\text{вх}}, \quad (11)$$

де  $U_{\text{вх}} = K_e e(nT) + K_r r(nT)$  – вхідний вплив нечіткого регулятора.

Залежність (11) показує, що добуток  $K_e e(nT)$  залежить від помилки регулювання  $e$ : чим більше помилка, тим більше значення добутку. Отже, завжди зі збільшенням помилки регулювання буде зростати реакція на її зменшення. У загальному вигляді такий регулятор можна представити схемою у складі замкненої системи управління (рис. 2), де сигнал  $e$  – помилка регулювання; БД – блок ділення; БВМ – блок виділення модуля сигналу  $e$ ;  $K_{\text{зз}}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку,  $U_3$  – задане значення вхідної напруги,  $W_{\text{ОК}}$  – передавальна функція об'єкта керування,  $y$  – вихідний сигнал.

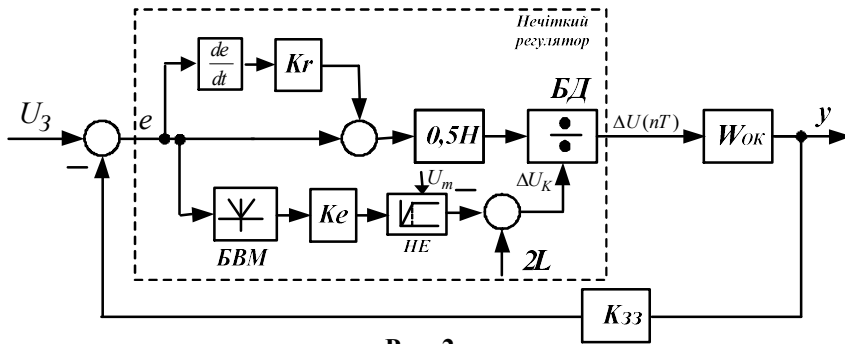


Рис. 2

Для того щоб коефіцієнт пропорційності регулятора  $K_e$  не залежав від знаку помилки  $e$  в паралельній передачі, використовується її абсолютне значення (БВМ), оскільки коефіцієнт  $K_e$  може набувати значення  $K_e|e| < 2L$ ,  $2L=1$ .

З огляду на те, що нечіткість даного регулятора визначається, в основному, внутрішньою паралельною передачею, розглянутий регулятор можна назвати пропорційним із нечіткою корекцією. Для практичного використання нечіткий зв'язок потрібно виконати нелінійним.

Нелінійний елемент НЕ введено для того, щоб при будь-яких значеннях помилки  $e$  сигнал  $\Delta U_K$  був більше нуля. Чим менше сигнал  $\Delta U_K$ , тим більше коефіцієнт пропорційності  $K_e$  і тим швидше буде зменшуватися помилка. Обмеження вхідного сигналу НЕ  $U_m$  повинне бути менше  $2L$ , щоб уникнути можливого ділення управляючого сигналу на 0.

Контур стабілізації складової зусилля різання по вертикальній осі верстата з нечітким регулятором матиме вигляд, показаний на рис. 3, де наведено такі позначення: НР – нечіткий регулятор;  $F_z$ ,  $F'_z$  – задане і поточне значення стабілізованої складової зусилля різання;  $\omega$  – частота обертання вала двигуна подачі;  $t_p$  – величина припуску;  $T_{piz}$  – постійна часу процесу різання;  $F'_z = 9,8K_Z\omega^{0,8}t_p^{0,75}$  – залежність зусилля різання від частоти обертання вала двигуна подачі та припуску;  $K_Z$  – коефіцієнт, який визначається геометрією різця, коефіцієнтом передачі кульково-гвинтової пари і твердістю заготовки;  $K_{Fz}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по зусиллю різання, що визначається діаметром оброблюваної деталі та коефіцієнтом посилення датчика струму приводу шпинделя; ЕПП – електропривод подачі. Задатчик інтенсивності першого порядку (ЗІ-1) формує задане значення стабілізуючої складової зусилля різання. В розробленій схемі нечіткого регулятора відбувається автоматична зміна коефіцієнта пропорційності сигналу, причому, чим більше помилка  $e$ , тим більше коефіцієнт пропорційності, а при зменшенні  $e$  зменшується і коефіцієнт пропорційності. Інші коефіцієнти прийнято:  $K_e = 10$ ,  $0,5H = 1$ .

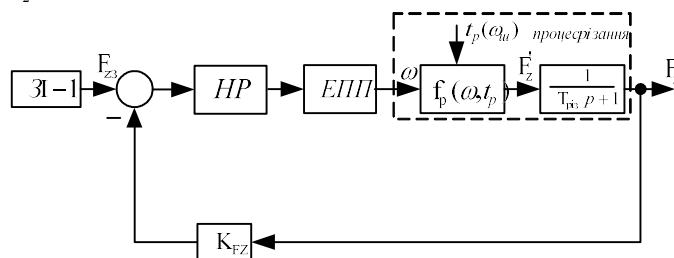


Рис. 3

двигуна подачі;  $t_p$  – величина припуску;  $T_{piz}$  – постійна часу процесу різання;  $F'_z = 9,8K_Z\omega^{0,8}t_p^{0,75}$  – залежність зусилля різання від частоти обертання вала двигуна подачі та припуску;  $K_Z$  – коефіцієнт, який визначається геометрією різця, коефіцієнтом передачі кульково-гвинтової пари і твердістю заготовки;  $K_{Fz}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по

зусиллю різання, що визначається діаметром оброблюваної деталі та коефіцієнтом посилення датчика струму приводу шпинделя; ЕПП – електропривод подачі. Задатчик інтенсивності першого порядку (ЗІ-1) формує задане значення стабілізуючої складової зусилля різання. В розробленій схемі нечіткого регулятора відбувається автоматична зміна коефіцієнта пропорційності сигналу, причому, чим більше помилка  $e$ , тим більше коефіцієнт пропорційності, а при зменшенні  $e$  зменшується і коефіцієнт пропорційності. Інші коефіцієнти прийнято:  $K_e = 10$ ,  $0,5H = 1$ .

Для аналізу динамічних властивостей системи стабілізації зусилля різання із запропонованою системою керування був використаний метод цифрового моделювання з застосуванням прикладного пакета MATLAB. Для приводу подачі використовувалася математична модель асинхронного електроприводу з серводвигуном МСА14L20, що має наступні паспортні дані:  $P_n = 1,4$  кВт,  $N_n = 2000$  об/хв,  $I_n = 1,4$  А,  $U_{1ф} = 220$  В,  $J_1 = 0,00192$  кгм<sup>2</sup>. Аналіз якості регулювання здійснювався за графіками стабілізуючої складової зусилля різання та частоти обертання з використанням класичного П-регулятора (рис. 4, а), що найчастіше використовується у разі чорнової обробки заготовок із суттєвими коливаннями припуску, та синтезованого фазі-регулятора (рис. 4, б).

Слід зазначити, що при використанні П-регулятора в системі мають місце коливання зусилля різання до 12% від заданого сталого сигналу завдання, а також перерегулювання до 8% під час різання різця у заготовку. Це, в свою чергу, призводить до зменшення точності обробки та додаткового навантаження на різець. У разі використання нечіткого регулятора амплітуда коливань зусилля різання, що зумовлені зміною припуску, а також перерегулювання суттєво зменшуються. Також слід зауважити, що використання нечіткого регулятора дає змогу зменшити статичну похибку регулювання без збільшення коливальності та тривалості перехідного процесу.

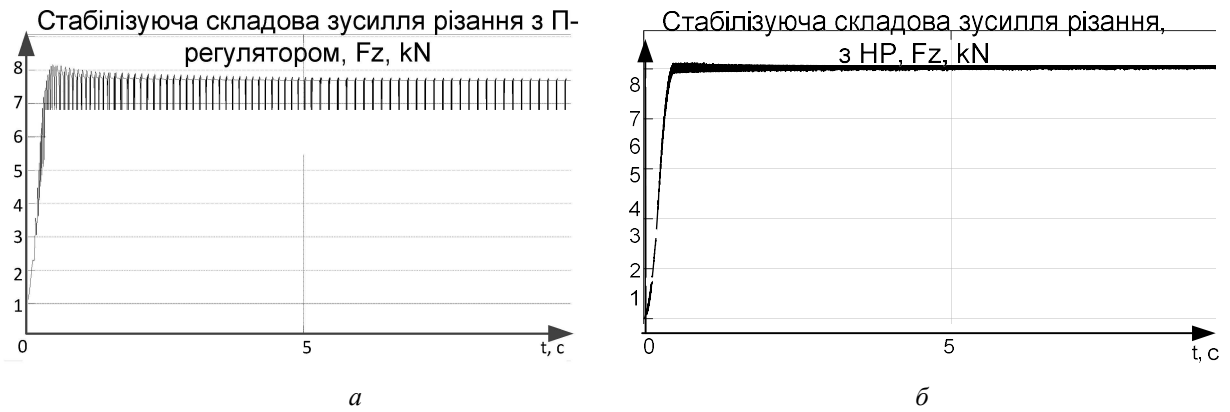


Рис. 4

Для здійснення експериментального дослідження запропонованого алгоритму нечіткого керування використовувалася система стабілізації зусилля різання токарного верстата 1ВФ340М. Складова зусилля різання по вертикальній осі верстата оцінювалася за моментом електродвигуна з похибкою не більше 2,5% [10]. Система стабілізації з встановленими на верстаті сервоприводами побудована за схемою, що представлена на рис. 5, де ЕД – електродвигун; BR1, BR2 – датчики частоти обертання;  $M_c$  – статичний момент інерції;  $\omega$ ,  $\omega_{ш}$  – частота обертання вала двигуна подачі та шпинделя верстата відповідно;  $F_{z3}$  – задане значення складової зусилля різання, що формується у зовнішній системі автоматизації роботи верстата; CAN PDO – формат передачі даних по каналу Process Data Object з використанням інтерфейсу CANopen.

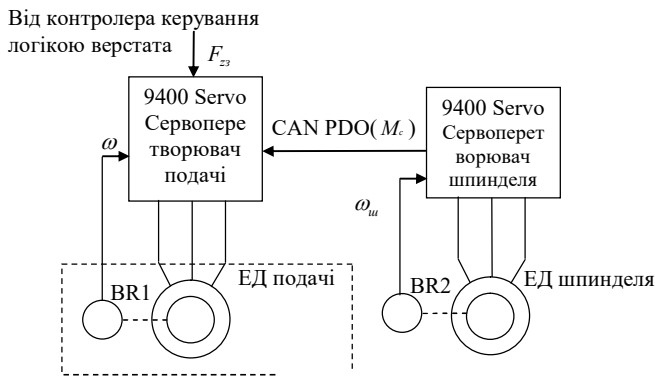


Рис. 5

Схема електромеханічної системи стабілізації зусилля різання побудована на базі сервоперетворювачів серії 9400 Servo Highline, зв'язок між ними здійснюється по інтерфейсу CAN із робочою швидкістю передачі даних 1 Мб/с. Дані щодо поточного моменту навантаження приводу шпинделя передаються у привод подачі по каналу PDO. У сервоперетворювач приводу подачі 9400 Servo Highline був встановлений додатковий модуль програмованого логічного контролера PLC M440 для реалізації нечіткого регулятора. Слід зазначити, що під час проведення досліджень заготовка була навмисно встановлена із суттєвим ексцентриситетом для більш наглядного відображення коливань моменту навантаження головного приводу.

У результаті експериментальних досліджень із застосуванням прикладного програмного забезпечення L-force Engineer були отримані графіки перехідного процесу за навантаженням головного приводу з використанням П-регулятора зусилля різання (рис. 6, а) та розробленого фазі-регулятора (рис. 6, б).

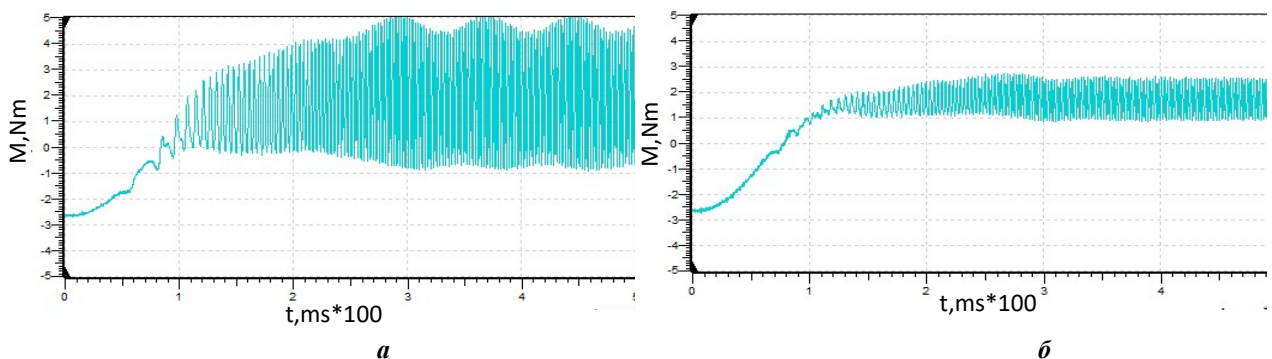


Рис. 6



Графіки були отримані з застосуванням функції Oscilloscope, реалізованої в програмному забезпеченні L-force Engineer, при циклічності запису значень 250 мкс. Очевидно, що низькочастотні коливання навантаження, зумовлені ексцентриситетом деталі, повністю компенсуються нечітким регулятором. Також, завдяки підвищенню коефіцієнта підсилення за малих відхилень забезпечується гасіння і високочастотних коливань, що дає змогу суттєво підвищити надійність обладнання.

**Висновки.** Виконано аналіз найбільш суттєвих впливів на динамічні показники контура стабілізації зусилля різання та запропонована практична реалізація системи стабілізації зусилля різання з урахуванням інерційності збігання стружки, гармонічних коливань припуску та нелінійної залежності складової зусилля різання від швидкості переміщення ріжучого інструмента. Визначено структуру нечіткого регулятора, що забезпечує швидкодію в контурі за наявності збурень гармонічного характеру. Дослідження методом цифрового моделювання показало переваги використання нечіткого регулятора у порівнянні з П-регулятором внаслідок зниження амплітуди коливань зусилля, зменшення перерегулювання. Нечіткий регулятор може бути реалізований програмно в модулі розширення M440 для сервоперетворювачів 9400 Servo Highline Lenze, що часто використовуються для керування частотою обертання двигунів металообробних верстатів.

1. Петраков Ю.В., Мельничук П.П. Автоматизація технологічних процесів у машинобудуванні засобами мікропроцесорної техніки. Житомир, 2001. 194 с.
2. Водічев В.А., Монтик П.М., Алдаїрі А.Н. Система стабілізації потужності різання металообробного верстата. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. № 6 ( 4). С. 62-65.
3. B. Roszak, E.J. Davison, E.S. Rogers. The servomechanism problem for unknown MIMO LTI positive systems: Feedforward and robust tuning regulators. *American Control Conference IEEE*. USA, 11-13 June, 2008. Vol. 1. Pp. 4821-4826.
4. Hao Ying. Fuzzy Control and modeling: Analytical Foundations and Application. Wiley-IEEE Press, 2000. 342 p.
5. Hengli Liu, Taiyong Wang, Dong Wang. Constant Cutting Force Control for CNC Machining Using Dynamic Characteristic-Based Fuzzy Controller. *Shock and Vibration*. 2015. Vol. 2015. Pp. 1-8.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/406294>
6. Босак А.В., Торопов А.В. Исследование характеристик позиционного асинхронного электропривода с нечетким регулятором. XVII Міжнародна наук.-техн. конференція *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика*. Кременчук, 17-19 травня 2016. Вип. 1/2016 (4). С. 43-45.
7. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. Київ: УкрНДІАТ, 2003. 383 с.
8. Васильев В.С., Васильев С.В. Резание металлов – псевдогармонический случайный процесс. *Станки Инструмент*. 2003. № 7. С. 17-20.
9. Румбешта В.О., Симута М.О., Гнатейко Н.В., Штефан Н.І. Аналіз втрати динамічної стійкості механообробки. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2013. № 3. С. 46-51.
10. Dohyun Kim, Doyoung Jeon. Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors. *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35. Pp. 143-152.

УДК 62.83.52

## **НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНТУРА СТАБИЛИЗАЦИИ УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗМУЩЕНИЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ХАРАКТЕРА**

**А.В. Торопов\***, канд.техн.наук, **А.В. Босак\*\***, канд.техн.наук

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: [alla\\_koz@ukr.net](mailto:alla_koz@ukr.net)**

*Решена задача разработки нечеткого регулятора для системы стабилизации тангенциальной составляющей усилия резания, который позволяет повысить производительность оборудования и надежность металлообрабатывающих станков. Разработана структура нечеткого регулятора с входным сигналом заданного значения стабилизированной составляющей усилия резания на основании анализа структуры нечетких регуляторов с использованием различных методов вывода выходного сигнала. Для учета влияния изменения припуска во время обработки детали предложено использовать колебательное звено, на вход которого поступает последовательность импульсных функций. Проведено исследование динамических характеристик системы стабилизации усилия методом цифрового моделирования с помощью прикладного пакета MATLAB с учетом гар-*

монических колебаний припуска и нелинейной зависимости усилия резания от подачи. Проанализированы полученные графики переходных процессов с тангенциальной составляющей усилия резания. Показана возможность практической реализации системы стабилизации усилия резания в современных станках с полупроводниковыми преобразователями и микропроцессорным блоком управления. Библ. 10, рис. 6, табл. 1.

**Ключевые слова:** система стабилизации усилия резания, нечеткий регулятор, гармонический характер возмущений, инерционность процесса резания, моделирование.

## FUZZY CONTROL OF THE ELECTRIC DRIVE OF CUTTING FORCE STABILIZATION LOOP IN PRESENCE OF OSCILLATION CHARACTER DISTURBANCES

A.V. Toropov\*, A.V. Bosak\*\*

National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: [alla\\_koz@ukr.net](mailto:alla_koz@ukr.net)

*The article deals with a problem of designing a fuzzy regulator for the stabilizing system of cutting force tangential component, which makes possible to increase the productivity of equipment and the reliability of machine tools. The structure of the fuzzy controller with the input signal of the set value of the cutting force stabilizing component on the basis of the analysis of the structure of fuzzy regulators using different methods of derivation of the output signal is developed. In order to take into account, the effect of allowance changing during the work piece processing of the, it is proposed to use oscillation link at whose input the sequence of impulse functions arrives. Investigation of the dynamic characteristics of the force stabilization system using the MATLAB application package, taking into account the harmonic oscillations of the allowance and the nonlinear dependence of the cutting force on the feed, is performed. The analysis of the obtained transients of cutting force tangential component is carried out. The possibility of practical implementation of the system of cutting force stabilization in the modern machines with semiconductor converters and microprocessor control unit is shown. References 10, figures 6, table 1.*

**Key words:** cutting force stabilization system, fuzzy regulator, harmonious behavior of disturbances, inertia of the cutting process, modeling.

1. Petrakov Yu.V., Melnichuk P.P. Automation of technological processes in engineering by means of microprocessor technology. Zhytomyr, 2001. 194 p. (Ukr)

2. Vodichev V.A., Montik P.M., Aldairi A.N. System of stabilization of cutting power of metal-working machine tools. *Automation of technological and business processes*. 2014. No 6 (4). Pp. 62-65. (Ukr)

3. B. Roszak, E.J. Davison, E.S. Rogers. The servomechanism problem for unknown MIMO LTI positive systems: Feedforward and robust tuning regulators. *American Control Conference IEEE*. USA, 11-13 June, 2008. Vol. 1. Pp. 4821-4826.

4. Hao Ying. Fuzzy Control and modeling: Analytical Foundations and Application. Wiley-IEEE Press, 2000. 342 p.

5. Hengli Liu, Taiyong Wang, Dong Wang. Constant Cutting Force Control for CNC Machining Using Dynamic Characteristic-Based Fuzzy Controller. *Shock and Vibration*. 2015. Vol. 2015. Pp. 1-8.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/406294>

6. Bosak A.V., Toropov A.V. Investigation of the characteristics of a positional asynchronous electric drive with a fuzzy controller. Proc. XVII International Scientific and Technical Conference *Problems of energy saving in electrical engineering systems. Science, education and practice*. Kremenchuk, 17-19 May 2016. Vol. 1/2016 (4). Pp. 43-45. (Rus)

7. Petrakov Yu.V. Automatic control of the processing of materials by cutting. Kyiv: UkrNATRI, 2003. 383 p. (Ukr)

8. Vasiliev V.S., Vasiliev S.V. Metal cutting – Pseudoharmonic random process. *Tool stands*. 2003. Vol. 7. Pp. 17-20. (Rus)

9. Rumbest V.O., Simuta M.O., Gnateyko N.V., Stefan N.I. Analysis of loss of dynamic stability of mechanical processing. *Bulletin of the Kiev National University of Technology and Design*. 2013. No 3. Pp. 46-51. (Ukr)

10. Dohyun Kim, Doyoung Jeon. Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors. *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35. Pp. 143-152.

Надійшла 01.11.2018  
Остаточний варіант 11.04.2019