

ЗАЄЦЬ Сергій

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-9954-1434>

e-mail: zssvp0204@gmail.com

АДАПТИВНА СИСТЕМА ДЛЯ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

У роботі розглядається система діагностики та оцінювання стану інструменту для обробки і технологічного процесу в реальному часі на фрезерних верстатах, застосування ефективних методів обробки діагностичної інформації для розпізнання технологічного стану оброблюваного матеріалу і інструменту, в процесі виготовлення деталі.

В роботі представлено дослідження розробки адаптивної системи для фрезерного верстату на основі вивченої взаємодії акустичного сигналу та процесу фрезерної обробки.

Результати проведених досліджень дають можливість побудувати систему контролю процесу фрезерної обробки, тим самим скоротити час обробки та підвищити точність і продуктивність обробки.

Ключові слова: адаптивна система керування, модель різання.

ZAIETS Serhii

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ADAPTIVE SYSTEM FOR MILLING

The present work is dedicated to the development and analysis of a real-time diagnostic and evaluation system for monitoring the condition of both the cutting tool and the technological process during machining operations on milling machines. The core objective is to enhance the performance and reliability of the machining process by implementing intelligent diagnostic methods capable of accurately recognizing the technological state of the material being processed as well as the condition of the cutting tool throughout the manufacturing cycle.

Special attention is paid to the implementation of efficient and adaptive data processing techniques to analyze diagnostic signals, allowing for more precise recognition and interpretation of the machining environment. These diagnostic signals, particularly acoustic emissions, provide valuable insight into the interaction between the cutting tool and the workpiece. By analyzing the acoustic signatures generated during the milling process, it becomes possible to identify abnormal conditions such as tool wear, tool breakage, or material inconsistencies, which are critical for maintaining product quality and process stability.

The research further explores the concept and design of an adaptive control system tailored specifically for milling operations. This system dynamically adjusts process parameters based on real-time feedback from diagnostic sensors, effectively creating a closed-loop control architecture. The adaptation is grounded in the correlation between acoustic signal behavior and cutting dynamics, ensuring that the process remains within optimal operational thresholds even under varying machining conditions.

The outcomes of this research demonstrate the feasibility of integrating such an adaptive system into modern CNC milling machines. As a result, manufacturers can achieve significant improvements in productivity, precision, and cost-efficiency by minimizing downtime, reducing the frequency of tool changes, and optimizing machining parameters. Overall, this study contributes to the advancement of intelligent manufacturing systems and paves the way for more autonomous, reliable, and efficient machining processes.

Keywords: adaptive control system, cutting model.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОКІЗ З НАУКОВИМИ І ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Широке використання верстатів із програмним керуванням та необхідність максимізації їх ефективності обумовлюють актуальність дослідження адаптивних систем керування. Впровадження адаптивного керування на верстатах із ЧПК та багатоопераційних верстатах дає змогу створювати самоналагоджувальні технологічні системи, що забезпечують задані показники точності та продуктивності при обробці нових деталей.

Ефективність адаптивних систем керування (АСК) проявляється у підвищенні якості обробки деталей, скороченні часу виконання операцій та зниженні собівартості виробництва [1].

Розвиток теорії керування технологічними процесами механічної обробки спрямований на підвищення ефективності виробництва та прискорення економічного розвитку.

Сучасний рівень автоматизації технологічних процесів характеризується інтенсивним використанням мікропроцесорних систем, що розширює можливості проектування систем керування та вимагає розробки нових методів їх синтезу [2].

Застосування адаптивних методів керування дозволяє реалізувати системи автоматизованого програмування (САП) в умовах невизначеності.

Теоретичні основи побудови адаптивних систем керування для безперервних процесів із запізненням залишаються недостатньо розробленими. Існуючі методи, призначені для систем без запізнення, потребують подальшого вдосконалення для їх ефективного застосування в умовах післядії. Це обумовлює актуальність

науково-прикладної проблеми, пов'язаної з розробкою методології синтезу адаптивних систем керування для об'єктів із запізненням.

Динаміка технологічних процесів у реальних умовах формується під впливом множини стохастичних факторів, що ускладнює прогнозування їх перебігу. В адаптивних системах керування, орієнтованих на регулювання однієї або декількох вихідних величин, критично важливим є забезпечення системного моніторингу параметрів процесу. Отримання інформації має здійснюватися в режимі реального часу з мінімальною затримкою, оскільки високошвидкісна механічна обробка супроводжується швидкою зміною навантажень і похибок [3].

Обмежена можливість точної математичної формалізації структури об'єкта, похибки вимірювань, невизначеність початкових умов та вплив зовнішніх стохастичних збурень обумовлюють необхідність динамічної корекції керуючих впливів. Така адаптація реалізується через модифікацію структури та параметрів системи керування.

Концепція адаптації конкретизується відповідно до цілей дослідження та проектування. Ключовою характеристикою адаптивних систем є здатність до підтримки заданих показників керування в умовах невизначеності зовнішнього середовища та зміни параметрів об'єкта.

Металорізальний верстат як технологічна система представляє собою сукупність взаємопов'язаних фізико-технічних процесів, інтенсивність і характер яких визначаються як режимами обробки, так і конструктивними особливостями системи.

Усі параметри, що описують стан системи, перебувають у взаємозалежності, причому кількісні співвідношення між ними визначаються фізичними закономірностями, властивими даній системі [1].

Функціональні залежності між фізичними величинами, що характеризують різні процеси, описуються алгебраїчними рівняннями статичної або статичними характеристиками.

Однак, оскільки процес механічної обробки суттєво залежить від динамічних змінних умов (таких як варіації припуску на обробку, зміни фізико-механічних властивостей матеріалу, стану інструменту та інших стохастичних факторів), система повинна враховувати часову динаміку цих змін, які безпосередньо впливають на якість обробки та продуктивність [1-4].

Динаміка процесу, що характеризує перехід системи з одного стану в інший, математично описується інтегровано-диференціальними рівняннями, які враховують часову еволюцію всіх значимих параметрів.

Ефективність, отримана в результаті застосування адаптивних систем керування полягає в підвищенні якості оброблювальних деталей, зниження часу обробки, зменшення вартості виготовлення деталей.

ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

У всіх адаптивних системах, що забезпечують керування технологічним процесом відносно одної або кількох регулюючих величин, важливим є питання систематичного отримання інформації, що характеризує справжній стан процесу. Отримана інформація повинна мати комплексний характер і безперервно поступати безпосередньо в процесі виконання операцій [3].

Проектування систем автоматичного керування процесом обробки на металорізальних верстатах починається з чіткого визначення завдань, які необхідно вирішити шляхом оснащення верстата системою автоматичного управління. В цьому випадку обмовляються ступінь уточнення, очікуване підвищення продуктивності обробки, характер оптимізації процесу, термін окупності системи, техніко-експлуатаційні показники верстата, оснащеного САК, і ряд специфічних вимог, які пред'являються до системи в цілому.

Коректна і чітка постановка задачі дозволяє зробити вибір способу керування з урахуванням системи, що реалізовується; одночасно вирішується питання і про допустиму величину помилок, властивих системі автоматичного керування. Задачі, що вирішуються на цьому етапі, охоплює критичну оцінку можливості і доцільності керування за розміром статичної настройки, розміру динамічної настройки, сукупного керування по i , необхідність інтегрувати пристрій програмування і обмежувальних пристроїв.

Методологія проектування систем автоматичного керування (САК)

Критерії вибору типу САК:

- вимоги до швидкодії системи
- допустимі значення похибок регулювання

Аналіз технологічної системи як об'єкта керування:

- експериментальне визначення статичних та динамічних характеристик
- оптимізація розміщення датчиків контролю
- вибір керуючого параметра та відповідних виконавчих механізмів

Методи моделювання:

- аналітичний підхід (теоретичне моделювання)
- експериментальний підхід (обробка емпіричних даних)

Процедура синтезу системи:

- розрахунок коефіцієнта посилення з урахуванням:
- допустимої статичної похибки
- вимог до роботи виконавчих пристроїв
- верифікація системи шляхом:
- побудови функціональної блок-схеми
- аналізу статичних характеристик компонентів

Експериментальні дослідження:

- необхідні при відсутності аналітичних моделей окремих пристроїв

-особливо актуальні для оригінальних технічних рішень, що розробляються для конкретних технологічних процесів

У випадку складних динамічних характеристик об'єкта керування рекомендовано застосовувати комбінований підхід, що поєднує теоретичний аналіз з експериментальними дослідженнями.

В процесі розробки системи автоматичного регулювання необхідно враховувати дуже різноманітний комплекс вимог, пов'язаних з різними її характеристиками. Ці вимоги об'єднаємо в деякі основні групи.

До першої групи віднесемо вимоги, пов'язані із статичними і динамічними властивостями системи регулювання. Серед них найважливіше місце займають характеристики точності. Вони визначають похибки, які може мати система регулювання в різних режимах. Для їх визначення використовують деякі допоміжні оцінки та критерії якості. Це насамперед оцінка запасу стійкості, яка визначається по близькості системи до коливальної границі стійкості, оцінки швидкодії, які визначимо по швидкості проходження процесів або по ширині полоси пропускання частот. Використовуються і інші якісні оцінки, що визначають, наприклад, близькість проектованої системи до оптимальної по деякому критерію оптимальності, динамічні діапазони роботи системи при «повзучих» швидкостях руху, здатність зберігати свої динамічні характеристики при технологічних розкидах параметрів регульованих об'єктів.

Так, в процесі проектування враховується досить багато вимог. В принципі можлива побудова оптимальної системи регулювання, якщо одну або декілька її технічних характеристик взяти за основу критерію оптимальності і потім визначити умови набуття його оптимального значення.

Розглянемо питання синтезу систем регулювання з погляду задоволення вимог до них по точності. Розглянемо на конкретному прикладі аналіз динамічної точності і стійкості системи автоматичного регулювання. На рисунку 1 показана система автоматичного регулювання для стабілізації пружних переміщень за рахунок зміни подачі на вертикально-фрезерному верстаті. Визначення динамічних властивостей (передаточних функцій $W = W_p W_0$ і W_f) системи проводилося шляхом осцилографування перехідних функцій, відповідних передаточним, і подальшій обробці отриманих осцилограм.

Більшість реальних об'єктів автоматичного керування з достатньою ступенем точності апроксимуються рівняннями першого та другого порядків [4]:

$$T_0 \frac{d\varphi(t)}{dt} + \varphi(t) = k_0 \mu(t) - \text{рівняння першого порядку;}$$

$$T_0 \frac{d\varphi(t)}{dt} + \varphi(t) = k_0 \mu(t - \tau) - \text{рівняння першого порядку з запізненням;}$$

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\varphi(t)}{dt} + \varphi(t) = k_0 \mu(t) - \text{рівняння другого порядку;}$$

$$T_0^2 \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + 2T_0 \frac{d\varphi(t)}{dt} + \varphi(t) = k_0 \mu(t - \tau) - \text{рівняння першого порядку з запізненням;}$$

тут $\mu(t)$ – вхідний вплив;

$\varphi(t)$ – вихідна величина;

k_0 – коефіцієнт підсилення;

τ – час запізнення;

T_0, T_1, T_2 – постійні часу.

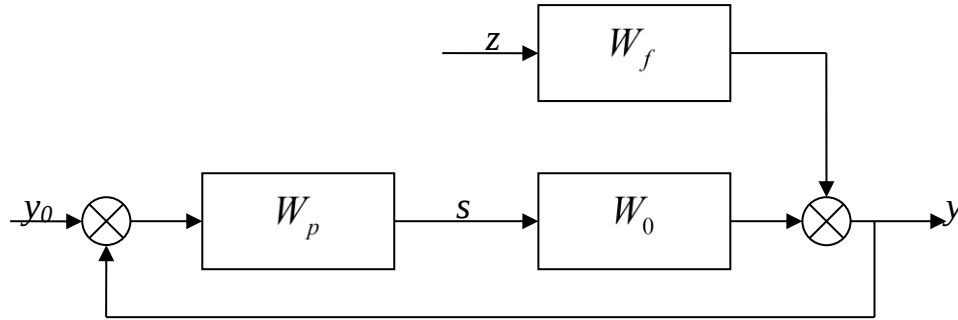


Рис. 1 Структурна схема САК пружними переміщеннями на вертикально-фрезерному верстаті: W_f і W_0 – передаточні функції об'єкта керування по обуренню Z і по керуванню S ; W_p – передаточна функція регулятора; $A'_{Д0}$ – вимірюване значення пружного переміщення; $A'_{Д0}$ – задане значення пружного переміщення

Задача полягає в знаходженні постійних часу і часу запізнення безпосередньо по експериментально знятій кривій перехідного процесу.

Із-за наявності в САК пружними переміщеннями ланок з розподіленими параметрами, а також внаслідок високого порядку системи, в якості апроксимуючих вибиратимемо ланки першого і другого порядку з запізненням.

Для знаходження параметрів рівняння першого порядку з запізненням необхідно:

1). По значеннях координат експериментальної кривої перехідного процесу в установленому режимі і по величині скачковидного обурення визначимо коефіцієнт підсилення ланки

$$k_0 = \frac{\varphi(\infty) - \varphi(0)}{\mu(\infty) - \mu(0)};$$

2). Експериментальна крива перехідного процесу тарується:

$$\bar{\varphi}(t) = \frac{\varphi(t) - \varphi(0)}{\varphi(\infty) - \varphi(0)};$$

3). По тарованій кривій перехідного процесу для $\bar{\varphi}_1 = 0,7$ та $\bar{\varphi}_2 = 0,33$ знайдемо відповідно t_1 та t_2 ;

4). Обчислимо значення часу запізнення і постійної часу:

$$\tau = \frac{3t_2 - t_1}{2}; T_0 = \frac{t_1 - \tau}{1,2};$$

5). Типова перехідна крива співпадає з експериментальною при $\bar{\varphi} = 0$, $\bar{\varphi} = 0,33$, $\bar{\varphi} = 0,7$

Значення кривої $\bar{\varphi} = 0,5507$ при $t = 0,8T_0 + \tau$, $\bar{\varphi} = 0,865$ при $t = T_0 + \tau$ порівняємо із значеннями експериментальної кривої.

При наявності більшої різниці перейдемо до апроксимації другим порядком.

Для рівняння другого порядку з однаковими постійними часу і з запізненням знаходження коефіцієнта підсилення і тарировка експериментальної кривої проводиться аналогічно рівнянням першого порядку.

Потім по тарированій кривій перехідного процесу для $\bar{\varphi}_1 = 0,7$ знайдемо t_1 . При $t_2 = \frac{t_1}{3}$ визначимо $\bar{\varphi}_2$. Якщо $\bar{\varphi}_2 < 0,131$, то рівняння апроксимуємо другим порядком з запізненням.

1. По тарованій кривій перехідного процесу при $\bar{\varphi} = 0,131$ знайдемо t'_2 ;

2. Обчислимо значення часу запізнення і постійної часу:

$$\tau = \frac{3t_2' - t_1}{2}; \quad T_0 = \frac{t_1 - \tau}{2,4};$$

3. Типова крива співпадає з експериментальною при $\bar{\varphi} = 0$, $\bar{\varphi} = 0,181$, $\bar{\varphi} = 0,7$. Значення кривої $\bar{\varphi} = 0,48$ при $t = 1,6T_0 + \tau$ і $\bar{\varphi} = 0,91$ при $t = 4T_0 + \tau$ порівняємо із значеннями експериментальної тарованої кривої. При наявності значної різниці переходять до апроксимації більш високим порядком [1].

Основними особливостями фрезерування є переривчастість процесу різання і періодична зміна товщини зрізу, а отже, і навантаження на кожному зубі фрези.

Ці особливості обумовлені кінематикою процесу і, у свою чергу, визначають специфіку силових обмежень [5-6].

При фрезеруванні з прямолінійним напрямом подачі зуб фрези в процесі обробки описує подовжену циклоїду, яку отримуємо в результаті коливання кола радіусом $r_0 = \frac{s}{2\pi}$ без ковзання по прямій АВ (рисунк 2).

Центр даного кола O співпадає з центром перетину торця фрези, а її кутова швидкість рівна кутовій швидкості фрези ω .

При зустрічному циліндровому фрезеруванні уявна пряма АВ розташовується над центром фрези.

В цьому випадку миттєва товщина зрізу на кожному зубі фрези поступово зростає від нуля до максимуму і з достатньою для практичних розрахунків точністю описується залежністю.

$$a_i = s_z \sin \varphi_i$$

де φ_i – миттєве значення кута повороту зуба від нульового положення.

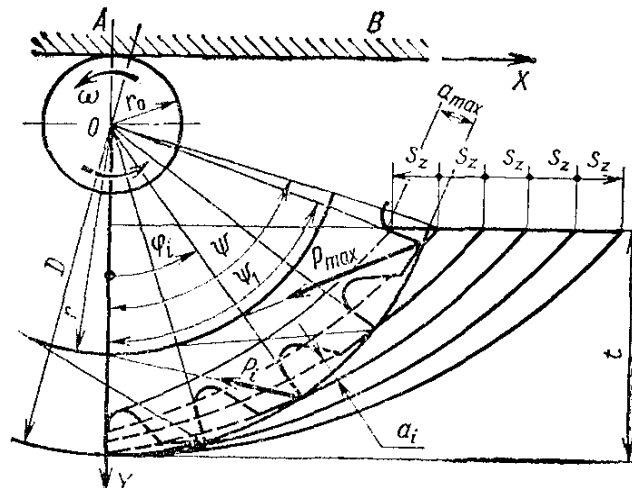


Рис. 2 Розрахункова схема зустрічного циліндричного фрезерування

Миттєву величину сили різання на кожному зубі визначимо формулою.

$$P_i = k a_i^\beta$$

де k – коефіцієнт, що враховує ширину фрезерування і інші умови обробки.

Підставимо вираз і отримаємо

$$P_i = k s_z^\beta (\sin \varphi_i)^\beta$$

Якщо $t \leq \frac{D}{2}$, то свого максимального значення сила різання досягне при повороті зуба на кут ψ_1 – перед виходом зуба із роботи. Враховуючи незначну величину s_z в порівнянні з радіусом фрези

вважатимемо, що кут ψ_1 рівний куту контакту ψ , значення якого визначимо із відношення [6].

$$\sin \psi = 2\sqrt{(t/D) - (t/D)^2}$$

При таких припущеннях:

$$P_{\max} = k s_z^\beta (\sin \psi)^\beta = k (2s_z / D)^\beta t^{\beta/2} (D - t)^{\beta/2}$$

При збільшенні s_z і t ймовірність поломки зуба зростає. Але при збільшенні t збільшується і кількість зубів, що одночасно знаходяться в роботі. У багатьох випадках вихід фрези з ладу відбувається не в результаті первинної поломки одного або декількох зубів, а в результаті розриву диска фрези, зрізання шпонок або штифтів, що передають крутящий момент на фрезу. Разом з навантаженням на кожен зуб обмежується і сумарне навантаження на фрезу. В якості оцінки сумарного навантаження приймемо величину сумарного моменту (відносно осі фрези), створюваного силами різання на зубах, що знаходяться в роботі. При розрахунку величини сумарного моменту приймемо, що вектор сили різання не змінює своєї орієнтації відносно зуба фрези при зміні товщини зрізу. В цьому випадку сумарний момент визначимо за допомогою функції.

$$M = r \sum_{i=1}^{z_p} P_i(\varphi_i)$$

де r – плече сили різання відносно центру обертання фрези – радіус деякого кола, дотичного до променів, що співпадають по напрямку з векторами сил різання.

Функція має періодичний пилоподібний характер. Коливання моменту на фрезі характерні поступовим наростанням і швидким спадом (у момент виходу чергового зуба із металу). Максимального значення функція досягає в ті моменти часу, коли черговий зуб фрези виходить з металу. Враховуючи вираз і допускаючи рівність кутів ψ і ψ_1 запишемо:

$$M_{\max} = r k s_z^\beta \sum_{i=1}^{z_p} \{\sin[\psi - (i-1)\eta]\}^\beta$$

де $\eta = \frac{2\pi}{z_\phi}$ – кутовий крок зубів фрези;

$$z_p = F\left(\frac{\psi}{\eta}\right) + 1 ;$$

$F\left(\frac{\psi}{\eta}\right)$ – ціла частина дробу $\frac{\psi}{\eta}$.

Порівнюючи вирази, відмітимо, степінь впливу величини s на $P_{\max}$ і $M_{\max}$ однакова. Однак збільшення t , а внаслідок і ψ надає різне вплив на ці параметри. Із формули бачимо, що при збільшенні один із співмножників в правій частині ($t^{\beta/2}$) збільшується, а другий зменшується. Оскільки при фрезеруванні циліндровою фрезою $t < D/2$, то другий співмножник надає менший вплив на весь добуток, ніж перший при зміні t . При збільшенні t величина $P_{\max}$ також збільшуватиметься, але менш інтенсивно, чим при збільшенні s_z . Порівнюючи першу рівність з другою, бачимо, що максимальна сила на одному зубі зростає пропорційно деякій степені синуса кута контакту, а величина максимального моменту на фрезі зростає пропорційно сумі цих же степенем синусів кутів в межах від 0 до ψ .

При збільшенні кута ψ сума в правій частині виразу збільшується (зокрема, за рахунок збільшення кількості доданків) інтенсивніше, ніж її максимальний доданок, особливо при $\psi = 90^\circ$. Тому можемо стверджувати, що вплив t на $M_{\max}$ буде сильнішим, ніж на $P_{\max}$.

При достатньо великій глибині фрезерування основним є обмеження по величині сумарного моменту, проте по мірі зменшення глибини фрезерування сумарний момент зменшується інтенсивніше, ніж величина максимальної сили на одному зубі, тому при малій глибині головним параметром навантаження стає $P_{\max}$.

Якщо апроксимувати залежності $P_{\max}(v, s_z, t)$ і $M_{\max}(v, s_z, t)$ степеневими функціями, то обмеження по $P_{\max}$ та $M_{\max}$ в логарифмічних координатах приймуть вигляд, зображений на рисунку [5].

Так як вплив S_z і V на обидва ці параметри досить близький, то вважатимемо, що сліди цих плоскостей на сікучій плоскості $t_i = \text{const}$ паралельні. Глибина фрезерування, при якій обмеження по M і P зливаються в одну лінію знайдемо за допомогою виразу.

$$t_{kp} = \left(\frac{M_0}{P_0}, \frac{C_P}{C_M} \right)^{\frac{1}{\gamma M - \gamma P}}$$

де M_0 і P_0 – допустимі значення відповідних параметрів навантаження;

C_P , C_M , γP , γM – постійні коефіцієнти і показники степені в апроксимуючих залежностях.

Таким чином, при t_{kp} керування процесом ведуть з контролюванням навантаження на кожен зуб фрези, що важко реалізовується. Якщо t_{kp} достатньо мале, то управління процесом ведуть тільки з контролем моменту на фрезі, обмеживши максимальну швидкість подачі столу, для уникнення поломки зубів фрези при малих значеннях t .

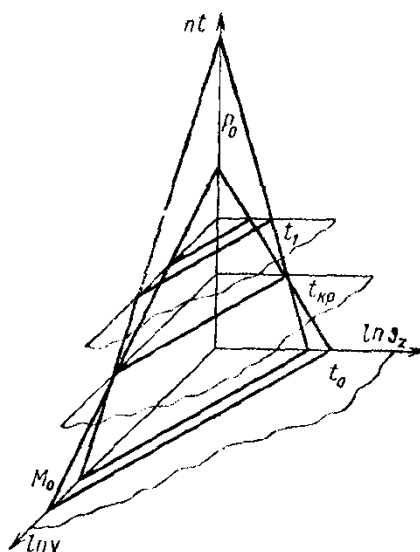


Рис. 3 Область допустимих режимів при наявності двох обмежень

Іншим способом є зниження моменту на фрезі по мірі збільшення подачі за рахунок статичної помилки системи керування.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Сучасні вимоги до автоматизації металообробки вимагають переходу від традиційних експериментальних методів до передових аналітичних підходів проектування програмного керування, що дозволить реалізувати принципи адаптивного управління технологічними процесами. Запропонована система неперервних моделей для аналізу і синтезу дискретних адаптивних систем керування. Представлено розрахункову схему зустрічного циліндричного фрезерування. На основі представлених показників, створюється логічна модель адаптивної системи керування.

Література

1. Заєць С.С., Система прогнозування стану процесу механічної обробки / Заєць С.С., Максимчук І.В., Педько К.В. // Науковий вісник КУЕІТУ. – 2012 с. 56-62.
2. Шевченко В.В., Аналіз акустичної емісії в процесах механічної обробки з використанням вейвлет-пакетів/ Шевченко В.В., Заєць С.С., Олійничук А.В. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях 7 (1229) с.233-238.
3. Остафьев, В. А. Адаптивная система управления / В. А. Остафьев, Г. С. Тымчик, В. В. Шевченко // Механизация и автоматизация управления. – 1983. – №1. – с. 18-20.
4. Kamarthi, S. V. Flank wear estimation in turning through wavelet representation of Acoustic Emission signals / S. V. Kamarthi, S.R.T. Kumara, and P.H. Cohen // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2000. – 122. – 12-19. – doi:10.1115/1.538886

5. Li, Z. Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme / Z. Li, Z. J. He, Y. Y. Zi, X. F. Chen // *Math. Comput. Simulat.* – 2008. – 79. – 318-338. – doi: 10.1016/j.matcom.2007.12.004.

6. Kumara, S. R. T. Sensor based of monitoring for real time quality control in manufacturing / S. R. T. Kumara, S. V. Kamarthi, S. T. S. Bukkapatnam, and J. W. Lee // *ASME Transactional Journal of Dynamic System. –Measurements and Control.* – 2000. – vol. 122. – 89-94

References

1. Zaiets S.S., Systema prohnozuvannia stanu protsesu mekhanichnoi obrobky /Zaiets S.S., Maksymchuk I.V., Pedko K.V // *Naukovyi visnyk KUEITU.*–2012 s. 56-62.

2. Shevchenko V.V., Analiz akustychnoi emisii v protsesakh mekhanichnoi obrobky z vykorystanniam veivlet–paketiv/ Shevchenko V.V., Zaiets S.S., Olinichuk A.V. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh 7 (1229) s.233-238.

3. Ostafev, V. A. Adaptyvnaia systema upravleniia / V. A.Ostafev, H. S. Тымчык, V. V. Shevchenko // *Mekhanizatsiia y avtomatyzatsiia upravleniia.* – 1983. –№1.– s. 18-20.

4. Kamarthi, S. V. Flank wear estimation in turning through wavelet representation of Acoustic Emission signals / S. V. Kamarthi, S.R.T. Kumara, and P.H. Cohen // *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* – 2000. – 122. – 12-19. – doi:10.1115/1.538886

5. Li, Z. Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme / Z. Li, Z. J. He, Y. Y. Zi, X. F. Chen // *Math. Comput. Simulat.* – 2008. – 79. – 318-338. – doi: 10.1016/j.matcom.2007.12.004.

6. Kumara, S. R. T. Sensor based of monitoring for real time quality control in manufacturing / S. R. T. Kumara, S. V. Kamarthi, S. T. S. Bukkapatnam, and J. W. Lee // *ASME Transactional Journal of Dynamic System. –Measurements and Control.* – 2000. – vol. 122. – 89-94