

Ю.В. Петраков, д.т.н., проф.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Методи управління процесами різання

Представлені методи управління у відповідності до часу надходження інформації, що використовується: апріорна, поточна і апостеріорна. При управлінні за апріорною інформацією визначення режиму різання відбувається при моделюванні процесу зрізування припуску, де форма заготовки і деталі представлені у вигляді каркасних моделей. Управління за поточною інформацією передбачає модернізацію верстату з ЧПК, при цьому вхідні установи мають розраховуватись за допомогою створених програм оптимізації. Для реалізації управління за апостеріорною інформацією запропонований метод корекції формоутворюючої траєкторії на другому проході за результатами вимірювань поверхні заготовки, утвореної на першому проході. Розроблена спеціальна прикладна програма, що автоматично проектує скорегований файл траєкторії формоутворення.

Ключові слова: управління; оброблення на верстаті з ЧПК.

Вступ. Будь-який процес різання є квазістаціонарним, відбувається в замкненій пружній технологічній обробляючій системі і потребує перманентного управління [1, 2]. Сучасні верстати з ЧПУ надають широкі можливості з управління процесом різання як за формоутворюючою траєкторією за всіма координатами, так і за робочими рухами подачі, швидкості різання тощо [3].

Відомо [1], що процес різання має проектуватись з урахуванням наступної послідовності: по-перше його треба стабілізувати, по-друге оптимізувати на певному, вже стабільному, рівні і по-третє – скорегувати траєкторію формоутворення для забезпечення заданої точності. Для вирішення таких задач рекомендуються методи управління, що поділяються за часом надходження інформації, яка використовується для формування управління: управління за апріорною інформацією, за поточною та за апостеріорною інформацією.

Наразі для автоматизації підготовки виробництва на верстатах з ЧПК і підготовки управляючих програм в сучасному машинобудуванні широко використовуються САМ системи [4, 5]. Такі системи вирішують завдання з геометричного проектування траєкторій формоутворюючих рухів, проте зовсім не ураховують квазістаціонарність процесу різання, наявність пружних деформацій, вібрацій тощо. В більшості випадків призначення режиму різання виконується технологом-програмістом на підставі рекомендацій фірм виробників інструменту або власного досвіду.

Розроблена фірмою Delcam стратегія управління Vortex передбачає стабілізацію кута різання за рахунок забезпечення відносного руху інструмента і заготовки за спеціальною трохоїдальною траєкторією [4]. Таким чином, розробники стратегії пішли по шляху керування геометричними параметрами, а не складовими режиму різання. Трохоїдальна траєкторія (лінія 1 на рис.1.9) розраховується виходячи з геометричної взаємодії фрези, як циліндричного тіла, без урахування зубів, а в якості критерію для стабілізації процесу різання взято також чисто геометричний параметр – кут контакту, який підтримується на постійному рівні.

Такий підхід по-перше знижує адекватність моделі (навіть геометричної) взаємодії інструменту і заготовки, а по-друге кут контакту лише опосередковано пов'язаний з головною характеристикою процесу різання – швидкістю зрізування припуску – MRR (Material Removal Rate) [2], за якою можна оцінювати стабілізацію процесу.

Останнім часом спостерігається деякий прогрес в напрямку автоматичного призначення режиму різання [6]. Найбільш посуненою САМ системою можна вважати систему SolidCAM, а саме її модуль iMachining, в який входить, як стверджується, унікальний запатентований «майстер технології», перший і єдиний в даній проблемній області засіб для автоматичного розрахунку умов різання для траєкторії руху інструменту.

Зазначається, що система SolidCAM є модулем iMachining – єдина САМ-система, котра виключає елемент угадування при визначенні умов різання і автоматично пропонує оптимальні значення параметрів фрезерної обробки. Модуль iMachining 3D автоматично генерує повну, готову до завантаження на верстат програму обробки, яка забезпечуватиме оптимальні умови різання, запропоновані «майстром технології» на підставі експертних знань. Проте, нічого не повідомляється про конкретні алгоритми автоматичного визначення режиму різання, його оптимізації, управління з метою компенсації дії змінних збурень у вигляді перманентної зміни умов різання, наприклад, при обробленні складних 3D поверхонь.

Використовуючи досвід перших розробників адаптивних систем для металообробних верстатів (школа проф. Б. С. Балакшина, 1973 р.) фірма Omative System (США) пропонує свої розробки адаптивних систем управління для верстатів з ЧПК [7]. У відповідності до заявлених фірмою властивостей (рекламного характеру) OMATIVE Adaptive Control Monitor (АСМ) забезпечує технологію системи моніторингу фактичних умов різання в режимі реального часу і автоматичне регулювання подачі на заданому рівні для кожної операції. Зазначається, що завдяки цьому OMATIVE АСМ автоматично гарантує, що параметри процесу різання не будуть перевищувати критичні, допустимі рівні. Система перебуває в постійній готовності щоб попередити можливу колізію і у випадку необхідності автоматично зупинити верстат.

Проте фірми, що пропонують системи адаптивного управління процесами різання на верстатах з ЧПК по-перше не розголошують алгоритмів управління, а по-друге не забезпечують оптимізації процесу різання.

Для вирішення задачі забезпечення точності оброблення в умовах невизначеності основних технологічних параметрів процесу використовуються методи управління за апостеріорною інформацією. Відомі методи налагодження процесу оброблення різанням з використанням так званих «пробних проходів» [8]. Проте, як показує аналіз, такі методи найчастіше застосовуються для визначення оброблюваності матеріалів, режиму різання і тільки в найпростіших випадках (токарне оброблення циліндричних поверхонь) для корекції положення інструменту за результатами вимірів на пробному проході. Корекція управляючих програм для оброблення складних поверхонь, розглядається з метою усунення колізій, що виникають в особливих місцях формоутворення, пов'язаних з формуванням гострих кутів профілю, різкою зміною напрямку руху [9].

Таким чином, ураховуючи невизначеність навіть головних параметрів технологічної оброблювальної системи (ТОС) в діючому виробництві залишається актуальною проблема забезпечення точності формоутворення, особливо для унікальних виробів зі складною 3D функціональною поверхнею, наприклад, для корпусів та роторів різних гідравлічних насосів, хоча вже розроблені програмні засоби вимірювання, які рекомендується використовувати безпосередньо на верстаті з ЧПК [10].

Постановка задачі. Головна мета роботи полягає у визначенні найбільш ефективних методів управління процесами різання на верстатах з ЧПК та розробленні узагальнених алгоритмів управління за апостеріорною, поточною та апостеріорною інформацією.

Основний зміст. Управління за апостеріорною інформацією.

Управління процесом різання на верстаті з ЧПУ за апостеріорною інформацією може бути реалізоване тільки через управляючу програму без будь-якої модернізації верстату. Наразі для проектування управляючих програм використовують САМ-системи, тому, для реалізації завдань управління такі системи потребують точного знання адекватної математичної моделі процесу. Причому, ефективність такого управління для обробки складних 3-D поверхонь цілком достатня, оскільки всі головні нестаціонарні збурення так чи інакше пов'язані з геометричною взаємодією початкової інструментальної поверхні і поверхні заготовки і можуть бути з достатнім ступенем точності визначені на етапі моделювання, що зумовлює високу адекватність математичної моделі, використовуваної для управління. Для кожного виду обробки (точіння, фрезерування, шліфування) ця апостеріорна інформація повинна бути доповнена. Наприклад, якщо процес формоутворення виконується з високими швидкостями, обов'язковим є урахування динамічних явищ, для шліфування необхідно враховувати зношування абразивного круга і тому подібне.

Таким чином, управління за апостеріорною інформацією є фактично управлінням за збуренням і передбачає розрахунок законів управління подачею формоутворювального руху, корекції траєкторії формоутворення на останньому проході, а при багатопрхідній обробці – ще і розрахунок закону розподілу припуску, що зрізується, по робочих ходах. Розрахунки виконуються на етапі моделювання процесу з використанням апостеріорної інформації з послідовним виконанням зазначених вище етапів: стабілізація – оптимізація – корекція.

Стабілізація припускає управління швидкістю формоутворення шляхом одночасного управління подачею формоутворювального руху у напрямі поточної координати обробки і поперечною подачею при багатопрхідній обробці. Як вже зазначалося, для тих видів обробки, де самою схемою зрізування припуску забезпечена стабільність або там, де нестабільність режимів різання неістотно впливає на якість обробленої поверхні, можна обійтися без першого етапу.

Далі проводиться оптимізація режиму різання. Оптимальним управлінням слід вважати такий вплив на процес різання, який у кожний момент часу забезпечує максимум продуктивності при задоволенні всіх вимог за точністю та якістю оброблення. В такому розумінні задача оптимізації зводиться до однокритеріальної і може бути розв'язана класичними методами нелінійного програмування [11].

Оскільки управління за апостеріорною інформацією передбачає управління за даними, які є в наявності до виконання оброблення на верстаті (креслення деталі, заготовки, матеріал, геометричні параметри інструменту, система координат верстату тощо), то воно має формуватись автоматично при

комп'ютерному моделюванні процесу оброблення з визначенням головної характеристики процесу різання – аналога швидкості зрізування припуску (Material Removal Rate) і подальшим визначенням управління, що буде вирішувати задачу стабілізації, оптимізації, а якщо потрібно, то й корекції траєкторії. Для вирішення цієї важливої задачі пропонується представляти геометричну модель деталі і заготовки у вигляді каркасних моделей, представлених відповідними цифровими масивами.

Функціонування розробленого алгоритму можна продемонструвати на прикладі визначення взаємодії контуру заготовки з циліндричною початковою інструментальною поверхнею фрези (рис.1). Відповідно до запропонованого чисельного методу весь контур заготовки представляється дискретною геометричною моделлю у вигляді масивів x_i і y_i . Для кожного кроку моделювання необхідно визначити координати точки А (початок лінії дуги різання) і точки В – закінчення дуги різання.

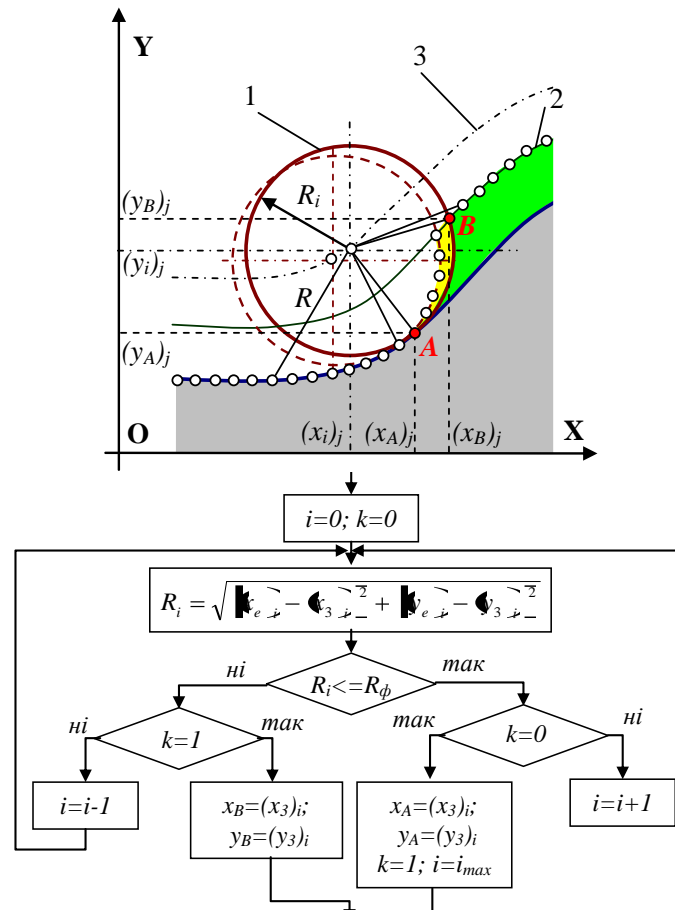
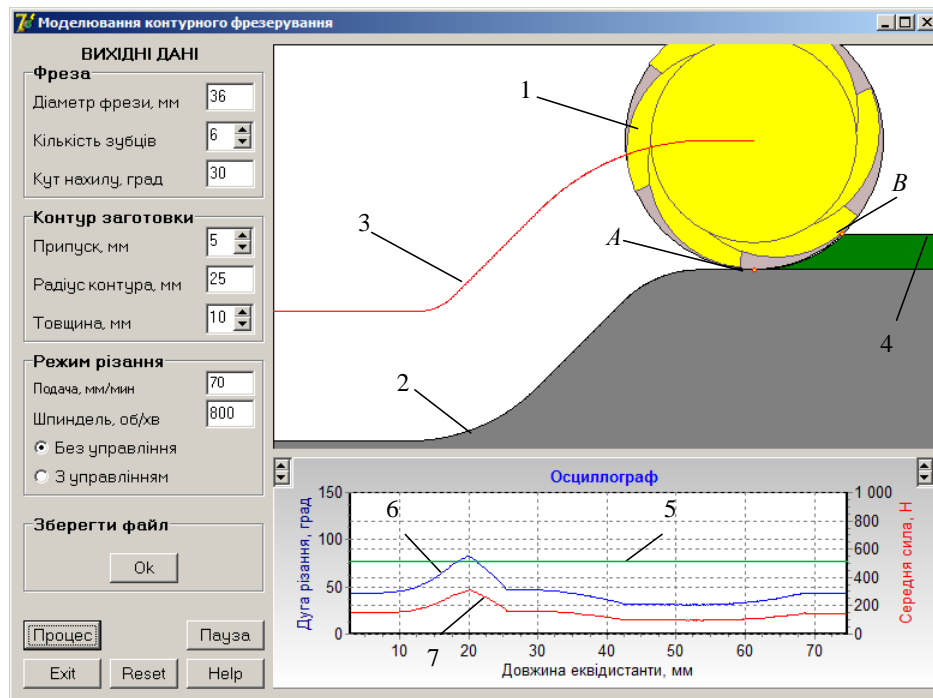


Рис. 1. До визначення дуги різання

На рисунку 1 цей контур умовно позначений колами, що символізують дискретну геометричну модель заготовки. По обчислених значеннях координат точок А і В можна розрахувати необхідні для кожного виду обробки параметри, які визначатимуть силу різання. Таким чином, у вирішенні задачі геометричної взаємодії визначальним є розрахунок координат вказаних вище точок і формування на кожному кроці моделювання нового контуру заготовки. Розрахунок пропонується виконувати за алгоритмом, блок-схема якого представлена справа на рис.1.

Розроблений алгоритм був використаний у прикладній програмі, інтерфейс якої у стані закінчення процесу моделювання представлений на рис.2. У вікні анімації траєкторія центра фрези 1 для оброблення контуру деталі 2 показана лінією 3, припуск, що зрізується, показаний лінією 4, точка А – початок дуги різання, точка В – кінець дуги різання. На осцилографі представлені наступні характеристики процесу: лінія 5 – подача (постійна, складає 70мм/хв.), лінія 6 – кут дуги різання, лінія 7 – окружна складова сили різання.



497			
X	Y	k	
2.000	222.000	1.000	} 1
3.000	222.000	1.000	
4.000	222.000	1.000	
.....			
56.000	222.000	1.034	} 2
57.000	222.000	1.034	
58.000	222.000	1.034	
.....			
119.000	222.000	2.040	} 3
120.000	222.000	2.056	
121.000	221.988	2.072	
156.063	203.317	1.067	} 4
156.770	202.609	1.067	
157.477	201.902	1.067	
.....			
252.047	112.786	0.651	} 5
252.686	112.362	0.651	
253.970	111.521	0.651	
.....			
398.880	79.566	0.981	} 6
399.880	79.566	0.981	
400.880	79.566	0.981	

Рис. 2. Інтерфейс прикладної програми і спроектований файл управління

В файлі управління, що був автоматично спроектований програмою в процесі моделювання (рис. 2) представлені тільки фрагменти, що відповідають фрезеруванню контуру: 1 – на горизонтальній дільниці, 2 – при наближенні до увігнутої дільниці, 3 – на увігнутій дільниці 4 – на прямолінійній дільниці з нахилом, 5 – на випуклій дільниці і 6 – на прямій в кінці циклу. В результаті експериментальної перевірки створеного за розробленим програмним забезпеченням файлу управління на обробляючому центрі VF-3 фірми HAAS була повністю доведена його ефективність.

Намагання збільшити продуктивність верстатів з ЧПУ завжди пов'язано з підвищенням швидкостей формуютьоруючих рухів. Технологічні операції виготовлення складних поверхонь деталей, що передбачають багатопрхідну обробку, наприклад шліфування 3D поверхні протезу колінного суглоба людини, потребують проектування траєкторій холостого руху, за якими відбувається перехід від одного робочого проходу до наступного [12]. Тому виникає проблема: яка з траєкторій забезпечить найбільшу плавність зміни динамічних навантажень робочих органів верстату з ЧПУ?

Для забезпечення плавності руху холостого хода доцільно прийняти гармонічний закон зміни прискорення $\ddot{R}(\alpha)$ (в полярній системі координат):

$$\ddot{R}(\alpha) = A \cos(\alpha + \varphi), \quad (1)$$

де A – амплітуда, k – коефіцієнт, φ – фаза.

Послідовним інтегруванням залежності (1) визначаються закони зміни швидкості:

$$\dot{R}(\alpha) = \int A \cos(\alpha + \varphi) d\alpha = \frac{A}{k} (\cos \varphi \sin k\alpha + \sin \varphi \cos k\alpha) + C \quad (2)$$

і переміщення:

$$R(\alpha) = \int \left(\frac{A}{k} (\cos \varphi \sin k\alpha + \sin \varphi \cos k\alpha) + C \right) d\alpha = \frac{A}{k^2} (\sin \varphi \sin k\alpha - \cos \varphi \cos k\alpha) + C\alpha + C_1, \quad (3)$$

де C і C_1 – постійні інтегрування. В отриманому рівнянні руху за холостим переміщенням п'ять невідомих: амплітуда A , коефіцієнт k , фаза φ , а також постійні інтегрування C і C_1 , які можуть бути визначені за початковими та кінцевими умовами. Проте рівняння (3) для визначення коефіцієнта k є трансцендентним і аналітично розв'язано бути не може. Тому для вирішення задачі слід використовувати чисельний метод і спеціально розроблену процедуру, яка заснована на використанні ітераційного алгоритму.

Для розрахунку фази використовується залежність (1) з кінцевими умовами:

$$\begin{cases} \text{при } \alpha = 0 & \ddot{R}(\alpha) = \ddot{R}_H \\ \text{при } \alpha = \alpha_K & \ddot{R}(\alpha) = \ddot{R}_K \end{cases}, \quad (4)$$

де α_K – полярний кут холостого хода.

З першої умови системи (4) визначається залежність для амплітуди:

$$A = \frac{\ddot{R}_H}{\cos \varphi}. \quad (5)$$

Після підстановки в систему (4) рівняння (1), залежності (5) і її вирішення можна отримати залежність фази φ від коефіцієнта k :

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\ddot{R}_H \cos(\alpha_K) - \ddot{R}_K}{\ddot{R}_H \sin(\alpha_K)} \right). \quad (6)$$

Постійні інтегрування C і C_1 розраховуються за формулами, що отримані з рівняння (2) при початкових умовах (коли $\alpha = 0$, то $\dot{R}(\alpha) = \dot{R}_H$):

$$C = \dot{R}_H - \frac{A}{k} \sin \varphi, \quad (7)$$

та з рівняння (3) при початкових умовах (коли $\alpha = 0$, то $R(\alpha) = R_H$) з використанням формули (7):

$$C_1 = R_H + \frac{A}{k^2} \cos \varphi. \quad (8)$$

Розроблені процедури були вбудовані в прикладну програму проектування траєкторій формоутворюючих рухів, інтерфейс якої показаний на рис.3.

Справа розташоване анімаційне вікно рухів деталі 1 і шліфувального круга 2 при формоутворенні всієї поверхні протезу. Внизу розташований віртуальний осцилограф на який виводяться графіки переміщення (лінія 3), швидкості і прискорення (лінії 4 і 5 відповідно).

Як показує аналіз отриманих результатів, зшивання траєкторії формоутворюючого руху з траєкторією холостого руху відбувається без розривів другої похідної (лінія 5 на рис. 3), що гарантує безударну роботу приводів верстату з ЧПК. Проведені експериментальні дослідження процесу шліфування на верстаті з ЧПК повністю підтвердили ефективність методу.

Управління за поточною інформацією.

Управління за поточною інформацією передбачає створення системи автоматичного управління (адаптивної системи), яка безпосередньо в процесі оброблення за сигналом зворотного зв'язку буде вирішувати задачу стабілізації процесу різання за визначеною характеристикою. Система отримує зворотну інформацію через послідовний порт RS232, або через інший інтерфейс від стійки ЧПК, а управління здійснюється через апаратний модуль і енкодер ручної корекції автоматично за принципом зведення балансу (рис. 4) [13].

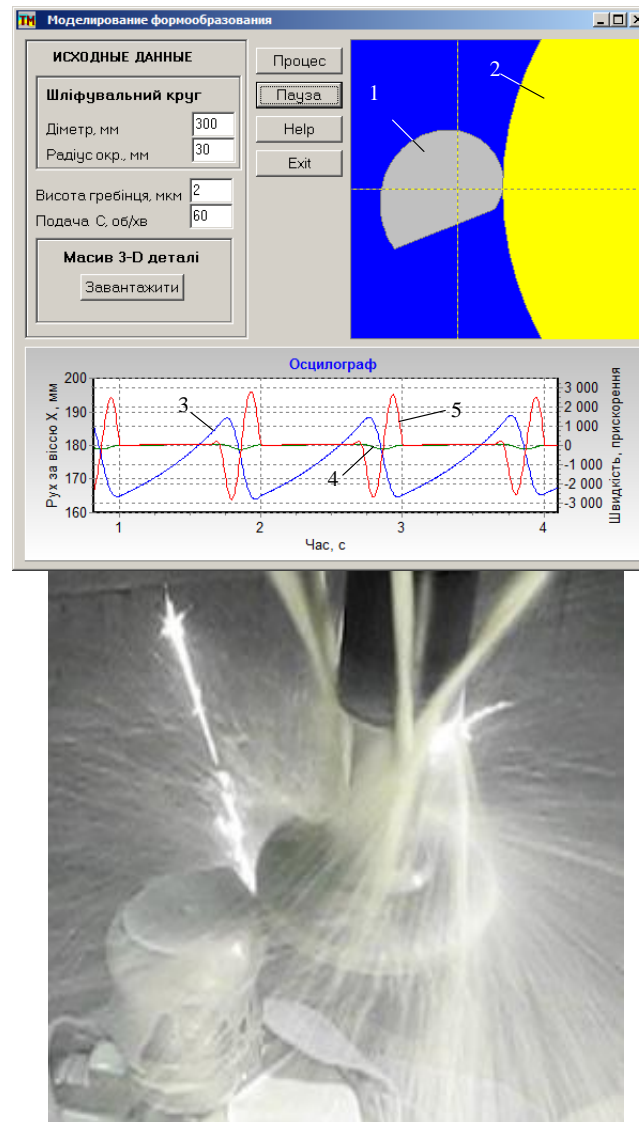


Рис. 3. Інтерфейс програми проектування і шліфування профілю протеза

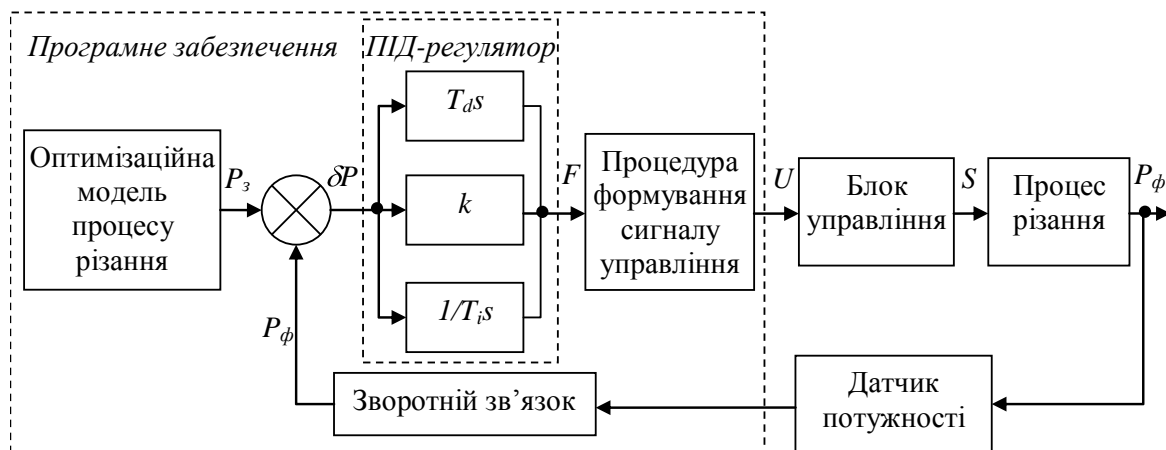


Рис. 4. Блок-схема САУ

Відмінність створеної САУ від розроблених фірмою [7] полягає у спеціально створеному каналі управління з використанням енкодера ручної корекції подачі та застосуванням оригінальної розробки з визначення оптимального режиму різання [14]. Для покращення показників якості в системі застосований пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятор. Введення регулювання за інтегральним законом підвищує точність регулювання завдяки збільшенню порядку астатизму системи, усуває помилку від швидкості зміни сигналу управління, проте зменшує швидкодію. Тому вводиться ще

й регулювання за диференціальним законом, яке підвищує швидкодію і створює резерв для підвищення коефіцієнта передачі, що, в свою чергу, зменшує похибку системи.

Для перевірки функціонування створеної системи адаптивного управління та визначення її експлуатаційних характеристик були проведені експериментальні дослідження на фрезерному верстаті з ЧПК фірми HAAS в Навчально-тренінговому центрі «КПІ ім. Ігоря Сікорського – HAAS» при кафедрі технології машинобудування (рис. 5). Експерименти проводилися при фрезеруванні контуру деталі, що містить як опуклі, так і увігнуті дільниці, як показано на рисунку 2.



Рис. 5. Робоча зона верстату при виконанні експериментів

Фрезерування контуру виконувалось за однакових умов: матеріал деталі Ст10, інструмент – кінцева фреза діаметром 20 мм на 4 зуба. Експерименти з фрезерування виконувались у два етапи: без застосування системи адаптивного управління і при застосуванні такої системи. В процесі виконання етапів експерименту з верстату, за допомогою системи, що забезпечує зворотний зв'язок, зчитувалися параметри, які характеризують процес, а саме:

- координата X (відносно системи координат деталі);
- координата Y (відносно системи координат деталі);
- координата Z (відносно системи координат деталі);
- частота обертання шпинделя;
- потужність оброблення;
- системний час ЧПУ (в мілісекундах).

Всі параметри зчитувались з системи ЧПУ верстата з заданим постійним інтервалом часу. Інтервал обирається мінімально можливий з міркувань достатності для спрацювання всієї системи. Таким чином, обраний інтервал характеризує систему по швидкодії.

Для проведення експериментів з використанням створеної системи адаптивного управління ключову роль відіграють основні параметри каналу управління і пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора. Оскільки раніше було доведено, що їх величини суттєво впливають на якість регулювання, то їх оптимальні значення були попередньо визначені при проведенні експериментів на створеному макеті системи. У відповідності до запропонованої структури системи адаптивного управління та прийнятого каналу управління подачею при виконанні CNC програми виникаюча помилка компенсується автоматично шляхом подачі на клему енкодера ручної корекції відповідних сигналів. На рис.6 представлені осцилограми сигналів на клемі енкодера при функціонуванні системи. Лінією 1 позначена зміна помилки, лінії 2 і 3 – сигнали на клемі А і В відповідно.

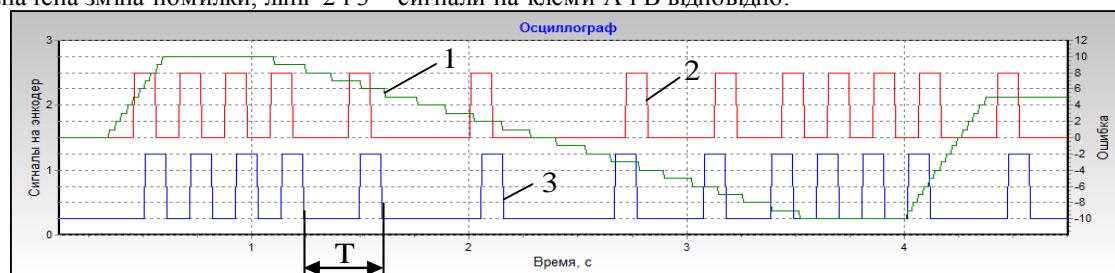


Рис. 6. Сигнали на енкодері

Таким чином було перевірене функціонування САУ при зміні сигналу помилки, а саме при переході її величини через нуль. Результати генерування управляючих сигналів показують, що при зменшенні величини помилки (лінія 1) збільшується час T надходження імпульсів на клеми енкодера, що буде викликати зменшення величини корекції подачі, яка була задана в CNC управляючій програмі. Крім того, при зміні знаку помилки відбувається зміна порядку надходження імпульсів (лінія 2 – імпульси на клеми А, лінія 3 – імпульси на клеми В) на клеми енкодера, що викликає або зменшення, або збільшення величини подачі, яка була задана в CNC управляючій програмі.

При виконанні експериментів була зафіксована зміна потужності різання під час фрезерування контуру деталі, який представлений на рис.2. Запис відбувся за рахунок реєстрації сигналу, який надходив за каналом зворотного зв'язку. На рис.7 представлена осцилограма потужності при фрезеруванні контуру деталі з постійною подачею (лінія 1) і при використанні САУ (лінія 2).

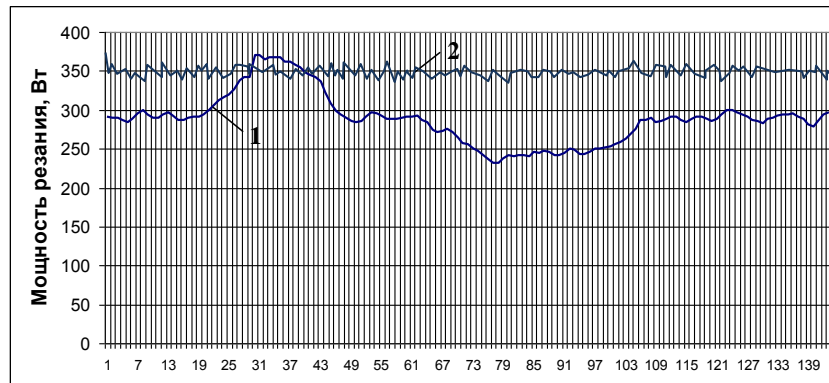


Рис. 7. Експериментальна осцилограма при фрезеруванні контуру

Управління за апостеріорною інформацією. Управління за апостеріорною інформацією в основному використовується для забезпечення необхідної точності оброблення за вимірюваннями або кожної попередньо обробленої деталі (при наявності партії деталей) або за вимірюваннями деталі після зрізування деякої частини припуску для корекції траєкторії на наступному (останньому) проході. Проектування скорегованої траєкторії здійснюється автоматично при комп'ютерному моделюванні з використанням даних вимірювань геометричних координат обробленої деталі без її зняття з верстату. При фрезеруванні складних 3D поверхонь деталей вимірювання мають виконуватися за спеціальною програмою шупом з тензометричними датчиками типу Renishaw OMI 2T. Далі, алгоритм дій за запропонованою методикою доцільно пояснити на прикладі токарного оброблення циліндричної деталі [15].

Суть даної методики полягає в тому, що весь припуск на обробку розбивається на дві рівні частини, після першого проходу з глибиною різання, що дорівнює половині припуску, вимірюють фактичне значення контрольованої координати (діаметра) і, використовуючи отриману інформацію, виконують обробку на другому проході по скоригованій формоутворюючій траєкторії. Для проведення експериментальних досліджень в якості заготовок було взято прутки зі Сталі 45 (ГОСТ 1050-74) діаметром 20 мм, довжиною 150 мм. Оброблення виконувалося на токарному верстаті з ЧПК ST30 фірми HAAS з наступними режимами: глибина різання на прохід 2,0мм, подача 0,25мм/об., швидкість різання 70,0м/хв. із застосування MOP (рис.8).

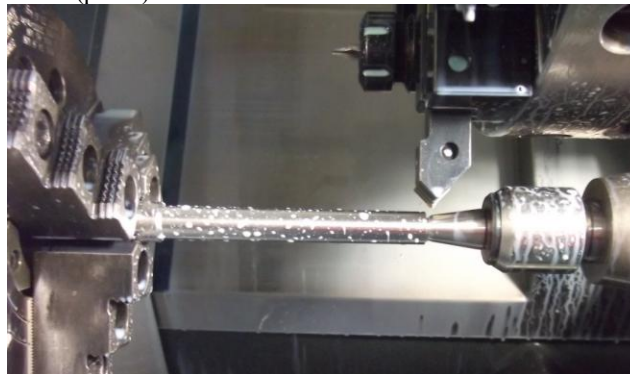


Рис. 8. Оброблення заготовки

На рисунку 9 представлено інтерфейс прикладної програми проектування файлу CLDATA для обробки заготовки на другому проході з корекцією траєкторії руху інструменту за результатами вимірювань заготовки, встановленої в патроні і задньому центрі, після першого проходу. Вимірювання діаметра деталі виконувалося за допомогою вимірювальних шупів та мікрометрів. Отримані дані

записуються в текстовий файл *.txt, що має бути сформований за інструкціями прикладної програми. Таким чином, для подальших розрахунків, програмою використовується масив даних, що використовуються у розробленій математичній моделі [15].

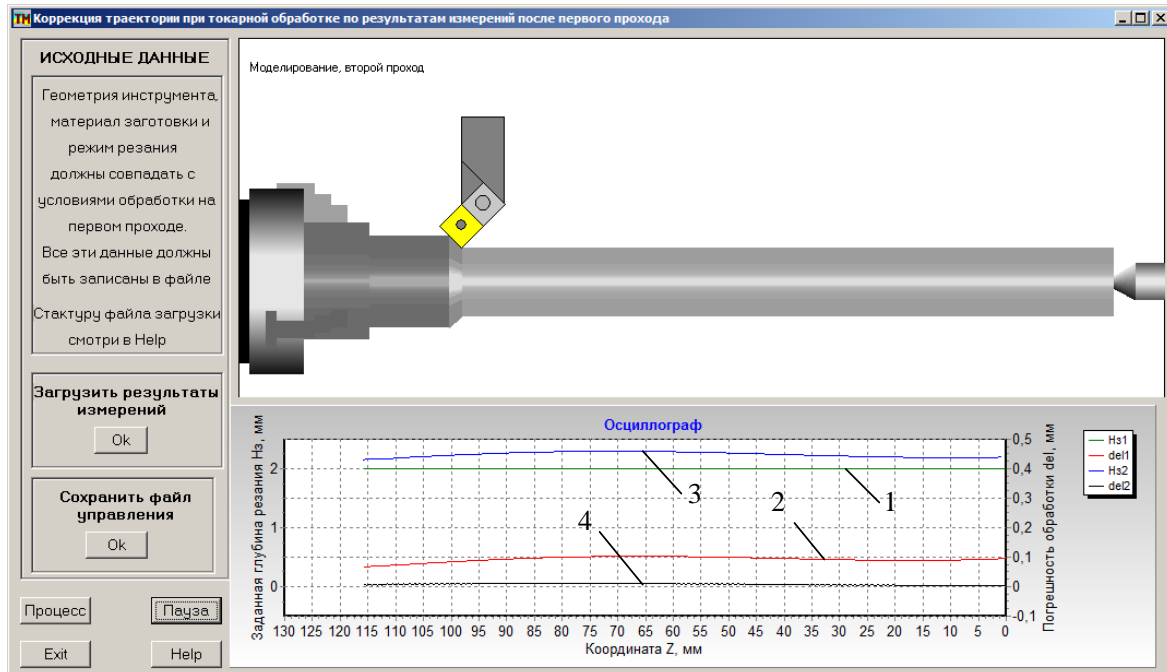


Рис. 9. Інтерфейс прикладної програми

У вікні «осциллограф» програми в ході моделювання і візуалізації оброблення відображаються наступні графіки: лінія 1 – задана на першому проході глибина різання, лінія 2 – похибка обробки на першому проході, лінія 3 – задана на другому проході глибина різання, лінія 4 – похибка обробки на другому проході, що прогнозується.

Після моделювання, (розрахунку формоутворюючої траєкторії) можна зберегти файл управління для подальшої обробки на верстаті з ЧПК, та експериментальної перевірки методики. Результати експериментальної перевірки представлені на рис.10.

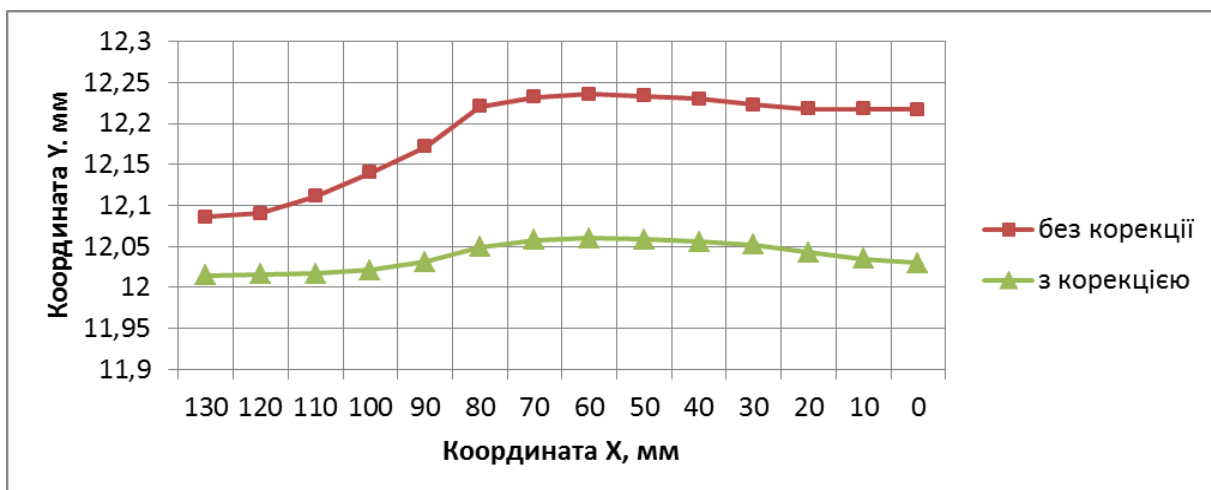


Рис. 10. Відхилення форми деталі при точінні на другому проході

Висновки.

1. Управління процесом різання за апіорною інформацією має здійснюватись через САМ-систему і міститься у спроектованій управляючій програмі. При цьому визначення режиму різання відбувається при моделюванні процесу зрізування припуску, де форма заготовки і деталі представлені у вигляді каркасних моделей, а їх геометричні образи представляються у вигляді цифрових масивів, що обробляються створеним алгоритмом.

2. Розроблений новий підхід і створена математична модель проектування траєкторій холостих рухів, що забезпечує максимальну плавність і безударність функціонування приводів формоутворюючих рухів верстата з ЧПК.

3. Управління за поточною інформацією передбачає модернізацію верстату з ЧПК, коли САУ створюється програмним методом, зворотний зв'язок реалізується через послідовний порт системи ЧПК верстату, а управління – через енкодер ручної корекції. При цьому вхідні установи мають розраховуватись за допомогою створених програм оптимізації.

4. Для реалізації управління за апостеріорною інформацією запропонований метод корекції формоутворюючої траєкторії на другому проході за результатами вимірювань поверхні заготовки, утвореної на першому проході. Розроблена спеціальна прикладна програма, що автоматично проектує скорегований файл траєкторії формоутворення.

Список використаної літератури:

1. *Петраков Ю.В.* Автоматическое управление процессами резания / *Ю.В. Петраков, О.И. Драчев.* – ТНТ, 2014. – 408 с.
2. *Stephenson D.A.* Metal Cutting Theory and Practice / *D.A. Stephenson, J.S. Agapiou* // CRC Press. – New York, 2016. – 932 p.
3. *Suh Suk-Hwan* Theory and Design of CNC Systems / *Suk-Hwan Suh, Seon-Kyoon Kang, Dae-Hyuk Chung, I.Stroud* // Springer. – London, 2008. – 455 p.
4. *Евченко К.* PowerMill 2013: стратегия Vortex и новые возможности для программирования пятиосевой обработки / *К.Евченко, А.Пинчук* // САПР и графика. – 2012. – № 11. – С. 88–91.
5. *Воронов С.А.* Методика применения численного моделирования динамики многокоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей при проектировании технологического процесса / *С.А. Воронов, И.А. Киселев, С.В. Аршинов* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия : Машиностроение. – 2012. – № 6. – С. 50–69.
6. Модуль iMachining SolidCAM [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.isolidcam.com/ru/imachining/obzor-tehnologii-imachining/>.
7. Системы адаптивного регулирования и мониторинга для металлообрабатывающих станков с CNC [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.omative.com/173890/ACM>.
8. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. / под ред. *А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мецержакова, А.Г. Сулова.* – М. : Машиностроение-1, 2003. – 944 с.
9. *Залогов В.А.* Методика коррекции управляющих программ для обработки методом концевое фрезерования на станках с ЧПУ / *В.А. Залогов, Д.В. Криворучко, Д.Г. Голдун.* – Сумы, 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://zavantag.com/docs/298/index-1238809.html>.
10. *Веретнов А.* Контроль точности обработки изделий на станках с ЧПУ при помощи PowerINSPECT OM V / *А.Веретнов* // САПР и графика. – 2012, июнь. – С. 76–79.
11. *Петраков Ю.В.* Оптимизация токарной обработки / *Ю.В. Петраков, А.А. Камбиз* // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Машинобудування. – Київ, 2008. – № 54. – С. 24–30.
12. *Петраков Ю.В.* Проектирование траекторий холостых движений при шлифовании 3D поверхности протеза коленного сустава человека / *Ю.В. Петраков, В.В. Писаренко* // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія : Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 104–108.
13. *Петраков Ю.В.* Забезпечення якості регулювання системи адаптивного управління фрезеруванням на верстаті з ЧПК / *Ю.В. Петраков, О.С. Мацьківський* // Вісник ЖДТУ. – Житомир, 2015. – № 2 (73). – С. 81–85.
14. *Петраков Ю.В.* Оптимізація периферійного фрезерування кінцевими фрезами / *Ю.В. Петраков, О.С. Мацьківський* // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Машинобудування. – Київ, 2016. – № 1 (76). – С. 88–94.
15. *Петраков Ю.В.* Повышение точности токарной обработки на станках с ЧПУ / *Ю.В. Петраков, Д.П. Ковальчук* // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Машинобудування. – Київ, 2013. – № 68. – С. 134–138. – Режим доступа : <http://visnyk-mm.kpi.ua/images/stories/pdf/68/134.pdf>.

References:

1. *Petrakov, Ju.V. and Drachev, O.I.* (2014), *Avtomaticheskoe upravlenie processami rezaniya*, TNT, 408 p.
2. *Stephenson, D.A. and Agapiou, J.S.* (2016), «Metal Cutting Theory and Practice», *CRC Press*, New York, 932 p.
3. *Suh, Suk-Hwan, Kang, Seon-Kyoon, Chung, Dae-Hyuk and Stroud, I.* (2008), «Theory and Design of CNC Systems», *Springer*, London, 455 p.
4. *Evchenko, K. and Pinchuk, A.* (2012), «PowerMill 2013: strategija Vortex i novye vozmozhnosti dlja programmirovaniya pjatiosеvoј obrabotki», *SAPR i grafika*, No. 11, pp. 88–91.
5. *Voronov, S.A., Kiselev, I.A. and Arshinov, S.V.* (2012), «Metodika primeneniya chislenogo modelirovaniya dinamiki mnogokoordinatnogo frezerovaniya slozhnoprofil'nyh detalej pri proektirovanii tehnologicheskogo processa», *Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana, Serija Mashinostroenie*, No. 6, pp. 50–69.
6. «Modul' iMachining SolidCAM», available at: <http://www.isolidcam.com/ru/imachining/obzor-tehnologii-imachining/>
7. «Sistemy adaptivnogo regulirovaniya i monitoringa dlja metalloobrabatyvajushhih stankov s CNC», available at: <http://www.omative.com/173890/ACM>

8. Kosilova, A.G. and Meshherjakov, R.K. (ed.) (2003), *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja*, in 2 volumes, in Dal'skoj, A.M. and Suslov, A.G. (ed.), Mashinostroenie-1, Moskva, 944 p.
9. Zaloga, V.A., Krivoruchko, D.V. and Goldun, D.G. (2005), *Metodika korekcii upravljajushhih programm dlja obrabotki metodom koncevogo frezerovanija na stankah s ChPU*, Sumy, available at: <http://zavantag.com/docs/298/index-1238809.html>
10. Veretnov, A. (2012), «Kontrol' tochnosti obrabotki izdelij na stankah s ChPU pri pomoshhi PowerINSPECT OMV», *SAPR i grafika*, ot ijunja, pp. 76–79.
11. Petrakov, Ju.V. and Kambiz, A.A. (2008), «Optimizacija tokarnoj obrabotki», *Visnik NTUU «KPI»*, Serija *Mashinobuduvannja*, No. 54, Kiiv, pp. 24–30.
12. Petrakov, Ju.V. and Pisarenko, V.V. (2013), «Proektirovanie traektorij holostyh dvizhenij pri shlifovanii 3D poverhnosti proteza kolennogo sustava cheloveka», *Visnik SevNTU*, zbirnik naukovih prac', Serija *Mashinopriladobuduvannja ta transport*, Vol. 140, Sevastopol', pp. 104–108.
13. Petrakov, Ju.V. and Mackivs'kyj, O.S. (2015), «Zabezpechennja jakosti reguljuvannja systemy adaptivnogo upravlinnja frezeruvannjam na verstati z ChPK», *Visnyk ZhDTU*, No. 2 (73), Zhytomyr, pp. 81–85.
14. Petrakov, Ju.V. and Mackivs'kyj, O.S. (2016), «Optimizacija periferijnogo frezeruvannja kincevymy frezamy», *Visnyk NTUU «KPI»*, Serija *Mashinobuduvannja*, No. 1 (76), Kyi'v, pp. 88–94.
15. Petrakov, Ju.V. and Koval'chuk, D.P. (2013), «Povyshenye tochnosty tokarnoj obrabotky na stankah s ChPU», *Visnyk NTUU «KPI»*, Serija *Mashinobuduvannja*, No. 68, Kyi'v, pp. 134–138, available at: <http://visnyk-mmi.kpi.ua/images/stories/pdf/68/134.pdf>

Петраков Юрій Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

– управління процесами різання на верстатах з ЧПК.

E-mail: ypetrakov.86@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2017.