

## Напрями розвитку САМ-систем

Ю. В. Петраков<sup>1)</sup>, В. В. Писаренко<sup>2)</sup>, О. С. Мацківський<sup>3)</sup><sup>1), 2), 3)</sup> НТУУ «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

## Article info:

Paper received:

13 November 2015

The final version of the paper received:

25 November 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

## Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> yp-86@yandex.ru

У статті поданий аналіз методів управління процесами оброблення на верстатах із ЧПУ на базі апіорної, поточної та апостеріорної інформації. Управління за апіорною інформацією передбачає розв'язання задачі стабілізації процесу різання за критерієм швидкості видалення припуску через комп'ютерне моделювання, що відбувається за запропонованим алгоритмом. Управління за поточною інформацією має на меті стабілізацію деякої характеристики процесу різання, наприклад потужності, і передбачає створення системи адаптивного управління зі зворотним зв'язком, що забезпечується програмним методом через датчики системи ЧПУ верстата. Управління за апостеріорною інформацією доцільно використовувати для підвищення точності оброблення. Алгоритм такого управління передбачає проектування скоригованої траєкторії на другому проході за результатами вимірювань похибки після першого проходу.

**Ключові слова:** САМ-системи, верстата з ЧПУ, управління процесами різання.

## ВСТУП

Сучасна технологічна підготовка виробництва деталей на верстатах із ЧПУ передбачає широке застосування САМ-систем (Computer Aided Manufacturing), що автоматизують проектування керувальних програм, а для деталей складної форми просто неможливо створити керувальну програму оброблення без таких систем. Аналіз можливостей наявних на ринку високих технологій САМ-систем [1, 2] засвідчує, що всі вони розв'язують геометричні задачі проектування траєкторій формування для складних поверхонь деталей, мають широкий спектр постпроцесорів, різноманітні опції технологічної підтримки тощо.

Однак процес оброблення виконується на верстатах, які мають певну жорсткість, характеризується квазістаціонарністю процесу різання і для досягнення найкращих результатів вимагає урахування цих реальних умов. Таким чином, процес оброблення деталей різанням можна розглядати як об'єкт, що зазнає дії збурень і потребує перманентного управління. Якщо на початку, на першому етапі розвитку САМ-систем їх можливості дозволяли обробити, зазвичай, на верстатах із ЧПУ, поверхні деталей, які вважалися за нетехнологічні й такі, що навіть не реалізуються, то зараз цього вже мало: технологи-програмісти почали звертати увагу на продуктивність, точність та якість обробки. Проте, як відзначають експерти [1], відсутність яких-небудь інноваційних перетворень з керування процесом різання останнім часом змусила фірми шукати нові рішення [3].

Отже, проблеми переходу на якісно новий рівень проектування керувальних програм для верстатів із ЧПУ є актуальною науково-технічною проблемою.

## ПОСТАВЛЕННЯ ПРОБЛЕМИ

Метою цього дослідження є розроблення напрямів удосконалення алгоритмів САМ-систем, що дозволять урахувати реальні процеси оброблення деталей різанням на верстатах із ЧПУ і вирішувати основне завдання задачі будь-якого машинобудівного виробництва – виготовлення деталей заданої точності та якості за мінімальний час.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

Із теорії автоматичного управління [4] відомі два принципи управління – за помилкою і за збуренням і три основні методи управління – за апіорною, поточною й апостеріорною інформацією. Саме на базі цих канонів і можливо вирішення основного завдання оброблення деталей різанням.

У процесі проведення досліджень [5] був сформульований загальний алгоритм управління процесом різання, який полягає в послідовному вирішенні трьох завдань: 1) стабілізації умов різання під час руху за формуютьовальною траєкторією; 2) оптимізації всього процесу різання за критерієм максимуму продуктивності; 3) корекція формуютьовальної траєкторії на останньому проході. Оскільки управління процесом різання на верстаті з ЧПУ може здійснюватися переважно через керувальну програму, вирішення цих завдань

повинне проводитися автоматично під час підготовки керувальної програми в САМ-системі.

На кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ» були розроблені та систематизовані основні методи управління за часом надходження інформації, що використовується для його формування: за апіорною інформацією, управління за поточною інформацією та управління за апостеріорною інформацією. Кожен із цих методів може мати на меті вирішення одного з наведених вище завдань або всіх трьох одночасно.

### Управління за апіорною інформацією

Таке управління формується безпосередньо в САМ-системі під час проектування керувальної програми на підставі початкових даних про поверхню деталі, яку потрібно обробити, заготовку, інструмент і деяких інших, відомих на цьому етапі відомостей та має на меті стабілізацію умов різання за критерієм швидкості видалення припуску (MRR – Material Removal Rate) [6], що розраховується з розв'язання задачі оптимізації процесу.

Сутність управління за апіорною інформацією пояснюється схемою рис. 1 і полягає в тому, що на основі вивчення процесу формоутворення, який здійснюється в замкненій технологічній обробній системі (ТОС), визначають модифікацію передатних функцій  $W_{np}$  процесу різання та  $W_{enc}$  еквівалентної пружної системи, які апіорі передбачаються, і розраховують визначену швидкість зрізування  $Q_{z1}$  як функцію подачі так, щоб під час різання забезпечувався збіг фактичної  $Q_{\phi}$  швидкості із заданою  $Q_{z1}$  під час різання. Із структурної схеми (рис. 1) маємо:

$$Q_{\phi} = Q_{z1} \frac{1}{1 + W_{np} W_{enc}}. \quad (1)$$

Управління досягається введенням у канал регулювання коригувального елемента з передатною функцією  $W_k$ :

$$Q_{z1} = Q_z W_k. \quad (2)$$

Після підстановки (1) у (2), одержимо

$$Q_{\phi} = Q_z \frac{W_k}{1 + W_{np} W_{enc}}. \quad (3)$$

За методом унаслідок корекції необхідно забезпечити  $Q_{\phi} = Q_z$ . З виразу (3) очевидно, що для виконання рівностей необхідно прийняти

$$W_k = 1 + W_{np} W_{enc}. \quad (4)$$

Саме така передатна функція відповідає з'єднанню елементів, показаних на рис. 1.

Коригувальний елемент повинен бути реалізований під час підготовки керувальної програми заданим переміщенням інструменту. Таким чином, цей метод управління імперативно передбачає використання верстата з ЧПУ. Система управління є розімкненою, і тому її ефективність повністю залежить від точності апіорної інформації.

Оскільки основним критерієм ефективності процесу різання є швидкість видалення припуску, тому на етапі проектування керувальної програми необхідно визначати таку характеристику за її аналогом, тобто за об'ємом видаленого припуску, зв'язаним із траєкторією інструмента, а потім стабілізувати процес за критерієм MRR управлінням подачею інструмента за формотвірною траєкторією. Визначити об'єм припуску, що зрізається, на етапі проектування керувальної програми можна під час моделювання процесу оброблення заготовки. Більшість САМ-систем мають у своєму складі модуль візуалізації спроектованого процесу оброблення, проте з нього неможливо одержати необхідну інформацію про процес різання. Таким чином, необхідно створити новий модуль САМ-системи, що розв'язує таку задачу на базі апіорної інформації про геометрію заготовки, деталі та інструменту і траєкторій формотвірних рухів, які розраховуються будь-якою САМ-системою.

Такий модуль був створений на кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ» та апробований під час моделювання різних видів оброблення відповідно до алгоритму (рис. 2), що ілюструє моделювання контурної 2D-обробки циліндричним інструментом 1 заготовки 2 довільної форми під час руху за траєкторією 3, геометричний образ заготовки, поданий у кресленні, перетворюється на цифровий масив (умовно показаний кружками на рис. 2).

Так само подається траєкторія формотвірного руху.

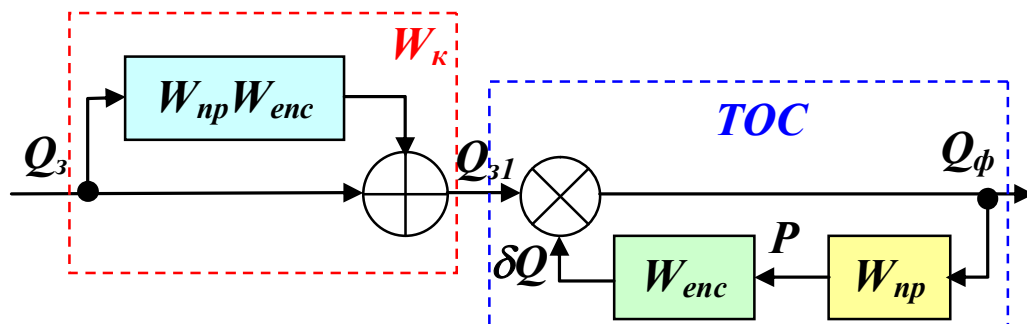


Рисунок 1 - Схема управління за апіорною інформацією

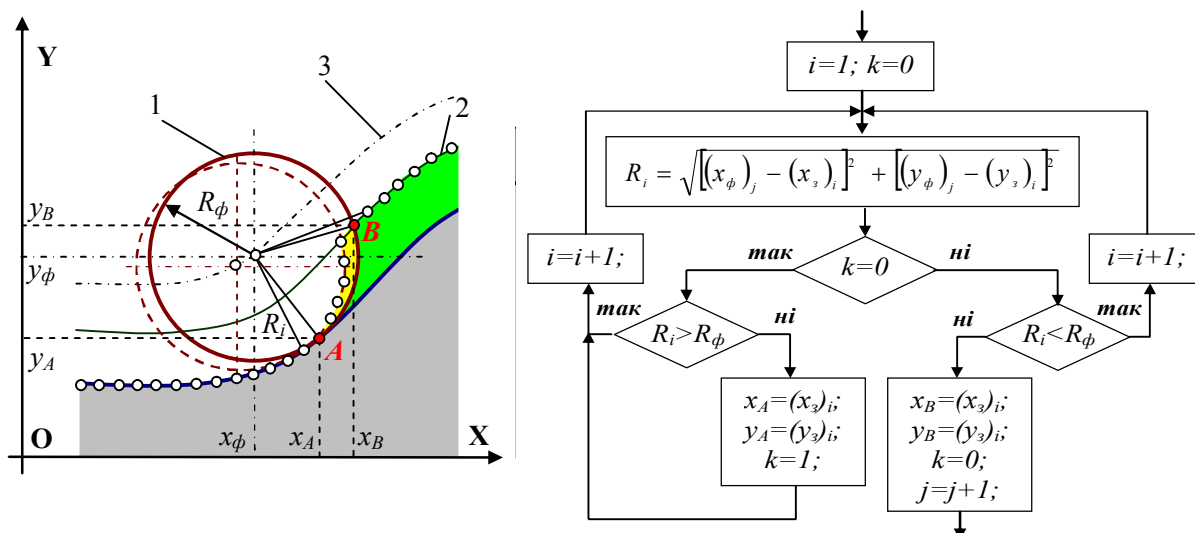


Рисунок 2 - Схема та алгоритм визначення дуги різання

Під час моделювання за кожний крок функціонує алгоритм, що визначає координати точки контуру заготовки, де починається дуга різання (точка А) і де вона закінчується (точка В). Після цього функціонує спеціальна процедура, яка перераховує контур заготовки з урахуванням ділянки АВ, що утворилася внаслідок видалення матеріалу заготовки на цьому кроці моделювання, і готує дії алгоритму на наступному кроці, що повторює процедури, але вже із зміненним контуром заготовки.

Як свідчить практика, такий модуль здатний визначати об'єм припуску, що зрізається, при обробленні різних поверхонь, зокрема з урахуванням реальної форми фрез із зубцями, навіть при 3D-обробці [7]. Розроблена математична модель ураховує кут нахилу леза зуба фрези й товщину заготовки, а визначений на кожному кроці моделювання об'єм матеріалу, що зрізається, враховує сумарну площу різання при знаходженні в зоні різання одного, двох і більше зубів фрези.

За одержаним масивом зміни об'єм припуску, що зрізається, для стабілізації процесу різання на всій траєкторії формотвірного руху розраховується масив зміни подачі. Такий підхід був апробований на практиці та довів свою ефективність [8].

Порівняння розробленого методу управління із стратегією Vortex, розробленою фірмою Delcam для стабілізації процесу фрезерування [3], демонструє деякі переваги, які полягають у тому, що метод забезпечує стабілізацію процесу фрезерування, за основною його характеристикою – силою (потужністю) різання, може бути реалізований на будь-яких верстатах із ЧПУ без тестування їх динамічних характеристик. Крім того, враховуючи можливість моделювання процесу зрізування припуску кожним зубом, створюються передумови до оптимізації процесу різання, а саме вибору такого рівня середньої подачі та частоти обертання фрези, які в умовах дії обмежень, зокрема за шорсткістю обробленої поверхні, дозволяють забезпечити максимальну продуктивність.

Метод управління за апріорною інформацією був неодноразово успішно реалізований на кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ», наприклад, при шліфуванні робочої поверхні ендопротезу колінного суглоба людини на верстаті з ЧПУ [8].

#### Управління за поточною інформацією

Ідея стабілізації процесу різання за допомогою замкнених систем автоматичного управління (САУ) була реалізована вченими школи Б. С. Балакшина ще у 80-ті роки минулого сторіччя. Проте нерозвиненість елементної бази, обчислювальної техніки та верстатів з ЧПУ не дозволила довести експериментальні зразки до промислового використання. Значні переваги таких САУ у стабілізації процесу різання привертали увагу вчених та виробників, і сьогодні нарешті з'явилися надійні промислові зразки. Фірма Omative System США [9] пропонує систему, побудовану на використанні поточної інформації, реалізовану на сучасному рівні для верстатів із ЧПУ, що вже випускаються провідними фірмами та обладнані різними датчиками. Саме ці датчики й використовуються фірмою як датчики зворотного зв'язку для своїх САУ. Оскільки застосовується поточне управління безпосередньо через систему ЧПУ і контролери приводів, фірма розробила різні версії, адаптовані до систем верстатів провідних виробників: Siemens, Fanuc, Heidenhain. Як визначають необхідне співвідношення, за яким виконують регулювання, – know how фірми.

На кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ» були розпочаті роботи зі створення САМ-системи автоматичного управління процесом різання, що використовує відомий принцип управління за помилкою [10]. САУ створюється за функціональною схемою, поданою на рис.3.

Відповідно до розробленої функціональної схеми САУ вона складається з наступних основних модулів: модуль оптимізації, модуль управління і модуль зворотного зв'язку.

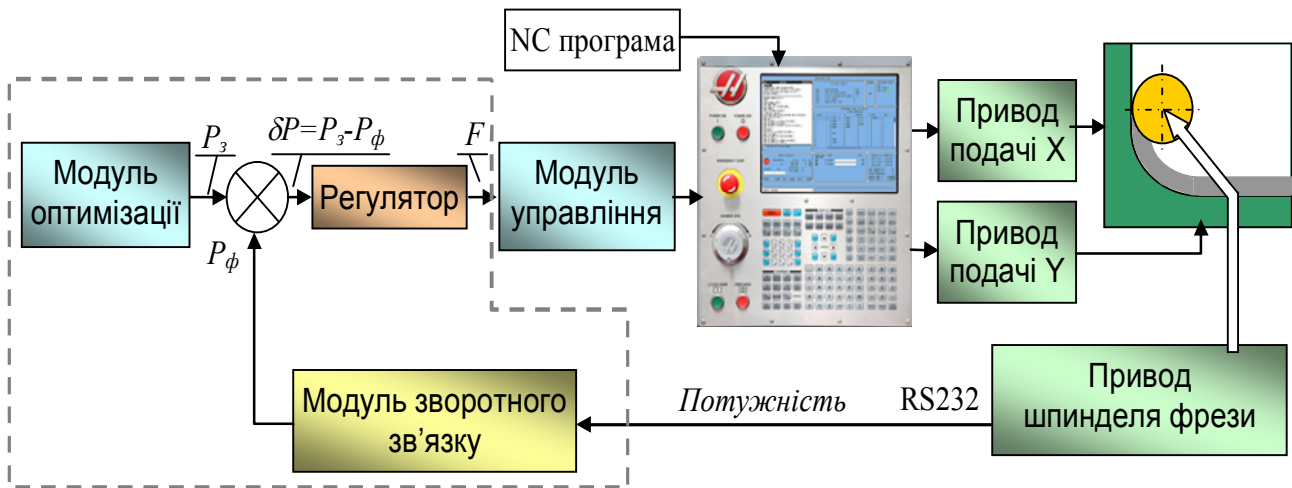


Рисунок 3 - Функціональна схема САУ

Для реалізації САУ необхідно вирішити три основні завдання: створення модуля оптимізації, модуля управління та модуля зворотного зв'язку. Відповідно до мети на етапі моделювання САУ достатньо дослідити функціонування САУ без модуля оптимізації, програмне забезпечення якого залежатиме від результатів, одержаних при моделюванні замкненого контура. Частина функціональних блоків САУ, обведених пунктирною лінією на рис. 3, реалізована програмним методом у ПК, а модуль управління впливає на систему через стандартний рознім аналогічно ручному управлінню маховиком зменшення або збільшення поточної подачі.

За результатами експериментальних досліджень найкращі результати з якості управління, що оцінювалася за швидкодією й точністю, в регуляторі здійснюються управлінням за пропорційно-диференціально-інтегральним законом:

$$F = \delta P(k + T_d s + 1/T_i s), \quad (5)$$

де  $k$  – коефіцієнт передачі;  $T_d$  – постійна часу диференціювання;  $T_i$  – постійна часу інтегрування;  $s$  – оператор Лапласа. Оптимальні величини параметрів визначаються експериментально [10].

#### Управління за апостеріорною інформацією

Такий метод управління використовується переважно для підвищення точності обробки шляхом корекції формотвірною траєкторії [11]. Оскільки при обробці на верстаті з ЧПУ у баланс похибки виготовлення деталі ліву частку займає похибка, спричинена пружними деформаціями технологічної

оброблювальної системи (ТОС), виникає можливість розрахунку деформації на основі апріорної інформації. Проте здебільшого одержання достовірних відомостей про жорсткість ТОС при виконанні конкретної операції досить проблематичне. Тому для корекції формотвірної траєкторії пропонується використовувати результати вимірювання уже обробленої деталі для управління процесом обробки наступної (рис. 4), а при обробці складних, дорогих виробів в одиничному виробництві використовувати результати вимірювань після так званого пробного проходу. Необхідно відзначити, що поширений на практиці спосіб корекції ЧПУ «на радіус» у даному випадку абсолютно непридатний.

Оскільки основною метою методу є забезпечення точності, то як параметр управління взята глибина різання. На структурній схемі за рис. 4:  $H_z$  – задана;  $H_{z1}$  – скорегована;  $H_\phi$  – фактична глибина різання;  $\delta H$  – випадкова складова. Далі прийняті ті ж самі позначення, що й на схемі за рис. 1, а запізнення відображається передатною функцією  $be^{-\tau s}$ , де  $b$  – коефіцієнт корекції;  $\tau$  – час циклу обробки й вимірювання однієї деталі;  $s$  – оператор Лапласа.

Такий метод управління може здійснюватися як в режимі «ручного» управління, так і в автоматичному режимі. Останнє передбачає створення комплексу, що автоматично вимірює оброблену деталь і через спеціально розроблену процедуру передає інформацію на верстат із ЧПУ для відповідної корекції позицій інструмента на величину очікуваної похибки наступної деталі.

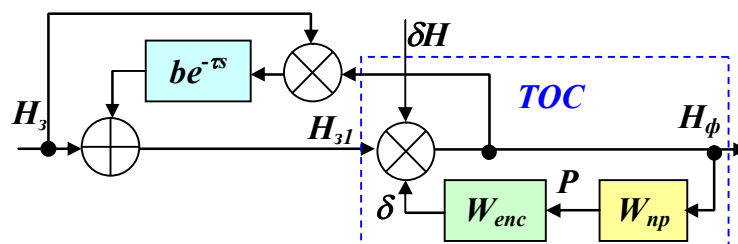


Рисунок 4 - Схема управління за апостеріорною інформацією



Пропонується наступна методика розрахунку корекції формотвірної траєкторії для компенсації похибок, спричинених пружними деформаціями ТОС за методикою пробних проходів. Згідно з робочою гіпотезою, покладеною в основу методу, в похибці обробки міститься вся необхідна для корекції інформація. Була створена математична модель, що визначає характеристики жорсткості ТОС при токарній обробці за двома координатами Z та X на підставі даних вимірювань після першого проходу і розраховує корекцію траєкторії інструмента на другому, останньому, проході. Математична модель використовує залежності жорсткості ТОС від поздовжньої координати Z при закріпленні заготовки в патроні та задньому центрі [12].

Для апробації розробленого способу була створена прикладна програма, інтерфейс якої поданий на рис. 3. У програму завантажуються файли, що містять необхідні для моделювання дані про умови оброблення на першому проході, а також дані вимірювань діаметра заготовки після оброблення на першому проході. Оскільки вимірювання були зроблені з кроком 10 мм по координаті Z, у програмі

передбачена процедура розрахунку цифрового масиву контура заготовки за сплайном, що дозволяє забезпечити необхідну точність.

Після завантаження вихідного файлу починається моделювання, в процесі якого створюється цифровий масив скоригованої траєкторії на другому проході. На осцилографі з'являються такі графіки: лінія 1 – глибина різання на першому проході (постійна за довжиною величина); лінія 2 – похибка, що утворилася та визначена за результатами вимірювань і представлення сплайном; лінія 3 – розрахована за корекцією зміна глибини різання на другому проході; лінія 4 – прогнозована похибка при спроектованій корекції.

Автоматично створений файл управління, що містить дані за скоригованою траєкторією, може бути збережений у форматі \*.txt і використаний під час проектування керувальної програми для токарного верстата з ЧПУ. Розроблений спосіб був апробований під час оброблення реальної заготовки на верстаті SL20 фірми HAAS і підтвердив свою ефективність: похибка була зменшена у 8 разів порівнянно з обробленням без корекції.

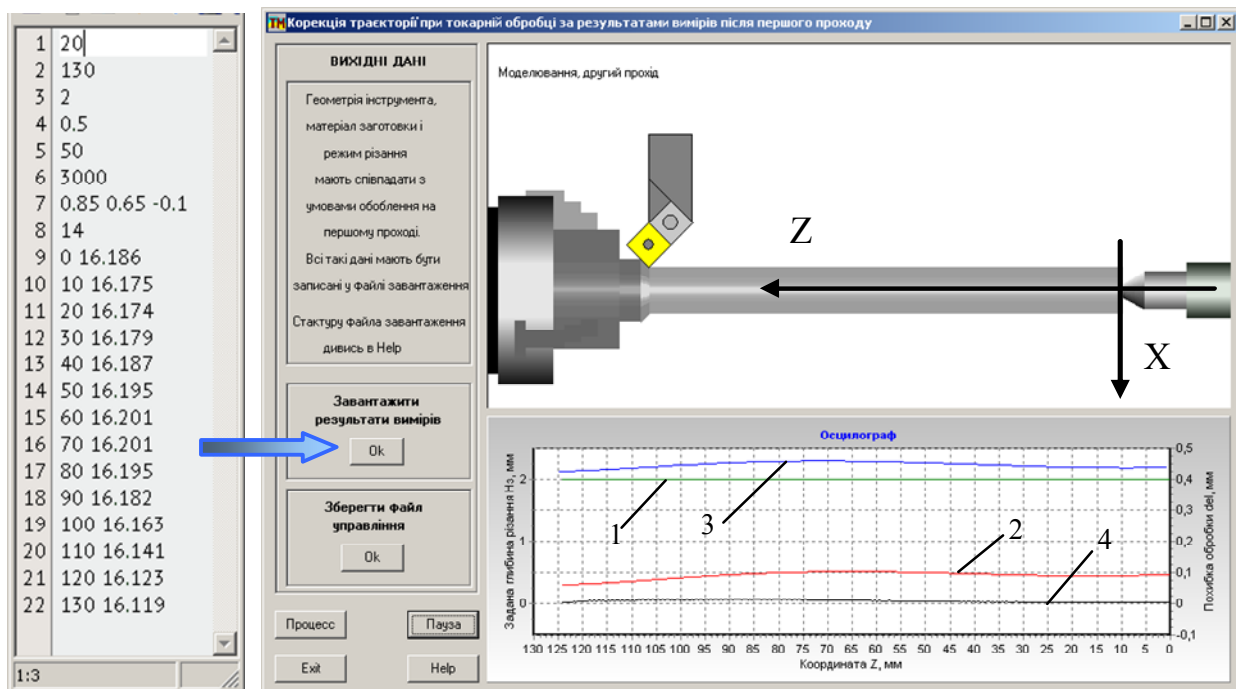


Рисунок 5 - Інтерфейс програми корекції за апостеріорною інформацією

## ВИСНОВКИ

1. Розроблений спосіб управління за апіорною інформацією з метою стабілізації режиму різання за критерієм швидкості зрізування припуску базується на попередньому моделюванні процесу оброблення, в результаті якого автоматично створюється файл управління подачею за формотвірною траєкторією. Спосіб був апробований під час токарної обробки, фрезерування і шліфування. Доведено, що ефективність способу залежить від адекватності

математичних моделей процесу різання, які в багатьох випадках потребують уточнення.

2. Управління за поточною інформацією є перспективним, але вимагає наявності на верстаті з ЧПУ датчиків зворотного зв'язку і супроводжується апаратною модернізацією системи його управління. Крім того, алгоритми управління ще потребують удосконалення, як у плані швидкодії, сталості системи в цілому, так і в плані вибору мети управління і математичної моделі оптимізації.

3. Управління за апостеріорною інформацією наразі поки що не застосовується в САМ-системах,

проте для вирішення завдання підвищення точності обробки, особливо складних поверхонь, таке управління є дуже перспективним, урахувавши фактичну невизначеність априорної інформації про характеристики жорсткості ТОС під час обробки. Оскільки метод передбачає оброблення, як мінімум, у два проходи з контрольними вимірюваннями, його використання доцільне при виготовленні

відповідальних деталей, де втрати часу на операцію компенсуються вирашем у точності оброблення. Для автоматизації процесу вимірювань може бути використаний програмний продукт PowerInspect фірми Delcam.

## Directions of Development of the CAM-systems

Yu. V. Petrakov<sup>1)</sup>, V. V. Pysarenko<sup>2)</sup>, O. S. Mackivsky<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Victory Avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 0305.

The article presents the analysis of methods of control of machining processes on CNC machines based on a priori, on-line and a posteriori information. The control of a priori information involves the task of stabilizing of cutting process on the criterion of material removal rate through computer simulation, which is performed in accordance with the developed algorithm. On-line control aims at the stabilization of certain characteristics of cutting process, such as cutting power, and provides for the establishment of adaptive feedback control system, which is carried out programmatically through the sensors of the CNC. Control on a posteriori information could be used to improve the accuracy of treatment. The algorithm of such control in a single production involves the design of trajectory which is corrected during a second pass based on the measurement results of error after the first pass.

**Keywords:** CAM-system, CNC machines, control of cutting process.

## Направления развития САМ-систем

Ю. В. Петраков<sup>1)</sup>, В. В. Писаренко<sup>2)</sup>, А. С. Мацковский<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> НТУУ «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

В статье представлен анализ методов управления процессами обработки на станках с ЧПУ на основе априорной, поточной и апостериорной информации. Управление по априорной информации предусматривает решение задачи стабилизации процесса резания по критерию скорости срезания припуска через компьютерное моделирование, выполняющееся в соответствии с разработанным алгоритмом. Управление по текущей (on-line) информации имеет целью стабилизацию некоторой характеристики процесса резания, например мощности, и предусматривает создание системы адаптивного управления с обратной связью, обеспечивающейся программным методом через датчики станка с ЧПУ. Управление по апостериорной информации целесообразно использовать для повышения точности обработки. Алгоритм такого управления в единичном производстве предусматривает проектирование скорректированной траектории на втором проходе по результатам измерений погрешности после первого прохода.

**Ключевые слова:** САМ- системы, станки с ЧПУ, управление процессами резания.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Суханов Ю. Проект «короли» и «капуста» на рынке САМ / ж. CAD/CAM/CAE Observer, № 3 (71), 2012. - С. 10 - 25.
2. Петраков Ю. В. Развитие САМ-систем автоматизованого програмування верстатів із ЧПУ : Монографія. – К. : Січкар, 2011. – 220 с.
3. Евченко К., Пинчук А. PowerMill 2013: стратегия Vortex и новые возможности для программирования пятиосевой обработки / САПР и графика. – 2012. - № 11. – С. 88 - 91.
4. Петраков Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. – УкрНДІАТ, Київ, 2004. – 336 с.
5. Петраков Ю.В. Методи управління точністю оброблення різанням : сб. Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». – 2006. - № 48. - С. 102 - 110.
6. Jerard R., Fussell B., Ercan M. On-line Optimization of Cutting Conditions for NC Machining // Manufacturing & Industrial Innovation Research Conference, Tampa, Florida, 2011.
7. Петраков Ю. В. 3-D моделирование для САМ-систем // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. / Севастоп. нац. техн. ун-т. - Севастополь : Вид-во Севастоп. нац. техн. ун-ту, 2011. - Вып. 118: Машиноприладобудування та транспорт. - С. 119 - 125.
8. Петраков Ю. В., Писаренко В. В. Підготовка програми шліфувального верстату з ЧПУ для виготовлення штучного суглоба людини // сб. ДонНТУ Прогресивні технології і системи машинобудування : Міжнародний збірник наукових праць. – 2010. - Вып. 40. - С. 200 - 205.

9. Системы адаптивного регулирования и мониторинга для металлообрабатывающих станков с CNC / <http://www.omative.com/173890/ACM>.
10. Петраков Ю. В., Кореньков В. М., Мацківський О. С. Идентифікація процесу різання на верстаті з ЧПУ / 36. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Краматорськ. - 2013. - № 32. - С.312 - 316.
11. Петраков Ю. В., Мацківський О. С. Забезпечення якості

- регулювання системи адаптивного управління фрезеруванням на верстаті з ЧПК / Вісник Житомирського державного технологічного університету, серія Технічні науки. – 2015. - № 2 (73). - С. 81 - 85.
12. Петраков Ю. В., Ковальчук Д. П. Повышение точности токарной обработки на станках с ЧПУ Вісник НТУУ «КПІ» Машинобудування. – Київ. - 2013. - № 68. - С. 134 - 138.

## REFERENCES

1. Suhanov Y. (2013) Proekt "koroly" i "kapusta" na rynke CAM [The project "kings and cabbage" in the market]. CAD/CAM/CAE Observer, № 3 (71), 10 - 25 [in Russian].
2. Petrakov Y. V. (2011) Rozvitok CAM-system avtomatyzovanogo programuvannya verstativ z CHPU [The development of CAM-system for CNC machine]. Kiev: Sychkar [in Ukrainian].
3. Evchenko K., Pynchuk A. (2012) PowerMill 2013: strategiya Vortex i novye vozmozhnosti dlia programmirovania piatyosevoy obrabotky [PowerMill 2013: the Vortex strategy and new opportunities for programming of five-axis machining]. SAPR and graphics, № 11, 88 - 91 [in Russian].
4. Petrakov Y. V. (2004) Avtomatychno upravlinnia procesami obrobki materialiv rizanniam [Automatic control of machining processes]. UkrNDIAT, Kiev [in Ukrainian].
5. Petrakov Y. V. (2004) Metody upravlinnia tochnistu obrobliennia rizanniam [The methods of accuracy control for machining]. Bulletin of National technic university of Ukraine "KIP", № 48, 102 - 110 [in Russian].
6. Jerard. R., Fussell B., Ercan M. (2011) On-line Optimization of Cutting Conditions for NC Machining // Manufacturing & Industrial Innovation Research Conference, Tampa, Florida.
7. Petrakov Y. V. (2011) 3D-modelirovanie dlia CAM-system [3D-simulation for CAM-system]. Bulletin of Sevastopol national technical University, Mechanical engineering and transport, Mechanical engineering and transport, vol. 118, 119 - 125 [in Russian].
8. Petrakov Y. V., Pysarenko V. V. (2010) Pidgotovka programy shlifovalnogo verstatu z CHPK dlia vigotvleniia shtuchnogo segloba ludyni [The preparation of the control program of the grinding CNC-machine for machining of artificial joint in the human body]. Bulletin of DonNTU, Progressive technologies and systems engineering, vol. 40, 200 - 205 [in Ukrainian].
9. Sestemy adaptivnogo regulirovania I monitoring lkz metallobratuvaucshih stankov s CNC [Adaptive control and monitoring for CNC-machine tools] Retrieved from <http://www.omative.com/173890/ACM>.
10. Petrakov Y. V., Korenkov V. M., Mackivsky O. S. (2013) Identifikacia procesu rizannia na verstaty z CHPU [Identification of cutting process on the CNC machine]. Reliability of the tool and optimization of technological systems, № 32, Kramatorsk, 312 - 316 [in Ukrainian].
11. Petrakov Y. V., Mackivsky O. S. (2015) Zabezpechennia iakosty reguluvannya systemy adaptivnogo upravlinnia frezeruvanniam na verstaty z CHPU [Ensuring quality control systems adaptive control of milling on the CNC machine]. Bulletin of Zhitomir state technological University, Series Technical science, № 2 (73), 81 - 85 [in Ukrainian].
12. Petrakov Y. V., Kovalcvhuk D. P. (2013) Povyshenie tochnosti tokarnoy obrabotki na stankah s CHPU [The accuracy increase in precision turning on CNC machines]. Bulletin of National technic university of Ukraine "KIP", № 68, 134 - 138 [in Russian].