

Ю.В. Петраков, д.т.н., проф.  
О.С. Мацківський, аспір.

Національний технічний університет України «КПІ»

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ФРЕЗЕРУВАННЯМ НА ВЕРСТАТІ З ЧПК

*Наведена структура системи адаптивного управління процесом фрезерування на верстаті з ЧПК, що здійснює автоматичне керування подачею через стійку верстата. Зв'язок реалізований за допомогою спеціально створеного апаратного блока, який з одного боку підключений до персонального комп'ютера, а з іншого – до клем енкодера ручної корекції подачі. Для забезпечення необхідної якості регулювання в систему введений ПІД-регулятор, що здійснює регулювання за пропорційним, диференціальним та інтегральним законами. Представлено результати експериментальних досліджень з визначення параметрів ПІД-регулятора, що проводилися на спеціально створеному стенді. Розроблене програмне забезпечення системи адаптивного управління, що реалізоване в персональному комп'ютері, було з'єднане з реальною стійкою ЧПК фірми HAAS, а процес фрезерування представлений його цифровою моделлю. Доведена можливість автоматичного управління подачею, що призводить до стабілізації потужності різання. Визначено параметри ПІД-регулятора, що забезпечують необхідну якість регулювання.*

**Ключові слова:** система адаптивного управління; ПІД-регулятор; стабілізація потужності різання; моделювання; верстат з ЧПК.

**Вступ. Постановка проблеми.** Ідея адаптивного управління процесами різання вперше була втілена у практику науковою школою професора Б.С. Балакшина у 1972 році [1]. Проте, оскільки у той час матеріально-технічна база металорізального обладнання не мала в своїй структурі необхідних датчиків, розвинутих засобів ЧПК та обчислювальної техніки, регульованих широкодіапазонних приводів, впровадження адаптивного управління потребувало значної модернізації верстатів, що, в сполученні з низькою надійністю, було серйозною перешкодою впровадження цієї продуктивної ідеї у виробництво. Наразі ситуація кардинально змінилася: сучасні верстати з ЧПК мають всі необхідні складові класичної структури системи адаптивного управління (САУ). Тому на ринку високих технологій з'являються пропозиції й відповідні програмні продукти фірм, що пропонують САУ для різних операцій металообробки та різних систем ЧПК металорізальних верстатів [2]. Однак управління пропонується здійснювати через систему контролерів регульованих приводів за однією складовою режиму різання – подачею. До того ж, алгоритми управління програмного забезпечення не розкриваються, а їх аналіз свідчить про відсутність оптимізації процесу різання.

Таким чином, розробка методів адаптивного управління з необхідними характеристиками якості регулювання, які б не лише стабілізували процес різання за однією його характеристикою, а й надавали можливість використовувати оптимізацію, є актуальною науково-технічною проблемою.

**Постановка завдання.** Головною метою даної роботи є розроблення структури САУ, що забезпечує необхідну якість управління через стійку верстата з ЧПК. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Розробити структуру управління процесом різання через стійку ЧПК при виконанні управляючої програми.
2. Провести дослідження з вибору законів управління, що забезпечують необхідну точність та швидкодію.
3. Експериментально перевірити запропоновані рішення і визначити оптимальні параметри прийнятих законів управління.

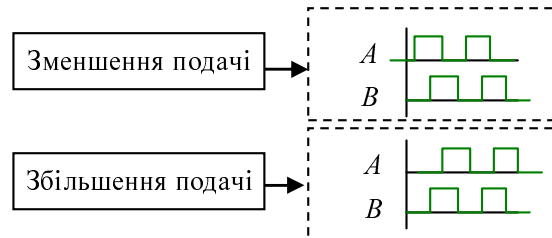
**Викладення основного матеріалу.** При визначенні структури САУ було прийняте рішення стабілізувати процес різання за його головною характеристикою – потужністю. При застосуванні управління через стійку ЧПК верстата виникла проблема створення каналу автоматичного управління подачею при виконанні окремого кадру управляючої програми. Потреба такого автоматичного і перманентного управління полягає у тому, що навіть під час виконання одного кадру умови різання можуть змінюватись у широкому діапазоні, що, для їх стабілізації, вимагає управління подачею. Єдиним каналом такого управління на стійці ЧПК є енкодер ручної корекції подачі. Були проведені окремі дослідження з визначення форми сигналу управління та його симуляції. За допомогою осцилографу, підключеного до клем енкодера (рис. 1, а) були визначені форми сигналів (рис. 1, б) при збільшенні та зменшенні подачі, що надходять до системи ЧПК при обертанні маховичка.

На підставі отриманої інформації був розроблений модуль апаратної симуляції таких сигналів, що управляється від комп'ютера, в якому було завантажено програмне забезпечення САУ. Програмне забезпечення реалізує класичну схему САУ зі зворотним зв'язком, що підключений до стійки ЧПК через інтерфейс RS232. У САУ задана потужність  $P_z$  різання, що визначається з оптимізаційної моделі, яка побудована за методикою вирішення задачі нелінійного програмування [3] та порівнюється з фактичною потужністю  $P_\phi$  під час різання, що надходить через канал зворотного зв'язку, і помилка  $\delta P$ , що використовується для управління подачею:

$$\delta P = P_z - P_\phi . \tag{1}$$



а)



б)

Рис. 1. Канал автоматичного управління подачею:  
а) клеми енкодера ручної корекції;  
б) форми сигналів управління

Помилка  $\delta P$ , що утворюється має перетворитися на величину подачі, яка забезпечить виконання головного принципу управління – зведення балансу. Перетворення відбувається за процедурою, яка визначається за принципом дії блока управління, що формує сигнали на збільшення або зменшення подачі (рис. 1, б).

Відомо [4], що якість управління визначається за наступними трьома групами критеріїв: сталість, точність в різних режимах роботи, швидкодія. Сталість САУ є безумовною вимогою до будь-яких систем, точність визначається за похибкою, в даному випадку – за похибкою стабілізації, а швидкодія визначається за часом перехідного процесу. В системах управління верстатами з ЧПК застосовують різні закони управління і відповідні регулятори, що їх здійснюють. Якість будь-якої системи управління оцінюється за точністю досягнення заданої мети та швидкодією реакції на управління і збурення. Доведено, що найкращі показники якості мають системи з пропорційно-інтегрально-диференціальним законом управління, так звані ПІД-регулятори [5]. Тому для реалізації САУ процесом різання через стійку верстата з ЧПК була запропонована структура, схема якої представлена на рисунку 2.

Відповідно до запропонованої структури, регулювання здійснюється за законом:

(2) де  $k$  – коефіцієнт передачі;  $T_d$  – постійна часу диференціювання;  $T_i$  – постійна часу інтегрування;  $s$  – оператор Лапласа.

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 [4, 5].

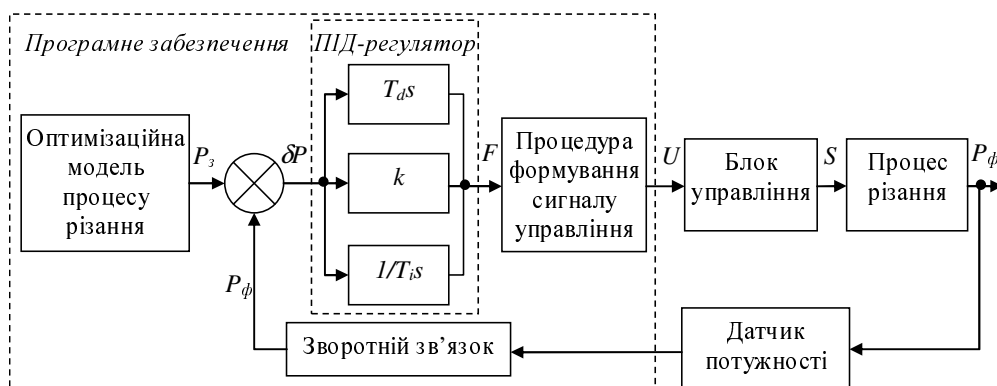
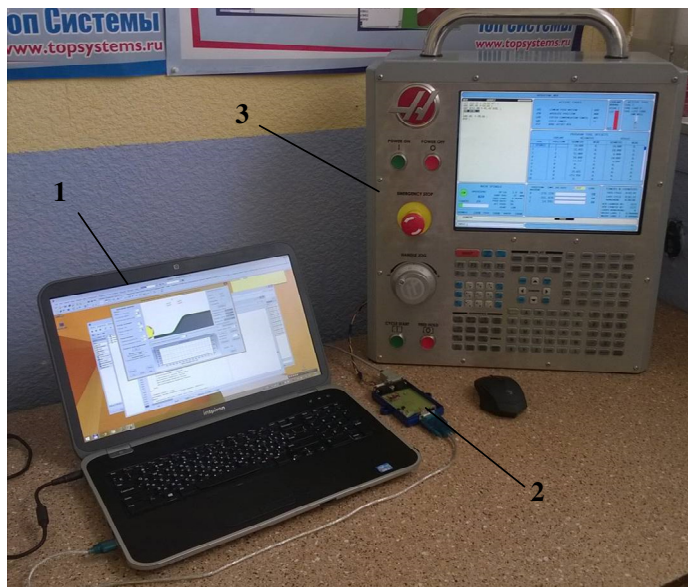


Рис. 2. Структура САУ

Для проведення досліджень з визначення параметрів ПД-регулятора, що забезпечують необхідну якість управління, був створений експериментальний стенд (рис. 3). Програмне забезпечення, відповідно до розробленої структури САУ, було закладене у персональному комп'ютері 1, що був з'єднаний за допомогою інтерфейсу RS232 та блока управління 2 з реальною стійкою ЧПК 3 фірми HAAS. З міркувань безпеки реальний процес різання на верстаті був замінений на його модель [6], що симулює процес фрезерування деталі, контур якої представлений як увігнутою, так і опуклою частинами. Тим самим забезпечується моделювання функціонування САУ і визначення її спроможності стабілізувати процес різання при фрезеруванні зі змінами умов різання в широкому діапазоні, як при підвищенні інтенсивності зрізування припуску, так і при її зменшенні.

У процесі виконання експериментів у стійку ЧПК закладалась управляюча програма у G-кодах, а реакція САУ на зміну умов різання спостерігалась на інтерфейсі створеної програми у вигляді зміни подачі та стабілізації потужності різання.



а)

```

%
O00012 (exp_model_mill_V3)
T1 M06
G90 G54 G00
S800 M03
G00 Y-236.
G01 X175. F50.
G03 X190.302 Y-229.487 R21.
G01 X261.621 Y-158.069
G02 X324.551 Y-130. R89.
G01 X350.
G00 X0. Y-236.
M30
%

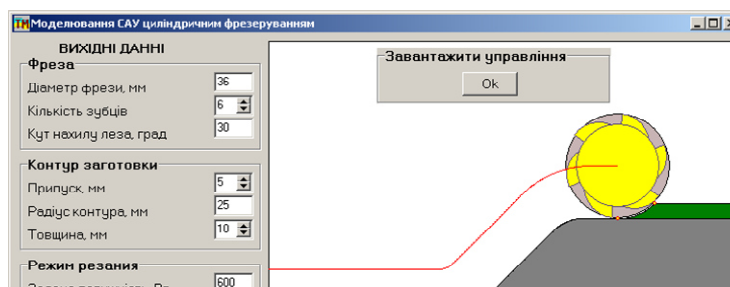
```

б)

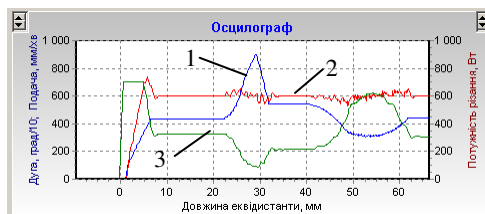
Рис. 3. Моделювання САУ:

а) експериментальний стенд; б) управляюча програма у G-кодах

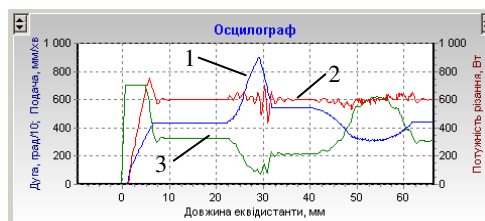
На інтерфейсі програми (рис. 4) при моделюванні виводяться наступні характеристики процесу: лінія 1 – дуга різання, лінія 2 – потужність, лінія 3 – подача. В результаті досліджень з пошуку оптимальних за точністю регулювання параметрів ПД-регулятора були отримані такі величини коефіцієнта передачі і постійної часу інтегрування, що забезпечують відсутність похибки регулювання на ділянці стаціонарного різання:  $k = 100$ ,  $T_i = 0,1$  с. Однак за таких параметрах якість регулювання, що оцінювалась за максимальним відхиленням  $\delta P$  потужності від заданого рівня стабілізації та коливальністю процесу, була незадовільною (рис. 4, а).



а)



б)



в)

Рис. 4. Пошук постійної часу диференціювання:  
а)  $T_d = 0$  с; б)  $T_d = 0,03$  с; в)  $T_d = 0,06$  с

Забезпечення необхідної якості регулювання здійснювалось за рахунок введення регулювання за диференціальним законом відповідно до рекомендованої структури САУ (рис. 2). Проведені експерименти дозволили встановити оптимальну (за критерієм мінімуму максимального відхилення потужності) величину  $T_d = 0,03$  с (рис. 4, б). Подальше збільшення постійної часу диференціювання знову призводить до погіршення якості (рис. 4, в).

Слід зауважити, що, з огляду на складність системи і вплив багатьох факторів на процес регулювання, створена САУ потребує подальших досліджень у вигляді багатофакторного експерименту перед застосуванням на верстаті з ЧПК.

#### Висновки:

1. Запропонована методика забезпечення якості регулювання, що базується на використанні моделі процесу фрезерування, дозволяє отримати оптимальні за мінімумом максимального відхилення потужності різання параметри САУ. Доведено, що забезпечення необхідної якості регулювання має передбачати використання ПД-регулятора в ланцюгу управління, а його параметри мають визначатись за результатами стабілізації потужності різання при моделюванні.
2. Автоматичне управління подачею, реалізоване через створений блок управління, який підключений до енкодера ручного управління подачею стійки ЧПК, спроможне автоматично змінювати подачу незалежно від записаної в кадрі управляючої програми. Експериментальна установка, що містить всі компоненти реальної САУ, може бути використана для проведення попередніх досліджень з визначення всіх параметрів, які в подальшому будуть використані при управлінні реальним процесом фрезерування.

#### Список використаної літератури:

1. Адаптивное управление станками / Б.С. Балакишин и др. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.
2. Системы адаптивного регулирования и мониторинга для металлообрабатывающих станков с CNC [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.omative.com/173890/АСМ>.
3. Петраков Ю.В. Моделирование процессов резания / Ю.В. Петраков, О.И. Драчев. –2013. – 240 с.

4. *Петраков Ю.В.* Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / *Ю.В. Петраков.* – К. : УкрНДІАТ, 2004. – 383 с.
5. *Suk-Hwan Suh, Seon-Kyoon Kang, Dae-Hyuk Chung, Ian Stroud* Theory and Desing of CNC Systems // *Springtr.* – London, 2008. – 455 p.
6. *Петраков Ю.В.* Моделювання фрезерування кінцевими фрезами / *Ю.В. Петраков, О.С. Мацківський* // *Вісник НТУУ «КПІ» / Машинобудування.* – № 73. – 2015. – С. 78–83.
7. *Тимофеев А.В.* Адаптивные робототехнические комплексы / *А.В. Тимофеев.* – СПб. : Машиностроение, 1988. – 332 с.
8. *Лиценко Н.В.* Силовые параметры резания в системах адаптивного управления станками / *Н.В. Лиценко* // *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и эргосбережении : матер. науч.-техн. конф.* – К. : АТМ Украины, 2010. – С. 77–81.
9. *Никитина Л.Г.* Адаптивное управление станками / *Л.Г. Никитина* // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности.* – № 3. – 2011. – С. 61–64.
10. *Jinho Lee.* Adaptive nonlinear contour coupling control for a machine tool system / *J.Lee, Warren, E.Dixon, John C. Ziegert* // *International Journal Adventive Manufacturing Technologies.* – 2012. – № 61. – Pp. 1057–1065.

ПЕТРАКОВ Юрій Володимирович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України „КПІ”.

Наукові інтереси:

– управління процесами різання на верстатах з ЧПК.

МАЦКІВСЬКИЙ Олександр Сергійович – аспірант Національного технічного університету України „КПІ”.

Наукові інтереси:

– управління процесами різання на верстатах з ЧПК.

Стаття надійшла до редакції 19.08.2015