

УДК 62-50:658.564:621.923:924

Петраков Ю.В., Мацківський О.С.  
НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ФРЕЗЕРУВАННЯМ НА ВЕРСТАТІ З ЧПК

Petrakov Y., Matskivsky O.  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([yp-86@vandex.ru](mailto:yp-86@vandex.ru))

### MODELING SYSTEMS ADAPTIVE CONTROL MILLING ON CNC MACHINES

***Анотація.** Представлена система адаптивного управління фрезеруванням на верстаті з ЧПК. Система призначена для стабілізації потужності різання при зміні умов фрезерування складних поверхонь деталей. Розроблена структура системи складається з модуля управління, модуля зворотного зв'язку і модуля формування сигналу управління. Модуль зворотного зв'язку підключений до стійки ЧПК через інтерфейс RS232, а модуль формування сигналу управління підключений через спеціальний апаратний блок к енкодеру ручної корекції подачі. Виконання експериментів з використанням спеціально створеної цифрової моделі процесу фрезерування дозволило уникнути ризиків і провести дослідження в широкому діапазоні зміни параметрів аж до втрати сталості функціонування системи. Виконані експериментальні дослідження з метою визначення коефіцієнту передачі каналу управління, який забезпечує стабільне функціонування всієї системи. Підтверджена можливість стабілізації потужності різання за рахунок автоматичного управління подачею.*

***Ключові слова:** система адаптивного управління, фрезерування, верстат з ЧПК.*

#### Вступ

Оброблення фрезеруванням деталей машин завжди характеризується квазістаціонарністю, яка визначається зміною швидкості зрізування припуску MRR (Material Removal Rate) [1] за формоутворюючою траєкторією. Найбільш суттєво нерівномірність об'єму матеріалу, що зрізується, притаманна процесам оброблення складних поверхонь. Таким чином, процес різання при обробленні більшості деталей вимагає перманентного управління для компенсації збурюючих впливів на технологічну обробляючу систему (ТОС) [2, 3].

Відомі два основних принципи управління, що використовуються для стабілізації процесу різання: за збуренням і за помилкою [3]. Управління за збуренням передбачає проектування управління, наприклад, за подачею, з використанням апріорної інформації під час технологічної підготовки виробництва за допомогою САМ систем [4, 5]. Результат такого управління цілком залежить від точності апріорної інформації про процес і адекватності математичної моделі ТОС.

В той же час доведено, що управління за помилкою через замкнені системи автоматичного управління (САУ) не потребує такої інформації і автоматично компенсує всі збурюючі впливи, які діють на елементи ТОС, охоплені зворотним зв'язком [3]. Такі перші САУ процесом різання були розроблені ще у 80-х роках ХХ століття школою професора Балакшина Б.С. [6]. Однак, у ті часи відсутність належної матеріальної бази не дозволило повністю реалізувати потенціал такого принципу управління, а низька надійність створених САУ завадила широкому впровадженню у виробництво.

Наразі сучасні верстати з ЧПК оснащуються потужними комп'ютерами, приводами безступінчастого регулювання, датчиками зворотного зв'язку тощо. Таким чином, ідеї, що були закладені раніше, отримали матеріальну базу для їх втілення на сучасному рівні і деякі компанії скористалися такою нагодою. Так, фірма Omative System (США) пропонує замкнені САУ, в які входять спеціально розроблені САМ-модулі для управління різними видами оброблення на верстагах з ЧПК: точінням, фрезеруванням, свердлінням, шліфуванням тощо [7]. Цілком зрозуміло, що реалізація таких систем є know-how компаній і алгоритми управління не розкриваються.

Спираючись на накопичений досвід та отримані позитивні результати попередніх досліджень на кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ», на базі нової концепції управління процесом різання за поточною інформацією розпочаті роботи зі створення адаптивної системи управління операціями механічного оброблення на верстах з ЧПК. Нова концепція полягає у реалізації управління в режимі on-line безпосередньо на верстаті з ЧПК, з метою стабілізації умов різання на всіх ділянках траєкторії інструменту на оптимальному рівні. Запропоноване смарт-рішення використовує наявні датчики верстата з ЧПК у якості зворотного зв'язку для управління різанням, а його математичну модель – для підтримки оптимального процесу на всій траєкторії.

**Метою** даного дослідження є моделювання САУ фрезерного верстата з ЧПК для визначення її структури, параметрів та перевірки функціонування розроблених програмних засобів та всієї системи.

### Основний зміст

У відповідності до розробленої функціональної схеми САУ вона складається з наступних основних модулів: модуля оптимізації, модуля управління і модуля зворотного зв'язку (рис.1).

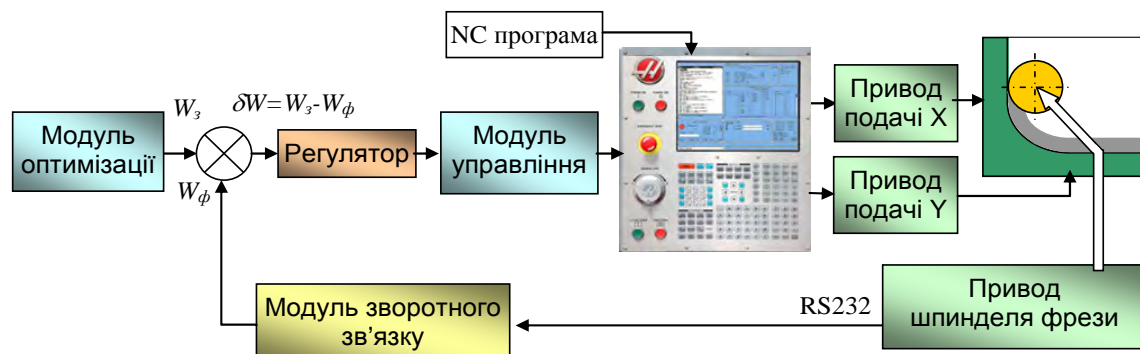


Рис. 1. Функціональна схема САУ

Під час виконання завантаженої програми управління на стійці ЧПК через модуль зворотного зв'язку в САУ надходять дані про фактичне значення потужності різання ( $W_\phi$ ), яке порівнюється із заданою потужністю ( $W_3$ ) і помилка, що при цьому утворюється ( $\delta W = W_\phi - W_3$ ) через регулятор надходить у канал управління, який зв'язаний з модулем формування сигналу управління, що зменшує або збільшує подачу.

Таким чином, для реалізації САУ необхідно вирішити три основні задачі: створення модуля оптимізації, модуля управління та модуля зворотного зв'язку. У відповідності до мети на етапі моделювання САУ достатньо дослідити функціонування САУ без модуля оптимізації, програмне забезпечення якого залежатиме від результатів, отриманих при моделюванні замкненого контуру.

**Модуль зворотного зв'язку.** Вирішення цієї задачі будується на властивостях сучасних верстатів з ЧПК вимірювати і надсилати на стійку деякі параметри процесу різання: координати положення кожної з осей; потужність на шпинделі і його частоту обертання; номер інструмента, що використовується; величину подачі тощо.

Для використання таких можливостей в якості сигналів зворотного зв'язку було розроблено програмний засіб, головною функцією якого є зчитування необхідних параметрів із системи управління верстата (рис.2). На головний інтерфейс програми виведені всі необхідні опції для попереднього налаштування. Передбачено налаштування за параметрами з'єднання і списком необхідних параметрів, що потрібно зчитувати з верстату.

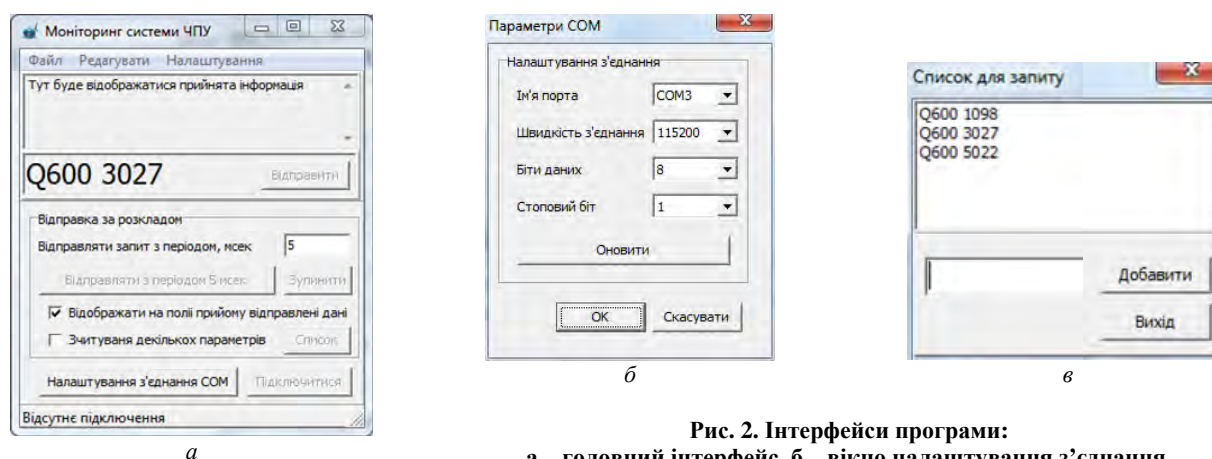


Рис. 2. Інтерфейси програми:  
а – головний інтерфейс, б – вікно налаштування з'єднання,  
в – вікно списку параметрів

Для перевірки функціонування створеного програмного засобу зворотного зв'язку був виконаний експеримент, під час якого оброблялася заготовка зі сталі 40Х,  $\varnothing 35\text{мм}$  на довжині 40мм при зміні припуску від 1мм до 2,5мм (точіння циліндра  $\varnothing 30\text{мм}$ ), подача 0,12 мм/об і частота обертання шпинделя 1000 об/хв. (рис.3, а).

Для тестування програми за умовами експериментальних досліджень були встановлені наступні параметри, що визначатимуть часові та інформаційні характеристики з'єднання (дивись рис.2, б), далі записується список параметрів для запиту (рис.2, в):

- Q600 1098 – навантаження (потужність) на шпинделі;
- Q600 3027 – частота обертання шпинделя;
- Q600 5022 – координата вісі Z на момент запиту.

Інтервал, з яким зчитувалися параметри був встановлений на 250 мс. Програма виконується на персональному комп'ютері, що підключений до системи управління верстата за допомогою порту RS-232.

Під час експерименту дані, що отримані за допомогою створеної програми, були записані у файл, за яким побудовані графіки зміни потужності двигуна головного руху (лінія 2 на рис.3) і глибини різання (за координатою X) від координати Z (лінія 1 на рис.3).

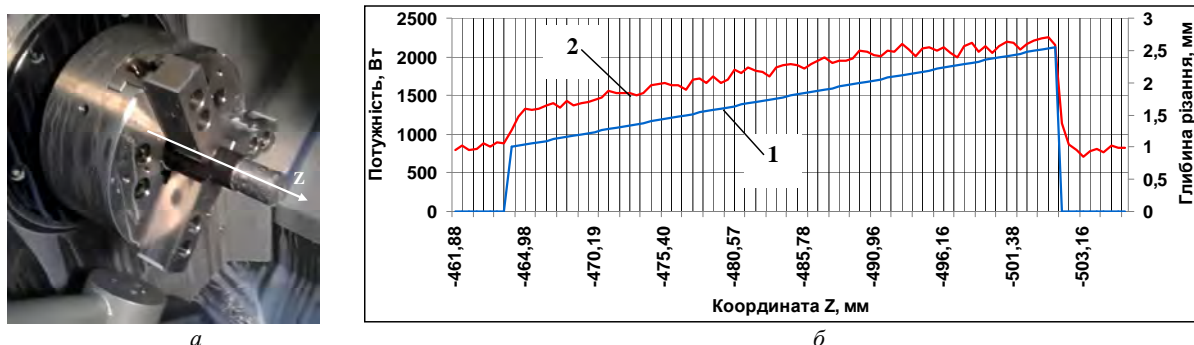


Рис. 3. Перевірка каналу зворотного зв'язку: а – деталь, що обробляється, б - графіки залежності потужності двигуна головного руху від глибини різання за координатою Z

Перевірка адекватності записаної інформації, а саме потужності різання, проводилась з використанням відомої залежності складової  $P_z$  сили різання від режиму і розрахунку потужності  $W_p$  різання з відніманням потужності холостого ходу з експериментальних даних за формулою:

$$W_p = \frac{P_z \pi D n}{1000 \cdot 60} \quad (\text{Вт}), \quad (1)$$

де  $n$  – частота обертання шпинделя (об/хв.),  $P_z$  – складова сили різання (Н).

Проведена експериментальна перевірка функціонування створеного програмного забезпечення повністю підтвердила можливість його використання у якості каналу зворотного зв'язку САУ для верстата з ЧПУ.

**Модуль управління.** У відповідності до основного принципу числового програмного управління, як правило, при виконанні програми кожний наступний кадр буде виконуватись тільки після повного завершення попереднього, причому команда, що визначає подачу в G-кодах, не може бути переписана в режимі on-line. В той же час, при виконанні одного кадру, наприклад руху за дугою кола, головна характеристика процесу різання може змінюватись в значному діапазоні, що вимагає управління, тобто автоматичної зміни величини подачі. Тому було запропоновано змінювати подачу, використовуючи можливості стійки ЧПК, а саме через енкодер ручної корекції подачі.

Для з'ясування функціонування цього каналу управління були виконані наступні експериментальні дослідження (рис.4). До клем А і В енкодера 1 ручної корекції подачі стійки ЧПК фірми HAAS були підключені входи 2 осцилографу, на екрані якого можна спостерігати форму сигналів 3 управління при обертанні маховичка в сторону збільшення чи зменшення подачі. В результаті було визначено тип сигналу, що генерується енкодером при обертанні маховичка ручної подачі. На основі отриманої інформації було розроблене тестове програмне забезпечення для відтворення необхідного типу сигналу в ході управління від САУ.

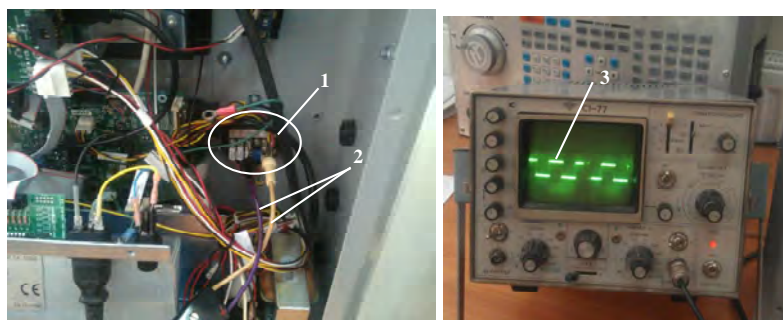


Рис. 4. Експериментальна установка для визначення сигналів управління

**Експериментальна установка для моделювання.** Наступний крок з реалізації САУ – перевірка функціонування всього замкненого контуру у складі створеної системи адаптивного управління. Для вирішення цієї задачі була створена експериментальна установка та розроблена методика проведення досліджень. Експериментальна установка була створена за функціональною схемою (рис.5, а) і складається зі стійки ЧПК фірми HAAS, спеціально розробленої апаратної частини і програмної частини, що завантажена у персональний комп'ютер. Апаратна частина перетворює сигнал управління, який генерується відповідною процедурою в програмній частині САУ в сигнал, що сприймається енкодером стійки (дивись рис.4). Оскільки моделювання проводилось з використанням стійки ЧПК, але без реального процесу різання, його було замінено прикладною програмою «модель процесу фрезерування», що створена за алгоритмом, представленим в роботі [8], а в стійку ЧПК завантажена управляюча програма у G-кодах, яка забезпечує фрезерування такого ж контуру. Таким чином, експериментальна установка (рис.5, б) складається зі стійки 1 ЧПК HAAS, блока 2 апаратної частини і персонального комп'ютера 3.

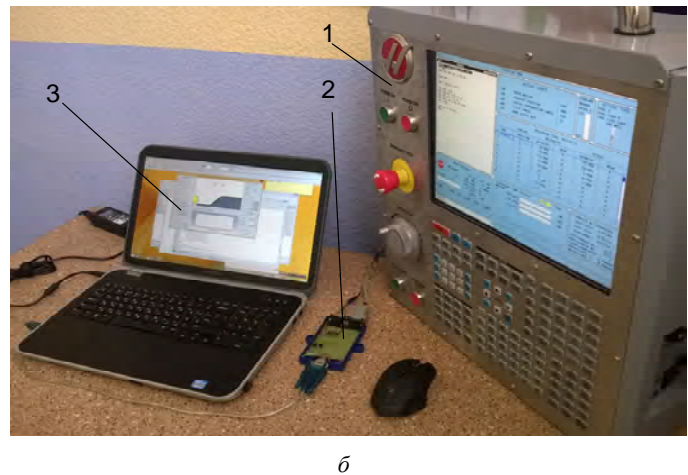
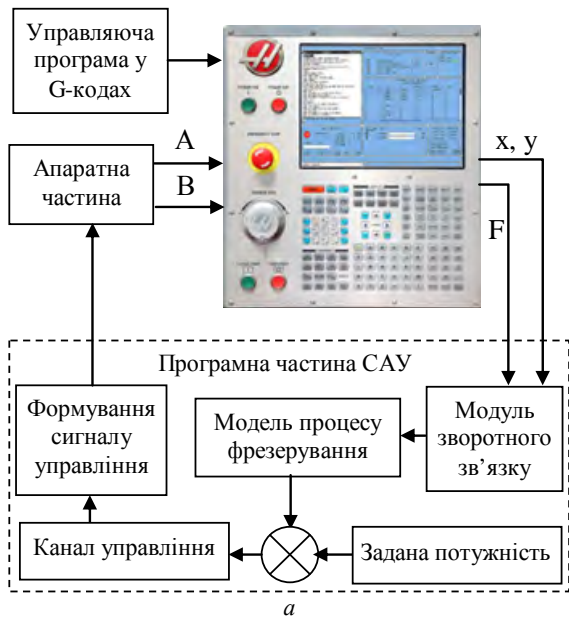


Рис. 5. Моделювання функціонування системи адаптивного управління: а - функціональна схема, б – експериментальна установка

У відповідності до плану експерименту спочатку необхідно визначити оптимальну величину коефіцієнту  $k_n$  передачі каналу управління, який здійснює регулювання за пропорційним законом. Для цієї мети використана прикладна програма моделювання процесу фрезерування [8], в яку були включені процедури, що виконують операції за контуром регулювання САУ, зчитування файлу даних координат, які надходять зі стійки, представлення додаткових параметрів процесу моделювання тощо (рис.6).

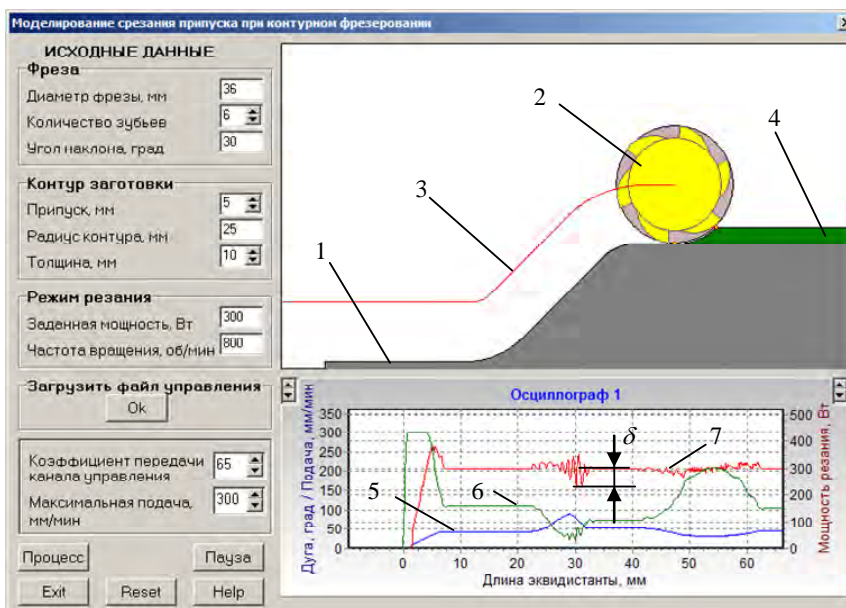


Рис. 6. Інтерфейс програми моделювання

За допомогою прикладної програми було проведено моделювання процесу фрезерування контуру деталі 1, що містить як увігнуті, так і випуклі дільниці фрезою 2, яка рухається за траєкторією 3 і зрізує припуск 4 (рис.6). Рух здійснюється за масивом даних координат, що були окремо отримані зі стійки при виконанні програми обробки заданого контуру за допомогою каналу зворотного зв'язку і збережені в окремому файлі. При моделюванні на екрані осцилографа з'являються графіки зміни довжини дуги різання (лінія 5), подачі (лінія 6) і потужності різання (лінія 7).

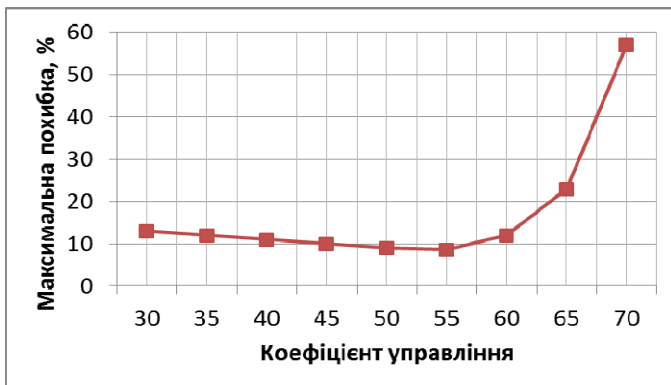


Рис. 7. Залежність похибки регулювання від коефіцієнту передачі каналу управління

Якість процесу регулювання оцінювалась за максимальною похибкою  $\delta$  стабілізації потужності різання, при цьому збільшення потужності при врізанні не урахувалось. В процесі моделювання різання максимальна величина похибки завжди спостерігалась при різкій зміні умов різання: при збільшенні або зменшенні дуги різання. За результатами експерименту була визначена величина коефіцієнту передачі каналу управління, що становить  $k_n = 55$  (рис.7). Така величина забезпечує мінімальну похибку САУ при пропорційному регулюванні. Збільшення коефіцієнту викликає різке погіршення якості регулювання і за межею  $k_n > 70$  САУ втрачає сталість.

Друга частина запланованих експериментальних досліджень мала за мету перевірку функціонування всієї САУ у відповідності до функціональної схеми рис.5, а. Для виконання такого експерименту програмна частина САУ була розширена до включення всіх складових функціональної схеми (рис.8). Зоною 1 позначено інтерфейс для введення початкових даних моделювання, які визначають геометричні параметри фрези і процес різання, а у вікні 2 відбувається анімація процесу фрезерування. Зоною 3 виділений інтерфейс налаштування каналу з'єднання зі стійкою ЧПК, де 4 – клавіша з'єднання/від'єднання зі стійкою. У вікнах 5 відображається інформація, що зчитується з системи управління верстата, а у вікні 6 – інтерфейс налаштування періоду спрацювання системи. Коефіцієнт передачі каналу управління налаштовується у вікні 7, а граничні значення величини подачі для системи управління – у вікнах 8. Вибір джерела надходження даних для моделювання – у вікні 8. Для запуску процесу моделювання необхідно натиснути кнопку 9 а для збереження файлів моделювання, що відображаються у вікні 10 осцилографа – натиснути кнопку 11.

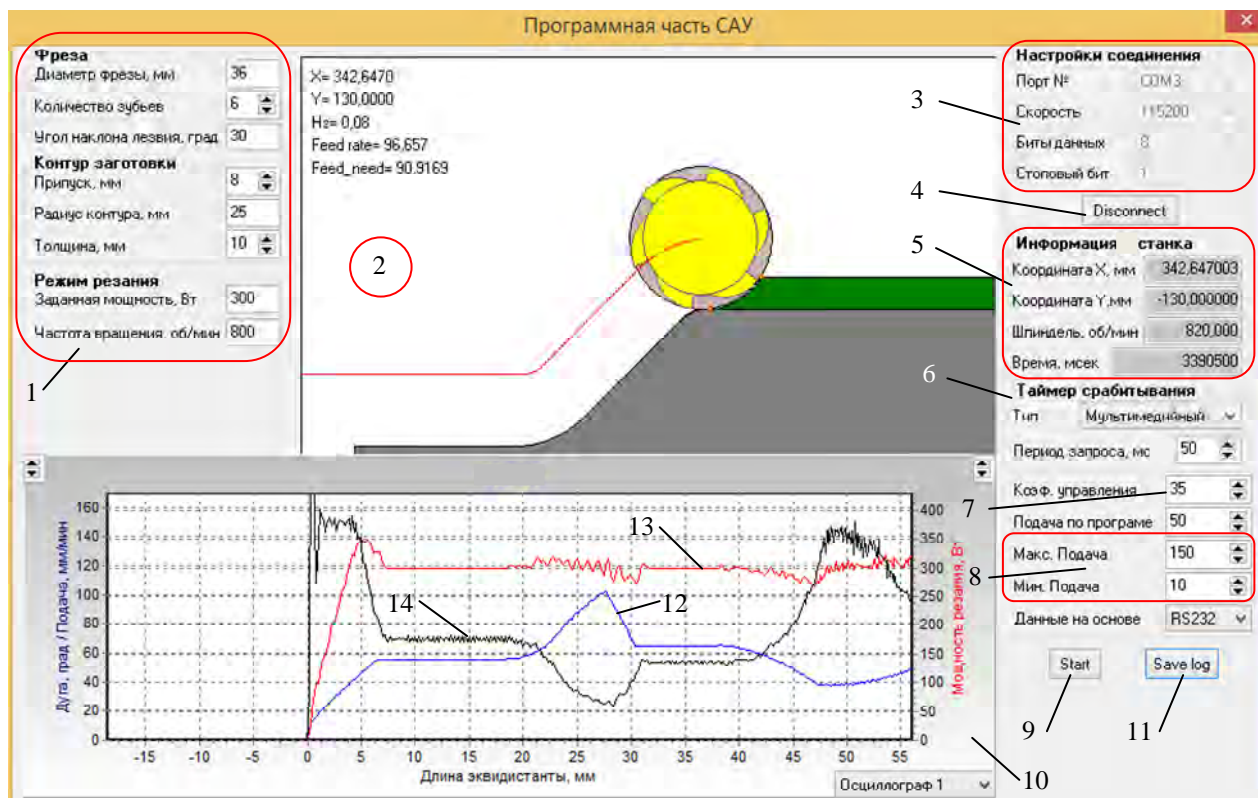


Рис. 8. Інтерфейс програмної частини САУ

В ході моделювання у вікні 10 осцилографа відображаються наступні характеристики процесу: лінія 12 – дуга різання, лінія 13 – подача, що записується зі стійки в процесі регулювання, лінія 14 – потужність різання. Таким чином, при функціонуванні САУ відбувається порівняння заданої потужності різання з тією, що розраховується моделлю фрезерування на відповідній ділянці контуру заготовки, яка визначається в моделі за координатами, що надходять зі стійки при виконанні управляючої програми і за помилкою, що утворилася формується команда на зміну подачі. Ця команда, через блок апаратної частини САУ, впливає на енкодер стійки ЧПК і подача відповідно змінюється, а її фактична величина відображається лінією 13 у вікні 10 осцилографа. За отриманими результатами моделювання можна констатувати коректне функціонування всієї САУ: потужність різання на протязі фрезерування всього контуру заготовки, не зважаючи на суттєві зміни умов різання, автоматично підтримується на заданому рівні 300 Вт.

### Висновки

1. Визначна структура САУ фрезерного верстата з ЧПК, що має складатися з програмної та апаратної частин. У програмній частині сформовані процедури каналу зворотного зв'язку, каналу автоматичного управління і формування сигналу управління для апаратної частини, яка з'єднана з енкодером стійки ЧПК. Експериментально доведена можливість керувати подачею при виконанні управляючої програми через створений апаратний модуль.
2. Застосування моделі процесу фрезерування замість реального процесу дозволяє провести експерименти з визначення параметрів САУ та оцінити якість управління і швидкість без ризику пошкодження інструменту, верстату тощо. Такий підхід дозволяє провести експерименти з застосування різних законів управління, а саме: пропорційно-диференціального (ПД) і пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД).
3. При моделюванні встановлено, що величина коефіцієнту підсилення каналу управління, що забезпечує найменшу похибку, залежить від часу опитування каналу зворотного зв'язку. Так при інтервалі опитування 50 мс через інтерфейс RS232 оптимальна величина коефіцієнту знизилась з 55 до 35.

**Аннотация.** Представлена система адаптивного управления фрезерованием на станке с ЧПУ. Система предназначена для стабилизации мощности резания при изменении условий фрезерования сложных поверхностей деталей. Разработанная структура системы состоит из модуля управления, модуля обратной связи и модуля формирования сигнала управления. Модуль обратной связи подключен к стойке ЧПУ через интерфейс RS232, а модуль формирования сигнала управления подключен через специальный аппаратный блок к энкодеру ручной коррекции подачи. Проведение экспериментов с использованием специально созданной цифровой модели процесса фрезерования позволило устранить риски и провести исследования в широком диапазоне изменения параметров вплоть до потери устойчивости системы. Выполнены экспериментальные исследования с целью определения коэффициента передачи канала управления, который обеспечивает устойчивое функционирование системы. Подтверждена возможность стабилизации мощности резания за счет автоматического управления подачей.

**Ключевые слова:** система адаптивного управления, фрезерование, станок с ЧПУ.

**Abstract.** The adaptive control system of milling on the CNC machine is presents. The system is designed to stabilize cutting power when conditions change milling of complex surfaces. The structure of the system consists of a control module, a feedback module and the module of generation of a control signal. Feedback module connected to the CNC via RS232 interface, and the module of generation of a control signal is connected through a dedicated hardware block to the encoder manual correction of feed rate. The experiments using a specially created digital models of the milling process allowed us to eliminate the hazards and to conduct research in a wide range of change of parameters up to the loss of stability of the system. Performed experimental studies to determine the feed rate control channel, which ensures the stable operation of the system. The possibility of stabilization of the cutting power due to the automatic feed control was confirmed.

**Keywords:** adaptive control, milling, CNC machine

### Бібліографічний список використаної літератури

1. Jerard. R., Fussell B., Ercan M. On-line Optimization of Cutting Conditions for NC Machining // Manufacturing & Industrial Innovation Research Conference, Tampa, Florida, 2011.
2. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Теория автоматического управления технологическими системами / М.: Машиностроение, 2008. – 336с.
3. Петраков Ю.В. Развитие САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ: Монографія. – К.: Січкара, 2011. – 220с.
4. Евченко К., Пинчук А. PowerMill 2013: стратегия Vortex и новые возможности для программирования пятиосевой обработки / САПР и графика, №11, 2012.- с.88-91.
5. Mastercam Balic J. Sntelligent CAD/CAM systems for CNC programming – an overview / Advances in Production Engineering & Managmnt ISSN 1854-6250 1(2006) 1, pp.13-22.

6. *Балакишин Б. С.* и др. Адаптивное управление станками, М.:Машиностроение, 1973, 688с.
7. *Системы адаптивного регулирования и мониторинга для металлообрабатывающих станков с CNC* / <http://www.omative.com/173890/ACM>.
8. *Петраков Ю.В., Мацківський О.С.* Моделювання фрезерування кінцевими фрезами. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування, №73, Київ 2015 С.78-83.

#### References

1. *Jerard. R., Fussell B., Ercan M.* On-line Optimization of Cutting Conditions for NC Machining. Manufacturing & Industrial Innovation Research Conference, Tampa, Florida, 2011.
2. *Petrakov Y.V., Drachev O.I.* Teoria avtomaticheskogo upravleniya technologicheskimi sistemami. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 336p.
3. *Petrakov Y.V., Rozvitok CAM-sistem avtomatizirovanogo programuvanna verstativ z CNC: Monografia.* Kyiv: Sichkar, 2011. 220p.
4. *Evchenko K., Pinchuk A.* PowerMill 2013: strategiya Vortex i novie vozmozhnosti dla programmirovania piatiosevoy obrabotki / SAPR i graphika, no 11, 2012. p.88-91.
5. *Mastercam Balic J.* Snteligent CAD/CAM systems for CNC programming – an overview. Advances in Production Engineering & Managmtnt ISSN 1854-6250 1(2006) 1, pp.13-22.
6. *Balakshin B. S.* и др. Адаптивное управление станками. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 688p.
7. *Systemi adaptivnogo regulirovania i monitoringa dla metalloobrabativaucshich stankov CNC.* <http://www.omative.com/173890/ACM>.
8. *Petrakov Y.V., Mackivsky O.S.* Modeluvannia frezeruvannia kincevimi frezami. Vestnik NTUU “KPI”. Seria mashinobuduvannia, no 73, Kyiv, 2015. p.78-83.

Подана до редакції 08.09.2015