

**Петраков Ю.В., Підпалій В.І.**  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна  
[yp-86@yandex.ua](mailto:yp-86@yandex.ua)

## **ВИБІР ПАРАМЕТРІВ АКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК**

### **Вступ**

Наявність природних зворотних зв'язків процесу різання, який завжди відбувається в пружній технологічній обробляючій системі (ТОС), в сполученні з обробкою за слідом, викликає виникнення так званих регенеративних коливань, що негативно впливає на якість оброблення і може навіть привести до втрати сталості процесу. Наявність регульованих приводів головного руху на сучасних верстатах з ЧПК дозволило реалізовувати ефективний метод гасіння регенеративних коливань шляхом управління швидкістю різання. Такий режим при токарному обробленні досягається за рахунок спеціального управління частотою обертання двигуна головного руху. В сучасних токарних обробляючих центрах цей режим програмується опцією «Spindle Speed Variation» (SSV) [1].

Управління SSV передбачає зміну частоти обертання шпинделя, як правило, за гармонічним законом. Очевидно, що амплітуда зміни і період для оптимального результату мають залежати від характеристик процесу різання і параметрів ТОС. Таким чином, виникає необхідність створення дієвого механізму практичного визначення таких параметрів в умовах діючого виробництва безпосередньо технологом-програмістом.

Відомо, що визначення необхідних параметрів управління передбачає наявність математичної моделі процесу, що управляється, або іншого його адекватного представлення. Перші такі дослідження [2] на підставі моделі процесу різання з урахуванням запізнюючого аргументу пропонують використовувати евристичний критерій для вибору частоти зміни швидкості виходячи з мінімуму енергозатрат на процес різання. Напрямок подальших досліджень [3, 4] спрямований на визначення оптимальних співвідношень амплітуди і частоти SSV. Однак, в цих роботах приведені всього лиш деякі рекомендації, побудовані на теплових обмеженнях двигуна головного руху. Крім того, у всіх роботах відмічається складність створення універсальної стратегії підбору оптимальних параметрів SSV.

Серед причин, що приводять до виникнення автоколивань, різні дослідники відмічають три найбільш значимі: нелінійність залежності між силою різання і глибиною різання [5], запізнення сили різання по відношенню до глибини різання (постійна часу стружкоутворення) [6] або наявність обробки «за слідом» [7]. Аналіз відомих досліджень свідчить, що, при створенні математичних моделей, що представляють динамічні явища при різанні, повна сукупність таких факторів разом з динамічною моделлю, що описує процес у 3D просторі дозволяє провести дослідження з визначення оптимальних параметрів SSV [8]. Однак такі дослідження вимагають значну кількість апріорних даних про процес різання і особливо про ТОС, що значно затрудняє вирішення поставленої задачі.

Таким чином, залишається актуальною проблема розроблення дієвої і спрощеної методики, яка б дозволяла провести пошук найбільш раціональних (або оптимальних) параметрів SSV управління.

### **Мета роботи**

Мета дослідження – розробити і перевірити на практиці методику вибору оптимальних параметрів управління частотою обертання шпинделя токарного верстата з ЧПК для гасіння регенеративних автоколивань і забезпечення необхідної якості обробленої поверхні.

### **Результати досліджень**

На кафедрі технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського на протязі багатьох років ведуться дослідження з моделювання процесів різання і автоматичного управління ними на верстатах з ЧПК. Для вирішення поставленої задачі в рамках мети, що

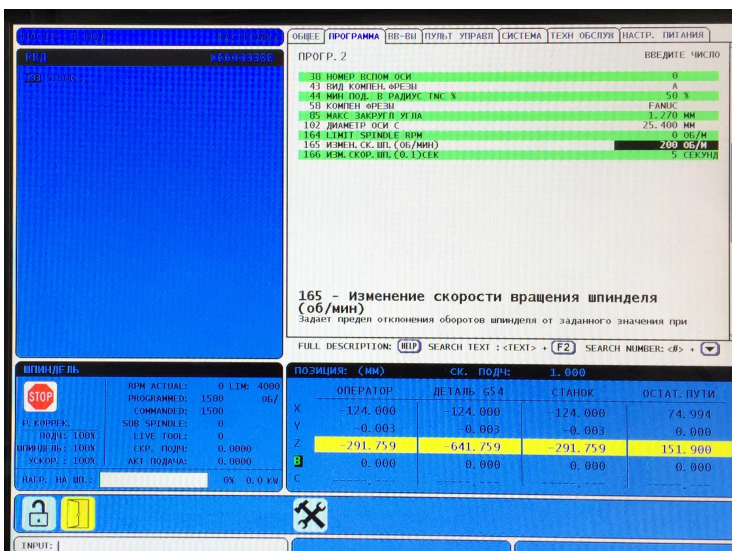
задекларована, було прийняте рішення використати математичний апарат планування експерименту і створення регресійної моделі, що зв'язує амплітуду та період SSV при гармонічному законі управління з шорсткістю обробленої поверхні.

Для виконання завдання був застосований повнофакторний експеримент  $2^2$ , а лінійна математична модель шукається у вигляді:

$$Ra = a_0 + a_1A + a_2T, \quad (1)$$

де  $Ra$  – параметр шорсткості обробленої поверхні;  $a_0$  – значення шорсткості (для попередньо обробленої поверхні);  $A$  – амплітуда зміни частоти обертання шпинделя;  $T$  – період зміни частоти обертання;  $a_1, a_2$  – коефіцієнти.

Умови проведення експериментів: поперечна подача  $S=0,1$  мм/об; глибина різання  $h=0,5$  мм; частота обертання шпинделя  $n=1500$  об/хв.; діаметр заготовки  $d=30$  мм; довжина заготовки  $L=200$  мм; матеріал заготовки Сталь 20; інструмент – прохідний різець, радіус вершини  $r=0,8$  мм. Попередньо були визначені діапазони зміни параметрів: максимальна амплітуда 200 об/хв., мінімальна 100 об/хв., максимальний період 20 мс, мінімальний період 5 мс. Програмування відповідних параметрів SSV виконувалося безпосередньо на стійці ЧПК верстата (рис.1, а), після чого оброблялася відповідна заготовка (рис.1, б).



а) налаштування параметрів SSV, б) робоча зона верстату

Рис.1. Умови проведення експериментів:

а) – налаштування параметрів SSV, б) – робоча зона верстату



Рис.2. Вимірювання шорсткості

У відповідності до методики повнофакторного експерименту  $2^2$ , були виконані чотири експерименти з вимірюванням шорсткості безпосередньо на верстаті цифровим вимірювальним приладом (рис.2). Результати зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати експериментів

№	Амплітуда, об/хв.	Період, мс	Шорсткість $Ra$ , мкм
1	200	5	4,70
2	100	5	5,42
3	100	20	2,74
4	200	20	2,36

При нормуванні факторів за правилами побудови лінійної моделі ( $A_B=200$  об/хв  $\rightarrow +1$ ;  $A_H=100$  об/хв  $\rightarrow -1$ ;  $T_H=5$  мс  $\rightarrow -1$ ;  $T_B=20$  мс  $\rightarrow +1$ ) можна визначити наступні коефіцієнти:

$$4\tilde{a}_0 = 4,70 + 5,42 + 2,74 + 2,36 = 15,22, \text{ звідки } \tilde{a}_0 = 3,805;$$

$$4\tilde{a}_1 = -4,70 - 5,42 + 2,74 + 2,36 = -5,02, \text{ звідки } \tilde{a}_1 = -1,255;$$

$$4\tilde{a}_2 = -4,70 + 5,42 - 2,74 + 2,36 = 0,34, \text{ звідки } \tilde{a}_2 = 0,085.$$

Отже, математична модель для нормованих факторів матиме вигляд:

$$Ra = 3,805 - 1,255\tilde{A} + 0,085\tilde{T} \quad (2)$$

Для повернення до ненормованим (реальним) факторам необхідно виконати наступні обчислення:

$$a_0 = \tilde{a}_0 - \tilde{a}_1 \frac{A_B + A_H}{A_B - A_H} - \tilde{a}_2 \frac{T_B + T_H}{T_B - T_H} = 7,428$$

$$a_1 = \frac{2\tilde{a}_1}{A_B - A_H} = -0,0251 \quad a_2 = \frac{2\tilde{a}_2}{T_B - T_H} = 0,01133$$

Таким чином, остаточно маємо наступну лінійну модель:

$$Ra = 7,428 - 0,0251A + 0,01133T \quad (3)$$

За отриманою моделлю можна прогнозувати вплив параметрів SSV управління на шорсткість обробленої поверхні. Так, з залежності (3) випливає, що для зменшення шорсткості (за умов експерименту) необхідно збільшувати амплітуду коливань та зменшувати період зміни швидкості обертання шпинделя. Однак на практиці в такому виборі впливають певні обмеження, про які йдеться нижче.

При виборі параметрів закону управління також необхідно урахувати навантаження на двигун головного руху, які збільшуються у порівнянні з постійним режимом різання і можуть викликати певні колізії, пов'язані з перегрівом двигуна. Потужність двигуна головного руху може бути визначена за залежністю:

$$P_\partial = J_{np} \frac{d\omega}{dt} + P_{piz} + P_{xx}, \quad (4)$$

де  $\omega$  – наріжна швидкість,  $J_{np}$  – приведений момент інерції,  $P_{piz}$  – потужність, що витрачається на різання,  $P_{xx}$  – потужність холостого руху.

При здійсненні управління за опцією SSV використовується гармонічний закон:

$$\omega = \omega_0 + A \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (5)$$

де  $\omega_0$  – постійна наріжна швидкість шпинделя,  $A$  – амплітуда,  $T$  – період SSV.

Приведений момент інерції визначається за загальною формулою:

$$J_{np} = J_{\partial\partial} + (J_{ш} + J_n + J_3) / i^2, \quad (6)$$

де  $J_{\partial\partial}$  – момент інерції ротора двигуна (зі шківом),  $J_{ш}$  – момент інерції шпинделя (зі шківом),  $J_n$  – момент інерції патрона,  $J_3$  – момент інерції заготовки,  $i$  – передаточне відношення пасової передачі.

Потужність, що витрачається на різання, визначається за відомою з теорії різання залежністю:

$$P_{piz} = \frac{F_Z V}{1000 \cdot 60}, \quad (\kappa Bm), \quad (7)$$

де  $F_Z$  – тангенціальна складова сили різання,  $V$  – швидкість різання.

Для умов експерименту були розраховані постійні складові для формули (4), а потужність холостого ходу (за рекомендаціями фірми-виробника верстата HAAS)

визначається у відсотках потужності приводу в залежності від частоти обертання. Для частоти обертання 1500об/хв. без обробки, потужність холостого ходу становить 9-10% від потужності приводу, тобто для верстату HAAS DS-30Y, на якому проводився експеримент, потужність головного приводу становить 22,4 кВт, а відповідно  $P_{xx}=2,24кВт$ .

При виконанні експериментів зміна потужності фіксувалась безпосередньо з екрану стійки ЧПК верстата за показниками відповідного індикатора (обведено лінією 1 на рис.3.) за кожний цикл зміни частоти обертання шпинделя.

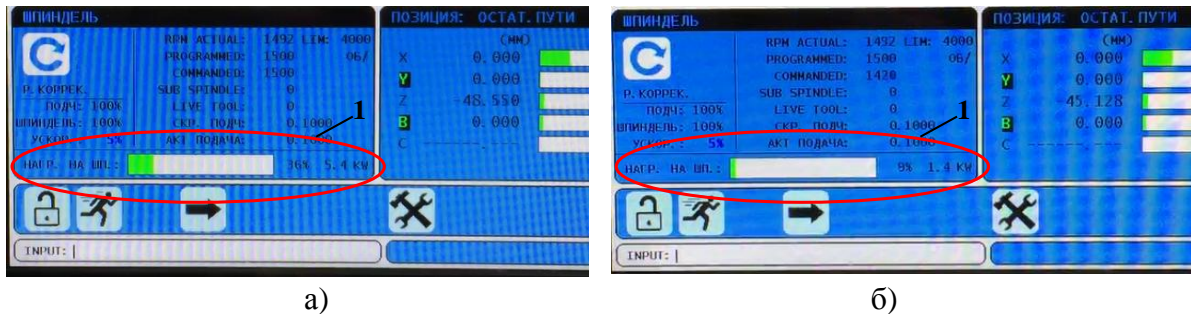


Рис.3. Вимірювання потужності приводу головного руху при SSV:  
а) – максимальна потужність 5,4кВт, б) – мінімальна потужність 1,4кВт

Результати, що представлені у вигляді діаграм на рис.4, свідчать про достатню адекватність розроблених математичних моделей.

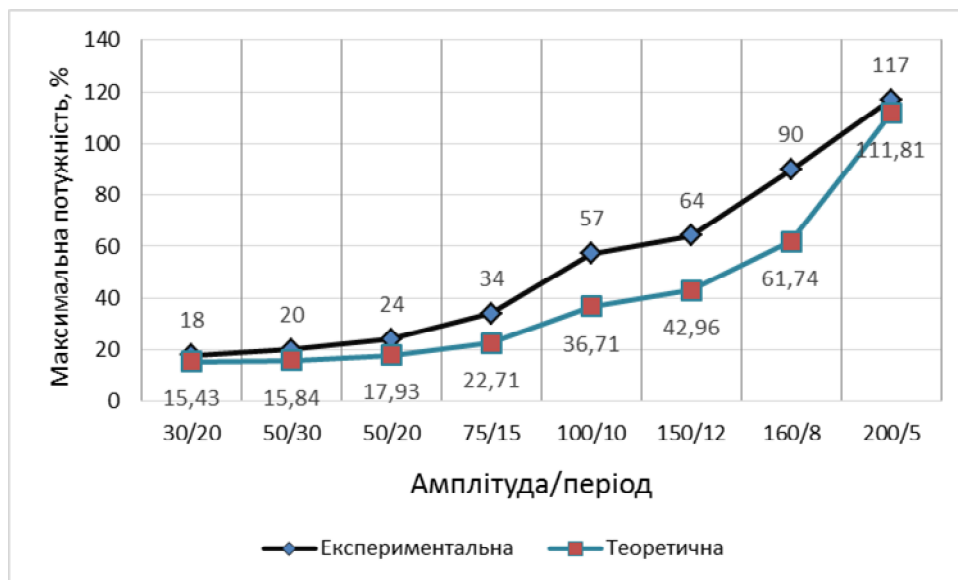


Рис.4. Залежності максимального перевищення потужності приводу головного руху верстата від параметрів SSV

## Висновки

1. Розроблена методика визначення параметрів SSV управління шпинделем токарного верстата з ЧПК дозволяє вибрати такі амплітуду і період зміни частоти обертання, які для певних умов гарантують отримання заданої шорсткості поверхні при точінні мало жорстких деталей.
2. Доведено, що при визначенні параметрів SSV необхідно урахувати зміну навантаження на двигун приводу головного руху, при цьому можна користуватися розробленою математичною моделлю, адекватність якої доведена експериментально.

**Перелік джерел літератури:** 1. Spindle Speed Variation – Stop chatter during CNC turning [Electronic resource] // Haas Automation. – Mode of access: \ www / URL: <https://www.youtube.com/watch?v=kR6KUsh-jg4> 2. Emad, Al-Regib. Programming spindle speed variation for machine tool chatter suppression [Text] / Al-Regib Emad, Ni Jun, Soo-Hun Lee //

International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. – №43. – pp. 1229–1240. **3.** Albertelli, P. Spindle speed variation in turning: technological effectiveness and applicability to real industrial cases [Text] / P. Albertelli, S. Musletti, M. Leonesio, G. Bianchi // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 62, Issue 1–4. – pp. 59–67. **4.** Andreas, Otto. Application of Spindle Speed Variation for Chatter Suppression in Turning [Electronic resource] / Otto Andreas, Radons Gunter // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2013. – Vol. 6, Issue 2. – Mode of access: \www/ URL: [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755\\_581713000047](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755_581713000047) **5.** Логоминов В.А. Внуков Ю.Н. Анализ подходов по учету динамики сил резания при прогнозировании виброустойчивости механической обработки // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.–техн. сб. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. – №79. – С. 132–153. **6.** Иванов, О.И. К вопросу моделирования процесса стружкообразования при резании металлов [Текст] // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2014. – №3 (29). – С. 57–61. **7.** Петраков Ю. В. Моделирование гашения колебаний при токарной обработке / Вісник НТУУ «КПІ» Машинобудування №77, Київ, 2016.- С.119-124. **8.** Petrakov Y., Danylchenko M., Petryshyn A. Programming spindle speed variation in turning / EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, 2017, #2 (1-85) pp.4-9.

Рецензент: **Мироненко Е.В.**, д.т.н., проф. ДДМА

#### ВИБІР ПАРАМЕТРІВ АКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК

Петраков Ю.В., Підпалый В.І.

Представлена методика визначення параметрів SSV управління (амплітуди і періоду зміни частоти обертання шпинделя) на токарному верстаті з ЧПК. На підставі повно факторного експерименту отримана математична модель, що зв'язує амплітуду і період з шорсткістю обробленої поверхні. При виборі параметрів SSV пропонується урахувати обмеження за потужністю двигуна приводу головного руху. Складена математична модель потужності адекватно відображає процес і добре корелюється з експериментальними даними. Результати виконаних досліджень можуть бути використані при програмуванні токарної обробки нежорстких деталей.

Ключові слова: управління частотою обертання шпинделя, токарні верстати, числове програмне управління.

#### ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ ТОКАРНОГО СТАНКА С ЧПУ

Петраков Ю.В., Підпалый В.И.

Представлена методика определения параметров SSV управления (амплитуды и периода изменения частоты вращения шпинделя) на токарном станке с ЧПУ. На основании полнофакторного эксперимента получена математическая модель, связывающая амплитуду и период с шероховатостью обработанной поверхности. При выборе параметров SSV предлагается учитывать ограничения по мощности двигателя привода главного движения. Составленная математическая модель мощности адекватно отображает процесс и хорошо коррелируется с экспериментальными данными. Результаты выполненных исследований могут использоваться при программировании токарной обработки нежестких деталей.

Ключевые слова: управление частотой вращения шпинделя, токарные станки, числовое программное управление.

#### CHOICE OF PARAMETERS SPINDLE SPEED VARIATION ON LATHE CNC

Petrakov Y.V., Pidpalyi V.I.

The technique for determining the parameters of the SSV control (amplitude and period changes in the frequency of spindle rotation) on a lathe with CNC. On the basis of full factorial experiment produced a mathematical model to relate the amplitude and period of roughness of the machined

surface. When selecting settings for SSV it is proposed to consider restriction of engine power of main drive. The mathematical model of power and adequately reflects the process and is well correlated with the experimental data. Resultant of the research can be used when programming turning machining non-rigid parts.

Key words: spindle speed variation, CNC lathes, numerical control.