

УДК 621.9

Ю.М. Внуков, д.т.н., проф.

О.Г. Вотінов, аспір.

О.О. Тітова, к.т.н., доц.

*Запорізький національний технічний університет***ПРОБЛЕМИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ
НЕЖОРСТКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Розглянуто дослідження як вітчизняних, так і закордонних авторів, у яких вивчаються актуальні питання підвищення якості та ефективності обробки нежорстких деталей на металорізальних верстатах. Серед методів, які запропоновано в цих роботах, виділено три групи: моделювання і оптимізація процесів обробки, адаптивне управління та технологічні засоби забезпечення якості продукції.

Постановка проблеми. Багато сучасних досліджень присвячено проблемам обробки деталей машин та механізмів. Значну частину таких деталей при обробці не можна вважати жорсткими. У статті розглянуто основні дослідження, пов'язані з даною проблематикою. Розглядаються як вітчизняні, так і закордонні роботи в цьому напрямку.

Постановка проблем, які виникають при обробці нежорстких деталей, підходи до їх вирішення, задачі забезпечення якості продукції та стійкості інструмента описано в роботах Н.В. Гнайтейко, В.О. Румбешта, Л.А. Васильєвих, Ю.Г. Кабалдина, С.В. Серого, С.В. Біленко, Ю.М. Внукова, М.І. Ташлицького, В.Г. Гребня, І.Б. Шендерова та інших вчених України та СНД [1–12].

Результати досліджень. Для підвищення якості та ефективності обробки нежорстких деталей існують декілька шляхів. У роботах [4, 8, 13–17] розглядаються технологічні заходи, які дозволяють зменшити вплив вібрацій та пружних деформацій на якість продукції. Іншим шляхом вирішення проблем, пов'язаних з вібраціями, є знаходження оптимальних параметрів обробки, коли власні частоти пружної системи верстата розбігаються з частотами вимушених коливань, що виникають при різанні [1, 3, 6, 7, 9, 12, 18–22].

Задачі контролю якості становлять значну частину вимог сучасного виробництва. Так, у роботах Ю.М. Внукова та В.І. Дубровіна [23], [24] визначаються проблеми забезпечення якості продукції у сучасному виробництві. Розглядаються питання підвищення точності виготовлення деталей, які постають, починаючи з проектування виробу. Серед методів підвищення якості виробів, які було розглянуто в даних роботах, можна особливо відзначити прогнозування та керування процесами. Також треба відзначити метод вихідного контролю якості продукції, але він може застосовуватись лише при великосерійному виробництві.

У роботі [25] сучасні методи комп'ютерного моделювання використовуються для визначення висоти мікронерівностей результуючої поверхні, які визначають її шорсткість, в залежності від сукупності параметрів обробки. Побудовано математичну модель, яка описує поверхню різання при кінцевому сферичному фрезеруванні:

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t) + V_x \cdot t + X_0 \\ Y = -R \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\omega \cdot t) + Y_0, \\ Z = -R \cdot \sin(\beta) + V_z \cdot t + Z_0 \end{cases} \quad (1)$$

де R – радіус фрези; β – кут, який визначає положення точки на різальній крайці; ω – циклічна частота обертання фрези; V_x та V_y – швидкості горизонтального та вертикального рухів відповідно; X_0 , Y_0 , Z_0 – координати точки початку руху. Для визначення висоти нерівностей потрібно знайти перетини трьох найближчих інструментальних поверхонь, тобто розв'язати систему рівнянь, у якій кожній поверхні відповідають три рівняння виду (1). У системі є трансцендентні рівняння. Як засоби їх розв'язання розглядаються чисельні методи (Ньютона та градієнтного спуску). Але як більш зручний пропонується приближений аналітичний розв'язок, який одержують шляхом заміни складних інструментальних поверхонь трьома зміщеними сферами. При цьому проєкції відстаней між центрами сфер на координатні осі складаються з подачі на зуб S_z , кроку фрезерування S_r та випадкової величини зміщення $\Delta \in [0; S_z]$. Тоді координати точки перетину сфер:

$$X = \frac{S_z}{2}, Y = \frac{S_r}{2} - \frac{\Delta}{2} \cdot \frac{S_z - \Delta}{S_r}, \quad (2)$$

а висота розрахункових нерівностей:

$$H_{\max}^{\text{расч}} = \sqrt{R^2 - X^2 - Y^2}. \quad (3)$$

Показано, що $H_{\max}^{\text{расч}}$ знаходиться у межах від $\sqrt{R^2 - \frac{S_z^2 + S_r^2}{4}}$

до $\sqrt{R^2 - \frac{S_z^2}{4} - \left(\frac{S_r}{2} - \frac{S_z^2}{8S_r}\right)^2}$. Визначено також, що деякі

сполучення подачі на зуб та радіальної подачі дозволяють виконувати управління рівнем шорсткості поверхні. Для значень $S_z > 2S_r$ якісно змінюється характер нерівностей, їх висота зменшується.

Модель, яку розроблено у роботі [25], може бути поліпшена шляхом урахування додаткових параметрів різання та динамічної системи верстата. Для поліпшення адекватності моделювання при високошвидкісній обробці найбільш важливими будуть коливання інструмента, а при обробці нежорстких деталей – вібрації заготовки.

Моделювання технологічних процесів має на меті забезпечення можливості перевірки результатів обробки для певного набору параметрів, не застосовуючи натурне моделювання. Таким чином, за рахунок значного підвищення швидкості перевірки якості обробки виникає можливість оптимізації шляхом підбору технологічних параметрів.

Так, у монографії Л.А. Васильєвих [2] розглядаються проблеми, які постають при обробці довговимірних нежорстких валів. Досліджуються питання пружної та пластичної деформації вала, особливості формотворення при обробці деталей малої жорсткості та технологічні засоби зменшення деформацій таких деталей.

Як шляхи вирішення проблеми пружної деформації при обробці деталей малої жорсткості пропонуються наступні варіанти:

- управління пружною деформацією деталі, яка обробляється, шляхом навмисної зміни вихідного

- положення елементів системи верстат–інструмент–заготовка;
- управління пружною деформацією деталі, яка обробляється, шляхом навмисного раціонального формування припуску на обробку;
- управління пружною деформацією деталі, яка обробляється, шляхом автоматизованої програмованої зміни положення елементів системи верстат–інструмент–заготовка в процесі обробки.

Серед переваг запропонованих шляхів можна відзначити наступні: відсутність необхідності використання люнетів, що дозволяє зменшити час на допоміжні операції; усунення потреби в переустановленні деталі при програмованій зміні положення елементів системи верстат–інструмент–заготовка в процесі обробки; можливість підналагодити параметри обробки, не перериваючи процесу. В роботі наведено схеми програмованого пристрою та результати випробувань у порівнянні з традиційними технологіями, шляхом порівняння показано переваги запропонованих методів.

Статті М.І. Тапліцького та В.Г. Гребня [3], [18] присвячено питанням вібрацій при токарній обробці нежорстких деталей, валів. В них розглядаються теоретична основа розрахунку граничних режимів різання та особливості вимірювань характеристик, які входять у розрахунок вібростійкості для токарних верстатів. Основними факторами, які викликають автоколивання динамічної системи верстата, вважаються запізнення сили різання при збільшенні товщини зрізу та різниця сил різання при врізанні та відштовхуванні від виробу при зміцненні поверхневого шару. Спосіб розрахунку, який запропоновано у роботі [3], враховує обидві причини збудження автоколивань.

У роботах [8], [9], [21] Ю.Г. Кабалдін та інші розглядають виникнення вібрацій деталі та інструмента, визначають критерії встановлення автоколивань системи верстат–пристрій–інструмент–деталь. Для дослідження процесу виникнення автоколивань динамічної системи застосовується термодинамічний підхід, модель будується з точки зору роботи та енергії. Фактори виникнення коливань називаються ті ж самі, що й у роботах

М.І. Ташліцького та В.Г. Гребня [3], [18]. Серед параметрів, які визначають шорсткість поверхні, при аналізі зазначаються ступінь та швидкість деформації, коефіцієнт утворення стружки та частота стружкоутворення. Запропоновано діагностику процесу обробки за миттєвим значенням частоти стружкотворення.

З іншого боку, в роботі [12] розрахунок граничних параметрів обробки виконується шляхом застосування критеріїв стійкості теорії управління до моделі динамічної системи верстата.

В останніх роботах Ю.Г. Кабалдіна, С.В. Біленко, С.В. Серого [7, 13, 19, 20] для моделювання та управління вібраціями використовуються сучасні математичні методи. Методи нелінійної динаміки використовуються у роботі [7] для дослідження динамічної стійкості пружної системи верстата, а в [20] – для адаптивного управління процесом обробки з метою запобігання переходу його у хаотичний стан.

При аналізі динамічної системи верстата будується амплітудно-фазова частотна характеристика. Ознакою стійкості динамічної системи є замкнутість цієї характеристики. Як критерій в роботі [7] пропонується перевірка результатів ітеративного розрахунку системи рівнянь, яка описує динаміку верстата у певних умовах. Систему можна вважати динамічно стійкою, якщо траєкторія розрахунку збігається до атрактора. Змінюючи параметри, можна знайти область початкових значень, у межах якої система буде стабільною.

У подальших роботах Ю.Г. Кабалдіна, С.В. Біленко, С.В. Серого нейронні мережі застосовуються як для моделювання динаміки пружної системи верстата у залежності від керуючих параметрів [19], так і для адаптивного управління [13].

Адаптивне управління має на меті шляхом реагування на дані про поточний стан процесу обробки змінювати параметри таким чином, щоб забезпечувати стабільність заданих режимів, вносити корекції у відповідь на випадкові зміни в технологічному процесі. В роботі [13] розглянуто питання розробки універсального методу адаптивного управління технологічними параметрами процесів механічної обробки на

базі критеріїв стійкості нелінійної динаміки і, зокрема, фрактальної розмірності шляхом аналізу її у реальному часі за допомогою нейромереж, які містять розпаралелений алгоритм розрахунку цієї характеристики, та адаптивної корекції управляючих параметрів процесів механічної обробки з метою підвищення якості обробленої поверхні, зменшення зносу інструмента, підвищення продуктивності за рахунок визначення оптимальних режимів роботи обладнання й стабільності технологічних систем механічної обробки. Аналіз хаотичності динаміки обладнання проводиться по сигналах, які випускаються в процесі обробки.

В роботі [19] нейронні мережі використовуються для розв'язання наступних задач:

- моделювання динаміки процесу механічної обробки в часі в залежності від управляючих параметрів. За навчальну вибірку використовують часові послідовності, утворені в результаті вимірювань на динамічній системі верстата у процесі різання;
- навчання мережі на множині часових послідовностей, які відповідають різним варіантам динаміки верстата в залежності від початкових параметрів;
- екстраполяція й прогноз поведінки динамічної системи верстата в умовах, які відрізняються від умов, що використовувались для навчання мережі.

Як вхідні параметри обираються величини, які визначають динаміку технологічної системи: швидкість, подача, глибина різання, границя міцності матеріалу заготовки, сила різання у робочому просторі, фазовий зсув сили різання, координатна податливість. Для моделювання обрана мережа типу багатошарового персентрона, у якій кожен нейрон будь-якого шару має на входах виходи всіх нейронів попереднього шару. На нейрони першого шару подаються дані з усіх входів мережі.

Перший шар мережі приводить параметри до єдиного масштабу так, щоб будь-який параметр був перетворений на число від 0 до 1:

$$\bar{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (4)$$

де \bar{x} – приведені значення аргументу; x – вихідні значення; x_{\min} , x_{\max} – відповідно мінімальне й максимальне значення аргументу x для всіх параметрів, які надходять до моделі.

Наступні шари мають сигмоподібну логістичну активаційну функцію:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}. \quad (5)$$

Кількість шарів мережі та нейронів у кожному шарі можуть бути довільними, але фактично визначаються балансом між можливістю більш точного моделювання та обмеженою продуктивністю роботи обчислювальної техніки. У статті [19] згадується емпіричне визначення цих параметрів, які дозволили з достатнім ступенем коректності за розумний час навчити мережу коректно моделювати динаміку на 1000 відліків.

Для навчання нейронної мережі використовується алгоритм "навчання з учителем із зворотним поширенням помилки", який зручно використовувати для перцептронів. Для врахування попередньої історії роботи мережі в ній створений зворотний зв'язок вихідного значення з входами нейронної мережі. Таким чином ця мережа моделює вплив попереднього стану на наступні кроки моделювання.

Після успішного навчання й контролю нейронна мережа може бути використана для моделювання роботи верстата. Її можна використовувати для складання карти динамічних режимів верстата на всьому можливому діапазоні обробки, оцінки жорсткості верстата, а також проектування динамічної системи верстата за найбільш стабільною схемою обробки. Від звичайної системи зі зворотним зв'язком навчання нейронної мережі відрізняється тим, що в ній неможливо задати аналітично роботу моделі. Шляхом підбору вагових коефіцієнтів мережа формує відповідність між певними сполученнями значень на входах та результатом, який має бути на виходах. В залежності від випадковостей навчання коефіцієнти можуть різнитись.

Використання нейронних мереж доцільне для розв'язання задач, які не можуть бути сформульовані аналітично. В даному випадку аналітичному розв'язанню проблеми контролю якості обробки перешкоджає як велика кількість параметрів, які

впливають на технологічний процес, так і випадковість похибок деяких джерел.

Адаптивна неймережа у цьому випадку складається з наступних шарів: лінеаризація, визначення попарної відстані, функція Хевісайда, нелінійна сигмоподібна функція, лінійна активаційна функція. Останні два шари являють собою двошаровий перцептрон, навчання якого проводиться за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки.

Велика кількість досліджень і запатентованих розробок пропонує технологічні методи забезпечення потрібної якості при виготовленні деталі. Так, І.Б. Шендеров в роботі [4] розглядає технологічні методи боротьби з непрямолінійністю та різностінністю при виготовленні суцільних та порожніх валів. Зовнішню поверхню довговимірних валів оброблюють на верстатах, оснащених роликівими та кільцевими люнетами. Окрім точності діаметра та заданої шорсткості потрібно дотримуватись обмежень по непрямолінійності та різностінності. Як управляючий фактор використовується зміщення зовнішньої або внутрішньої поверхні заготовки щодо осі верстата. При обробці якість деталі поставляє суперечливу мету: намагання зменшити непрямолінійність створює умови для збільшення різностінності, і навпаки. Для вибору оптимальних параметрів обробки потрібно зупинитись на компромісному варіанті.

Для зменшення непрямолінійності деталі схема встановлення заготовки у верстаті має бути щонайменш близька до статично визначеної. Як приклади таких схем установа називаються: а) одним торцем у центрі задньої бабки верстата і в роликівому люнеті в одному з проміжних перерізів; у двох роликівих люнетах у проміжних (не торцевих) перерізах заготовки. Обертання передається від повідкового або чотирикулачкового патрона верстата. Якщо статично визначене встановлення неможливе, то обробку можна проводити, періодично розкріплюючи деякі перерізи деталі, залишаючи при цьому статично визначену систему. Згодом заготовку знову закріплюють у тому положенні, яке вона прийняла.

Інше обмеження полягає у різностінності деталі. Внутрішні поверхні зазвичай оброблюються на свердильно-розточувальних та розточувальних верстатах. При свердленні й

розточуванні трапляється увід інструмента і підвищується різностінність деталі. Технологія обробки дає можливість у подальшій обробці зовнішньої поверхні знизити різностінність деталі. Мінімальну різностінність при високому рівні прямолінійності можна отримати, якщо центрувати заготовку по задалегідь проточених рівностінних поясках, розміщення яких обирається на зразок описаного вище, але виходячи з результатів лінеаризації непрямолінійності осьового отвору. Якщо потрібно лише зменшити різностінність, то можна встановити заготовку в центри, а в середньому перерізі закріпити рівностінним пояском у роликівий люнет. При цьому вісь заготовки пружно деформується так, щоб апроксимувати різницю відхилень від прямолінійності внутрішньої та зовнішньої поверхонь.

У роботі [4] І.Б. Шендеров також розглядає послідовну обробку деталі по окремих ділянках. Біля торців та рівномірно по всій довжині заготовки виконуються опорні пояски з товщиною стінки та діаметром, що перевищують задані для деталі значення. Заготовка встановлюється у чотирикулачковий натрон та центр задньої бабки верстата. Опорні пояски на границях ділянки, яка підлягає обробці, встановлюються у люнети. Один з опорних поясків біля ділянки, яка на цей час підлягає обробці, встановлюється в люнет з ексцентриситетом відносно осі обертання. Це зміщення обирається так, щоб запобігати биттю контрольного пояска на середині поточної ділянки обробки. Після закінчення обробки всіх ділянок обточуються опорні пояски. Така обробка є аналогом кусочно-поліноміальної апроксимації неспіввісності внутрішньої та зовнішньої поверхонь.

У роботі проведено комп'ютерне моделювання, в якому для опису неперервних випадкових похибок використовувались дві моделі: у припущенні, що первинним формоутворюючим фактором є кутове відхилення інструмента або аналогічна величина, та модель, в якій вважається, що первинним формоутворюючим фактором є кривизна поверхні або її аналог. Практичні значення, отримані в результаті експерименту, зазвичай знаходяться між цими двома крайніми випадками.

Розвиток сучасних засобів вимірювання та інформаційних технологій дозволяє налагоджувати технологічну операцію для кожної конкретної заготовки з урахуванням її характеристик та особливостей. У роботі [4] наведено дані експериментів, які ілюструють вплив технології обробки на якість виготовлення. Вважається, що підвищення трудомісткості за рахунок переустановлення деталей та вимірювань незначне у порівнянні з безпосередньо часом на обробку і має компенсуватись підвищенням якості виробу. Питання контролю якості продукції при серійному виробництві розглядаються в роботах [24], [26–30]. У сучасному середовищі висока якість виробів може відшкодувати досить значні затрати на виробництво.

Стаття [1] Н.В. Гнатейко та В.О. Румбешти пропонує метод регулювання динамічної стійкості системи різання на основі динамічного гасіння вібрації верстата та виводу вібрації з резонансної зони шляхом регулювання режимів різання при токарній обробці на верстаті з ЧПУ. Цей метод ґрунтується на нелінійності границі безпечної зони в координатах швидкість–глибина різання. Для підвищення якості поверхні важливо мати можливість прогнозування поведінки системи верстат–прилад–інструмент–деталь при будь-яких значеннях режимів обробки.

Підходи щодо підвищення зносостійкості інструмента, яка впливає на довгострокову стабільність роботи верстата, пропонуються у роботах [31–34]. Нові покриття зберігають інструмент протягом більшого часу роботи, забезпечуючи його постійні різальні характеристики. Цим шляхом може вирішуватись питання зносу інструмента, який значно залежить від вібрацій, що виникають при обробці нежорстких деталей. Стабільність форми забезпечує відповідність результуючої поверхні розрахункам.

Згідно з розробками [15] усунення вібрацій відбувається шляхом неперервної або періодичної зміни жорсткості, а, відповідно, і резонансної частоти інструмента. В одному з варіантів до гільзи шпинделя, яка містить електрореологічну або магнітореологічну рідину, підводиться електричне або магнітне поле, і таким чином відбувається зміна власної частоти коливань.

Рідина для активного гасіння вібрацій також використовується у розробках [16]. Управління динамічними параметрами проводиться шляхом адаптивної зміни тиску у гідростатичних опорах верстата. В залежності від амплітуди та частоти поточних вібрацій система управління шляхом маніпулювання тиском в опорах верстата змінює його динамічні параметри таким чином, що технологічна система виходить з резонансу, і коливання згасають.

У статті [17] пропонується технологічний підхід до підвищення ефективності високошвидкісної обробки: відзначається позитивний вплив попереднього нагрівання заготовки. Таке нагрівання зменшує рівень вібрацій та ударні навантаження на інструмент, підвищує якість результуючої поверхні.

Аналогічні методи використовуються у роботі [14]. Нагрівання виконується за допомогою високочастотної індукційної установки. Дослідження доводять значне зменшення амплітуди вібрації завдяки попередньому нагріванню заготовки.

Дослідження [22] показує значне підвищення динамічної стійкості фрезерування у випадку розділення роботи різання між двома послідовними різальними крайками. При нестабільних умовах обробки це забезпечує нижчий рівень вібрацій. У роботі наведено приклади реалізації розподілу роботи різання.

Особливості обробки деталей на сучасному обладнанні, з максимальною ефективністю та забезпеченням відповідної якості поверхні, розглядаються у роботах [35], [36]. Новітні верстати, високі вимоги до продуктивності їх роботи та потреба в удосконаленні якості результуючої поверхні вимагають особливих заходів щодо забезпечення відповідності сучасних стандартів.

Висновки. Роботи, які було розглянуто, демонструють високу актуальність проблеми якісної та ефективної обробки нежорстких деталей. Потреби промисловості викликають все більші вимоги до точності обробки та шорсткості поверхні деталі. З іншого боку, розвиток науки дозволяє перейти до нових методів моделювання та оптимізації технологічних процесів. В роботах з моделювання та адаптивного управління використовуються останні досягнення математики та

комп'ютерної техніки. Розвиток цих галузей дає можливість вийти на новий рівень дослідження процесів обробки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Гнатейко Н.В., Румбецта В.О.* Динамическая устойчивость системы СПИД. Методика керування динамікою обробної механічної системи // Наук. вісті Нац. техн. ун-ту України "Київ. політехн. ін-т". – 2002. – № 6. – С. 55–58.
2. *Васильевых Л.А.* Интенсификация процессов обработки нежестких деталей. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1990. – 280 с., ил.
3. *Ташлицкий Н.И., Гребень В.Г.* Виброустойчивость при чистовом точении валов резцами с зачищающей режущей кромкой // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1983. – № 5. – С. 53–55.
4. *Шендеров И.Б.* Особенности технологии точения длинномерных сплошных и полых валов: аппроксимация, оптимизация, интерактивный процесс // Вестник машиностроения. – 2000. – № 8. – С. 25–28.
5. *Лират Ф., Дюбнер Л., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И.* Методология оптимального конструирования новых многослойных покрытий для режущих инструментов // Високі технології в машинобудуванні: Тези доп. міжнар. наук.-техн. семінару 28 вересня–2 жовтня 1994 р., Харків–Алушта, 1994. – С. 138–139.
6. *Внуков Ю.Н., Дубровин В.И., Табуцкий Г.В.* Робастные методы обеспечения качества при проектировании // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: Сб. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – С. 140–142.
7. *Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Биленко С.В.* Метод исследования динамической устойчивости упругой системы станка // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2004. – № 4. – С. 43–44.
8. *Кабалдин Ю.Г., Дунаевский Ю.В., Медведева О.И., Серебрянникова А.Г.* Управление качеством

- поверхностного слоя при резании в автоматизированном производстве // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1993. – № 3. – С. 36–39.
9. *Кабалдин Ю.Г.* Термодинамический подход к анализу причин возникновения вибраций при резании // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1994. – № 4. – С. 19–24.
 10. *Кедров С.С.* Колебания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.
 11. *Тондл А.* Автоколебания механических систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 429 с.
 12. *Кирилин Ю.В., Табаков В.П., Еремин Н.В.* Аналитическое определение виброустойчивости тяжелых фрезерных станков по критической глубине // Международная конференция "Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства", Волгоград, 16–19 сент., 2003: Материалы конференции. Ч. 1. – Волгоград, 2003. – С. 111–113.
 13. *Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В.* Использование методов нелинейной динамики при управлении станков с ЧПУ // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2003. – № 3. – С. 38–41.
 14. *Amin A. K. M. N., Abdelgadir M.* The effect of preheating of work material on chatter during end milling of medium carbon steel performed on a vertical machining center (VMC) // Trans. ASME. J. Manuf. Sci. and Eng. – 2003. – 125, № 4. – С. 674–680.
 15. *Segalman Daniel J., Redmond James M.* Метод и устройство для устранения регенеративных колебаний при работе станков. Method and apparatus for suppressing regenerative instability and related chatter in machine tools : Пат. 6189426 США, МПК{7} В 23 В 25/00; Sandia Corp. – № 09/296041; Заявл. 21.04.1999; Опубл. 20.02.2001; НПК 82/117.
 16. *Roders Jurgen* Активное гашение вибраций в станке. Aktive Schwingungsdampfung in einer Werkzeugmaschine : Заявка 10232637 Германия, МПК{7} В 23 Q 1/38%В 23

- В 19/02 – N 10232637.1; Заявл. 18.07.2002; Опубл. 12.02.2004.
17. *Игнатъев А.А., Насад Т.Г.* Влияние динамических характеристик высокоскоростного резания с фрикционным нагревом на качество поверхности // СТИН. – 2003. – № 8. – С. 36–39.
 18. *Ташлицкий Н.И, Гребень В.Г.* Исследование характеристик жесткости и демпфирования системы СПИД на токарных станках // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1983. – № 10. – С. 48–50.
 19. *Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Биленко С.В.* Нейросетевое моделирование динамики технологических процессов // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2004. – № 5. – С. 47–49.
 20. *Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Биленко С.В.* Адаптивное управление технологическими системами механообработки на основе искусственного интеллекта // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2004. – № 6. – С. 46–48.
 21. *Кабалдин Ю.Г.* Повышение устойчивости процесса резания // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1991. – № 6. – С. 37–40.
 22. *Porke Herbert, Emmer Thomas, Alex Ralph* Динамически устойчивое фрезерование. Dynamisch stabile Fräser mit Schnittaufteilung // Werkstatt und Betr. – 2001. – 134, № 12. – С. 23–24, 26–28.
 23. *Внуков Ю.Н., Дорошенко Ю., Дубровин В.И.* Стандартизація у сфері управління якістю // Стандартизація. Сертифікація. Якість. – 2001. – № 2. – С. 24–27.
 24. *Внуков Ю.Н., Дубровин В.И., Табуницкий Г.В.* Керування якістю і зниження варіабельності // Стандартизація. Сертифікація. Якість. – 1999. – № 4. – С. 42–43.
 25. *Папашев К.О., Титова О.А., Внуков Ю.Н.* Определение высоты расчетных неровностей при фрезеровании концевыми сферическими фрезами // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-

- техн. сборник. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. – Вып. 66. – С. 145–152.
26. Внуков Ю.Н., Дубровин В.И., Табуницкий Г.В. Анализ риска в задачах допускового анализа // Modelling and Analysis of Safety, Risk and Quality in Computer Systems / Proceedings of the International Scientific School MA SRQ-2001. – СПб.: ООО НПО "Омега". – 2001. – С. 233–235.
27. Внуков Ю.Н., Дубровин В.И. Алгоритм классификации с использованием дискриминантных функций // Высокие технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. ХГПУ. – Харьков, 1998. – С. 64–66.
28. Внуков Ю.Н., Дубровин В.И. Концепция всеобщего менеджмента качества и статистические методы // Высокие технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. ХГПУ. – Харьков, 1998. – С. 62–64.
29. Внуков Ю.Н., Гамов Н.С., Дубровин В.И. Методика применения теории статистических оценок для управления качеством // Методологические проблемы качества обучения и обучения качеству / Материалы науч.-техн. конф. – Харьков: ХАИ, 1996. – С. 85.
30. Внуков Ю.Н., Дубровин В.И. Методики прогнозирования с использованием теории статистических ошибок и статистической классификации // Высокие технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. ХГПУ. – Харьков, 1996. – С. 26–27.
31. Внуков Ю.Н., Песочин С.М. О возможности повышения стойкости металлообрабатывающего инструмента за счет нанесения вакуумно-плазменных покрытий нового поколения // Металлообработка: современ. инструмент и инструментальные материалы: Материалы конф. 2–4 окт. 1996 г., Ялта. – Киев, 1996. – С. 34.
32. Дюбнер Л., Внуков Ю.Н., Скальский Е. Сравнительные исследования работоспособности инструментов с износостойкими покрытиями // Високі технології в машинобудуванні: Тези доп. міжнар. наук.-техн. семінару 28 вересня – 2 жовтня 1994 р., Харків–Алушта, 1994. – С. 35.

33. Внуков Ю.Н. Ионно-плазменный синтез покрытий как составляющая интегрированных генеративных технологий // Высокие технологии: тенденции развития. – Харьков–Алушта: НТУ "ХПИ", 2003. – С. 72–77.
34. Солоха В.В., Внуков Ю.Н., Ищенко Л.И. Изнашивание жаропрочных сплавов при изменении нагрузочных факторов // Резание и инструмент в технологических процессах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, – 2001. – Вып. 60. – С. 79–83.
35. Внуков Ю.Н. Опыт использования современного 5-координатного оборудования при изготовлении деталей авиадвигателей // Вісник машинобудування. – 2004. – № 3. – С. 40–42.
36. Ищенко Л.И., Внуков Ю.Н. Методологические аспекты исследования трибологических процессов в экстремальных условиях // Резание и инструмент в технологических процессах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 2001. – Вып. 59. – С. 111–117.

ВНУКОВ Юрій Миколайович – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи Запорізького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання виробничих процесів.

ВОТІНОВ Олександр Георгійович – аспірант кафедри "Металорізальні верстати та інструмент" Запорізького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання виробничих процесів.

Тел. 8(0612)673384, shcan@ua.fm.

ТІТОВА Ольга Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри математичного аналізу Запорізького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання виробничих процесів.

Подано 12.05 2005