

В.О. Залога, д.т.н., проф.  
Р.М. Зінченко, к.т.н., доц.  
А.В. Гонщик, аспір.  
Сумський державний університет

## ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТИКИ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ: СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ

У статті представлено результати огляду літератури, пов'язаної з використанням методів нечіткої логіки в системах моніторингу процесів механічної обробки і, зокрема, стану різального інструменту. Запропоновано рекомендації щодо напрямків подальших досліджень в області розробки інтелектуальних систем діагностики стану та зношення різального інструменту.

**Вступ.** У епоху стрімкої автоматизації виробництва автоматизація процесу різання, як найбільш вагомий етап виробничого процесу, стає неминучою. Найголовнішими проблемами при автоматизації процесу обробки є час та виробничі витрати, що трапляються у результаті зношення та поломок різального інструменту.

Моніторинг зношення інструменту – один з ключових та неминучих процесів у сучасних виробничих системах. Зі зростанням безлюдного виробництва необхідність у системах он-лайн моніторингу також зростає.

Впровадження інформаційних технологій у різні галузі науки й техніки сприяло розповсюдженню «м'яких обчислень» при вирішенні комплексних інженерних завдань. Спостерігається значне поширення використання експертних систем, що включають в себе штучні нейронні мережі, системи нечіткого логічного виведення, генетичні алгоритми тощо. За останнє десятиліття методи штучного інтелекту довели свій високий потенціал при вирішенні завдань діагностики виробничого процесу і, зокрема, зношення інструменту, що займає центральне місце.

**Мета роботи.** Огляд сучасного стану проблеми щодо застосування методів нечіткої логіки в системах моніторингу процесів механічної обробки та стану різального інструменту, а також встановлення напрямків подальших досліджень у цій галузі.

**Викладення основного матеріалу. Нечітка логіка та система нечіткого логічного висновку.** Нечітка логіка (НЛ) є основою наукового напрямку, що називається «м'які обчислення» або «обчислювальний інтелект» і включає також штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми та ряд інших дисциплін. На сьогодні усі ці методи використовуються для створення інтелектуальної системи, причому можливим стає застосування комбінованих (нейро-нечітких, генетико-нечітких та ін.) методів обчислень.

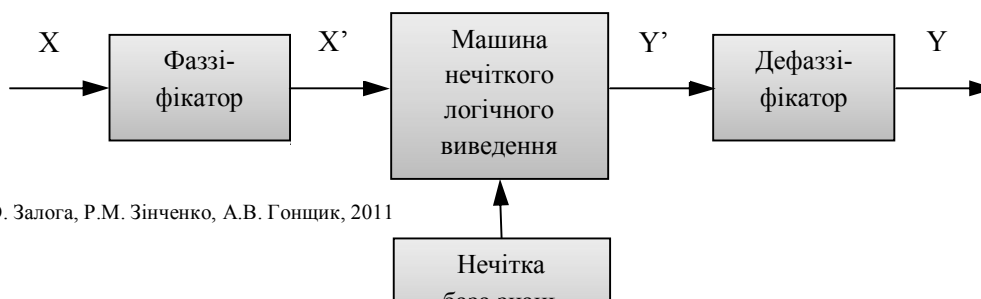
*Нечітка логіка і система нечіткого логічного виведення* – ефективний метод визначення і контролю складних нелінійних систем, який дозволяє вирішувати завдання за відсутності точних математичних моделей функціонування системи.

Нечітке моделювання засноване на ідеї пошуку набору часткових залежностей «входів–виходів», що описують процес і привертає увагу дослідників різних наукових галузей тим, що може виразити нелінійний процес набагато краще, ніж будь-який інший метод.

Теорія нечітких множин дає можливість використовувати при ухваленні рішень неточні та суб'єктивні експертні знання про предметну галузь без формалізації їх у вигляді традиційних математичних моделей. Нечіткі множини дають можливість застосовувати лінгвістичний опис складних процесів, встановлювати нечіткі зв'язки між поняттями, прогнозувати поведінку системи, формувати безліч альтернативних дій, здійснювати формальний опис нечітких правил ухвалення рішень.

Типова структура системи нечіткого виведення показана на рисунку 1 [1]. Вона містить такі модулі:

- *фаззифікатор*, що перетворює фіксований вектор факторів впливу ( $X$ ) на вектор нечітких множин  $X'$ , необхідних для нечіткого виведення;
- *нечітка база знань*, що містить інформацію про залежність  $Y = f(X)$  у вигляді лінгвістичних правил «якщо–то»;
- *машина нечіткого логічного виведення*, яка на основі правил бази знань визначає вхідні змінні у вигляді нечіткої множини  $Y'$ , що відповідає нечітким значенням вхідних змінних ( $X'$ );
- *дефаззифікатор*, що перетворює вихідну нечітку множину  $Y'$  на чітке число  $Y$ .



**Сучасні застосування систем нечіткого логічного виведення для процесів механічної обробки.** За останні роки спостерігається швидке зростання кількості та різноманіття застосувань нечіткої логіки. Методи нечіткої логіки були використані в системах управління, подачі знань, підтримки прийняття рішень, апроксимації, структурної та параметричної ідентифікації, розпізнавання образів, оптимізації.

Нечітка логіка як одна з форм штучного інтелекту довела свій високий потенціал при вирішенні досить великої кількості інженерних завдань. За останнє десятиліття лідером по застосуванню нечітких обчислень в машинобудуванні стала галузь моніторингу процесів механічної обробки включно з обробкою різанням (рис. 2). При цьому нечітка логіка використовується як основа експертної системи для визначення деякого показника процесу за даними великого числа давачів, встановлених у технологічній системі. Частіше за все рішення приймаються на основі даних про силу та температуру різання, параметри вібрацій, спектр акустичної емісії, струм і потужність електродвигуна.

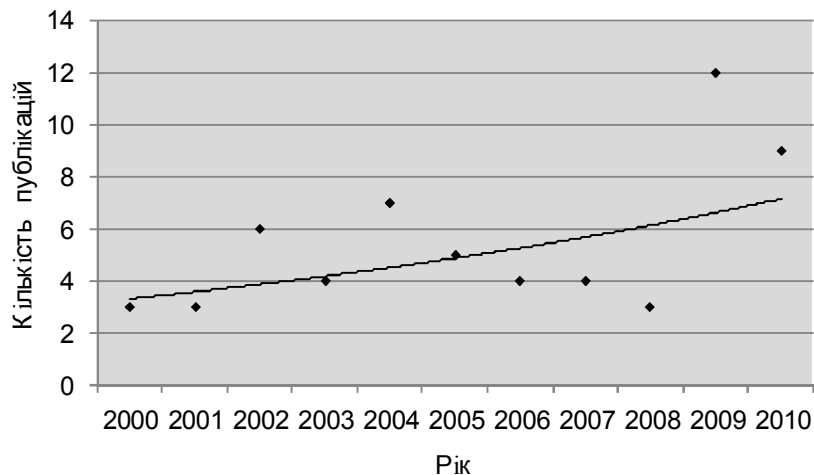


Рис. 2. Динаміка росту публікацій по застосуванню систем діагностики процесів механічної обробки з використанням нечіткої логіки у провідних виданнях світу

Шляхом огляду літератури було доведено, що метод нечіткої логіки має досить високий рівень компетентності при моделюванні, оптимізації та діагностиці процесів механообробки, адаптивному контролю процесів обробки матеріалів, прогнозуванні параметрів процесу різання і зношення інструменту. Розглянемо деякі останні роботи щодо вирішення вищезазначених завдань.

*Прогнозування поверхневої шорсткості та сил різання в операціях механічної обробки.* Найбільша кількість робіт по застосуванню нечіткої логіки у процесах механічної обробки торкається питань прогнозування таких параметрів, як шорсткість обробленої поверхні та сила різання. Причому значна більшість робіт досліджує процеси токарної обробки. Відтак D.Kirby та J.C. Chen [2] представили розробку системи прогнозування шорсткості для операцій точіння з використанням нейро-нечітких методів моделювання. При цьому вони скористалися даними про швидкість різання та вібрацію, що виникають у процесі обробки деталі на верстаті. Робота [3] описує прогнозування поверхневої шорсткості за допомогою адаптивної нейро-нечіткої системи виведення для часткового випадку, а саме процесу точіння алюмінієвих сплавів. N.R. Abburi та U.S. Dixit [4] використали нечітку логіку сумісно з нейронною мережею з метою розробки системи, заснованої на знаннях, яка може бути застосована при токарній обробці для двох випадків: прогнозування шорсткості за даними змінних процесу та для прогнозування змінних процесу за даною шорсткістю. A.K. Nandi [5] розглянув засноване на використанні методів нечіткої логіки прогнозування поверхневої шорсткості для прецизійного точіння. S.S. Roy [6] представив у своєму дослідженні проектування генетико-нечіткої експертної системи для прогнозування шорсткості при прецизійному алмазному точінні. Зроблена спроба розробити експертну систему з використанням нечіткої логіки та генетичного алгоритму так, щоб шорсткість могла бути змодельована для ряду параметрів різання: кругова швидкість, подача та глибина різання.

Що стосується процесів свердління, то в роботі [7] представлено прогнозування якості обробки за допомогою нечіткої логіки. Метою цього експериментального й аналітичного дослідження є визначення параметрів, що дають можливість прогнозувати поверхневу шорсткість при свердлінні. А ось робота [8] описує використання нечітких експертних систем при прогнозуванні поверхневої шорсткості для процесу глибокого свердління.

Є також і роботи по використанню нечіткої логіки в процесах фрезерування. S.-P. Lo [9] і M.Dong та ін. [10] представили прогнозування шорсткості обробленої поверхні за допомогою адаптивної нейро-

нечіткої системи виведення в процесі кінцевого фрезерування. Порівняно з нечіткою логікою така система має більш високу точність прогнозування. До розглядання приймалися три параметри обробки, що мають найбільший вплив на шорсткість: швидкість шпинделя, подача, глибина різання. W.-H. Ho та ін. [11] для прогнозування шорсткості заготовки в процесі кінцевого фрезерування застосували адаптивну нейро-нечітку систему виведення з алгоритмом генетичного навчання.

A.K. Nandi і D.K. Pratihar [12, 13] представили метод автоматичного проектування фаззи-контролера з використанням генетичного алгоритму для прогнозування споживаної потужності і поверхневої шорсткості при шліфуванні. Генетичний алгоритм тут використовується для підвищення ефективності фаззи-контролера.

Досить цікавим є дослідження K.-M. Tsai та P.-J. Wang-а, описане в роботі [14], де нечітка логіка використовується в нейро-нечітких мережах для прогнозування шорсткості при електроерозійній обробці. У цій роботі представлено порівняння точності прогнозування шорсткості для різних матеріалів заготовок зі зміною полярності електродів.

Що стосується прогнозування такого параметра обробки як сила різання, то в роботах [15] і [16] метод нечіткої логіки був використаний для оцінки сил різання при точінні. А в роботі [17] X.Li, H.-X.Li та ін. представили нечітке оцінювання сили різання і подачі згідно з вимірюванням струму на токарному оброблювальному центрі. Дослідження спрямоване на інтелектуальний моніторинг зношення інструменту. Експерименти доводять надійність і ефективність запропонованого методу в широкому діапазоні проведення моніторингу зношення інструменту. R.V.S. Singh та ін. [18] розглянули прогнозування осьового навантаження та обертового моменту при свердлінні за допомогою методів нечіткої логіки.

*Моделювання процесу механічної обробки.* Широке поширення отримали дослідження щодо застосування нечіткої логіки при моделюванні того чи іншого процесу механообробки і, зокрема, процесу різання. S.S. Gill та J.Singh [19] розглянули застосування адаптивної нейро-нечіткої системи виведення для моделювання інтенсивності зняття матеріалу при стаціонарному ультразвуковому свердлінні. P.Brevern, N.S.M. El-Tayeb та ін. в роботах [20, 21, 22] представили моделювання процесів лазерної обробки за допомогою адаптивної нейро-нечіткої системи виведення.

Не залишились осторонь і процеси шліфування. O.Ю. Новікова та ін. в роботі [23] здійснили моделювання процесу зовнішнього циліндричного шліфування деталей гідравлічних машин. Була розроблена нечітка експертна система для вибору методу механічної обробки і забезпечення якості деталей циліндричної форми на етапі проектування технологічного процесу їх виготовлення.

C.C. Федін [24] розробив нечітку експертну систему для забезпечення якості деталей приладів і машин на етапі проектування технологічних процесів їх виготовлення. А в роботі [25] C.C. Федін разом з іншими авторами представили створення системи нечіткого логічного управління точністю процесу виготовлення відповідальних деталей в умовах невизначеності, де була запропонована схема управління технологічним процесом виготовлення деталей на основі нечіткого контролера.

*Діагностика та моніторинг процесів механічної обробки.* Широко представлене застосування нечіткої логіки в системах діагностики процесів механічної обробки. Метод нечіткої логіки був використаний у роботі [26] для прогнозування й аналізу ефективності обробки алюмінієвого сплаву свердлінням з мінімальним використанням СОТС.

N.D. Sims та ін. [27] провели нечіткий аналіз з метою стабілізації вібрацій під час фрезерування. Представлений підхід може бути використаний для вирішення завдання проектування процесу зі стійкістю до параметрів, що коливаються.

Q.Liu та ін. [28] розглянули нечітке розпізнавання образів сигналів акустичної емісії для визначення припідкання шліфувального круга. А Y.M. Ali та L.C. Zhang [29] розробили нечітку модель для прогнозування припідкань при поверхневому шліфуванні. У роботі представлена практична і послідовна модель на основі нечітких правил для оцінювання режимів шліфування, при яких утворюються граничні температури для утворення припідкання.

Цікавою є робота [30], у якій розглядається проектування і налаштування контролера нечіткої логіки для електроерозійної обробки мікроотворів.

G.E. D'Errico [31] застосував системи нечіткого контролю для моніторингу процесів механообробки. T.Czyszpak та A.Sokolowski [32] окрім діагностики процесів механічної обробки торкнулися також питання діагностики металорізальних верстатів. А ось A.Devillez та D.Dudzinski [33] використали нечітку логіку у складі програмного забезпечення для реєстрації вібрацій інструменту в процесі обробки. Це програмне забезпечення дозволяє здійснювати моніторинг процесу механообробки для запобігання будь-яких проблем, що виникають при цьому.

*Адаптивний контроль процесів механічної обробки.* Однією з найбільш важливих сфер застосування нечіткої логіки є адаптивні системи контролю процесів машинобудування. За допомогою адаптивних систем контролю можна стабілізувати різні параметри обробки деталей на верстаті. Найчастіше контролюється такий параметр як сила різання. Так R.J. Lian та ін. [34] представили розробку фаззи-

контролера сили різання для системи токарної обробки. R.E. Haber та ін. у своїй роботі [35] розглядають проектування оптимальної системи нечіткого контролю для регулювання сили різання в процесі свердління. Застосування такого контролера знижує швидке зношення і катастрофічне зношення свердла завдяки зростанню сил різання, яке з'являється внаслідок збільшення глибини свердління. D.Kim та D.Jeon [36] розробили нечіткий контролер для автоматичного регулювання величини подачі з метою регулювання сили різання в процесі фрезерування на вертикальному оброблювальному центрі з використанням даних про струм у двигуні. S.Jee і Y.Koren [37] представили адаптивний нечіткий контролер для приводів подач у процесі точної профільної обробки на верстатах з ЧПК. Цей контролер регулює одночасно як вхідні, так і вихідні функції належності. U.Zuperl та ін. обговорюють у своїй роботі [38] застосування методу адаптивного нечіткого контролю при вирішенні завдань стабілізації сили різання при високошвидкісному кінцевому фрезеруванні.

E.D. Kirby та ін. в роботі [39] розглянули розробку системи адаптивного контролю поверхневої шорсткості для операцій токарної обробки з ЧПК. При цьому використовуються дані про вібрацію інструменту в процесі різання. M.Liang, T.Year та ін. [40] представили систему контролю, що може бути використана для різних процесів обробки. Контрольованим сигналом є момент на шпинделі, широкодоступний на багатьох верстатах з ЧПУ. Результати досліджень показали, що ця система добре адаптується до зміни інструменту і матеріалу заготовки і добре працює при кінцевому фрезеруванні і точінні. У роботі [41] розглядається застосування нечіткої логіки для контролю потужності шпинделя в процесах кінцевого фрезерування. Ця система здатна коригувати одночасно і величину подачі, і швидкість шпинделя.

Цікавою є робота J.H. Zhang та ін. [42], у якій вивчається система адаптивного фаззи-контролю слідкуючої системи для електроерозійної обробки. Ця система контролю може своєчасно регулювати параметри розрядної пульсації, а також проміжок між електродом інструменту і матеріалом заготовки. Таким чином, стан обробки може бути оптимальним, ефективність обробки зростає.

*Оптимізація процесів механічної обробки.* Слід зазначити також і вирішення завдань по оптимізації процесів механообробки. A.Iqbal та ін. [43] розробили нечітку експертну систему для оптимізації параметрів і меж ефективності прогнозування у процесах фрезерування загартованих деталей. Використана експертна система здатна не лише оптимізувати параметри фрезерування на підставі експериментальних даних, але і застосовуватися для досягнення цілей збільшення стійкості інструменту і вдосконалення поверхневої шорсткості заготовки.

**Використання методів нечіткої логіки в системах діагностики стану різального інструменту.** Останні дослідження довели ефективність апарата нечіткого логічного виведення при використанні його в системах діагностики стану різального інструменту (табл. 1).

Таблиця 1

*Застосування систем нечіткої логіки  
в системах діагностики стану різального інструменту*

Досліджуваний сигнал	Точіння	Свердління	Фрезерування
Сила різання	F.Basciftci, H.Seker [44] S.Achiche, M.Balazinski, L.Baron, K.Jemielniak [45] Q.Ren, M.Balazinski, L.Baron, K.Jemielniak [46] M.Balazinski, E.Czogala, K.Jemielniak, J.Leski [47]	A.Salimi, M.Zadshakouyan [52]	Z.Uros, C.Franc, K.Edi [55]
Вихрові струми двигунів	–	X.Li, S.K. Tso, J.Wang [53]	–
Вібрація, АЕ, сила різання	A.Gajate, R.E. Haber, J.R. Alique, P.I. Vega [48]	–	T.Amin, E.M. Joo, L.Xiang, L.B. Siong, Z.Lianyin, H.Sheng, S.Linn, G.O. Peen [57]
Вібрація	A.Antic, M.ZeljkoVIC, P.B. Petrovic [49]	–	–
Ультразвукові сигнали	D.Dinakaran, S.SamPathkumar, J.S. Mary [50] D.Dinakaran, S.SamPathkumar, N.Sivashanmugam [51]	–	–
АЕ, сила різання, струм двигуна	–	–	P.Fu, A.D. Hope, G.A. King [54]

АЕ, вібрація, сила різання, споживана потужність	–	–	P.Fu, A.D. Hore [56]
--	---	---	----------------------

Більшість досліджень стосуються процесів токарної обробки, проте використовують при цьому різні види сигналів. Так, наприклад, в роботах [44, 45–47] був проведений моніторинг зношення інструменту за даними про силу різання. A.Gajate та ін. [48] представили підхід для прогнозування зношення інструменту при точінні згідно з сигналами акустичної емісії, вібрації й сили різання. A.Antic та ін. [49] розглянули модель системи класифікації зношення різального інструменту за даними про вібрацію. Цікавими є роботи [50] і [51], де був представлений підхід до прогнозування зношення інструменту по задній і передній поверхні відповідно з використанням ультразвуку. Метод ґрунтується на індукції ультразвукових хвиль у різальному інструменті. При цьому кількість відбитої енергії від зношених ділянок (у разі визначення зношення по задній поверхні) і від задніх поверхонь інструменту (при визначенні зношення по передній поверхні) пов'язується з величиною зношення різального інструменту. Експериментальні дослідження показали, що така система досить точно може визначити зношення інструменту.

Що стосується процесів свердління, A.Salimi та M.Zadshakouyan [52] запропонували систему моніторингу зношення різального інструменту, використовуючи при цьому сигнали про силу різання і осьове навантаження. Було доведено, що системи НЛ мають ефективні можливості для прогнозування величини зношення. X.Li, S.K. Tso та J.Wang [53] використали у своїй роботі методи нечіткої логіки для моніторингу поломок інструменту і стану його зношення на підставі струмових сигналів двигунів шпинделя і подачі відповідно. Результати показали, що запропонована система може надійно визначити стани різального інструменту в процесах свердління в режимі реального часу з точністю до 90 %.

Процесу фрезерування також були присвячені деякі дослідження. P.Fu, A.D. Hore та G.A. King [54] здійснили моніторинг стану інструменту при торцевому фрезеруванні. При цьому як початкові сигнали бралися: акустична емісія, сила різання і струм двигуна. Робота [55] спрямована на прогнозування зношення інструменту по задній поверхні при кінцевому фрезеруванні згідно з сигналами про силу різання. P.Fu і A.D. Hore [56] розглянули моніторинг стану фрези по силі різання, споживаній потужності, акустичній емісії та параметрам вібрації, а T.Amin, E.M. Joo та ін. [57] – по сигналах акустичної емісії, сили різання і вібрації.

Слід також згадати про застосування систем нечіткої логіки для моніторингу стану шліфувального круга [58]. Тут НЛ використовують для класифікації стану різальних здібностей різального інструменту в процесі зовнішнього циліндричного шліфування.

Огляд публікацій показав, що перспектива застосування нечіткої логіки в системах діагностики процесів механічної обробки і, зокрема, стану різального інструменту полягає в розробці гібридних методів штучного інтелекту, до яких можна віднести нейро-нечіткі системи виведення [44, 50, 54 та ін.], оскільки саме вони можуть досягти максимальної ефективності.

**Висновки.** Методи, що ґрунтуються на застосуванні апарата нечіткої логіки, знаходять широке поширення при вирішенні завдань механічної обробки, у тому числі й обробки різанням. Розробка ефективної системи діагностики стану різального інструменту з використанням нечіткої логіки є актуальною науково-практичною проблемою.

Огляд літератури показав, що дослідження в області діагностики стану різального інструменту повинні проводитися по таким напрямкам:

- розробка єдиної методології застосування нечіткої логіки в системах діагностики стану різального інструменту;
- оцінка точності та порівняльний аналіз систем діагностики стану різального інструменту з використанням сигналів різних видів (сили різання, акустичної емісії, струму та потужності електродвигуна, температури тощо);
- розробка гібридної (нейро-нечіткої) підсистеми прийняття рішень у системах діагностики стану різального інструменту.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с. : ил.
2. Kirby E.D. Development of a fuzzy-nets-based surface roughness prediction system in turning operations, *Industrial Engineering / E.D. Kirby, J.C. Chen.* – 2007. – Vol. 53, No. 1. – Pp. 30–42.
3. Reddy B.S. Prediction of Surface Roughness in Turning Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System / B.S. Reddy, J.S. Kumar, K.V.K. Reddy // *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering.* – 2009. – Vol. 3, № 4. – Pp. 252–259.

4. *Abburi N.R.* A knowledge-based system for the prediction of surface roughness in turning process, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing / N.R. Abburi, U.S. Dixit.* – 2006. – Vol. 22, No. 4. – Pp. 363–372.
5. *Nandi A.K.* Prediction of Surface Roughness in Ultraprecision Turning Using Fuzzy Logic, Central Mechanical Engineering Research Institute.
6. *Roy S.S.* Design of genetic-fuzzy expert system for predicting surface finish in ultra-precision diamond turning of metal matrix composite / *S.S. Roy // Journal of Materials Processing Technology.* – 2006. – Vol. 173, No. 3. – Pp. 337–344.
7. *Sivarao* Machining Quality Predictions: Comparative Analysis of Neural Network and Fuzzy Logic / *Sivarao, Castillo, Taufik // International Journal of Electrical & Computer Sciences.* – Vol. 9, No. 9. – Pp. 451–456.
8. *Sivarao* Surface Roughness Prediction in Deep Drilling by Fuzzy Expert System / *Sivarao, Castilo, Tajul // International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering.* – Vol. 9, No. 9. – Pp. 331–335.
9. *Lo S.-P.* An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling / *S.-P. Lo // Journal of Materials Processing Technology.* – 2003. – Vol. 142, No. 3. – Pp. 665–675.
10. *Dong M.* Adaptive network-based fuzzy inference system with leave-one-out cross-validation approach for prediction of surface roughness / *M.Dong, N.Wang // Applied Mathematical Modelling.* – 2011. – Vol. 35, No. 3. – Pp. 1024–1035.
11. *Ho W.-H.* Adaptive network-based fuzzy inference system for prediction of surface roughness in end milling process using hybrid Taguchi-genetic learning algorithm, *Expert Systems with Applications / W.-H. Ho, J.-T. Tsai, B.-T. Lin, J.-H. Chou.* – 2009. – Vol. 36, No. 2 (2). – Pp. 3216–3222.
12. *Nandi A.K.* Automatic design of fuzzy logic controller using a genetic algorithm-to predict power requirement and surface finish in grinding / *A.K. Nandi // Journal of Materials Processing Technology.* – 2004. – Vol. 148, No. 3. – Pp. 288–300.
13. *Nandi A.K.* Design of a genetic-fuzzy system to predict surface finish and power requirement in grinding / *A.K. Nandi, D.K. Pratihar // Fuzzy Sets and Systems.* – 2004. – Vol. 148, No. 3. – Pp. 487–504.
14. *Tsai K.-M.* Predictions on surface finish in electrical discharge machining based upon neural network models / *K.-M. Tsai, P.-J. Wang // International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2001. – Vol. 41, No. 10. – Pp. 1385–1403.
15. *Khidhir B.A.* Modification Approach of Fuzzy Logic Model for Predicting of Cutting Force When Machining Nickel Based Hastelloy C-276, *American J. of Engineering and Applied Sciences / B.A. Khidhir, B.Mohamed, M.A.A. Younis.* – 2010. – Vol. 3, No. 1. – Pp. 207–213.
16. *Yaldiz S.* Comparison of experimental results obtained by designed dynamometer to fuzzy model for predicting cutting forces in turning / *S.Yaldiz, F.Unsacar, H.Saglam // Materials & Design.* – 2006. – Vol. 27, No. 10. – Pp. 1139–1147.
17. *Li X.* Fuzzy Estimation of Feed-Cutting Force From Current Measurement – A Case Study on Intelligent Tool Wear Condition Monitoring / *Li X., H.-X.Li. // IEEE.* – 2004. – Vol. 34, No. 4. – Pp. 506–512.
18. *Singh R.V.S.* Modeling and Analysis of Thrust Force and Torque in Drilling GFRP Composites by Multi-Facet Drill Using Fuzzy Logic / *Singh R.V.S., B.Latha, V.S. Senthilkumar // International Journal of Recent Trends in Engineering.* – 2009. – Vol. 1, No. 5. – Pp. 66–70.
19. *Gill S.S.* An Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System modeling for material removal rate in stationary ultrasonic drilling of sillimanite ceramic, *Expert Systems with Applications / Gill S.S., J.Singh.* – 2010. – Vol. 37, No. 8. – Pp. 5590–5598.
20. *Sivarao P. Brevern* ANFIS Modeling of Laser Machining Responses by Specially Developed Graphical User Interface / *Sivarao P.Brevern, N.S.M. El-Tayeb, V.C. Vengkatesh // International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering.* – Vol. 9, No. 9. – Pp. 181–189.
21. *Sivarao P. Brevern* A New Approach of Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System Modeling in Laser Processing-A Graphical User Interface (GUI) Based / *Sivarao P.Brevern, N.S.M. El-Tayeb // Journal of Computer Science.* – 2009. – Vol. 5, No. 10. – Pp. 704–710.
22. *Sivarao P. Brevern* GUI Based ANFIS Modeling: Back Propagation Optimization Method for CO<sub>2</sub> Laser Machining / *Sivarao P.Brevern, N.S.M. El-Tayeb, V.C. Vengkatesh // International Journal of Intelligent Information Technology Application.* – 2009. – Vol. 2, No. 4. – Pp. 191–198.
23. *Новикова Е.Ю.* Моделирование процесса внешнего цилиндрического шлифования деталей гидромашин с использованием методов нечеткого вывода / *Е.Ю. Новикова, К. Меженная // Системные технологии.* – 2009. – № 6 (65). – С. 82–86.

24. Федин С.С. Разработка нечеткой экспертной системы для обеспечения качества деталей приборов и машин на этапе проектирования технологических процессов их изготовления / С.С. Федин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 5/23. – С. 49–56.
25. Федин С.С. Система нечеткого логического управления точностью процесса изготовления ответственных деталей в условиях неопределенности / С.С. Федин, Т.И. Шевченко, Н.А. Зубрецькая // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2009. – № 1 (9). – С. 139–145.
26. Nandi A.K. A study of drilling performances with minimum quantity of lubricant using fuzzy logic rules *Mechatronics* / A.K. Nandi, J.P. Davim. – 2009. – Vol. 19, No. 2. – Pp. 218–232.
27. Sims N.D. Fuzzy stability analysis of regenerative chatter in milling / N.D. Sims, G.Manson, B.Mann // *Journal of Sound and Vibration*. – 2010. – Vol. 329, No. 8. – Pp. 1025–1041.
28. Liu Q. Fuzzy pattern recognition of AE signals for grinding burn / Q.Liu, X.Chen, N.Gindy // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, No. 7–8. – Pp. 811–818.
29. Ali Y.M. A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel / Y.M. Ali, L.C. Zhang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2004. – Vol. 44, No. 5. – Pp. 563–571.
30. Kao C.-C. Design and tuning of a fuzzy logic controller for micro-hole electrical discharge machining / C.-C. Kao, A.J. Shih // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2008. – Vol. 10, No. 2. – Pp. 61–73.
31. D'Errico G.E. Fuzzy control systems with application to machining processes / G.E. D'Errico // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 109, No. 1–2. – Pp. 38–43.
32. Czyszpak T. The algorithm of designing fuzzy logic inference systems for diagnostics of machine tool and cutting process, 14-th International Research/ T.Czyszpak, A.Sokolowski // Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, 11–18 September 2010. – Pp. 373–376.
33. Devillez A. Tool vibration detection with eddy current sensors in machining process and computation of stability lobes using fuzzy classifiers / A.Devillez, D.Dudzinski // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2007. – Vol. 21, No. 1. – Pp. 441–456.
34. Lian R.-J. A grey prediction fuzzy controller for constant cutting force in turning / R.-J. Lian, B.-F. Lin, J.-H. Huang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, No. 9. – Pp. 1047–1056.
35. Haber R.E. Optimal fuzzy control system using the cross-entropy method. A case study of a drilling process / R.E. Haber, R.M. del Toro, A.Gajate // *Information Sciences*. – 2010. – Vol. 180, No. 14. – Pp. 2777–2792.
36. Kim D. Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors / D.Kim, D.Jeon // *Precision Engineering*. – 2011. – Vol. 35, No. 1. – Pp. 143–152.
37. Jee S. Adaptive fuzzy logic controller for feed drives of a CNC machine tool *Mechatronics* / S.Jee, Y.Koren. – 2004. – Vol. 14, No. 3. – Pp. 299–326.
38. Zuperl U. Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling / U.Zuperl, F.Cus, M.Milfelner // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 164–165. – Pp. 1472–1478.
39. Kirby E.D. Development of a fuzzy-nets-based in-process surface roughness adaptive control system in turning operations / E.D. Kirby, J.C. Chen, J.Z. Zhang // *Expert Systems with Applications*. – 2006. – Vol. 30, No. 4. – Pp. 592–604.
40. Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining / M.Liang, T.Yeap, A.Hermansyah, S.Rahmati // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43, No. 14. – Pp. 1497–1508.
41. Fuzzy control of spindle power in end milling processes / M.Liang, T.Yeap, S.Rahmati, Z.Han // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – Vol. 42, No. 14. – Pp. 1487–1496.
42. Adaptive fuzzy control system of a servomechanism for electro-discharge machining combined with ultrasonic vibration / J.H. Zhang, H.Zhang, D.S. Su, Y.Qin, M.Y. Huo, Q.H. Zhang, L.Wang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 129, No. 1–3. – Pp. 45–49.
43. A fuzzy expert system for optimizing parameters and predicting performance measures in hard-milling process / A.Iqbal, N.He, L.Li, N.U. Dar // *Expert Systems with Applications*. – 2007. – Vol. 32, No. 4. – Pp. 1020–1027.
44. Basciftci F. On-line prediction of tool wears by using methods of artificial neural networks and fuzzy logic / F.Basciftci, H.Seker // *Scientific Research and Essays*. – 2010. – Vol. 5(19). – Pp. 2883–2888.

45. Tool wear monitoring using genetically-generated fuzzy knowledge bases / *S.Achiche, M.Balazinski, L.Baron, K.Jemielniak* // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2002. – Vol. 15. – Pp. 303–314.
46. Tool condition monitoring using the TSK fuzzy approach based on subtractive clustering method, Lecture Notes in Computer Science / *Q.Ren, M.Balazinski, L.Baron, K.Jemielniak*. – 2008. – Vol. 5027/2008. – Pp. 52–61.
47. Tool condition monitoring using artificial intelligence methods / *M.Balazinski, E.Czogala, K.Jemielniak, J.Leski* // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2002. – Vol. 15, No. 1. – Pp. 73–80.
48. Transductive-weighted neuro-fuzzy inference system for tool wear prediction in a turning process / *A.Gajate, R.E. Haber, J.R. Alique, P.I. Vega* // HAIS 2009, LNAI 5572. – 2009. – Pp. 113–120.
49. *Antic A.* Development of the wear condition classification system model in turning / *A.Antic, M.Zeljkojic, P.B. Petrovic* // ADEKO, 18 May 2010. – Pp. 207–212.
50. *Dinakaran D.* Real time prediction of flank wear by neuro fuzzy technique in turning / *D.Dinakaran, S.Sampathkumar, J.S. Mary* // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2010. – Vol. 4, No. 6. – Pp. 725–732.
51. *Dinakaran D.* An experimental investigation on monitoring of crater wear in turning using ultrasonic technique / *D.Dinakaran, S.Sampathkumar, N.Sivashanmugam* // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49, No. 15. – Pp. 1234–1237.
52. *Salimi A.* Tool condition monitoring using cutting and thrust forces and fuzzy logic technique / *A.Salimi, M.Zadshakouyan* // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2009. – Vol. 3, No. 1. – Pp. 283–290.
53. *Li X.* Real-time tool condition monitoring using wavelet transforms and fuzzy techniques / *X.Li, S.K. Tso, J.Wang* // IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society. – 2000. – Vol. 30, No. 3. – Pp. 352–357.
54. *Fu P.* Tool condition monitoring based on an adaptive neurofuzzy architecture, *P. Fu, A.D. Hope, G.A. King* // Advances in Materials Manufacturing Science and Technology, 2004. – Vol. 471–472. – Pp. 196–200.
55. *Uros Z., C. Franc, K. Edi.* Adaptive network based inference system for estimation of flank wear in end-milling / *Z.Uros, C.Franc, K.Edi* // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209, No. 3. – Pp. 1504–1511.
56. *Fu P.* A hybrid pattern recognition architecture for cutting tool condition monitoring, Pattern Recognition Techniques / *P.Fu, A.D. Hope* // Technology and Applications. – 2008. – Pp. 547–558.
57. Fuzzy clustering of wavelet features for tool condition monitoring in high speed milling process / *T.Amin J., E.M. Joo, L.Xiang et al.* // Annual Conference of the Prognostics and Management Society. – 2010. – Pp. 1–5.
58. *Lezanski P.* An intelligent system for grinding wheel condition monitoring / *P.Lezanski* // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 109, No. 3. – Pp. 258–263.

ЗАЛОГА Вільям Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

- теорія різання;
- моделювання робочих процесів високих технологій.

ЗІНЧЕНКО Руслан Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

- діагностування стану різального інструменту;
- моделювання та розробка САПР.

ГОНЩИК Анна Вадимівна – аспірантка кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

- діагностування стану різального інструменту.

Подано 11.05.2011



