

**ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ:  
СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА**

*В. А. Залоза, д-р техн. наук, профессор;*

*А. В. Гонщик, аспирантка;*

*Р. Н. Зинченко, канд. техн. наук, доцент,*

*Сумский государственный университет, г. Сумы, Украина*

*В статье представлен обзор литературы по вопросу применения метода искусственных нейронных сетей в системах диагностики процессов механической обработки и, в частности, состояния режущего инструмента.*

*Ключевые слова: механическая обработка, износ, состояние режущего инструмента, искусственный интеллект, нейронная сеть.*

*У статті подано огляд літератури з питання застосування методу штучних нейронних мереж у системах діагностування процесів механічної обробки та, зокрема, стану режущого інструменту.*

*Ключові слова: механічна обробка, зношення, стан режущого інструменту, штучний інтелект, нейронна мережа.*

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время практически в каждой области науки и техники находят свое применение методы, основанные на искусственном интеллекте (ИИ). Были созданы различные виды систем искусственного интеллекта, такие, как экспертные системы, нечеткие системы, системы поддержания принятия решений, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы и т. п. Проводится большое количество исследований по применению данных методов в медицине, геологии, авиа- и кораблестроении, экономике, управлении и др.

В машиностроении ИИ главным образом используются в системах контроля и диагностики. Однако, несмотря на то, что объем исследований в этой области за последние годы значительно увеличился, остается актуальным вопрос создания эффективной системы диагностики и управления процессом резания, обеспечивающих требуемое качество, высокую производительность и минимальные затраты на обработку деталей машин на металлорежущих станках.

*Цель работы* – обзор современного состояния проблемы применения методов искусственных нейронных сетей в системах мониторинга процессов механической обработки и состояния режущего инструмента, а также определение путей дальнейших исследований в этой области.

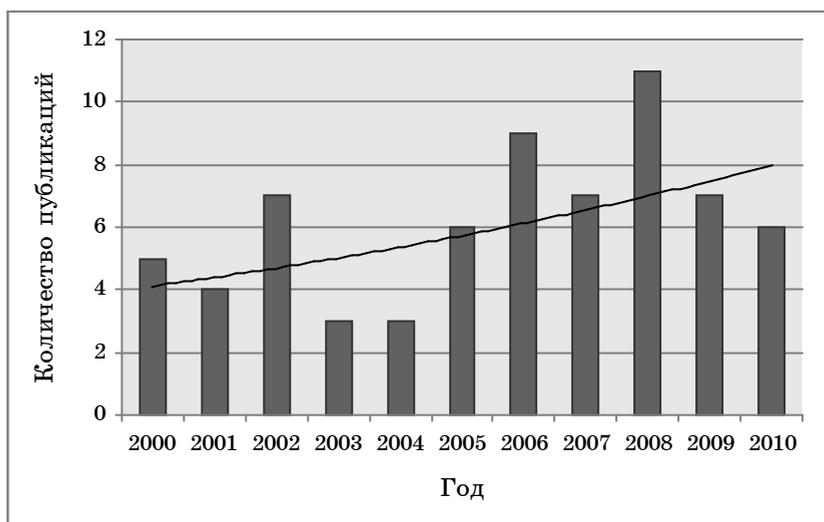
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Современные приложения метода искусственных нейронных сетей для процессов механической обработки**

Искусственная нейронная сеть (ИНС) как форма искусственного интеллекта доказала высокий уровень компетентности при решении многих комплексных инженерных задач. Исследования теории ИНС и их применение все в большей степени продолжает интересовать ученых и инженеров различных отраслей.

Простота, с которой могут быть созданы нейронные сети, привела к огромному количеству их использования в машиностроении. За последнее десятилетие большая часть опубликованных работ посвящена

мониторингу процессов механической обработки, включая обработку резанием (рис. 1). В этом приложении нейронные сети используются как основа экспертной системы для определения какого-либо показателя процесса по данным большого числа датчиков, установленных в технологической системе. Чаще всего решения принимаются на основе данных о силе резания, параметрах вибраций, спектре акустической эмиссии, токе и мощности электродвигателя, колебаний скорости вращения шпинделя.



*Рисунок 1 - Динамика роста публикаций по применению систем диагностики процессов механической обработки с применением искусственных нейронных сетей в ведущих мировых изданиях*

Благодаря простому и быстрому пониманию эмпирических моделей, нейронная сеть является очень популярным инструментом. Метод доказал свое превосходство в решении задач оптимизации, моделирования процесса, диагностики процессов механообработки (в частности, состояния режущего инструмента), адаптивного контроля процессов обработки материалов, прогнозирования параметров процесса резания и износа инструмента. Рассмотрим некоторые последние примеры задач, которые были решены с помощью НС.

*Моделирование процесса.* Одним из основных направлений применения нейронных сетей в задачах механической обработки является моделирование процесса. Так, J. F. Briceno, H. El-Mounayri, S. Mukhopadhyay [1] использовали НС эффективного моделирования и точной имитации процесса концевого фрезерования, а D. Mandal, S. K. Pal и P. Saha [2] смоделировали процесс электроэрозионной обработки. В работе [3] осуществлено моделирование нелинейных, нестационарных погрешностей из-за тепловых деформаций в станке. Важным является также моделирование взаимосвязи между режимами резания и параметрами процесса при высокоскоростной обработке [4]. Здесь была создана модель ИНС, входными параметрами которой стали скорость резания, машинное время, подача, глубина резания и давление охлаждающей жидкости, а выходными – тангенциальная сила, осевая сила, потребляемая мощность двигателя шпинделя, шероховатость обработанной поверхности, средний износ по задней поверхности, максимальный износ по задней поверхности, износ при вершине лезвия.

Предложено использовать эту модель для оптимизации процесса резания с целью повышения эффективности производства.

*Диагностика и мониторинг процессов механической обработки.* Как уже было сказано ранее, искусственные нейронные сети широко применяются в системах диагностики процессов машиностроения. Например, Н-У Kim и J-Н Ahn [5] в своих исследованиях провели мониторинг состояния удаления стружки в процессе сверления на основании данных о мощности двигателя шпинделя. В работе [6] нейросетевой подход применяется в диагностике операций шлифования, а именно автоколебаний и явления горения в процессе шлифования. При этом используются сигналы акустической эмиссии и мощностные сигналы.

М. Korosec, J. Balic, J. Корас [7] представили основанное на ИНС оценивание обрабатываемости свободных поверхностей заготовки по координатам точек. При этом определяется уровень сложности обработки таких поверхностей. P. G. Benardos, S. Mosialos, G.-C. Vosniakos [8] делают попытку спрогнозировать размеры упругих деформаций заготовок от сил резания, возникающих в процессе точения. S. Arul, L. Vijayaraghavan, S. K. Malhotra [9] применили нейронную сеть для онлайн мониторинга качества заготовки при сверлении по сигналам акустической эмиссии. Оценивается влияние параметров сверления (скорости резания и подачи) на осевую силу и износ сверла по задней поверхности, которые могут повлечь за собой уменьшение отверстия.

*Адаптивный контроль процессов механообработки.* Важным приложением нейронных сетей является использование их в системах адаптивного контроля процессов. John M. Fines и Arvin Agah в работе [10] рассматривают использование ИНС для компенсации погрешности осевого позиционирования станка. Основное внимание направлено на создание нейросетевой системы, которая могла бы быть интегрирована в открытую архитектуру системы контроля токарного станка. В работе [11] нейросетевой подход применяется для компенсации температурных погрешностей в обрабатывающем центре. Рассмотрена система гипотетических умозаключений, основанная на адаптивной нейросети, для оценки износа инструмента по задней поверхности в процессе концевой фрезерования [12]. Здесь была создана нейронечеткая схема, основанная на сигналах о силе резания.

*Оптимизация процессов механической обработки.* Известны работы по оптимизации режимов резания. В работе [13], например, осуществляется оптимизация режимов резания в процессе обработки для того случая, когда нет достаточно времени для глубокого анализа. Такая оптимизация применима для процессов точения, сверления, фрезерования, шлифования. R. K. Jain, V. K. Jain [14] представили выбор оптимальных режимов при абразивно-струйной обработке, а Н. El-Mounayri, H. Kishawy и J. Briceno [15] разработали модель интегрированной системы оптимизации сферического концевой фрезерования с ЧПУ.

Интересным является нейросетевой подход для прогнозирования оптимального зазора в процессе листовой штамповки [16], а также выявление оптимальной формы стружколомающей канавки, обеспечивающей максимальную производительность [17].

*Прогнозирование поверхностной шероховатости, сил резания, температуры.* Как показывает обзор публикаций по применению нейронных сетей в машиностроении, основное их количество направлено на решение вопросов прогнозирования параметров процесса. Известно большое количество работ по применению нейронных сетей в задачах прогнозирования шероховатости обработанной поверхности: [18–22] – при точении, [23–25] – при фрезеровании, [26, 27] – при сверлении.

Медведев В. В. и Медведев В. С. [18] представили результаты разработки интеллектуальной системы диагностики качества поверхностного слоя непосредственно в процессе обработки на станках с ЧПУ. С помощью нейронных сетей было осуществлено прогнозирование шероховатости в процессе точения стали в условиях минимального использования СОТС [19], моделирование поверхностной шероховатости для различных режимов резания в процессе чистового точения закаленных деталей [20]. Была также разработана система прогнозирования поверхностной шероховатости на основе нейронных сетей и теории нечетких множеств [21]. Разработанная база правил может быть использована и для прогнозирования переменных процесса по заданной шероховатости. Было проведено экспериментальное исследование влияния твердосплавных пластин (без покрытия и покрытых методами PVD и CVD) на шероховатость поверхности при точении с использованием ИНС [22].

Для процессов сверления в работе [27] на основе данных о силе резания было произведено оценивание шероховатости поверхности в композитном материале, а в работе [26] – прогнозирование микронеровностей заготовки из малоуглеродистой стали.

Были отмечены также и исследования по применению нейронных сетей для прогнозирования шероховатости в процессах фрезерования: [23, 24] – для концевое фрезерования, [25] – для торцевого. Работа [23], например, представляет подход для обеспечения минимальной шероховатости поверхности посредством определения соответствующих режимов резания.

Интересным применением нейронной сети является использование ее в качестве модели для прогнозирования шероховатости в процессе абразивно-струйной резки [28].

Мониторинг силы резания как одного из основных параметров процесса резания осуществляли U. Zuperl, F. Cus, V. Mursec и T. Ploj в работе [29], целью которой являлось создание надежного метода прогнозирования трех составляющих силы резания в процессе концевое сферического фрезерования. А С. С. Tsao и Н. Hocheng оценивали осевую силу в процессе сверления отверстий в композитном материале [27]. Нейронные сети нашли свое применение и в моделировании сил резания в процессе торцевого фрезерования [30] и в процессе точения [31]. В работе [32] ИНС применялась для моделирования температуры на границе контакта инструмента со стружкой в процессе токарной обработки на основании режимов резания и сигналов о силе резания.

#### **Диагностика состояния режущего инструмента и метод искусственных нейронных сетей**

Большое количество исследований описывают применение нейросетевых систем в мониторинге состояния инструмента, классификацию и прогнозирование износа режущего инструмента (РИ) и его стойкости (табл. 1).

Износ инструмента в процессе обработки снижает качество обработанных поверхностей и служит причиной непрогнозируемых изменений геометрии заготовки. Важно знать, когда инструмент изнашивается, какова будет величина этого износа и его вид. С точки зрения автоматизации процесса необходимо разработать интеллектуальную сенсорную систему для обнаружения прогрессирующего износа инструмента в процессе операций резания так, чтобы изношенные инструменты могли быть определены и заменены вовремя. Это сложная задача, которая может быть решена посредством применения систем, основанных на нейронных сетях.

На сегодняшний день существует ряд работ, посвященных мониторингу износа инструмента с применением искусственных нейронных сетей. В этих работах нейронные сети применяются в качестве экспертных подсистем - систем диагностики состояния режущих инструментов и их износа.

Среди отечественных ученых этим вопросом занимаются А. Г. Деревянченко, Л. В. Бовнегра, Л. М. Девин, среди зарубежных – К. Patra, S. K. Pal, K. Bhattacharyya, S. S. Panda, D. Chakraborty, T. Ozel, Y. Karpat, Z. Uros, C. Franc, K. Edi, A. K. Singh и др.

Основное количество публикаций, посвященных применению ИНС в системах диагностики состояния РИ и определения износа, сосредоточено на процессах точения. Разработана система контроля резцов для прецизионного точения, включающая систему технического зрения [33]. В работе [34] изложен подход к использованию нейронных сетей при создании системы поддержания трудоспособности режущего инструмента. Исследуется проблема моделирования износа инструмента по звуковому сигналу [35]. Для этой задачи были использованы многослойная нейронная сеть и нейронечеткая сеть.

Высокая эффективность аппарата ИНС наблюдается при диагностировании состояний РИ в процессе прецизионного точения [36], где было доказано, что он позволяет достичь более точного результата, чем при работе со статистическими методами. В работах [37–39] были созданы нейросетевые системы мониторинга износа резца на основании сигналов о силе резания.

Моделирование износа инструмента по задней поверхности при сверлении осуществлено в работах [40–43]. Однако все эти результаты основаны на идентификации различных сигналов. Так, например, С. Sanjay, М. L. Neema и С. W. Chin [40] использовали для этой цели силы резания (осевую силу и силу вращения), так же, как и S. Garg, K. Patra, V. Khetrpal, S. K. Pal и D. Chakraborty [43]. S. S. Panda и D. Chakraborty [42] взяли во внимание силы резания совместно с параметрами вибраций. Интересным является прогнозирование износа сверла по задней поверхности согласно токовым сигналам от двигателя [41].

Представлен также мониторинг износа инструмента в операциях микрофрезерования [44]; рассматриваются факторы, влияющие на износ и метод мониторинга износа инструмента с использованием различных датчиков, таких как акселерометр, датчики силовой и акустической эмиссии. Сигналы комбинируются посредством нейронечеткого метода, который в последствие определяет, в хорошей ли форме инструмент или он изношен. В работе [45] износ инструмента в процессе фрезерования с ЧПУ оценивается на основании данных о силе резания, колебаниях шпинделя, шпиндельных токах и уровне звукового давления.

### **Искусственные нейронные сети: обучение**

Искусственная нейронная сеть – это электронная модель нейронной структуры мозга, которая, главным образом, учится на опыте. ИНС представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов).

Возможность обучения — одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что, в случае успешного обучения, сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке.

Таблица 1 - Применение метода искусственных нейронных сетей в задачах диагностики состояния и износа режущего инструмента

Автор	Год	Процесс	Вид НС	Точность результатов	Исходный сигнал
C. Sanjay, M. L. Neema, C. W. Chin	2005	Сверление	Сеть обратного распространения (BP)	-	Силы резания
T. Ozel, Y. Karpat	2005	Точение	Сеть обратного распространения (BP)	-	Силы резания
S. S. Panda, A. K. Singh и др.	2006	Сверление	Сеть обратного распространения (BP)	92,5%	Силы резания
A. Antic, J. Hodolic, M. Sokovic	2006	Точение	Сеть обратного распространения (BP)	-	Силы резания
K. Patra, S. K. Pal, K. Bhattacharyya	2007	Сверление	Сеть обратного распространения (BP)	-	Вихревые токи двигателя
S. S. Panda	2007	Сверление	Сеть обратного распространения (BP)	-	Силы резания, вибрация
N. Ghosha, Y.B. Ravi, K. Patra, и др.	2007	Фрезерование	Сеть обратного распространения (BP)	-	Силы резания, вибрация, звуковое давление
X. Wang, Y. Huang и др.	2008	Точение	Гибридная НС, обучающаяся по расширенному алгоритму Калмана	-	-
S. S. Panda, D. Chakraborty, S. K. Pal	2008	Сверление	Сеть обратного распространения (BP) и радиальная базисная сеть (RBFN)	-	Силы резания
M. Malekiana, S. S. Parka, Martin B. G. Jun	2009	Фрезерование	Адаптивная нейронечеткая система (ANFIS)	-	Силы резания, АД
S. Garg, K. Patra, V. Khetrupal, S.K. Pal и др.	2010	Сверление	Радиальная базисная сеть (RBFN)	-	Силы резания
K. Patra, S. K. Pal, K. Bhattacharyya	2010	Сверление	Нечеткая радиальная базисная сеть (FRBF)	-	Вибрация
S. M. Ali, N. R. Dhar	2010	Точение	Сеть обратного распространения (BP)	99%	Силы резания
F. Basciftci и H. Seker	2010	Точение	Сеть обратного распространения (BP)	100%	Силы резания

Существуют два отличных друг от друга этапа работы нейронной сети: тренировка (обучение) и воспроизведение (применение). Обучение включает в себя процессы многократного установления весов взаимосвязи нейронов таким образом, чтобы минимизировать ошибку прогнозирования [13]. Для обучения нейронных сетей применяются

алгоритмы обучения двух типов (разные типы сетей используют разные типы обучения): управляемое «обучение с учителем» и неуправляемое «без учителя».

Анализ публикаций показал, что для решения задач механической обработки чаще всего применяется обучение с учителем. А наиболее популярным алгоритмом обучения в решении такого рода задач является алгоритм обратного распространения (back propagation), при котором имеющиеся данные используются для корректировки весов и пороговых значений сети таким образом, чтобы сделать ошибку прогноза минимальной. Используют также и радиальную базисную сеть (radial basis neural network).

Доказано, что сети обратного распространения дают более точные результаты, однако они требуют большего количества времени на обучение и проверку. Точность результатов при использовании радиальной базисной сети ниже, но при этом она является более быстрой и надежной [13; 29; 42]. Известны также и случаи применения в мониторинге процессов машиностроения сетей с обратной связью: интегрированной НС с обратной связью (Integrated Recurrent Neural Network) [47], самоорганизующейся НС Кохонена (Self-organized Kohonen neural network) [48]. Для повышения точности прогнозирования все более актуальным является использование гибридных (нейронечетких) сетей, объединяющих в себе преимущества нейронных сетей и системы нечеткого вывода [12; 44; 35].

## ВЫВОДЫ

Технологии, основанные на использовании метода ИНС, находят широкое применение в решении задач машиностроения. Главным образом НС используются здесь в системах мониторинга и диагностики механической обработки, в том числе и обработки резанием.

Диагностика состояния и износа режущего инструмента с применением искусственных нейронных сетей является актуальной научно-исследовательской задачей. Современные исследования способны достигнуть достаточно высокой точности прогнозирования износа режущего инструмента посредством НС – 90%. Однако обзор литературы показал, что на сегодняшний день такие системы диагностики имеют ряд недостатков:

- не разработана единая методология по применению НС в системах диагностики состояния режущих инструментов;
- достаточно мало информации касательно точности систем диагностирования состояния режущего инструмента;
- нет сравнительного анализа систем диагностики, основанных на использовании датчиков, регистрирующих разные сигналы (вибрации, силы резания, акустической эмиссии, тока и мощности электродвигателя, скорости вращения шпинделя и др.).

## SUMMARY

### DIAGNOSIS OF MACHINING PROCESSES BY MEANS OF APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS: PRIOR ART

*Zaloha V. O., Honshchuk A. V., Zinchenko R. M.,  
Sumy State University, Sumy*

*This article presents the literature review on the subject of application of artificial neural network method in the systems of machining process diagnosis and cutting tool condition diagnosis particularly.*

**Key words:** *machining, wear, cutting tool condition, artificial intelligence, neural network.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Briceno J. F. Selecting an artificial neural network for efficient modeling and accurate simulation of the milling process / J. F. Briceno, H. El-Mounayri, S. Mukhopadhyay // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – Vol. 42, 6. – P. 663-674.
2. Mandal D. Modeling of electrical discharge machining process using back propagation neural network and multi-objective optimization using non-dominating sorting genetic algorithm-II / D. Mandal, S. K. Pal, P. Saha // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 186, 1-3. – P. 154-162.
3. Yang H. Dynamic neural network modeling for nonlinear, nonstationary machine tool thermally induced error / H. Yang, J. Ni // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, 4-5. – P. 455-465.
4. Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network / E. O. Ezugwu, D. A. Fadare, J. Bonney, R. B. Da Silva, W. F. Sales // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, 12-13. – P. 1375-1385.
5. Kim H.-Y. Chip disposal state monitoring in drilling using neural network based spindle motor power sensing / H.-Y. Kim, J.-H. Ahn // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – Vol. 42, 10. – P. 1113-1119.
6. Kwak J.-S. Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals / J.-S. Kwak, M.-K. Ha // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – Vol. 147, 1. – P. 65-71.
7. Korosec M. Neural network based manufacturability evaluation of free form machining / M. Korosec, J. Balic, J. Kopac // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, 1. – P. 13-20.
8. Benardos P. G. Prediction of workpiece elastic deflections under cutting forces in turning / P. G. Benardos, S. Mosialos, G.-C. Vosniakos // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2006. – Vol. 22, 5-6. – P. 505-514.
9. Arul S. Online monitoring of acoustic emission for quality control in drilling of polymeric composites / S. Arul, L. Vijayaraghavan, S. K. Malhotra // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 185, 1-3. – P. 184-190.
10. Fines J. M. Machine tool positioning error compensation using artificial neural networks / J. M. Fines, A. Agah // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2008. – Vol. 21, 7. – P. 1013-1026.
11. Mize C. D. Neural network thermal error compensation of a machining center / C. D. Mize, J. C. Ziegert // *Precision Engineering*. – 2000. – Vol. 24, 4. – P. 338-346.
12. Uros Z. 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, 3. – P. 1504-1511.
13. Cus F. Approach to optimization of cutting conditions by using artificial neural networks / F. Cus, U. Zuperl // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2006. – Vol. 173, 3. – P. 281-290.
14. Jain R. K. Optimum selection of machining conditions in abrasive flow machining using neural network / R. K. Jain, V. K. Jain // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol. 108, 1. – P. 62-67.
15. El-Mounayri H. Optimization of CNC ball end milling: a neural network-based model / H. El-Mounayri, H. Kishawy, J. Briceno // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 166, 1. – P. 50-62.
16. Hambli R. Application of a neural network for optimum clearance prediction in sheet metal blanking processes / R. Hambli, F. Guerin // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2003. – Vol. 39, 11. – P. 1039-1052.
17. Kim H.-G. Performance evaluation of chip breaker utilizing neural network / H.-G. Kim, J.-H. Sim, H.-J. Kweon // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, 2. – P. 647-656.
18. Медведев В. В. Особенности диагностики качества механообработки с применением интеллектуальных систем / В. В. Медведев, В. С. Медведев // *Вісник Донбасько державно машинобудвно академ*. – 2008, 3Е (14). – С. 131-135.
19. Tsao C. C. Tool wear and surface roughness prediction using an artificial neural network (ANN) in turning steel under minimum quantity lubrication (MQL) / C. C. Tsao, H. Hochen // *Engineering and Technology*. – 2010. – 62. – P. 830-839.
20. Ozel T. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks / T. Ozel, Y. Karpaz // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, 4-5. – P. 467-479.
21. Abburi N. R. A knowledge-based system for the prediction of surface roughness in turning process / N. R. Abburi, U. S. Dixit // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2006. – Vol. 22. – 4. – P. 363-372.
22. The experimental investigation of the effects of uncoated, PVD- and CVD-coated cemented carbide inserts and cutting parameters on surface roughness in CNC turning and its prediction using artificial neural networks / M. Nalbant, H. Gokkaya, I. Toktas, G. Sur // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2009. – Vol. 25, 1. – P. 211-223.

23. Oktem H. Prediction of minimum surface roughness in end milling mold parts using neural network and genetic algorithm / H. Oktem, T. Erzurumlu, F. Erzincanli // *Materials & Design*. – 2006. – Vol. 27, 9. – P. 735-744.
24. Zain A. M. Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network / A. M. Zain, H. Haron, S. Sharif // *Expert Systems with Applications*. – 2010. – Vol. 37, 2. – P. 1755-1768.
25. El-Sonbaty I. A. Prediction of surface roughness profiles for milled surfaces using an artificial neural network and fractal geometry approach / I. A. El-Sonbaty, U. A. Khashaba, A. I. Selmy, A. I. Ali // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 200, 1-3. – P. 271-278.
26. Panda S. S. Simultaneous prediction of surface roughness and drill flank wear in drilling a mild steel work piece using ANN, National Conference on Quality, Reliability and Maintainability aspect in Engineering systems. – 2007.
27. Tsao C. C. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network / C. C. Tsao, H. Hocheng // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 203, 1-3. – P. 342-348.
28. Caydas U. A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method / U. Caydas, A. Hascalik // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 202, 1-3. – P. 574-582.
29. Zuperl U. A generalized neural network model of ball-end milling force system / U. Zuperl, F. Cus, B. Mursec, T. Ploj // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2006. – Vol. 175, 1-3. – P. 98-108.
30. Aykut S. Modeling of cutting forces as function of cutting parameters for face milling of stellite 6 using an artificial neural network / S. Aykut, M. Golcu, S. Semiz, H. S. Ergur // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 190, 1-3. – P. 199-203.
31. Prediction of cutting force for self-propelled rotary tool using artificial neural networks / W. Hao, X. Zhu, X. Li, G. Turyagyenda // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2006. – Vol. 180, 1-3. – P. 23-29.
32. Korkut I. Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool-chip interface temperature in machining / I. Korkut, A. Acir, M. Boy // *Expert Systems with Applications*. – 2011.
33. Система контролю и методы распознавания состояний резцов для поддержания их работоспособности / А. Г. Дерев'янченко, Л. В. Бовнегра, Д. А. Криницин, Е. В. Косс, А. А. Фомин // *Науков прац ДонНТУ. Проектування прогресивних конструкцій рзальних нструмент в та технолог чного оснащення*. – 2009. – С. 87-94.
34. Дерев'янченко О. Г. Використання засоб в штучного нтелекту при створенн системи п дтримки працездатност р ручних нструмент в / О. Г. Дерев'янченко, Р. Г. Дол щинський, Д. О. Криницин // *Всник ЖДТУ. Техн чн науки*. – 2009. – 3 (50). – С. 32-38.
35. Внуков Ю. Н. Моделирование износа инструмента по результатам вейвлет-преобразования звукового сигнала / Ю. Н. Внуков, В. И. Дубровин, Ю. С. Афонин, Т. В. Манило // *Штучний нтелект*. – 2008. – 1. – С. 73-79.
36. Дерев'янченко А. Г. Диагностирование состояний режущих инструментов с использованием нейронных сетей / А. Г. Дерев'янченко, В. Д. Павленко, А. А. Фомин // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2001. – 2 (17). – С. 1-4.
37. Ali S. M. Modeling of tool wear and surface roughness under MQL condition-a neural approach / S. M. Ali, N. R. Dhar // *Canadian Journal on Artificial Intelligence, Machine Learning & Pattern Recognition*. – 2010. – Vol. 1, 2. – P. 7-25.
38. Antic A. Development of an intelligent system for tool wear monitoring applying neural networks / A. Antic, J. Hodolic, M. Sokovic // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2006. – Vol. 14, 1-2. – P. 146-151.
39. 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). – P. 2883-2888.
40. Sanjay C. Modeling of tool wear in drilling by statistical analysis and artificial neural network / C. Sanjay, M. L. Neema, C. W. Chin // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 170, 3. – P. 494-500.
41. Patra K. Artificial neural network based prediction of drill flank wear from motor current signals / K. Patra, S. K. Pal, K. Bhattacharyya // *Applied Soft Computing*. – 2007. – Vol. 7, 3. – P. 929-935.
42. Panda S. S. Flank wear prediction in drilling using back propagation neural network and radial basis function network / S. S. Panda, D. Chakraborty, S. K. Pal // *Applied Soft Computing*. – 2008. – Vol. 8, 2. – P. 858-871.
43. Genetically evolved radial basis function network based prediction of drill flank wear / S. Garg, K. Patra, V. Khetrpal, S. K. Pal, D. Chakraborty // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2010. – Vol. 23, 7. – P. 1112-1120.
44. Malekian M. Tool wear monitoring of micro-milling operations / M. Malekian, S. S. Park, M. B. G. Jun // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, 10. – P. 4903-4914.

45. Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion / N. Ghosh, Y. B. Ravi, A. Patra, S. Mukhopadhyay, S. Paul, A. R. Mohanty, A. B. Chattopadhyay // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2007. – Vol. 21, 1. – P. 466-479.
46. Panda S. S. Flank wear prediction in drilling using back propagation neural network and radial basis function network / S. S. Panda, D. Chakraborty, S. K. Pal // Applied Soft Computing. – 2008. – Vol. 8, 2. – P. 858-871.
47. Yang H. Dynamic neural network modeling for nonlinear, nonstationary machine tool thermally induced error / H. Yang, J. Ni // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 45, 4-5. – P. 455-465.
48. Korosec M. Improved surface roughness as a result of free-form surface machining using self-organized neural network / M. Korosec, J. Kopac // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 204, 1-3. – P. 94-102.

*Поступила в редакцию 1 декабря 2011 г.*