

РОЗДІЛ II. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.9

Дмитро Федориненко, Олександр Космач, В'ячеслав Безручко, Сергій Сапон

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ВЕРСТАТАХ

Дмитрий Федориненко, Александр Космач, Вячеслав Безручко, Сергей Сапон

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ

DmytroFedorynenko, OleksandrKosmach, ViacheslavBezruchko, SerhiiSapon

EXPERIMENTAL EVALUATION OF ENERGY PROCESSES OF CNC MACHINING

Проведені експериментальні дослідження електричного споживання приводу головного руху прецизійного верстата в режимі холостого ходу, що дозволило встановити фактори та їх загальний внесок в енергоспоживання. Оброблення отриманих результатів досліджень дозволило класифікувати результати досліджень за різними групами, яким відповідають різне енергетичне споживання приводу головного руху в режимі холостого ходу. Основним фактором, який впливає на енергетичне споживання приводу головного руху верстата в режимі холостого ходу, є частота його обертання.

Ключові слова: верстат, двигун, потужність, напруга, струм, споживання, привод.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 6.

Проведенные экспериментальные исследования электрического потребления привода главного движения прецизионного станка в режиме холостого хода, что позволило установить факторы и их общий вклад в энергопотребление. Обработка полученных результатов исследований позволила классифицировать результаты исследований по различным группам, которым соответствуют разному потреблению энергии привода главного движения в режиме холостого хода. Основным фактором, влияющим на потребление энергии привода главного движения станка в режиме холостого хода, является частота его вращения.

Ключевые слова: станок, двигатель, мощность, напряжение, ток, потребление, привод.

Рис.: 4. Табл.: 1. Библ.: 6.

Experimental study of electrical consumption of the main motion of precision machine in an idling mode, which revealed factors and their contribution to the overall power consumption was conducted. Processing of the results of research allowed classifying the results of studies by various groups that represent different energy consumption over the main motion in an idling mode. The main factor that influences on the energy consumption over the main drive of the machine in an idling mode is the speed of its rotation.

Key words: machine, engine, power, voltage, current consumption, gear.

Fig.: 4. Tabl.: 1. Bibl.: 6.

Постановка проблеми. У більшості розвинених країн світу проблема ефективного використання різних видів енергії та енергоносіїв для виробництва стає дуже гострою з урахуванням постійних змін та попиту на світовому ринку. Це пов'язано з тим, що промисловий сектор потребує використання значної кількості енергії, більша частина якої складає електроенергія. Складність та особливості цієї проблеми для більшості виробничих галузей України пов'язано з використанням, у першу чергу, застарілого обладнання, низького рівня автоматизації технологічних процесів виробництва, а також низьким рівнем впровадження енергетичного менеджменту. Зазначені вище обставини призводять до значного зростання собівартості виготовленої продукції, зниженням конкурентності як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринку збуту продукції. Крім того, збільшується негативний вплив на зовнішнє середовище, а також підвищене споживання викопних енергоресурсів, які в основному використовуються для виробництва електричної енергії в Україні.

Невід'ємною частиною будь-яких технологічних процесів на виробництві, які пов'язані з механічним обробленням сировини та її переробленням є використання металорізальних верстатів, а також рухомих механізмів та машин, які забезпечують первинну або вторинну переробку сировини. Тому ефективність їх використання, яка ха-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

рактизується відношенням спожитої електричної енергії до корисної механічної роботи, суттєво впливає на складову собівартості виготовленої продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання електричних стандартів та вимог до способів і засобів перевезення виготовленої продукції посприяло достатньо низькому коливанню енергетичних витрат виробництва, які на сьогодні коливаються в межах 1...2 порядків. При цьому споживана ефективна потужність обладнання більшості розвинених підприємств становить у межах 5...50 кВт [1]. Слід зазначити, що поряд з цим потоки різних видів матеріалів можуть коливатися в межах 10 порядків. У зв'язку з цим важливою складовою сучасних технологій є не тільки мінімізація часових витрат на виготовлення продукції, але й мінімізація енергетичних витрат, а також їх загальна енергоефективність. Наприклад, для верстатів, які мають загальну потужність декілька тисяч кВт, загальна енергетична ефективність може становити менше 0,2, що, безумовно, буде відображатися на продуктивності та собівартості виготовленої продукції [2]. Не менш важливою складовою електричного споживання металообробного обладнання є його коефіцієнт корисної дії. Так, наприклад, для верстатів нормальної точності та налагодженого процесу різання лише близько 20 % спожитої верстатом електричної енергії витрачається на механічне оброблення матеріалу. Аналіз основних джерел споживання енергії та шляхи підвищення енергоефективності обробних верстатів докладно розглянуто в [3].

Згідно даних джерела [3] значний вплив на споживання електроенергії у процесі механічної обробки чинить привод шпинделя (в межах 30 %) і допоміжних верстатних вузлів (до 60 % від загального споживання електроенергії). Також зазначено, що споживання електричної енергії шпиндельними вузлами разом із витратою енергії для змащення механізмів й охолодження робочих рідин варіюється у діапазоні від 50 до 70 % залежно від умов обробки на верстатах з ЧПК.

Розглянувши загальну структуру верстата, можна виокремити деякі узагальнені шляхи зменшення витрат електроенергії під час оброблення матеріалів. Проте не менш важливою частиною дослідження енергоефективності металорізальних верстатів є виявлення та аналіз складових процесів, які призводять до споживання електричної енергії верстатом.

Одним з таких напрямів є дослідження енергоефективності металорізальних верстатів на допоміжних та холостих ходах, яка суттєво впливає на загальне енергоспоживання обладнання [3].

Наприклад, у процесі роботи шпиндельного вузла виділяють декілька типових стадій енергетичних витрат: 1 – вмикання та пов'язані з цим перехідні процеси; 2 – вихід на стаціонарний режим змащування опор; 4 – встановлення заготовки; 5 – процес механічного оброблення, який залежить від визначеного методу формування поверхонь; 6 – зміна умов змащування та зменшення швидкості обертання до повної зупинки обертання шпинделя; 7 – зняття заготовки; 8 – вимикання шпинделя [2].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Під час дослідження енергоефективності обладнання найчастіше аналізуються енергетичні витрати, які виникають при безпосередньому виконанні технологічних операцій. Проте, як показують експериментальні дослідження, не менш вагомою складовою є енергетичне споживання при допоміжних та холостих ходах верстата, які невід'ємно супроводжують процес різання. У зв'язку з цим визначення факторів, які впливають на енергетичне споживання верстата на допоміжних ходах та їх подальший аналіз, є достатньо актуальним завданням для підвищення енергоефективності металорізальних верстатів.

Формулювання мети статті. Метою статті є експериментальне визначення факторів, які впливають на енергетичне споживання приводу головного руху токарного вер-

тата в режимі холостого ходу, а також класифікація груп факторів за показниками зменшеного та підвищеного енергетичного споживання привода на допоміжних ходах.

Виклад основного матеріалу. Дослідження енергоспоживання верстата на допоміжних ходах входить в узагальнену методику аналізу енергоефективності металорізального верстата. Вона включає в себе структурний аналіз досліджуваної модифікації верстата та виявлення його основних енергетичних потоків та джерел споживання. Крім цього, кожне джерело споживання повинно бути оцінене у стані спокою або готовності, а також при безпосередньому виконанні корисної роботи на верстаті.

Ключовим етапом методики дослідження є експериментальне визначення споживаної потужності, а також виявлених окремих енергетичних потоків верстата W_n та його загальної споживчої потужності W_b на допоміжних ходах та при безпосередньому обробленні зразків-виробів на різних режимах різання згідно з встановленим планом експерименту. Це дозволяє оцінити загальну енергоефективність роботи верстата, а також засобів передачі та перетворення енергії (приводи, насоси, гідравлічні чи електричні пристрої тощо).

Окремим етапом методики дослідження є визначення факторів, які впливають на споживання електроенергії верстатом у режимі безпосередньої роботи та на допоміжних ходах. Крім цього, визначення закономірностей зміни основних факторів, що впливають, дозволить визначити режими оброблення матеріалів, які мають найменшу та найбільшу енергоефективність. Визначення вузлів з низькою енергоефективністю дозволяє в подальшому провести їх заміну або по можливості провести їх модернізацію, що не потребує значних фінансових витрат.

Під час дослідження енергоефективності обробних верстатів виникає необхідність у виявленні деякої типової групи, в якій би були представлені найбільш розповсюджені джерела енергії, двигуни, передавальні механізми, системи керування та перетворювачі енергії разом з виконавчими органами. Це дозволить розширити основні напрямки розв'язання задач, які пов'язані з підвищенням енергоефективності верстатів, а також більш широко оцінити вплив окремих факторів на складову енергоефективності промислового обладнання [5]. До одного з металообробних верстатів, який володіє різними видами використовуваної енергії, наявністю великої кількості двигунів постійного та змінного струму, а також деяких незалежних систем їх керування, можна віднести прецизійний токарний верстат на гідростатичних опорах моделі УТ16А (рис. 1).

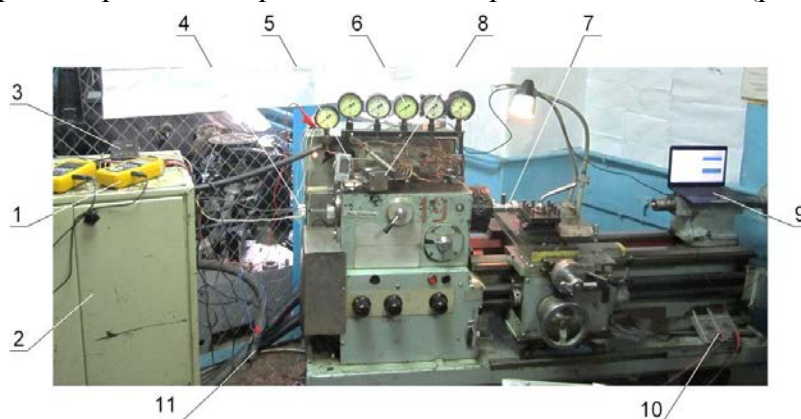


Рис. 1. Ескіз верстатного пристрою для оброблення симетричних заготовок:

1 – однофазні аналізатори якості електричної мережі; 2 – гідростанція; 3 – електронний тахометр; 4 – енкодер; 5 – температурний перетворювач; 6 – манометри в опорах ковзання; 7 – оправка зі змінним дисбалансом; 8 – подільник потоку рідини; 9 – ноутбук; 10 – цифрові мультиметри; 11 – струмові кліщі

Для визначення споживаної потужності верстата на допоміжних ходах проводилося визначення енергетичного споживання двигуна постійного струму головного привода верстата. Визначення електричної потужності двигуна постійного струму проводилося

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

з використанням двох прецизійних True RMS мультиметрів. Один з мультиметрів використовувався для визначення напруги в обмотках збудження, а інший використовувався для визначення величини сили струму, за допомогою паралельного встановлення через лабораторний шунт та вимірювання в режимі постійної напруги. Величина похибки вимірювання мультиметрів становить 0,08 %, а частота оновлення результатів становила 5 Гц. При цьому опір шунта був вибраний з величини максимального струму, який виникає при максимальному завантаженні двигуна постійного струму. Опір шунта становив 5 мОм, номінальне заниження напруги –75 мВ, межі вимірювання – 15А та 30А, клас точності – 0,5.

Отримані результати вимірювань через шину передачі даних RS 232 передавалися на персональний комп'ютер. Спеціалізоване програмне забезпечення, яке використовується разом з мультиметрами на базі операційної системи Windows, дозволяє проводити реєстрацію, зберігання, перетворення вхідних сигналів з подальшим виведенням на дисплей ПК у вигляді часових графічних залежностей у режимі реального часу. Для визначення споживаної потужності двигуна постійного струму в подальшому проводилося перемноження показників напруги мультиметра з показниками перерахованих значень струму, які визначалися другим мультиметром.

Під час дослідження енергоспоживання головного привода верстата враховувався вплив трьох технологічних факторів, які невід'ємно супроводжують оброблення матеріалів на верстатів: n – частота обертання шпинделя верстата, $D_{ст}$ – статичний дисбаланс заготовки, p – величина тиску в опорах ковзання. Величина варіювання та межі факторів, що впливають, представлені в таблиці.

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання факторів

Інтервал варіювання і рівні факторів	Натуральні значення факторів		
	$n, \text{хв}^{-1}$	$D_{ст}, 10^{-6} \text{кг}\cdot\text{м}$	$p, \text{МПа}$
Верхня «зіркова точка» (+1,414)	2770	7385	4,4
Верхній рівень (+1)	2400	6524	4,0
Нульовий рівень (0)	1500	4360	3,0
Нижній рівень (-1)	600	2219	2,0
Нижня «зіркова точка» (-1,414)	230	1303	1,6
Інтервал варіювання	900	2150	1,0

За встановленим планом експерименту, який включав у себе незалежну дію кожного фактора, проводилася багаторазове повторення експерименту для забезпечення збіжності вимірювань споживаної потужності $W_{\text{хх}}$. Крім того, зазначені експериментальні дослідження додатково повторювалися в інший проміжок часу з метою збільшення достовірності результатів. Загалом було опрацьовано близько 81 незалежного експерименту. Отримані результати досліджень представлені у вигляді графів, які представлені «зліва на право», при цьому в правій частині представлені результати вимірювань завдяки поєднанню різних комбінацій факторів, що впливають (рис. 2).

Для статистичного опрацювання результатів експериментальних досліджень в умовах невизначення, а також виявлення факторів, які впливають на енергетичне споживання приводу головного руху, було використано рекурсивний класифікаційний метод C&RT [6]. Особливості цього методу полягають у структуризації та побудові дерева класифікації основних показників, які впливають на досліджуваний процес енергетичного споживання приводу головного руху верстата. У найзагальнішому випадку мета такого аналізу полягає у побудові алгоритмів для визначення набору логічних умов, які дозволяють точно передбачити або провести класифікацію окремих проведених експериментів. Крім цього, здебільшого інтерпретація результатів, яка підсумовується в дереві, є дуже простою. Ця простота корисна не тільки для цілей швидкої класифікації

нових спостережень, але й часто дають набагато простішу «модель» для пояснення, чому спостереження класифікуються або прогнозується певним чином та за деякою класифікаційною ознакою.

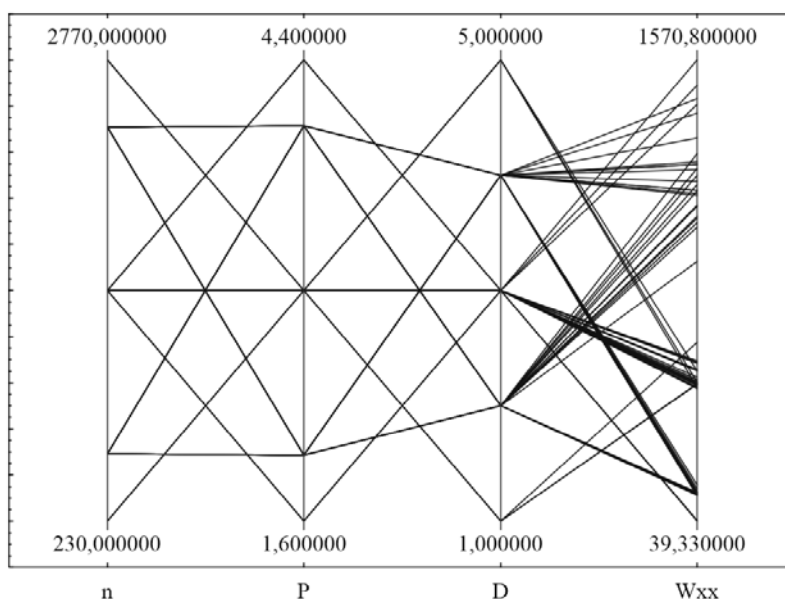


Рис. 2. Схема отримання результатів експериментальних досліджень при незалежній взаємодії факторів, що впливають

Модель дерева класифікації для елементів з 5 рівнів входження (15...11) показано на рис. 3. Побудоване дерево включає в себе елементи різних рівнів. Як показали результати статистичного оброблення, воно включає в себе класифікаційну ознаку зміни частоти обертання шпинделя верстата. Так елементи структури 2 (ліва частина, рис. 3) з порядковим номером 14 враховує класифікаційні ознаки зміни енергетичного споживання приводу верстата з частотою меншою $n=1950 \text{ хв}^{-1}$. У свою чергу, структура 3 (права частина, рис. 3) з порядковим номером 15 враховує ознаки зміни енергетичного споживання приводу верстата з частотою, більшою $n=1950 \text{ хв}^{-1}$. При цьому елементи структури 2, а саме 4 та 5, які входять до групи 13, можна класифікувати за частотами обертання меншими та більшими $n=1050 \text{ хв}^{-1}$ відповідно. Особливістю структури 2 полягає у відсутності інших факторів, крім частоти обертання шпинделя. Це дозволяє стверджувати, що на частотах обертання менших за $n=1950 \text{ хв}^{-1}$ вплив дисбалансу та тиску в опорах ковзання на енергетичне споживання є незнаним або мінімальним і таким, що можна знехтувати.

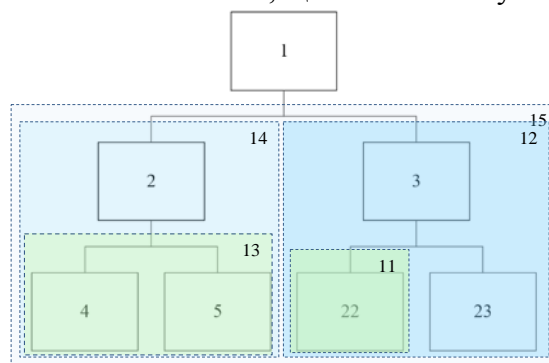


Рис. 3. Дерево класифікації енергетичного споживання приводу головного руху токарного верстата

У свою чергу, елементи структури 3, а саме 22 та 23, які входять до групи, 12 можна класифікувати за частотами обертання меншими та більшими $n=2585 \text{ хв}^{-1}$ відповідно. При цьому в елементи 22 та 23 входять класифікаційні ознаки, які враховують зміну

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

дисбалансу заготовки та зміну тиску. Це означає, що при високих частотах обертання відбувається додатковий вплив дисбалансу на результуюче енергетичне споживання привода головного руху верстата на гідростатичних опорах. Слід зазначити, що порядок входження класифікаційної ознаки зміни тиску в опорах ковзання є набагато нижчим за ознаку дисбалансу. Це означає, що в загальному випадку вплив дисбалансу на енергоспоживання привода головного руху в режимі холостого ходу є більшим, ніж вплив тиску в опорі ковзання. Результати статистичного оброблення показують, що показник значущості для частоти обертання шпинделя на холостих ходах становить 1, у той час як показник дисбалансу становить 0,041, а також 0,028 для тиску в опорах ковзання (рис. 4, а).

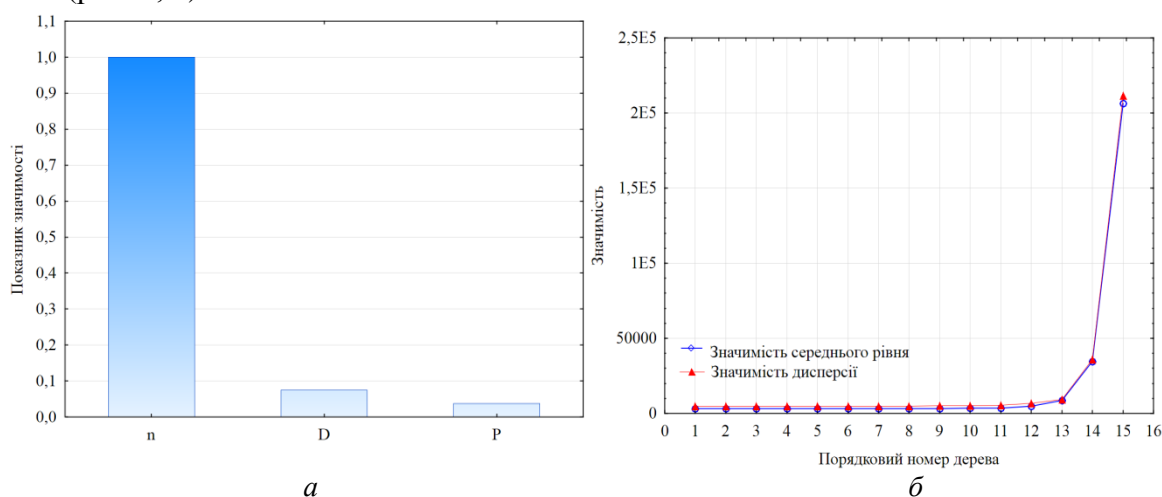


Рис. 4. Показники значущості для факторів, які впливають на енергетичне споживання привода головного руху на холостому ході (а), а також рівень значущості середнього рівня та дисперсії структурних груп за порядком входження в дерево (б)

Вплив дисбалансу на підвищене енергетичне споживання скоріше за все пов'язаний з появою додаткових динамічних та відцентрових сил, які сприяють додатковим механічним втратах між спряженими поверхнями рухомих елементів двигуна постійного струму.

Результати статистичного оброблення також показують, що висока значущість середнього рівня та дисперсії для класифікаційного дерева починається з порядкового номера рівня входження 11 (рис. 4, б), тобто можна вважати, що вплив дисбалансу заготовки та величини тиску в опорах ковзання є мінімальним на характер енергоспоживання верстата на холостому ході. Слід відзначити, що при подальшому підвищенні частоти обертання привода характер впливу дисбалансу та величини тиску в опорах ковзання на енергоспоживання буде зростати.

Розроблене дерево класифікації дозволяє на поверховому рівні та без детального дослідження процесів енергетичного споживання класифікувати режими роботи привода головного руху в режимі холостого ходу за критерієм частоти обертання, яким відповідають відповідно зменшене та підвищене енергетичне споживання двигуна постійного струму.

Висновки і пропозиції. Проведені експериментальні дослідження електричного споживання привода головного руху в режимі холостого ходу дозволили встановити фактори та їх загальний внесок в енергоспоживання. Статистичне оброблення отриманих результатів досліджень дозволило класифікувати результати досліджень за різними групами, яким відповідають різне енергетичне споживання привода головного руху в режимі холостого ходу.

Основним фактором, який впливає на енергетичне споживання в режимі холостого ходу, є частота його обертання. При цьому на частотах обертання, менших за $n=1950 \text{ хв}^{-1}$, вплив дисбалансу та тиску в опорах ковзання є незначним.

При високих частотах обертання відбувається додатковий вплив дисбалансу на результуюче енергетичне споживання привода головного руху верстата на гідростатичних опорах. При цьому вплив дисбалансу на енергоспоживання привода головного руху в режимі холостого ходу є більшим, ніж вплив тиску в опорі ковзання.

Список використаних джерел

1. Gutowski, T. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes / T. Gutowski, J. Dahmus, A. Thiriez // 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering, Lueven, May 31st – June 2nd, 2006 – Pp. 1–5.
2. Draganescu, F. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy / F. Draganescu, M. Gheorghe, C.V. Doicin // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol.141. – Pp. 9–15.
3. Aspects of Energy Efficiency in Machine Tools [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.heidenhain.us/enews/stories_1011/MTmain.php.
4. Федориненко Д. Ю. Енергоефективність обробних верстатів / Д. Ю. Федориненко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – 2015. – № 2 (78). – С. 64–70.
5. Федориненко Д. Ю. Інформаційно-вимірювальний комплекс визначення електричного споживання асинхронних двигунів верстатів / Д. Ю. Федориненко, О. П. Космач // Вісник Чернігівського національного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – 2015.–№2 (78). – С. 70–75.
6. Чубукова И. Data Mining / И. Чубукова. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 384 с.

References

1. Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A. (2006). Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. Proceedings from 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering (Lueven, May 31st – June 2nd, 2006), pp. 1–5 [in English].
2. Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C.V. (2003). Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. *Journal of Materials Processing Technology*, vol.141, pp. 9–15.
3. Aspects of Energy Efficiency in Machine Tools. Retrieved from: http://www.heidenhain.us/enews/stories_1011/MTmain.php.
4. Fedorynenko, D. Yu. (2015). Enerhoefektyvnist obrobnykh verstativ [Energy efficiency of machine tools]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Chernihiv State University of Technology. Series. Technical sciences*, no. 2 (78), pp. 64–70. (in Ukrainian).
5. Fedorynenko, D. Yu., Kosmach, O. P., (2015). Informatsiino-vymiriuvalniyi kompleks vyznachennia elektrychnoho spozhyvannia asynkhronnykh dvyhuniv verstativ [Information-measuring system determining the electrical consumption of asynchronous motors machines]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Chernihiv State University of Technology. Series. Technical sciences*, no. 2 (78), pp. 70–75. (in Ukrainian).
6. Chubukova, I. (2008). *Data Mining*. Moscow: Binom. Knowledge Laboratory. (in English).

Федориненко Дмитро Юрійович – доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Федориненко Дмитрій Юрьевич – доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, г. Чернігів, 14027, Україна).

Fedorynenko Dmytro – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Technologies of Mechanical Engineering and Woodworking Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: fdy1974@gmail.com <mailto:volodymyr.voytenko@inel.stu.cn.ua>

Космач Олександр Павлович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Космач Александр Павлович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологий машиностроения и деревообработки, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Kosmach Oleksandr – PhD in Technical Sciences, Senior lecturer of the Technologies of Mechanical Engineering and Woodworking Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: alexkos86@gmail.com <mailto:volodymyr.voytenko@inel.stu.cn.ua>

Безручко В'ячеслав Михайлович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних систем і мереж, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Безручко Вячеслав Михайлович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических систем и машин, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Bezruchko Viacheslav – PhD in Technical Sciences, Senior lecturer of Electrical Systems and Machines Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: slavajm@meta.ua

Сапон Сергій Петрович – кандидат технічних наук доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Сапон Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий машиностроения и деревообработки, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Sapon Serhii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Technologies of Mechanical Engineering and Woodworking Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: s.sapon@gmail.com