

лес, муфт, роторов гидравлических насосов и др.), а затем сравнить их с данными вибродиагностики.

Комплексное сравнение значений параметров виброперемещения, виброскорости и виброускорения однозначно указывает на виды дефекта, что будет способствовать их устранению и позволит избежать отказов или аварийной ситуации при эксплуатации станков, своевременно выполнив предупредительный ремонт.

**Выводы.** Анализ проведенных исследований с помощью разработанной аппаратуры дал возможность не только выдавать диагноз в явном виде, прогнозировать изменение технического состояния станка для обработки колесных пар, но и представить рекомендации по виду и срокам технического обслуживания и ремонта, рассчитывать оптимальные сроки последующих диагностических обследований.

#### Список использованных источников

1. Тихенко В. Н. Повышение эффективности обработки на колесотокарных станках / В. Н. Тихенко, С. В. Пчелинский // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2012. – Вып. 1(38). – С. 84–87.
2. Махов Ф. Ф. Вибродиагностика станков / Ф. Ф. Махов. – М. : Lap Lambert Academic Publishing, 2011. – 204 с.
3. Савинов Ю. И. Определение параметров механических систем станков / Ю. И. Савинов // Станки и инструмент. – 2010. – № 10. – С. 8–10.
4. Тихенко В. Н. Использование вибродиагностики в станках для обработки колесных пар / В. Н. Тихенко, С. В. Пчелинский // Материалы регионального многоотраслевого научно-техн. форума-конкурса «Экономотехническое развитие Одесского региона и инновационные инженерные решения» (20–22 февраля 2012 г., Одесса). – Одесса, 2012. – С. 95–98.
5. Патент України № 101749. Вимірювальний підсилювач / В. І. Старцев, О. О. Анісімов та інші. – № а201113649 ; заявл. 21.11.2011 ; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8/2013.
6. Максимов В. П. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В. П. Максимов, И. В. Егоров, В. А. Карасев. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.

УДК 621.9

**Д.Ю. Федориненко**, д-р техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

#### ЕНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРОБНИХ ВЕРСТАТІВ

**Д.Ю. Федориненко**, д-р техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

#### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

**Dmytro Fedorynenko**, Doctor of Technical Sciences

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

#### THE ENERGY EFFICIENCY OF MACHINE TOOLS

*Запропоновано методологію підвищення енергоефективності верстатів на основі системного підходу. Розглянуто застосування методів аналізу та синтезу конструкцій верстатів на двох ієрархічних рівнях. Розроблені перспективні шляхи підвищення енергоефективності верстатів, які можуть бути використані для широкої номенклатури промислового обробного обладнання. Проаналізовано методи підвищення енергоефективності, які ґрунтуються на скороченні оперативного часу на оброблення, зменшенні енергоспоживання та рекуперації енергії. Запропоновано критерії оцінювання проектних рішень стосовно їх енергоефективності.*

**Ключові слова:** енергоефективність, методологія, верстат, втрати потужності, рекуперація енергії.

*Предложена методология повышения энергоэффективности станков на основе системного подхода. Рассмотрено применение методов анализа и синтеза конструкций станков на двух иерархических уровнях. Разработаны перспективные пути повышения энергоэффективности станков, которые могут быть использованы для широкой номенклатуры промышленного обрабатывающего оборудования. Проанализированы методы повышения энергоэффективности, основанные на сокращении оперативного времени на обработку, уменьшении энергопотребления и рекуперации энергии. Предложены критерии оценки энергоэффективности проектных решений относительно их энергоэффективности.*

**Ключевые слова:** энергоэффективность, методология, станок, потери мощности, рекуперация энергии.

*The methodology of the energy efficiency increasing of machine tools based on a systematic approach is offered. The application methods of analysis and synthesis of machine tools structures on two hierarchical levels are considered. The promising ways to improve the energy efficiency of machine tools that can be used for a wide range of industrial processing equipment are developed. The methods of the energy efficiency increasing, based on the reduction of operational processing time, reducing energy consumption and energy recovery are analyzed. The criteria for energy efficiency evaluating of design decisions are proposed.*

**Key words:** energy efficiency, methodology, machine tool, power losses, energy recovery.

**Постановка проблеми.** Зниження енергоспоживання і втрат енергії є одними із пріоритетів енергетичної політики Європейського Союзу [1] та України [2]. Сьогодні лише незначна частина споживаної енергії використовується для фактичної доданої вартості процесу, наприклад, сучасне виробництво в Європі характеризується великою часткою «надмірного» енергоспоживання у промисловому секторі (20–50 %) [3]. Українська економіка використовує значно більше енергоносіїв, ніж країни Європи. Так, обсяг енергії, що використовується для виробництва одиниці товарів і послуг, у 3,8 рази перевищує середнє значення для Європейського Союзу [4].

В умовах постійного зростання цін на енергоносії і жорсткої конкуренції на ринку підвищення енергоефективності, продуктивності машинобудівного виробництва, зниження собівартості продукції є актуальними проблемами. Крім того, проблема підвищення енергоефективності безпосередньо пов'язана зі збереженням навколишнього середовища, зменшенням викидів шкідливих речовин та скороченням споживання викопних ресурсів [5], насамперед вугілля, яке в основному використовується для виробництва електричної енергії в Україні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема ефективного використання енергетичних ресурсів, збільшення продуктивності виробництва безпосередньо пов'язана з процесами оброблення на верстатах і визначальним чином впливає на вартість машинобудівної продукції. Так, у процесі механічного оброблення матеріалів на верстатах лише до 20 % споживаної верстатом енергії витрачається саме на оброблення [6], більша ж частина енергії витрачається на забезпечення стабільності параметрів процесу.

Згідно з даними джерела [7] значний вплив на споживання електроенергії у процесі оброблення чинить привод шпинделя (близько 30 %) і допоміжних верстатних вузлів (до 60 % від загального споживання електроенергії). Там же зазначено, що споживання енергії шпиндельним вузлом разом із витратою енергії для змащення механізмів й охолодження робочих рідин варіюється у діапазоні від 50 до 70 % залежно від умов оброблення на верстатах з ЧПК.

У роботі [8] зазначається, що існує суперечність між одночасним забезпеченням показників точності, продуктивності та енергоефективності верстатів. Подолання зазначеної суперечності у майбутньому дозволить створювати верстати якісно нового рівня.

**Невирішені частини проблеми.** Слід зазначити, що відсутність на цей час вітчизняних стандартів, проектних методик та рекомендацій щодо створення енергоефективних конструкцій верстатів суттєвим чином впливає на конкурентоспроможність машинобудівної продукції України порівняно з Європейським Союзом та гальмує інтеграційні процеси.

Отже, незважаючи на накопичений світовий досвід, проблема ефективного використання верстатів з погляду зменшення енергоспоживання є критичною для сучасного машинобудування і потребує подальших досліджень.

**Метою дослідження** є розроблення методології підвищення енергоефективності металорізальних верстатів на основі системного підходу.

**Основні результати дослідження.** Наукові підходи до досліджень енергоефективності верстатів характеризуються широким різноманіттям. Очевидно найбільш раціо-

нальним є застосування системного підходу до проектування енергоефективних конструкцій верстатів, що дозволяє аналізувати елементи та підсистеми машини і їх взаємозв'язки у межах заданої ієрархічної структури. Під час проектування верстатів на основі системного підходу (рис. 1) можуть бути виділені два взаємопов'язані ієрархічні рівні:

- рівень машини (загальні вимоги щодо технічного рівня, вхідні та вихідні параметри процесу оброблення, експлуатаційне середовище тощо);
- рівень підсистем (привод головного руху, приводи подач, система подачі змащувально-охолоджуючої рідини тощо).



Рис. 1. Методологія дослідження енергоефективності верстатів

Аналіз енергетичних потоків верстата повинен виконуватися у двох вимірах: просторі і часі. Просторовий вимір передбачає аналіз енергетичних потоків у компонентах та системах верстата, наприклад, аналіз споживання електричної енергії приводами верстата, аналіз втрат потужності на тертя у вузлах верстата. Вимір потоків у часі може бути здійснений трьома категоріями: у секундах (мікропланування); у годинах (макропланування); у днях (планування виробничого процесу) [9]. Для виявлення процесів та систем, які характеризуються значним споживанням енергії, доцільно застосовувати метод структурного аналізу.

Визначення енергетичних втрат може відбуватися на основі відповідних паспортних даних на окремі механізми, підсистеми верстата або за відомими теоретичними чи емпіричними залежностями. Кращим варіантом з погляду адекватності отриманих значень втрат енергії є експериментальні дослідження. Проте такий підхід пов'язаний із значними матеріальними витратами, характеризується великою тривалістю та не завжди можливий, особливо у виробничих умовах. Найбільш перспективним з погляду попереднього прогнозування енергоспоживання є використання спеціального програмного забезпечення для аналізу енергетичних потоків у верстатах [10], однак воно потребує масиву апріорної інформації щодо енергетичних параметрів, розширення бібліотек типових елементів з метою врахування широкої номенклатури енергетичного обладнання.

Побудова узагальненого енергетичного балансу дозволяє виявити «вузькі» місця системи, що характеризуються значним енергоспоживанням. Саме на подолання цих технічних суперечностей у системі спрямований наступний етап синтезу, який починається з розроблення математичних моделей, як правило, чисельного моделювання й експериментальних досліджень механізмів та систем верстата зі значним енергоспоживанням.

У результаті аналізу та систематизації накопиченого світового досвіду щодо підвищення ефективності енерговикористання промислового обладнання запропоновані найбільш перспективні шляхи підвищення енергоефективності верстатів, які представлені на рис. 2.

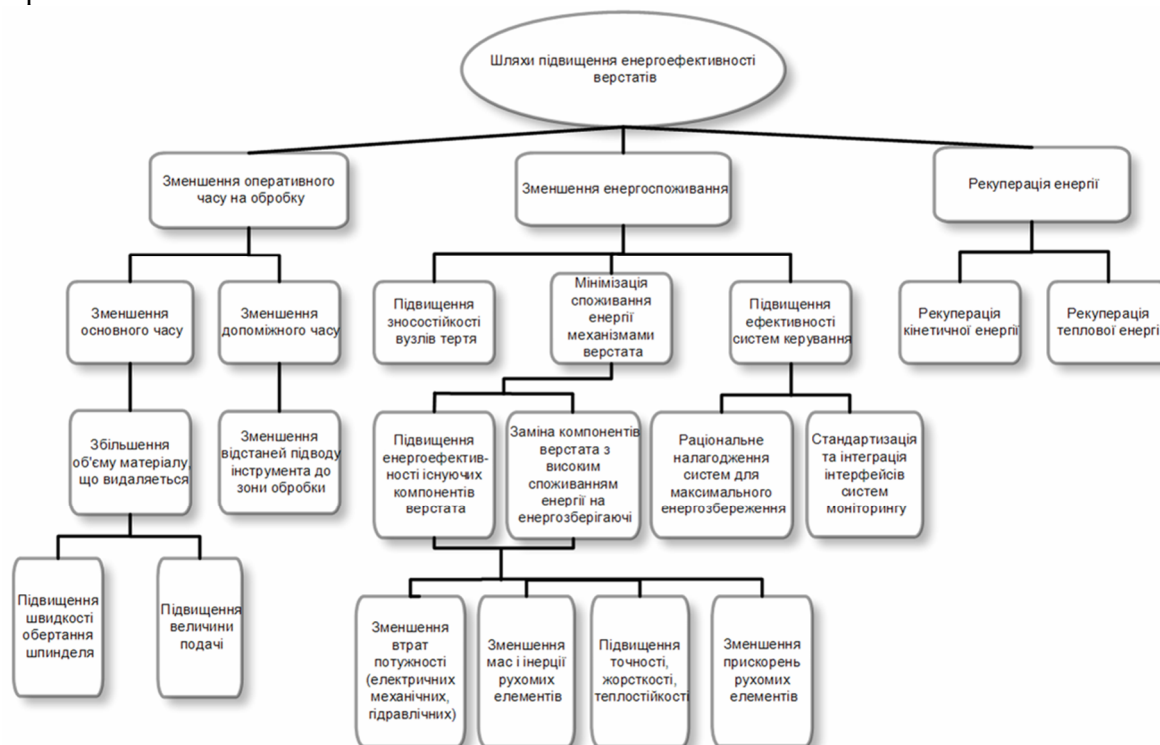


Рис. 2. Шляхи підвищення енергоефективності верстатів

Насамперед, підвищення енергоефективності обробних верстатів можливо досягти завдяки:

- зменшенню оперативного часу на оброблення;
- зменшенню енергоспоживання механізмами та системами верстатів;
- рекуперації енергії.

Раціональним способом підвищення ефективності енерговикористання верстатів є застосування високошвидкісного оброблення матеріалів [6; 11]. Одним із головних ефектів високошвидкісного оброблення є зменшення основного часу на оброблення заготовок. Цього ефекту можливо досягти за умови підвищення швидкості обертання шпинделя, величини подачі, стійкості різального інструменту, завдяки чому збільшується об'єм матеріалу, що видаляється, за певний проміжок часу. Порівняно із традиційним обробленням використання високошвидкісної дозволяє зменшити питоме споживання енергії на оброблення однієї заготовки у декілька разів [6].

Зменшення енергоспоживання можливо також за рахунок підвищення зносостійкості вузлів тертя, адже нові або малозношені вузли споживають менше енергії. Заміна компонентів верстата на більш енергоефективні дозволяє заощадити до 25 % споживаної електричної енергії [10].

Перспективним шляхом зменшення споживання електроенергії є зменшення втрат потужності у системах верстатів, зменшення мас, інерції, прискорень рухомих елементів

тів при одночасному забезпеченні високих показників точності, жорсткості та теплостійкості.

Втрати потужності у верстатах обумовлені, насамперед, втратами енергії у механічних та гідравлічних елементах системи, втратами енергії в електродвигунах.

Наприклад, встановлено, що при високошвидкісному різанні втрати потужності на тертя у гідростатичних підшипниках шпинделя можуть перевищувати потужність різання [12]. Необхідний пошук раціональних конструктивних рішень вузлів тертя, систем змащування підшипників для мінімізації втрат енергії. Важливу роль тут відіграє ефективність насосів гідравлічних систем верстата. Доцільним є використання різноманітних систем регулювання насосів, які дозволяють керувати споживанням електричної потужності залежно від робочого навантаження. Підвищення ефективності гідравлічних систем можливо за рахунок мінімізації об'ємних, механічних та гідравлічних втрат енергії. Також ефективність гідросистем можливо підвищити за рахунок модульного виконання структури, що зменшує втрати тиску в магістралях та у місцевих опорах; термостабілізації середовища за рахунок конвективного відводу тепла через стінки бака та елементів системи живлення; використання гідравлічних акумуляторів для часткового живлення виконавчих механізмів гідроприводів.

Значний вплив на енергоспоживання чинять електродвигуни, які широко застосовуються у приводах та системах керування верстатів. Підвищення енергоефективності електродвигунів у приводах верстатів можливо за рахунок: раціональної конструкції (використання міді замість алюмінію, зменшення зазорів, зменшення втрат на тертя у підшипниках); правильного вибору номінальної потужності (максимальна ефективність досягається у діапазоні 70–100 % від навантаження); застосування частотно-регульованих двигунів стандарту IЕ3 [13]. Перспективним є використання синхронних двигунів, безщіткових двигунів постійного струму, серводвигунів, які є більш енергоефективними порівняно із найбільш поширеними асинхронними двигунами.

Зменшення мас, інерційності рухомих елементів дозволяє скоротити матеріало- та енергоємність машини у цілому. Зменшення мас та інерції дозволяє зменшити реактивну енергію та електричні втрати енергії, що позитивно відбивається на споживаній потужності при прискореннях робочих органів верстата. Крім того, зменшення мас дозволяє скоротити втрати енергії у вузлах тертя верстата, підвищити власні частоти коливань системи, і, як наслідок, продуктивність механічного оброблення. Завдяки помірному прискоренню рухомих елементів верстата можливо застосування електродвигунів менших типорозмірів, які є більш енергоефективними.

Забезпечення високих показників точності, жорсткості та теплостійкості дозволяє опосередковано впливати на скорочення оперативного часу оброблення, наприклад, завдяки зменшенню кількості технологічних переходів, підвищенню стійкості інструменту, збільшенню робочих швидкостей обертання шпинделя тощо.

Раціональне налагодження верстата з погляду мінімізації енергоспоживання передбачає вибір ефективних стратегій оброблення заготовок у часі (протягом робочої зміни, тижня, місяця) та робочій зоні верстата (оптимізація траєкторій оброблення заготовок, зменшення як кількості інструментів, необхідних для оброблення, так і частоти зміни інструменту, відключення допоміжних компонентів верстата після використання, мінімізація використання змащувально-охолоджувальних рідин для оброблення тощо).

Значну роль для економії ресурсів відіграє підвищення ефективності систем керування, використання постійного моніторингу енергоспоживання. Так, системи керування верстатів повинні бути налагоджені на мінімізацію параметрів енергоспоживання при одночасному забезпеченні високої продуктивності. Сучасні верстати являють собою складні мехатронні системи з великою кількістю вимірювально-перетворюючих

елементів різноманітного призначення та принципів дії. Підвищення енергоефективності систем керування та моніторингу може бути досягнуто за рахунок стандартизації та інтеграцій інтерфейсів зазначених систем [11].

У промисловому виробництві України частка витрат на сировину та енергоносії у собівартості виготовлення виробів постійно зростає, тому перспективним напрямком підвищення енергоефективності промислового обладнання є рекуперація енергії. У верстатобудуванні знаходять застосування системи рекуперації кінетичної енергії під час гальмування шпинделів, приводів подач верстатів та системи рекуперації теплової енергії, наприклад, енергії нагрітої у зоні оброблення змащувально-охолоджуючої рідини. Стосовно обробних верстатів найбільш ефективним способом повторного використання енергії є рекуперація кінетичної енергії під час гальмування високошвидкісних шпинделів верстатів із використанням блоків конденсаторів для зберігання електричної енергії [11].

На етапі системного висхідного проектування доцільно використовувати методи багатокритеріальної оптимізації для пошуку оптимальних значень параметрів системи, що визначають енергоспоживання.

Враховуючи комплексність проблеми підвищення енергоефективності промислового обладнання з метою оцінювання отриманих проектних рішень, доцільно застосування груп критеріїв, які охоплюють різні галузі знань (техніка, економіка, екологія, соціологія). Можливі технічні критерії оцінювання: енергетична та електрична ефективність, питома витрата електроенергії, ККД, показники використання обладнання за електроенергією та потужністю тощо. Як економічні критерії можуть застосовуватися наведені витрати, термін окупності інвестицій, економічність енергоспоживання тощо. Екологічний ефект від впровадження енергоефективного обладнання та технологій може бути оцінений за прогнозованими показниками інтенсивності викидів шкідливих речовин у процесі виробництва електричної енергії.

**Висновки.** Розроблені узагальнені наукові підходи можуть бути використані з метою підвищення показників енерговикористання як наявних моделей верстатів, так і для проектування нових на основі аналізу об'єктів аналогічного призначення.

Запропоновані шляхи підвищення енергоефективності мають узагальнений характер та можуть бути використані для широкої номенклатури обробних верстатів.

Перспективним напрямком подальших досліджень є оптимізація технологічних процесів механічного оброблення з метою пошуку оптимальних рішень щодо енергоефективності та продуктивності.

#### Список використаних джерел

1. *Directive of the European Parliament on Energy using Products* [Directive 2005/32/EC].
2. *Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2015 роки* : Постанова КМУ від 01.03.2010 р. № 243.
3. *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. – P. 1–5.
4. *Майсснер Ф.* Підвищення енергоефективності в Україні: зменшення регулювання та стимулювання енергозбереження [Електронний ресурс] / Ф. Майсснер, Д. Науменко, Й. Радеке. – Режим доступу : [http://www.ier.com.ua/ua/publications/consultancy\\_work/archive\\_2012/?pid=3348](http://www.ier.com.ua/ua/publications/consultancy_work/archive_2012/?pid=3348).
5. *Gutowsky, T. An Environmental Analisis of Machining* / T. Gutowsky, J. Dahmus // ASME International Mechanical Engineering Congress. – 2004. – P. 1–10.
6. *Diaz, N. Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use* / N. Diaz, E. Redelsheimer, D. Dornfeld // Sustainability in Manufacturing - Energy Efficiency in Machine Tools. – 2011. – P. 263–267.
7. *Aspects of Energy Efficiency in Machine Tools* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.heidenhain.us/enews/stories\\_1011/MTmain.php](http://www.heidenhain.us/enews/stories_1011/MTmain.php).

8. *Grobmann, K.* Thermo-energetic Design of Machine Tools / K. Grobmann. – Springer International Publishing, 2015. – 261 p.

9. *Vijayaraghavan, A.* Automated Energy Monitoring of Machine Tools / A. Vijayaraghavan, D. Dornfeld // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 59. – P. 21–24.

10. *Energy Software Tools for Sustainable Machine Design. Deliverable D3.3: “Design for energy efficiency” approach* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.pdfdrive.net/design-for-energy-efficiency-estomad-e5025604.html>.

11. *Strategies for Minimum Energy Operation for Precision Machining* [Електронний ресурс] / N. Diaz, M. Helu, A. Jarvis, S. Tonissen, D. Dornfeld, R. Schlosser // The Proceedings of MTTRF 2009 Annual Meeting.. – Режим доступу : <https://escholarship.org/uc/item/794866g5>.

12. *Abgrenzung der Anwendung von Wäbzlagerungen gegenüber anderen Lagersystemen* // FAG. – 1987. – Vol. 1, № 10. – P. 1–12.

13. *International standards for electric motor efficiency labeling* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://en.wikipedia.org/wiki/Copper\\_in\\_energy-efficient\\_motors](http://en.wikipedia.org/wiki/Copper_in_energy-efficient_motors).

УДК 674.055/ 621.817

**Д.Ю. Федориненко**, д-р техн. наук

**О.П. Космач**, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### **ИНФОРМАЦИОННО-ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СПОЖИВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ВЕРСТАТІВ**

**Д.Ю. Федориненко**, д-р техн. наук

**А.П. Космач**, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СТАНКОВ**

**Dmytro Fedorynenko**, Doctor of Sciences

**Oleksandr Kosmach**, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

### **INFORMATION AND MEASURING COMPLEX FOR DETERMINATION OF POWER CONSUMPTION OF MACHINE TOOLS ASYNCHRONOUS MOTORS**

*Проаналізовано структуру інформаційно-вимірювального комплексу для визначення загальної споживаної потужності двигунів головних приводів металорізального обладнання. Розглянуто алгоритм оброблення сигналів для визначення споживаної електричної потужності двигунів верстатного обладнання. Визначено особливості вимірювання потужності асинхронних двигунів у номінальному режимі та в режимі запуску.*

**Ключові слова:** верстат, двигун, електричний, потужність, обладнання, напруга, перетворювач, струм.

*Проанализирована структура информационно-измерительного комплекса для определения общей потребляемой мощности двигателей главных приводов металлорежущего оборудования. Рассмотрен алгоритм обработки сигналов для определения потребляемой электрической мощности двигателей станочного оборудования. Определены особенности измерения мощности асинхронных двигателей в номинальном режиме и в режиме запуска.*

**Ключевые слова:** станок, двигатель, электрический, мощность, оборудование, напряжение, преобразователь, ток.

*The structure information and measuring complex to determine the total power consumption of the main engine drive of cutting equipment was considered. The algorithm of signal processing to determine the consumption of electric power engines of machining equipment was considered. Features power measurement of induction motors at rated speed and startup mode was considered.*

**Key words:** machine, engine, electrical, power, equipment, voltage, transformer, current.

**Постановка проблеми.** В умовах сучасного промислового виробництва дуже гостро постає проблема ефективного використання, заощадження та перетворення різних видів енергії та енергоносіїв. Це викликано, насамперед, кінцевою собівартістю готової продукції, яка включає в себе більше третини загальних витрат, до яких входить електроенергія, тепло, газ, мастило, вугілля, вода, стиснуте повітря тощо. Слід також зазна-