

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-

чити, що майбутнє впровадження технологій енергозбереження у виробництво напругу відображається вже на теперішній собівартості продукції.

Потоки матеріалів, які включають у себе заготовки, деталі, напівфабрикати, допоміжні матеріали, можуть коливатися у межах 10 порядків, що є достатньо варіативним. Тому важливою складовою сучасних технологій є не тільки мінімізація часових витрат на виготовлення продукції, але й мінімізація загального енергетичного споживання, а також їх загальна енергоефективність.

Важливою складовою у цьому аспекті є розроблення та впровадження універсального вимірювального обладнання, яке дозволяє оцінити рівень енергоефективності основних технологічних процесів. До таких процесів можна віднести процеси механічного оброблення матеріалів різанням, тиском, вузлового та загального складання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У більшості розвинених країн світу промисловий сектор потребує використання величезної кількості енергії різного виду. Наприклад, у Німеччині галузь промисловості витрачає 28 % від загальних витрат енергії країни [1]. Використання електричних стандартів та вимог до способів і засобів перевезення виготовленої продукції сприяють достатньо низькому коливанню енергетичних витрат виробництва. У свою чергу, споживана повна потужність кожного виду обладнання більшості передових підприємств світу знаходиться у межах 5...50 кВт [2]. Наприклад, для верстатів важкого машинобудування, які мають загальну потужність у декілька тисяч кВт, загальна ефективність може становити лише менше 0,2, що, безумовно, буде відобразитися на продуктивності, собівартості та конкретності виготовленої продукції [3]. У зв'язку з цим проблема підвищення енергоефективності є актуальною для машинобудівної галузі країни.

Математичний опис процесів енергоспоживання, а також процесів енергозбереження та перетворення на кожному етапі виробничого процесу є достатньо складним завданням. Тому більшість наявних моделей можна розділити на декілька ієрархічних рівнів, найнижчими з яких будуть мікропоказники складових окремих процесів, які пов'язані з формуванням поверхонь, зміною їх фізико-механічних властивостей тощо. Тривалість таких процесів становить від декількох мікросекунд до декількох секунд. На найвищому рівні розглядаються лише макропоказники енергоефективності самого виробництва з тривалістю від декількох годин та днів. На більш нижчих рівнях аналізуються окремі складові виробничого процесу, наприклад, окреме виробниче обладнання [4].

З погляду експериментального дослідження споживання енергії виробничим обладнанням можна виділити основні два напрямки:

- дослідження елементарних процесів енергоспоживання з метою внесення подальших змін в обладнання для здешевлення майбутньої виготовленої продукції;
- дослідження фізичних процесів, які пов'язані з енергетичними витратами та перетворенням на операціях механічної обробки.

Слід зазначити, що перший напрямок дослідження є достатньо звуженим, оскільки він враховує особливості лише конкретного окремого виробничого процесу та обладнання, що не дозволяє використовувати отримані результати досліджень до загальних принципів та методів енергозбереження обладнання.

Результати багатьох експериментальних досліджень дозволили встановити критичні компоненти промислового обладнання, які пов'язані з найбільшим енергетичним споживанням. До одного з таких компонентів відносять електричні двигуни [5].

У зв'язку з цим актуальним напрямком досліджень енергоефективності промислового обладнання є розроблення універсальної інформаційно-вимірювальної системи електричних витрат з використанням сучасних програмних та цифрових засобів.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Результати досліджень показують, що оцінювання енергоефективності обробних верстатів на виробництві може бути здійснена за допомогою детального аналізу складових процесів, які пов'язані з електричним споживанням. Найбільш поширеним джерелом електроспоживання у верстатах є електричні двигуни асинхронного типу.

Саме тому розроблення універсальної інформаційно-виміральної системи та алгоритму реєстрації споживаної потужності електричних двигунів верстатного обладнання є досить актуальним завданням.

**Формулювання мети статті.** Розроблення структури інформаційно-вимірального комплексу з метою оцінювання електроспоживання асинхронних двигунів верстатів.

**Виклад основного матеріалу.** Енергетичне споживання, що пов'язане з процесом механічного оброблення матеріалів [3], описуються виразом виду

$$E_{cs} = \frac{P_c}{60 \eta Z}, \quad (1)$$

де  $P_c$  – потужність на шпинделі, кВт;

$Z$  – швидкість відділення матеріалу від заготовки, см<sup>3</sup>/хв;

$\eta$  – ефективність обладнання, яка залежить від вибраного методу оброблення матеріалу.

Загальний макропоказник ефективності виробничого обладнання, зокрема металорізальних верстатів, описується виразом виду

$$\eta_{Machine}(t) = \frac{P_{Process}(t)}{P_{Machine}(t)}, \quad (2)$$

де  $P_{Process}(t)$  – споживання потужності у часі, які пов'язані безпосередньо з процесами геометричного формоутворення поверхонь;

$P_{Machine}(t)$  – споживання потужності у часі, які враховують загальну потужність обладнання з урахуванням втрат та перетворення енергії.

З погляду мінімізації енергетичного споживання особливу увагу слід приділяти аналізу складової рівняння  $P_{Machine}$ , яка враховує вагому частку втрат енергії через тертя, механічне зношування, пружні коливання, акустичне та теплове випромінювання тощо.

У результаті підстановки рівняння (2) в (1) отримаємо вираз, який відповідає повному енергетичному споживанню у процесі механічного оброблення

$$E_{cs}(t) = \frac{P_{Machine}(t)}{60 Z}. \quad (3)$$

З отриманої лінійної залежності видно, що під час розроблення інформаційно-виміральної системи загальне енергетичне споживання може бути визначене лише за допомогою вимірювання повної потужності процесу механічного оброблення.

Слід зазначити, що до силового електричного обладнання металорізальних верстатів відносять насоси, вентилятори, компресори, механізми повороту та обертання, які мають електричні двигуни. Для приведення в рух таких механізмів при трьохфазному живленні частіше всього використовують асинхронні трьохфазні двигуни за схемою зірочки. Тому з погляду розроблення та використання вимірального комплексу для визначення споживаної електричної потужності металорізальних верстатів важливе значення має визначення потужності саме на електричних двигунах асинхронного типу.

Для забезпечення високої енергоефективності важливе значення мають номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД), а також коефіцієнт потужності (КП) («косинус фі») двигуна асинхронного типу. Номінальний ККД характеризує відношення корисної по-

тужності на валу двигуна до повної витраченої потужності електроенергії. У свою чергу, КП – це відношення активної потужності електричної енергії до повної витраченої потужності, яке характеризує перетворення енергії в іншу форму (у цьому випадку механічну енергію) [6].

З погляду загальної споживаної потужності асинхронного електродвигуна можливі випадки вимірювання лінійної та фазової потужності. Для визначення загальної потужності  $P_3$  асинхронного двигуна через лінійне та фазове підключення використовуються вирази виду:

$$P_3 = \sqrt{3} U_l I_l \eta \cos(\phi);$$

$$P_3 = 3 U_\phi I_\phi \eta \cos(\phi),$$

де  $U_l, U_\phi$  – відповідно лінійна та фазова напруга;

$I_l, I_\phi$  – відповідно лінійний та фазовий струм;

$\eta$  – ККД асинхронного електродвигуна змінного струму;

$\phi$  – зсув фаз між струмом та напругою.

Принцип дії асинхронного двигуна пов'язаний із пропусканням однакових струмів та напруг у його кожній фазі. Тому з погляду вимірювань виникає можливість визначення однієї фазної або лінійної напруги та струму, крім нульового проводу. Для визначення повної споживаної потужності такого двигуна необхідно отриманий результат вимірювання відповідно помножити на 3 для фазної напруги та струму або на  $\sqrt{3}$  для лінійної напруги та струму згідно з представленими виразами.

Під час визначення повної потужності асинхронних електродвигунів особливу увагу слід приділити перехідним процесам. Результати досліджень показують, що під час запуску будь-якого електродвигуна виникає пусковий струм в межах 2...8 кратного значення номінального струму  $I_n$  у робочому режимі електродвигуна (рис. 1). Величина пускового струму залежить від конструкції електродвигуна, схеми підключення, наявності навантаження на валу та ін. Тому під час вибору вимірювального засобу для попередження його відмов та пошкоджень слід вибирати діапазон вимірювань струму  $I_e$  у 8 разів більший від номінального, тобто  $I_e = 8 I_n$ .

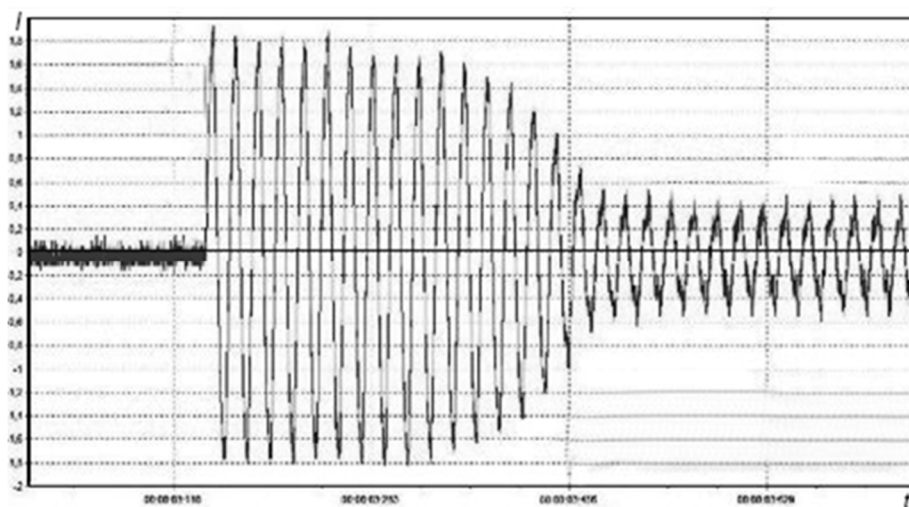


Рис. 1. Зміна фазного струму під час пуску асинхронного електродвигуна

Для вимірювання фазного або лінійного струму в мережі можуть використовуватися перетворювачі струму або шунти. Як основні перетворювачі можуть використовуватися безконтактні індуктивні та ємнісні датчики, струмовимірювальні кліщі, перетво-

рювач з ефектом Холла, трансформатор струму. Водночас найбільш простим способом вимірювання струму є використання шунта з відомим значенням опору.

Один з найважливіших електронних компонентів у сучасному вимірювальному і тестовому обладнанні є аналого-цифровий перетворювач (АЦП). АЦП перетворює напругу (аналоговий сигнал) у цифровий код, над яким мікропроцесор і програмне забезпечення виконують певні дії [7]. Головні переваги цього вимірювального засобу полягають у зручності реєстрації, збереження й аналізу та представлення результатів вимірювань за допомогою персонального комп'ютера (ПК). При цьому область значень вимірюваних напруг на аналоговому вході АЦП обмежена значеннями діапазону вимірювання. Звичайно діапазон зміни напруг становить у межах  $0 \dots 5$  В або  $0 \dots 10$  В.

У зв'язку з цим під час вимірювання лінійної або фазної напруги необхідно використовувати дільник або трансформатори напруги. Значення напруги на виході по можливості повинні відповідати максимальному діапазону вимірювання АЦП для ефективного використання розрядів.

Загальну структуру інформаційно-вимірювального комплексу визначення електричної потужності асинхронного електродвигуна змінного струму представлено на рис. 2.

Основна задача під час використання схеми на рис. 2 зводиться до визначення двох напруг (фазної або лінійної та падіння напруги у разі використання шунта), а також фази між струмом та напругою. Математичне обчислення засобами ПК дозволяє в режимі реального часу проводити множення зареєстрованих значень напруг по кожному з вимірювальних каналів. Для математичного обчислення можуть також використовуватися мультиплексори, до яких під'єднуються аналогові виходи перетворювачів напруги та струму. Мультиплексори у цьому випадку підключаються паралельно між собою та замикаються.

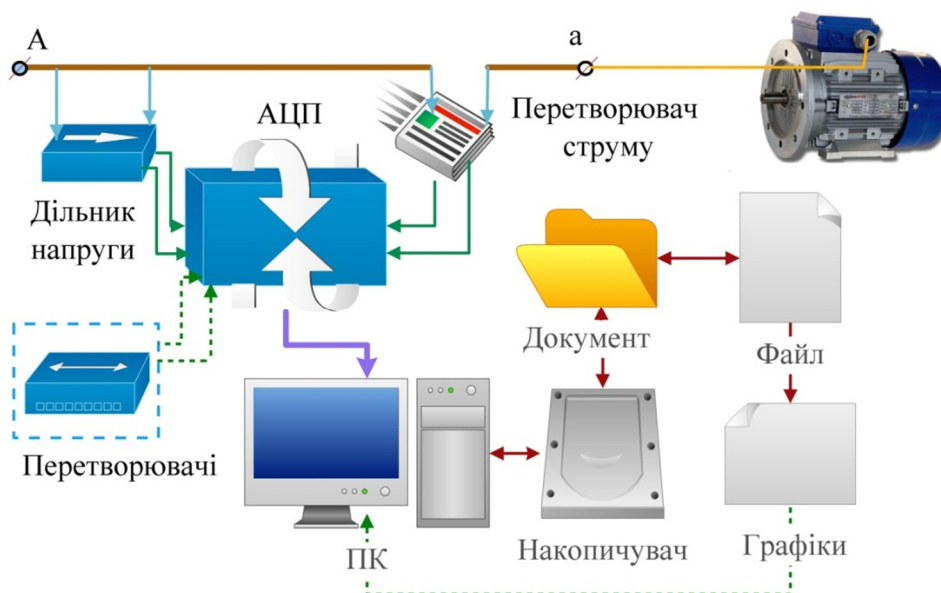


Рис. 2. Структура схеми вимірювального комплексу загальної споживаної електричної потужності двигуна

Цифрове оброблення сигналів перетворювачів напруги та струму дозволяє визначити повну, активну та реактивну потужність. Слід зазначити, що для реєстрації миттєвих значень потужностей необхідно використовувати АЦП з частотою дискретизації на декілька порядків вищою за частоту мережі. Виходячи з мінімально можливої величини вибірки на один період коливання струму в мережі для рівня значущості 5 %, частота дискретизації повинна становити вище 1 кГц.

Активна потужність у цьому випадку визначається згідно з виразом виду

$$P_a = \frac{\sum_{i=1}^N U_i I_i}{N}.$$

Повна потужність визначається за добутком середньоквадратичних значень фазних або лінійних напруг та струмів згідно з виразом виду

$$P_s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N U_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N I_i^2}}{N}.$$

Реактивна потужність та КП у такому випадку визначаються згідно з виразами виду

$$Q = \sqrt{P_a^2 - P_s^2}, \quad \cos(\phi) = \frac{P_a}{P_s}.$$

Таким чином, використання АЦП дозволяє у режимі реального часу визначати активну та повну потужність, яку витрачає електричний двигун привода головного руху верстата для виконання операцій механічного оброблення матеріалів. Використання додаткових перетворювачів, наприклад, таких як перетворювачі температури, коефіцієнти тертя, частоти обертання, вібрації тощо, які реєструються в окремих вимірювальних каналах АЦП, дозволяє пов'язати механічні, теплові, акустичні процеси з процесами енергетичного споживання обладнання.

**Висновки і пропозиції.** Розроблена структура інформаційно-вимірювального комплексу визначення загальної потужності асинхронних двигунів з використанням сучасних засобів вимірювання дозволяє в режимі реального часу проводити аналіз та оброблення сигналів, які відповідають повній споживаній потужності обробних верстатів.

Розроблений вимірювальний комплекс може бути використаний для аналізу енергоефективності широкої номенклатури промислового обладнання, що містить асинхронні двигуни.

Перспективним напрямком подальших досліджень є аналіз енергетичного споживання приводами верстатів. Особливий інтерес представляє аналіз та дослідження енергоефективності верстатів за умов високошвидкісного механічного оброблення.

#### Список використаних джерел

1. *Energy Efficiency through optimized coordination of production and technical building services* / J. Hesselbach, C. Herrmann, R. Detzer, L. Martin and other // Proceedings LCE2008 - 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 17-19 March 2008, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2008. – P. 624–628.

2. *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.

3. *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. – P. 9–15.

4. *Dietmair A. Energy consumption forecasting and optimisation for tool machines* / A. Dietmair, A. Verl // Energy Consumption Forecasting and Optimisation for Tool Machines. – 2009. – P. 62–67.

5. *Improvement Potential for Energy Consumption in Discrete Part Production Machines* / T. Devoldere, W. Dewulf, W. Deprez, B. Willems, J.R. Dufloy // Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Tokyo, Japan, June 11–13th, 2007. – P. 311–316.

6. *Асинхронные двигатели общего назначения* / Е. П. Бойко, Ю. В. Гаинцев и др. – М. : Энергия, 1980. – 488 с.

7. *Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов* / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2002. – 608 с.