

Д.І. Кузнецов, А.І. Купін

**МЕТОД МОНІТОРИНГУ ВИКОРИСТАННЯ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯМ  
ЗАСОБАМИ НЕЙРОМЕРЕЖ**

Анотація. Показана актуальність автоматизованого моніторингу енергоспоживання електрообладнанням. Запропонований метод моніторингу використання електроенергії з використанням спектр-струменевого аналізу. Розроблена та випробувана програмна модель автоматизованого моніторингу на основі застосування технології нейромереж.

Ключові слова: нейромережа, швидке перетворення Фур'є, АЧХ, моніторинг, ідентифікація

**Постановка проблеми**

На сьогоднішній день робота сучасних підприємств та установ характеризується суттєвим нерівномірним енергоспоживанням, як за окремими годинами, так і за днями тижня. Із збільшенням нерівномірності елекроспоживання збільшуються затрати на виробництво, передачу та перерозподіл енергії [1]. І саме тому має велике значення перерозподіл робочих навантажень для економної роботи систем електрообладнання в умовах існуючої тарифної сітки. Дані проблеми визначають необхідність створення автоматизованої системи контролю енергоспоживання, що у подальшому дозволить знизити витрати на енергоспоживання шляхом інвентаризації електроустаткування, яке найбільше споживає енергії.

**Аналіз публікацій за темою дослідження**

Одними із проблемних галузей у питанні економії електроенергії є житлово-комунальна сфера та підприємництво. Однією із існуючих та запроваджених технологій є система моніторингу енергоспоживання типу «Energoauditor» [2]. У результаті її впровадження можливо економити до 30% теплової та 15-20% електроенергії. В основі даної системи є безперервний моніторинг, в автоматичному режимі, загальнодоступних технічних ресурсів (електролічильники, стандарт-

ні ЕОМ, датчики та ін.). Дана система дозволяє здійснювати контроль за споживанням теплової та електроенергії, а також управління на великій віддаленості об'єктів один від одного, а результати моніторингу подаються у вигляді таблиць та графіків.

Іншою системою автоматизованого контролю та моніторингу енергоспоживання є програмно-апаратний комплекс фірми InlineGroup [3], який складається із спеціалізованого електролічильника «Меркурій-230» та програмного забезпечення компанії ПРОСОФТ. Дана система дозволяє проводити аналіз спожитої електроенергії у масштабах населеного пункту, що охоплює близько 100 будинків.

Також досить потужною системою моніторингу енергоспоживання є система контролю «САТКОН-А» компанії «Сучасні технології» [4], яка дозволяє

оперативно визначати небаланс за кожною фазою, контроль за обривом лінії, станом запобіжників, передачі первинної та аналітичної інформації до датчиків перетворення інформації.

У силу своїх досягнень всі розглянуті розробки та програмно-апаратні комплекси мають один головний недолік, а саме використання датчиків для зняття інформації з об'єктів, що може бути нерациональним з економічної точки зору для її подальшого впровадження на підприємстві, житлово-комунальній сфері тощо.

### **Формулювання цілей статті**

Метою даної статті є розробка методу моніторингу споживання електроенергії шляхом використанням спектр-струменевих характеристик електрообладнання, використовуючи базис багат шарових нейронних мереж на прикладі розробленого програмного засобу. У якості енергоспоживачів обрати електродвигуни постійного струму потужністю до 200 Вт.

### **Основна частина**

На сучасному підприємстві найбільшими споживачами електроенергії є електродвигуни. Так, доля їх споживання від виробленої електроенергії, згідно з останніми дослідженнями, приблизно складає 75% [5]. Як і будь-яке обладнання, електродвигуни у процесі своєї експлуатації піддаються дефектам, що у свою чергу може спричинити збільшення споживання електроенергії або їх повний вихід з ладу. В основі розроблюваного методу є аналіз спектр-струменевих характе-

ристик електродвигунів з використанням математичного апарату розкладу функції у ряд Фур'є для отримання, наприклад, амплітудно-частотної характеристики для її подальшого аналізу засобами нейронних мереж.

Як відомо, кожне електрообладнання, а особливо електродвигуни, характеризується негативною властивістю – утворення гармонік вищих порядків, які «забруднюють» електромережу, і можуть спричинити утворення пошкоджень у електрообладнанні [6]. Але у нашому випадку, вищі гармоніки, які утворюються внаслідок роботи електродвигунів, є досить гарним інструментом для зняття інформації, наприклад, з системи живлення устаткування, без безпосереднього підключення до нього, та без участі спеціальних датчиків для зняття інформації. Загальна структурна схема моніторингу представлена на рис. 1, де сигнал від електродвигуна у вигляді гармонік потрапляє у електромережу, далі – у аналого-цифровий перетворювач, після чого сигнал аналізується розробленим програмним засобом. Структурна схема роботи ПЗ представлена на рис. 2, де отриманий сигнал перетворюється за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є.

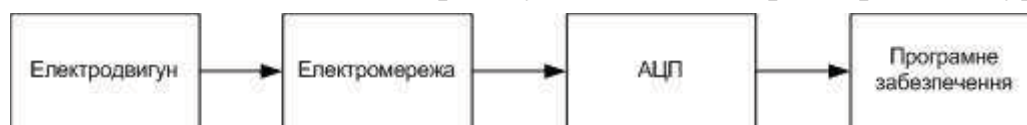


Рисунок 1 – Структурна схема моніторингу енергоспоживання

У загальному випадку ряд Фур'є можна записати у вигляді суми нескінченної кількості гармонічних складових різних частот:

$$U(t) = U_0 + \text{Sum}(U_m * \sin(k * w * t + \phi)), \quad (1)$$

де  $k$  – номер гармоніки,  $kw$  – кутова частота  $k$  гармоніки,  $w=2*\pi/T$  – кутова частота першої гармоніки,  $\phi$  – початкова фаза сигналу,  $U_0$  – нульова гармоніка. Для виділення спектру було використано швидкий алгоритм дискретного перетворення Фур'є.

В основі процесу ідентифікації електродвигуна (див. рис.3) є порівняння отриманої АЧХ з еталонною АЧХ, яка властива тільки даному об'єкту.

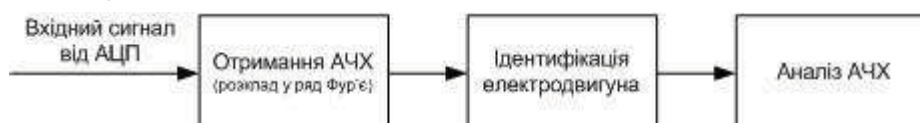


Рисунок 2 – Структурна схема роботи програмного забезпечення

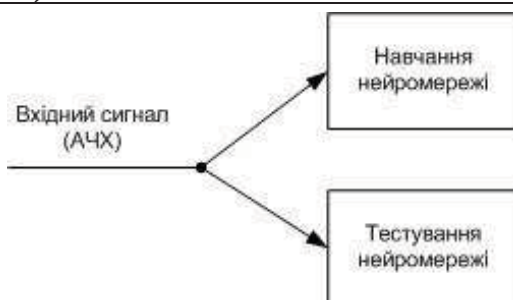


Рисунок 3 – Структурна схема ідентифікації електродвигуна

Перед процесом ідентифікації будь-якого об'єкту лежить обов'язкова процедура запам'ятовування набору його основних характеристик, на основі яких відбувається процедура розпізнавання. У даному методі основними характеристиками електродвигунів є їх характерні значення амплітуд на відповідних частотах. У процесі дослідження АЧХ електродвигунів було помічено, що максимальні значення амплітуд частот змінюються із часом у деякому діапазоні і мають сталі середні значення. Тому вхідними даними, як при навчанні, так і ідентифікації є діапазони частот із максимальним значенням амплітуди, тобто із масиву АЧХ  $U[m]$ , можна знайти діапазон частот  $[m-p, m]$ , в яких із часом встановлюються максимальні значення амплітуд, де  $p$  – є шириною (точністю) нашого діапазону,  $Ser$  – середнім значенням амплітуд:

$$Ser = \text{Max}(U[m]) / p, \quad (2)$$

Тобто максимальні значення амплітуд для відповідного двигуна знаходяться у діапазоні  $[U_{\min}; U_{\max}]$ , де  $U_{\min}$  та  $U_{\max}$  – мінімальні та максимальні значення амплітуд, які можуть виникати на будь-якій частоті діапазону  $[m-p, m]$ , що і є його основною властивістю. У процесі тренування нейронної мережі вхідною вибіркою є діапазон частот  $[m-p, m]$ , навчаючою множиною є середні значення амплітуд.

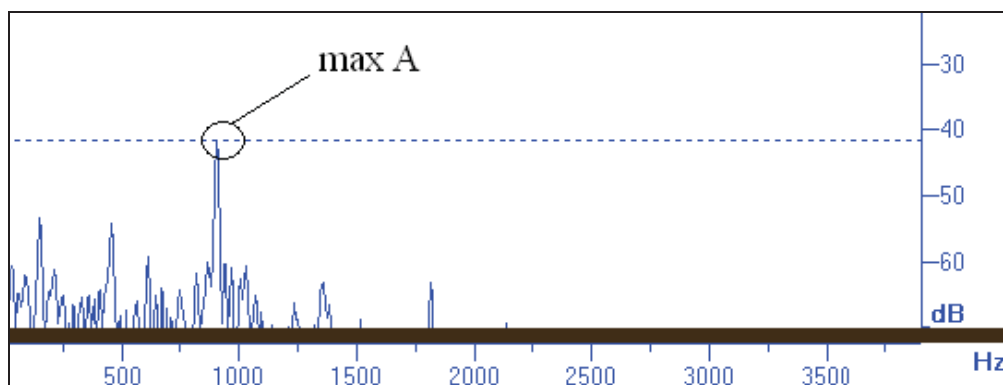


Рисунок 4 – АЧХ роботи електродвигуна у холостому ході

У процесі дослідження спектральних характеристик електродвигунів було помічено, що із збільшенням навантаження, максимальні значення амплітуд зберігають своє значення, але змінюють частоту. АЧХ роботи електродвигуна у холостому ході представлено на рис. 4, де максимальне значення амплітуди складає  $-41\text{dB}$ , на частоті  $906\text{ Hz}$ .

АЧХ роботи двигуна у навантаженому стані представлена на рис. 5. Як видно з графіку, максимальне значення амплітуди складає  $-43\text{ dB}$ , на частоті  $859\text{ Hz}$ . Отже, відбулося невелике зміщення частоти на  $47\text{ Hz}$  із зменшенням значення максимальної амплітуди. У процесі дослідження було встановлено, що для оптимального моніторингу енергоспоживання, зменшення максимальної амплітуди може змінюватися максимум на  $5\%$ , тобто у даному випадку діапазон чутливості нейромережі коливається у діапазоні  $[40; 44]\text{ dB}$  при умові, що ідеальне значення амплітуди складає  $41\text{dB}$ .

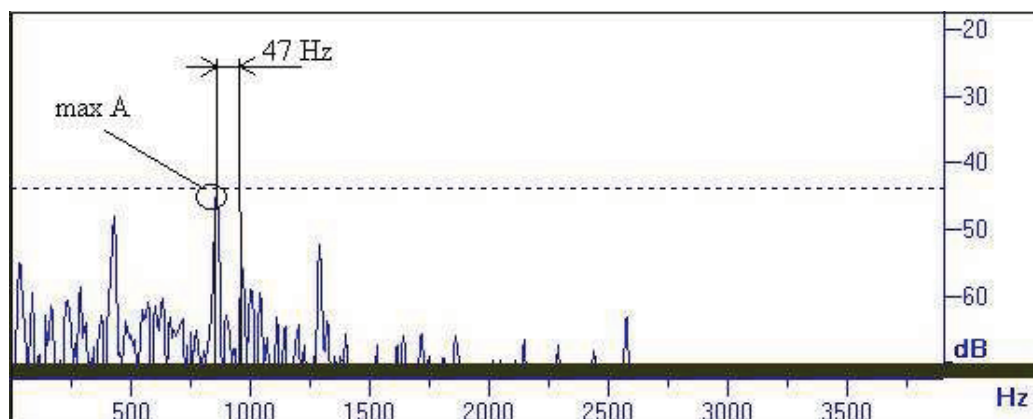


Рисунок 5 – АЧХ роботи двигуна у навантаженому стані

Розглянемо моніторинг енергоспоживання на прикладі двох електродвигунів. АЧХ роботи двигунів у холостому ході представлено на рис. 6.

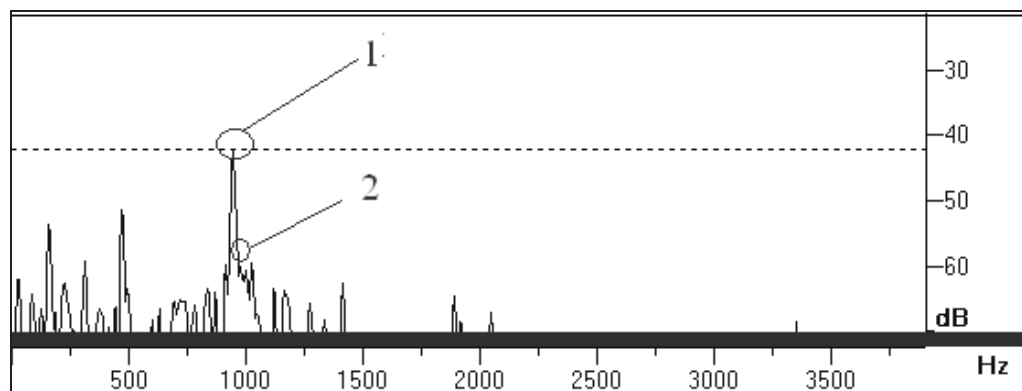


Рисунок 6 – АЧХ роботи двигунів у холостому ході

Значення амплітуд для двигунів №1=-41dB та №2=-55dB на частотах 906Hz та 1000 Hz відповідно. Подамо на двигун №1 деяке навантаження, внаслідок чого отримаємо АЧХ представлену на рисунку 7.

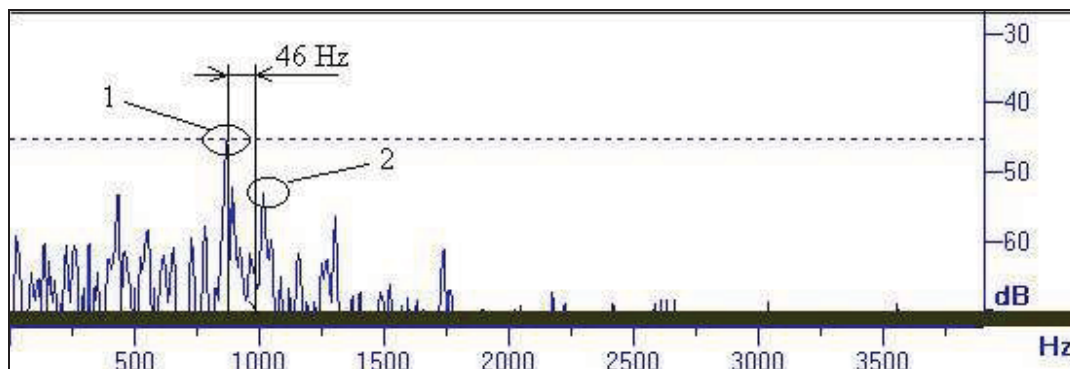


Рисунок 7 – АЧХ роботи двигунів у навантаженому стані

Значення амплітуд для двигунів №1=-44dB та №2=-54dB на частотах 850Hz та 1001 Hz відповідно. Отже, як видно з графіка, амплітуда двигуна змінилася на 3 dB.

Для загального випадку, блок-схема моніторингу енергоспоживання представлена на рис. 8, де будь-яке електрообладнання під'єднується до електромережі з деякою напругою ( $U$ ) та силою струму ( $I$ ). Для зняття гармонічних характеристик обладнання (блоки 1-3) з електромережі потрібно вхідну напругу перетворити у прийнятну для АЦП, наприклад осцилографу, шляхом використання струменевих трансформаторних перетворювачів (блок 4). Після отримання АЧХ (блок 6), якщо електрообладнання під'єднано вперше, його потрібно запам'ятати нейромережею для майбутньої ідентифікації та складання ідеальної моделі роботи електрообладнання, наприклад у холостому ході (блок 8). Якщо дане обладнання використовується у системі не вперше, то відбувається процес його ідентифікації (блок 9) та аналіз (блок 10), тобто порівняння даного стану обладнання з ідеальним, та виведенням відповідного висновку про енергоспоживання (блок 11).

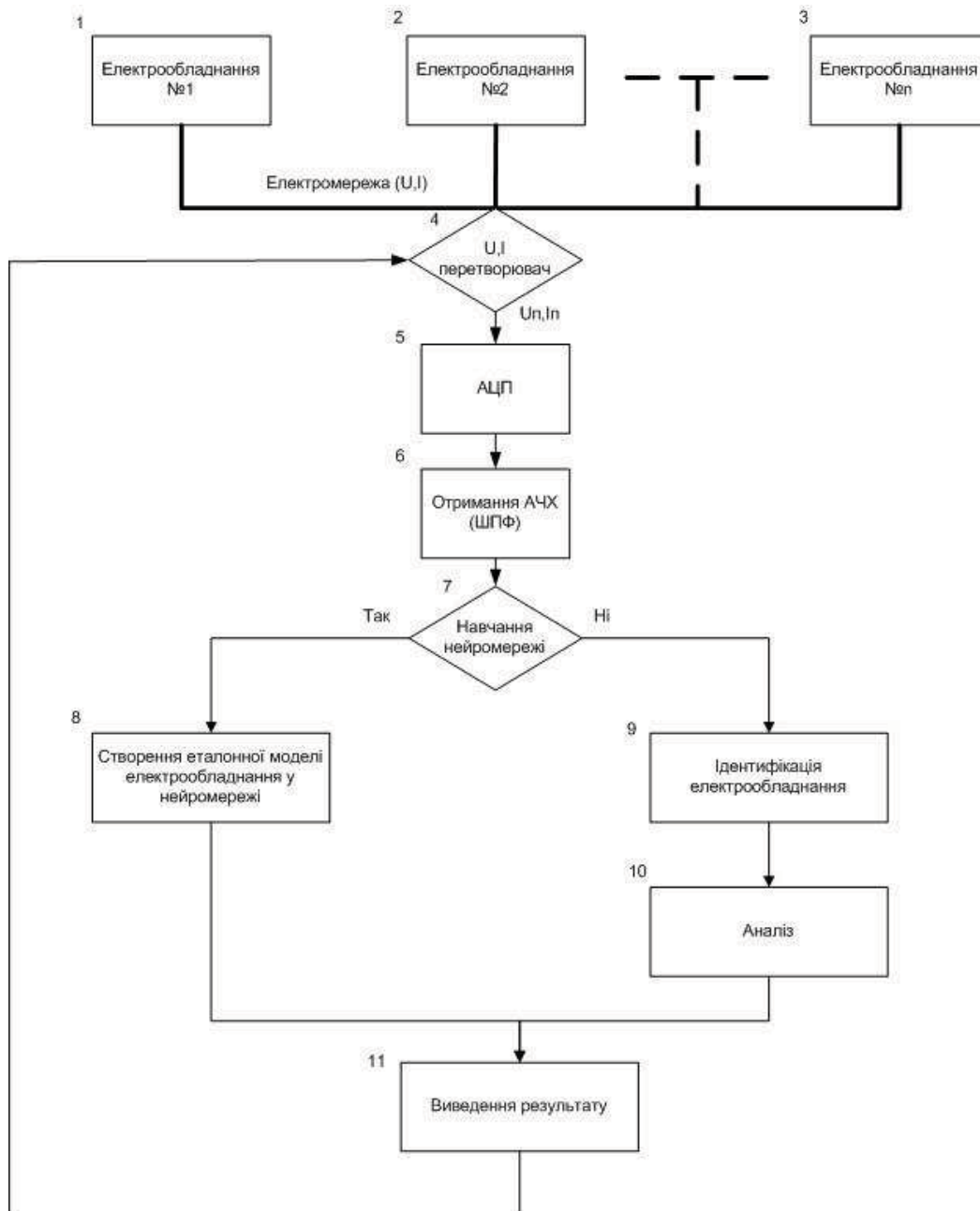


Рисунок 8 – Блок-схема моніторингу енергоспоживання

### Висновки та перспективи подальших досліджень

На основі отриманих результатів досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Моніторинг енергоспоживання електрообладнанням є актуальним та проблемним питанням на сучасних підприємствах, житлово-комунальній сфері тощо.

2. Своєчасна ідентифікація надмірного енергоспоживання може призвести до значної економії коштів або вчасної перевірки обладнання на предмет дефектів.

3. У світі не існує двох однакових електродвигунів, усі вони мають свій характерний слід, який легко ідентифікувати, наприклад, з використанням прямого перетворення Фур'є.

4. Авторами було протестовано програмний засіб, виконаний у середовищі Delphi7. У якості нейронної мережі було обрано багатопшарову нейромережу зворотного розповсюдження помилки.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Розробка імітаційної моделі енергоспоживання промислового підприємства [Електронний ресурс] / Савина О.А, Стичук А.А. // «Імітаційне моделювання систем» - 2003.- Режим доступу: <http://www.gpss.ru/immod'03/070.html>;
2. Система моніторингу енергоспоживання [Електронний ресурс] / Соколов С.А // Інновації та підприємництво – 2010. – Режим доступу: <http://www.innovbusiness.ru/projects/view.asp?r=205> ;
3. Система контролю енергозбереження [Електронний ресурс] / Петраков О.І // Підприємницька автоматизація – 2010. – Режим доступу до статті : [http://www.inlinegroup.ru/services/prom\\_aut/example/askke.php](http://www.inlinegroup.ru/services/prom_aut/example/askke.php) ;
4. Перетворення Фур'є [Електронний ресурс] / Карташкін А.А. // Кодування сигналів – 2004.- Режим доступу: <http://medem.kiev.ua/page.php?pid=530> ;
5. Сергиєнко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиєнко. – Питер, 2002.-196 с.
6. Юкіко Сато. Цифрова обробка сигналів / Сато Юкіко. – Москва, 2010. - 178 с.