

АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 681.518.54: 621.313

В. О. Поджаренко, д. т. н., проф.,

В. Ю. Кучерук, к. т. н., доц.;

О. П. Войтович, асп.

ВЕЙВЛЕТ-ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Постановка проблеми

Сьогодні у світі щорічно випускають 7 мільярдів електричних машин (ЕМ), які споживають 70 % загальної кількості електроенергії. Якість ЕМ є основним фактором їх конкурентоспроможності на світовому ринку. Необхідний рівень якості закладається на стадії розробки та проектування виробу, а також у процесі виробництва. Розвиток математичного моделювання ЕМ та широке застосування систем автоматизованого проектування дозволили успішно розв'язати задачі оптимального проектування ЕМ. Тому якість ЕМ в основному визначається рівнем технологічних процесів їх виготовлення та організацією вимірювальних систем, систем технічного діагностування їх стану на виробництві. Ефективне діагностування технічного стану ЕМ у процесі виробництва, своєчасне прогнозування причин розлагодження технологічного процесу і засноване на цьому керування якістю виготовлення ЕМ дозволяє розв'язати актуальні задачі на виробництві.

Технічне діагностування (ТД) стану ЕМ є надзвичайно трудомісткий процес із складною методикою визначення окремих параметрів і пов'язаний із великими витратами часу та матеріальних ресурсів. Ця проблема ускладнюється тим, що серійно не випускаються засоби вимірювання основних параметрів діагностування ЕМ (кутова швидкість, момент інерції, параметри обмоток та ін.), які необхідні для укомплектування вимірювальних систем та систем ТД, не випускаються також і випробувальні стенди, і тому промислові випробування ЕМ недостатньо автоматизовані [1].

Аналіз останніх досліджень

Розроблені на даний час методи та системи ТД ЕМ недостатньо ефективні для застосування під час прийнятно-здавальних випробувань ЕМ [2—10]. Вони характеризуються складністю й низькою швидкістю, недосконалістю математичного забезпечення. Більшість систем ТД ЕМ дозволяють визначати лише окремі види браку та не дозволяють прогнозувати втрату стійкості технологічного процесу виготовлення ЕМ. Відомі підходи до ТД ЕМ не дозволяють у повному обсязі розв'язати задачу оцінки якості ЕМ під час їх виготовлення та прийнятно-здавальних випробувань, здійснити аналіз даних вимірювального перетворення параметрів ТД, синтезувати сучасні схеми і алгоритми функціонування мікроконтролерних вимірювальних засобів. Тому постає питання необхідності розробки якісно нових теоретичних підходів до теорії побудови систем ТД ЕМ та впровадження їх у виробництво.

Для розв'язання поставлених задач було запропоновано:

1. *Метод ТД ЕМ на основі логічних функцій*, який використовує параметри діагностування ЕМ, отримані в чотирьох режимах випробувань: випробування обмоток; динамічний режим; режим холостого ходу; режим короткого замикання. Формулювання таблиці станів ЕМ дозволило синтезувати логічні моделі та алгоритми ТД у кожному з режимів випробувань. Під час аналізу причин браку можливий нечіткий діагноз, оскільки одна і та ж сама причина може привести до відхилень одночасно кількох параметрів ЕМ. Тому запропоновано процедуру ТД, яка враховує нечіткість заповнення таблиці станів ЕМ [11, 12].

2. *Метод ТД ЕМ на основі автоматичного класифікатора на базі нечітких множин.* Для побудови автоматичного класифікатора за основу було взято систему нечіткого логічного висновку типу Сугенто, що дозволило визначити необхідну кількість термів, вибрати функції належності кожного терму, побудувати дерево нечіткого логічного висновку та базу знань автоматичного класифікатора. Оскільки система ТД ЕМ ієрархічна, то структура бази знань розбита на декілька підсистем. Перші чотири підсистеми відповідають групам впливних факторів, і роблять частковий висновок про стан ЕМ, а остання, п'ята – на основі часткових факторів робить остаточний висновок про придатність або непридатність об'єкта діагностування і вказує на можливу причину непридатності. Розроблені методи ТД стану асинхронного двигуна можуть бути використані в прогнозуванні тенденцій нестійкості технологічного процесу (запобігання браку, формування суджень і рекомендацій для проведення організаційно-технічних заходів підтримки технологічної дисципліни на потрібному рівні), яке відноситься до найважливіших елементів керування якістю виробництва ЕМ [11, 13].

Мета статті

Основним недоліком методу ТД на базі нечітких множин є необхідність формування досить об'ємної бази знань про можливі стани ЕМ. Наведені методи ТД не дозволяють також використовувати неперервні показники якості параметрів діагностування в діапазоні 0...1. Можливість неперервного задавання показників якості дозволяє класифікувати ЕМ за категоріями якості та проводити детальніше прогнозування перебоїв технологічного процесу виготовлення ЕМ, що спонукало авторів до розробки ефективніших методів ТД ЕМ. Тому метою даної статті є розробка методу ТД ЕМ, який позбавлений перерахованих недоліків.

Вейвлет-діагностування

Авторами запропоновано побудувати ТД ЕМ на основі вейвлет-аналізу.

Термін «вейвлет» (*wavelet – маленька хвиля*) з'явився порівняно недавно — в середині 80-х років. В наш час сімейство аналізаторів, що названі вейвлетами, починає широко використовуватися в задачах розпізнавання образів; в процесі оброблення та синтезу різних сигналів; в процесі аналізу зображень самої різної природи; для вивчення властивостей турбулентного поля; для згортки (упакування) великих обсягів інформації, тощо [14—17].

Узагальненим підходом до аналізу сигналів $s(t)$ стало їх представлення у вигляді виваженої суми простих складових – базисних функцій $\psi_k(t)$, помножених на коефіцієнти C_k :

$$s(t) = \sum_k C_k \psi_k(t). \quad (1)$$

Так як базисні функції $\psi_k(t)$ задані як функції певного виду, то тільки коефіцієнти C_k несуть інформацію про певний сигнал. Таким чином, можна говорити про можливість представлення довільних сигналів на основі рядів (1) з різними базисними функціями. Базисними функціями вейвлетів можуть бути різні функції, в тому числі функції, що нагадують модульовані імпульсами синусоїди, функції із скачками рівня. Це забезпечує легке представлення сигналів з локальними скачками і розривами.

Вейвлети характеризуються своїм часовим та частотним образами. Часовий образ визначається деякою рсі-функцією $\psi(t)$ часу, а частотний образ – Фур'є образом $\hat{\psi}(\omega) = F(\omega)$, що задає об'єдну спектра вейвлета. Фур'є-образ визначається виразом

$$F(\omega) = \int \hat{\psi}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (2)$$

За допомогою вейвлетів сигнал представляється сукупністю хвильових пакетів, утворених на основі деякої вихідної (базисної) функції $\psi_0(t)$. Ця сукупність, різна в різних часових інтервалах визначення сигналу та коректується множниками, представляє сигнал з різною ступінню деталізації. Таке представлення називається *вейвлет-аналізом сигналів*.

Побудуємо вейвлет-діагностування ЕМ на основі *прямого дискретного вейвлет-перетворення*, що зводиться до обчислення вейвлет-коефіцієнтів за формулою

$$C(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - k) s(t) dt. \quad (3)$$

На рис. 1, 2 з використанням середовища Mathcad наведено приклади прямого і зворотного дискретного вейвлет-перетворення прямокутного імпульсу за допомогою вейвлету Добеші 4-го порядку [18], який має такі phi- та psi-функції:

$$\varphi(x) = \sum_{k=0}^{M-1} c_k \varphi(2x - k), \quad \psi(x) = \sum_{k=2-M}^1 (-1)^k c_{1-k} \varphi(2x - k), \quad (4)$$

$$c_0 = (1 + \sqrt{3})/4, \quad c_1 = (3 + \sqrt{3})/4, \quad c_2 = (3 - \sqrt{3})/4, \quad c_3 = (1 - \sqrt{3})/4.$$

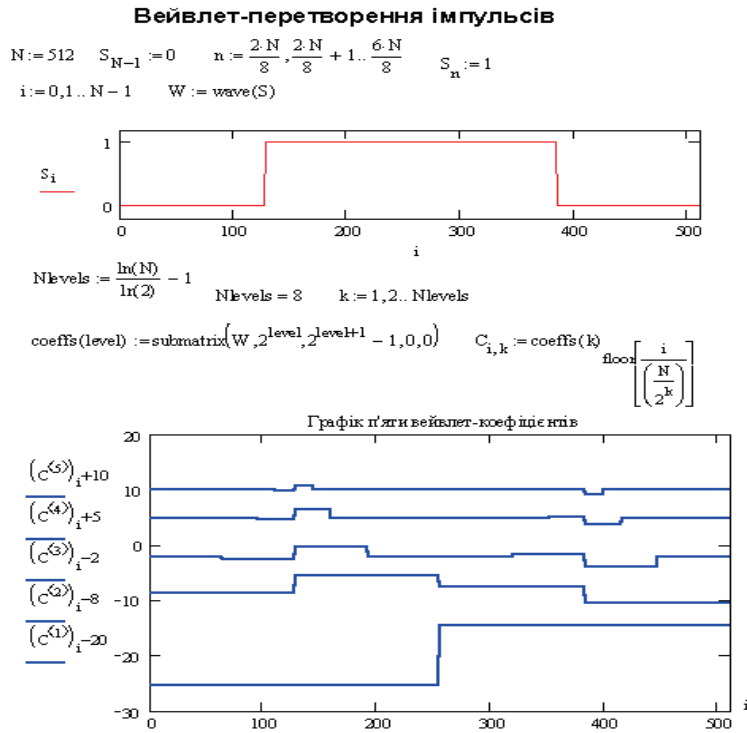


Рис. 1. Вейвлет-розклад прямокутного імпульсу

Відновлення сигналу з використанням перших L вейвлет-коефіцієнтів

L := 3 W3 := W j := 2^L .. N - 1 W3_j := 0 S3 := iwave(W3)
 L := 5 W5 := W j := 2^L .. N - 1 W5_j := 0 S5 := iwave(W5)
 L := 8 W8 := W j := 2^L .. N - 1 W8_j := 0 S8 := iwave(W8)

Графік вихідного імпульсу і імпульсу, що синтезується за допомогою вейвлет-перетворення

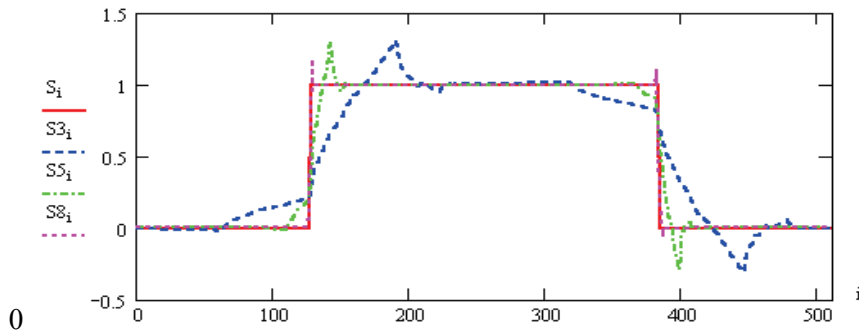


Рис. 2. Реконструкція прямокутного імпульсу

Аналіз рис. 1 дозволяє зробити такі висновки:

- форма вейвлет-коефіцієнтів вдала для аналізу сигналів, які вміщують стрибки;
- вейвлет-коефіцієнти представляють собою прямокутні коливання з кратною частотою осциляції;
- кількість максимально можливих рівнів розкладу невелика.

На рис. 2 показана методика видалення частини коефіцієнтів шляхом заповнювання нулями відповідних комірок матриці вейвлет-коефіцієнтів. Це дозволяє обмежити кількість коефіцієнтів числом L та змінювати рівень реконструкції сигналу. З рис. 2 видно, що зменшення рівня реконструкції веде до більшого проявлення ефекту Гіббса в місцях стрибків рівня сигналу. Можна зробити висновок, що вейвлети Добеші 4-го порядку при $L = 8$ дозволяють досить добре описувати вихідний сигнал. При цьому досягається висока швидкість обчислень вейвлет-коефіцієнтів.

Виходячи з того, що вейвлет-коефіцієнти Добеші дозволяють достатньо точно представляти сигнал із різкими стрибками рівнів, пропонується така послідовність проведення ТД ЕМ:

1. Для зручної обробки таблиці станів ЕМ, представимо їх у вигляді сигналів (рис. 3), зберігаючи однакову послідовність станів кожного сигналу.
2. Проведення випробувань ЕМ, що діагностується, та формування його стану у вигляді сигналу, з тою ж послідовністю станів, що і в таблиці.
3. Проведення дискретного вейвлет-перетворення Добеші 4-го порядку всіх сформованих сигналів.
4. Знаходження коефіцієнтів кореляції між вейвлет-коефіцієнтами ЕМ, що діагностується, та вейвлет-коефіцієнтами табличних станів ЕМ.
5. Видача діагнозу як стану з максимальним коефіцієнтом кореляції.

Покажемо роботу наведеного методу ТД на прикладах. В табл. 1 наведено основні стани асинхронних ЕМ [11, 12], а на рис. 3 – їх зображення у вигляді сигналів. В табл. 2 наведено основні результати діагностування за запропонованим методом для двох прикладів. Коефіцієнт кореляції r обчислювався за формулою

$$r = \frac{\sigma_{W_x W_y}}{\sigma_{W_x} \cdot \sigma_{W_y}}, \tag{5}$$

де σ_{W_x} , σ_{W_y} — дисперсії досліджуваних вейвлет-коефіцієнтів; $\sigma_{W_x W_y}$ — коваріантність,

$$\sigma_{W_x W_y} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (W_{xn} - \overline{W_x})(W_{yn} - \overline{W_y}). \tag{6}$$

Таблиця 1

Стани асинхронних ЕМ

Стани	1. Показники якості обмоток						2. Показники якості динамічного режиму				
	Rіз	Робм	Лобм	Собм	Lm	Qобм	Mmax	M(ωr)	J	M0	Дисб.
	a1	a2	a3	a4	a5	a6	b1	b2	b3	b4	b5
Q0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Q1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
Q2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q3	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q4	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Q5	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Q6	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q7	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Q8	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Q9	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Q11	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Q12	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q13	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
Q14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

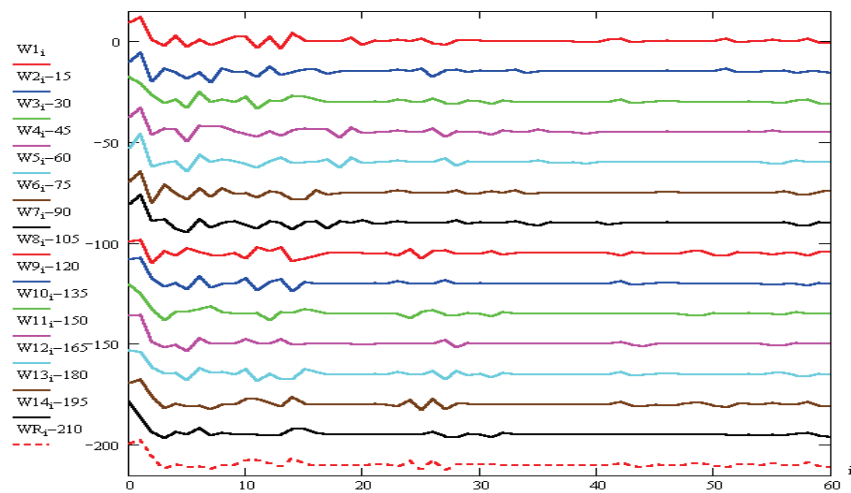


Рис. 4. Зображення вейвлет-коефіцієнтів станів ЕМ
(WR – стан ЕМ, що діагностується, приклад 1)

Як видно з табл. 2, вейвлет-діагностування дає можливість використовувати значення показників якості стану ЕМ не тільки у бінарному вигляді (0; 1), але й множину значень в діапазоні 0...1. За рахунок цього досягається більш точне діагностування ЕМ, а також класифікація ЕМ за категоріями якості.

Висновки

1. Проведено аналіз відомих методів ТД ЕМ та показано, що в цих методах показники якості параметрів діагностування неможливо задавати неперервними значеннями в діапазоні 0...1. Можливість неперервного задавання показників якості дозволяє класифікувати ЕМ за категоріями якості та проводити детальніше прогнозування втрат стійкості технологічного процесу виготовлення ЕМ.

2. Встановлено, що під час проведення прийнятно-здавальних випробувань ЕМ можна застосувати дискретні вейвлет-перетворення на основі вейвлету Добеші 4-го порядку. Даний тип вейвлету характеризується високою швидкістю обчислень та достатньою для практики діагностування точністю представлення сигналів з різкими фронтами вейвлет-коефіцієнтів.

3. Запропоновано метод вейвлет-діагностування ЕМ, який, на відміну від відомих, не потребує формування великих баз знань про можливі стани ЕМ та має можливість задавати показники якості параметрів діагностування ЕМ в діапазоні 0...1 поля допуску параметрів діагностування. Роботу методу продемонстровано на конкретних прикладах. Запропонований метод може бути узагальнений на вейвлет-діагностування складних об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучерук В. Ю. Класифікація та аналіз методів оцінки стану електричних машин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1999. — № 4. — С. 56—62.
2. Гольдберг О. Д. Научные основы диагностики и управления качеством асинхронных двигателей // Электричество. — 1986. — № 1. — С. 20—22.
3. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / О. Д. Гольдберг, И. М. Абдуллаев, А. Н. Абиев; Под ред. О. Д. Гольдберга. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 160 с.
4. S. Rawicki Diagnostic methods for three-phase Induction Motor // Second Int. Scientific Conf. «Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems» UEES'96, Proceeding volumes 2. — Szczecin, Poland, 1996. — P. 321—324.
5. P. Vas Parameter Estimation, Condition Monitorign and Diagnosis of Electrical Machines. — Oxford: Clarendon Press, 1993.
6. F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas. A Fuzzy Logic Approach to On-line Induction Motor Diagnostics Based on Stator Current Monitoring. — Stockholm Power Tech, Int. symp. on Electric Power Engineering, Stockholm, Sweden, 18—22 June 1995, Proceeding No. Electrical Machines and Drives. — P. 156—161.
7. S. Ferkolj, R. Fiser. On-line Fault Diagnostic Techniques of Induction Motor Drives. Stockholm Power Tech, Int. symp. on Electric Power Engineering, Stockholm, Sweden, 18—22 June 1995, Proceeding No. Electrical Machines and Drives. — P. 162—166.
8. Луговой А. В., Родькин Д. Й. Випробувальний комплекс для діагностики електричних машин // Електроінформ. — 2002. — № 1. — С. 14—16.
9. Родькин Д. И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. — М.: Недра, 1992. — 236 с.

10. Родькин Д. И., Черный А. П., Здор И. Е. Задачи и технические средства для диагностики параметров асинхронных двигателей // Вісник Харківського державного політехнічного університету: Зб. наук. праць. — 1999. — Вип. 61. — 400 с.
11. Кучерук В. Ю. Елементи теорії побудови систем технічного діагностування електромоторів. Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 195 с.
12. Кучерук В. Ю. Діагностика стану асинхронного двигуна за допомогою логічних функцій // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2001). Матеріали шостої міжнародної НТК. М.Вінниця, 8—12 жовтня 2001 року. — Том 2. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. — С. 91—98.
13. Поджаренко В. О., Кучерук В. Ю., Войтович О. П. Принципи побудови системи діагностування стану електричних машин за допомогою нечітких алгоритмів. // Вісник Технологічного університету Поділля. — 2002. — Том 2. — № 3. — С. 41—45.
14. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи Физических Наук. — 1996. — Том 166. — № 11 — С. 1145—1170.
15. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи Физических Наук. — 2001. — Том 171. — № 5. — С. 465—501.
16. Наконечный А. Й. Теорія мало хвильового перетворення та її застосування. — Львів: Фенікс, 2001. — 278 с.
17. Дьяконов В. П. Вейветы. От теории к практике. — М.: СОЛОН-Р, 2002. — 448 с.
18. I. Daubechies Ten lectures on wavelets, CBMS-NSF conference series in applied mathematics. SIAM Ed. 1992.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики

Надійшла до редакції 30.09.03
Рекомендована до опублікування 10.12.03

Поджаренко Володимир Олександрович — завідувач кафедри, **Кучерук Володимир Юрійович** — доцент, **Войтович Олеся Петрівна** — аспірант.

Кафедра метрології та промислової автоматики, Вінницький національний технічний університет