

БАГАТОПАРАМЕТРИЧНЕ БЕЗКОНТАКТНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ КОРОТКОЗАМКНЕНИХ РОТОРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

© Хліпальський Ю.З., 2004

Запропоновано спосіб отримання інформативних сигналів під час проведення безконтактного діагностування короткозамкнених роторів асинхронних двигунів трансформаторним методом. На основі системи давачів та схеми обробки інформативних сигналів, що використовує нейронну мережу, отримується інформація про відхилення розмірів осердя ротора та наявність дефектів у клітці ротора.

The method of information signals obtained by contactless diagnostics of squirrel-cage rotor induction motors have been proposed in the article. En base of sensor system and signal information scheme with use the neural networks received the information about transformer core and defects presence in the rotor cage.

Постановка проблеми. Важливим етапом під час розробки будь-яких пристроїв діагностування елементів електричних машин є оптимальний вибір параметрів і методів діагностування, які б забезпечили необхідну повноту діагностування при заданих обмеженнях (тривалість діагностування, глибина пошуку місця несправності /чутливість/ тощо). Не менш важливим завданням на етапі реалізації цих пристроїв є забезпечення достовірності отримання первинної інформації, яке зводиться до мінімізації впливу завад на контрольований інформативний сигнал, що надходить до засобу діагностування.

Виготовлення короткозамкненого ротора асинхронного двигуна (АД) складається з двох основних етапів: складання осердя з виштампуваних листів ротора та його заливання розплавленим алюмінієм. Потім ротор надходить на операцію складання, де він з'єднується з валом, після чого відбувається механічна обробка його зовнішньої поверхні. При цьому можуть виникнути два основні види дефектів, які суттєво впливають на робочі характеристики АД. Ними є зміна провідності елементів (переважно стрижнів) короткозамкненої (КЗ) клітки та вихід за межі допуску діаметра осердя ротора.

Задача діагностування поєднує в собі контроль придатності ротора та визначення причин виходу його параметрів за встановлені межі. Відповідна діагностична операція може виконуватись або безпосередньо після заливання осердя алюмінієм, або після обробки поверхні ротора. В останньому випадку процес діагностування незначно спрощується, але видовжується процес реакції на виявлені технологічні відхилення, що спричиняє збільшення втрат, особливо при значних порушеннях технології виготовлення і великих обсягах випуску продукції. В обох випадках для отримання достовірної інформації при безконтактному діагностуванні ротора найпоширенішим трансформаторним методом вирішальне значення мають такі чинники:

- 1) точність базування (позиціонування) поверхні ротора щодо магнітної системи збудження (індуктора) пристрою та вимірювальних давачів;
- 2) стабільність розмірів осердя ротора;
- 3) температура клітки ротора на момент його контролю;
- 4) стабільність основних нормованих характеристик електротехнічної сталі, з якої виготовлені листи осердя ротора.

На всіх сучасних підприємствах здійснюється вхідний контроль якості електротехнічної сталі, тому не практикується ускладнення діагностичних пристроїв з метою отримання інформації про характеристики сталі для врахування їх відхилень. Температура ротора має істотний вплив на

значення провідностей стрижнів та КЗ кілець клітки, але її визначення та реалізація відповідної корекції сигналів (наприклад, якщо перевірка необроблених роторів здійснюватиметься невдовзі після їх відливання) не становлять на теперішній час проблеми. Тому розглядатимемо спосіб, який дозволяє врахувати вплив перших двох чинників на результати діагностування.

Аналіз останніх досліджень. Більшість літературних джерел з питань контролю та діагностики КЗ роторів АД [1–4] не висвітлюють особливостей отримання первинної інформації під час діагностування та компенсації впливу завад.

У публікації [5] описано спосіб діагностування кліток роторів АД з компенсацією похибки встановлення ротора. Для компенсації похибки використано систему додаткових давачів, розташованих на елементах осердя індуктора, вихідний сигнал яких використано для отримання коефіцієнта корекції сигналу основного давача, що визначає провідність елементів КЗ клітки. Коефіцієнт корекції тут формується за допомогою тришарової односпрямованої нейронної мережі, яка відіграє функцію нелінійного апроксиматора, навченого за результатами випробувань взірцевих дефектних та бездефектних роторів. Отже, запропонований спосіб дозволяє зменшити похибку, зумовлену нестабільністю повітряних проміжків у системі індуктор – ротор за рахунок визначення неточності базування поверхні ротора відносно магнітної системи збудження.

Магнітний потік системи збудження, що розглядається у [5], формується магнітопроводом, виконаним на базі осердя статора АД, в якому здійснено розрив, а досліджуваний ротор відносно індуктора розташований співвісно. Отже, вихідні сигнали додаткових давачів (їх максимальна кількість дорівнює кількості зубців індуктора) залежать не тільки від співвісності розташування зубців індуктора та поверхні ротора, але й від геометричних розмірів останнього, оскільки від них залежить сумарна магнітна провідність повітряних проміжків між індуктором і ротором. Крім цього, на вихідний сигнал котушок давачів впливає також зміна реакції ротора, спричинена появою дефектів у елементах його клітки, а можливих комбінацій останніх за взаємним розташуванням та величиною може бути безліч. Тому незважаючи на значну кількість додаткових давачів, сформованих ними сигнали, які є пропорційні до відповідних магнітних потоків зубців, можуть дати лише наближену інформацію про зміну розмірів ротора, а, отже, врахування другого з окреслених вище чинників є неповним.

Постановка завдання. Відтак, актуальною є розробка способу, який дозволить здійснювати не тільки компенсацію похибки, зумовленої коливанням величини повітряного проміжку між ротором і магнітною системою діагностичного пристрою, але й визначатиме відхилення від номінального значення геометричних розмірів ротора. Отримана при цьому інформація може бути також використана для діагностування порушень технологічних процесів: а) механічної обробки поверхні ротора – якщо операція перевірки ротора здійснюється безпосередньо після неї; б) виготовлення осердя ротора – якщо діагностування ротора виконується після відливання КЗ клітки.

Виклад основного матеріалу. Зазначимо, що визначення відхилення діаметрального розміру ротора можливе лише тоді, коли конструкція індуктора діагностичного пристрою дозволяє сформувати шлях для проходження магнітного потоку збудження через дві діаметрально протилежні точки ротора. Індуктор з розімкненим магнітопроводом, описаний у [5], задовольняє цю вимогу, тому подальший аналіз пропонованого способу діагностування виконаємо, використавши за базовий такий тип осердя. На рис. 1 показано фрагменти індуктора з розімкненим магнітопроводом та контрольованого ротора.

Розглянемо найпоширеніший спосіб отримання первинної інформації про стан КЗ клітки, який полягає у послідовному проходженні всіх N стрижнів ротора повз електромагнітний давач (на рис. 1 цей давач не показаний). Електромагнітний давач може бути розташований в центрі зони розриву магнітопроводу індуктора (на рис. 1 над верхнім стрижнем біля поверхні ротора). У цьому випадку після завершення операції діагностування ротора буде сформовано N -мірний вектор вихідних сигналів, параметри яких містять інформацію про провідність стрижнів обмотки. Якщо ж використати давач торцевого типу (на зразок наведеного у [6]) з двома вимірювальними обмотками,

що розташовані навпроти ділянок КЗ кілець, прилеглих до згаданого вище контрольованого стрижня, то буде отримано інформацію як про провідність стрижнів, так і ділянок КЗ кільця (лише одного), що є більш ніж достатнім для оцінки технічного стану КЗ обмотки. У даному випадку вектор вихідних сигналів буде $2N$ -мірним.

В обох випадках інформативним параметром у вихідних сигналах виступає, переважно, амплітуда, на яку мають вплив згадані вище чотири чинники, які можна кваліфікувати як завади.

Для розв'язання задачі повнішого врахування впливу похибок базування та відхилень діаметра ротора на амплітуди сигналів використаємо ту ж кількість додаткових давачів, що запропонована у [5], але змінимо їх функції. За способом [5] на зубцях індуктора були встановлені вимірювальні котушки, в яких індукувались електрорушійні сили (ЕРС) при проходженні змінних магнітних потоків, створених однофазною кільцевою обмоткою збудження 1 тороїдного типу (рис. 1).

Функцію половини давачів не змінимо – вони слугуватимуть вимірювальними обмотками 3 (рис. 1). Друга половина давачів – 2 виконуватиме функції котушок збудження, які живитимуться змінною напругою з частотою f_2 . Вимірювальні обмотки та котушки збудження чергуються на зубцях індуктора попеременно так, як це показано на рис. 1 (на першому зубці біля зони розриву осердя знаходиться вимірювальна обмотка). На цьому ж рисунку показаний шлях проходження магнітного потоку, створеного котушкою збудження 2. Зміна величини повітряного проміжку між ротором та зубцями, на яких розташовані котушка збудження і сусідні з нею вимірювальні обмотки, викликає пропорційну зміну амплітуд сигналів вимірювальних обмоток. При парній кількості зубців індуктора Z кількість вимірювальних обмоток становить $k=Z/2$ і дорівнює кількості котушок збудження. При непарній кількості зубців $k=(Z-1)/2+1$.

Зазначимо, що внаслідок зменшення кількості вимірювальних обмоток порівняно з [5] точність визначення величин повітряних проміжків між ротором та індуктором не понизиться, оскільки просторова періодичність можливих відхилень форми осердя ротора є більшою за подвійну зубцеву поділку осердя індуктора. Крім цього, значення величини повітряного проміжку під зубцем, на якому розташована котушка збудження, усереднено враховується сигналами двох сусідніх вимірювальних обмоток.

У першому наближенні частота f_2 може бути прийнята, враховуючи такі міркування. Тривалість діагностування ротора знаходиться переважно в межах 7–15 с. Якщо кількість стрижнів ротора $Z_2=35$, то мінімальний час контролю одного стрижня становить $t_k=0,2$ с. Одноперіодний сигнал, сформований за такий час, матиме частоту $f_{2c}=5$ Гц, яка є мінімально необхідною для отримання достатньої інформації про величину повітряного проміжку. Враховуючи наявність перехідного процесу при зміні положення ротора, рекомендації [7] щодо вибору частоти живлення електромагнітних перетворювачів та викладені нижче зауваження, живлення котушок збудження 2 можна здійснювати змінною напругою промислової частоти 50 Гц.

Обмотка збудження 1 індуктора (рис. 1) слугує для створення змінного магнітного потоку, який індукує в КЗ клітці ротора струми, необхідні для отримання інформативного сигналу в основному давачі. Даний магнітний потік проходитиме через всі зубці індуктора і також індукуватиме у вимірювальних обмотках ЕРС, які в цьому випадку будуть неінформативними. Для точного врахування впливу відхилень повітряних проміжків у системі індуктор – давач на результати діагностування формування сигналу основного давача та сигналів вимірювальних

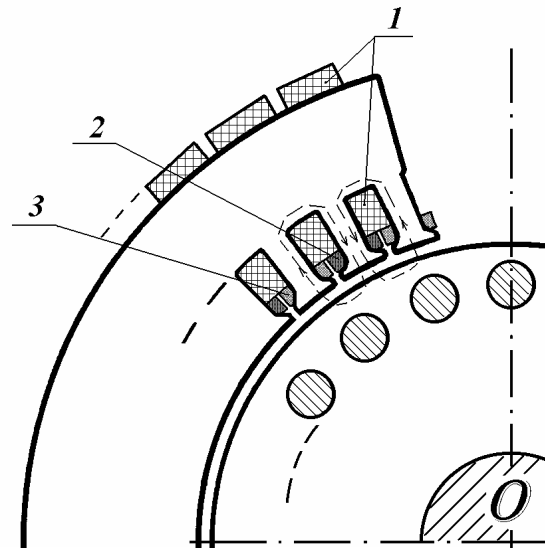


Рис. 1. Поперечний переріз індуктора з розімкненим магнітопроводом:
1 – обмотка збудження; 2 – котушка збудження; 3 – вимірювальна обмотка

обмоток має здійснюватись одночасно. Тому частота живлення f_1 обмотки збудження I має бути відмінною від f_2 , а вихідні сигнали всіх вимірювальних обмоток повинні фільтруватись.

Для забезпечення максимальної чутливості до дефектів КЗ клітки частота f_1 повинна бути низькою, що має особливе значення при діагностуванні необроблених роторів з закритими пазами. Наприклад, частота живлення обмотки збудження у приладах ПКР-2, згаданих у [8], становить 3–5 Гц. При обмеженій тривалості контролю ротора, враховуючи викладене вище та особливості фільтрації, зчитування та аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналів [9, 10], можливий діапазон частот f_1 становить 5–10 Гц. У загальному випадку вибір частот f_1 і f_2 та кількості витків обмотки і котушок збудження є задачею багатопараметричної оптимізації, яка не є предметом розгляду цієї статті.

Спрощена схема процесу перетворення інформації при діагностуванні ротора на основі визначення провідностей всіх стрижнів зображена на рис. 2.

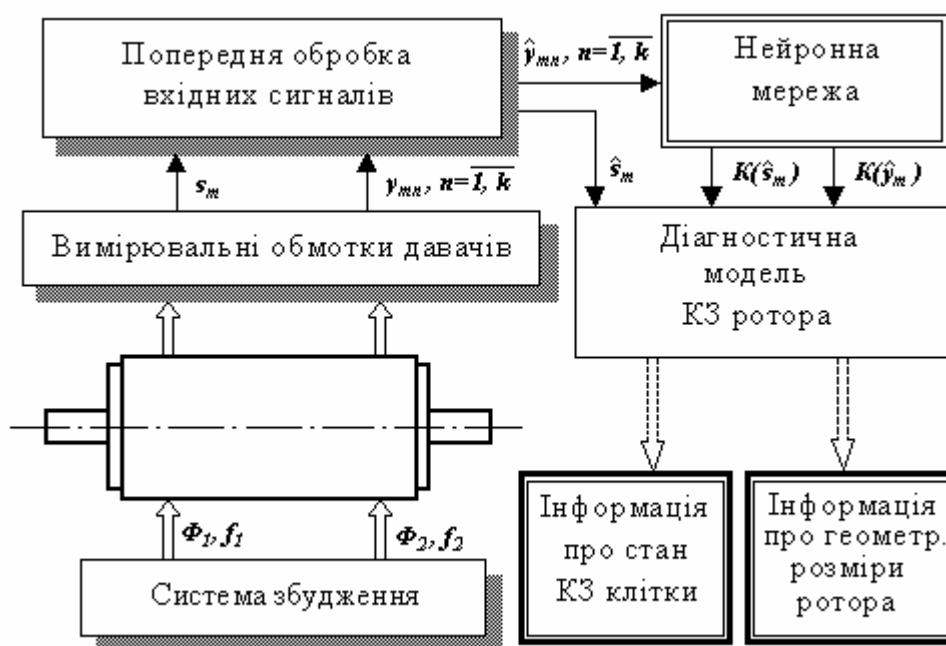


Рис. 2. Спрощена схема процесу перетворення інформації під час діагностування КЗ ротора АД

У результаті взаємодії з ротором змінних магнітних потоків Φ_1 і Φ_2 , частоти яких відповідно, f_1 та f_2 , у вимірювальних обмотках датчиків індукуються сигнали s_m та y_{mn} . Сигнал s_m формується основним датчиком, а індекс m означає, що при цьому контролюється m -й стрижень КЗ клітки ($m = \overline{1, N}$). Сигнали y_{mn} генеруються додатковими датчиками, другий індекс n тут вказує на порядковий номер додаткового датчика.

Попередня обробка вхідних сигналів передбачає такі стандартні процедури, як зокрема, їх узгодження, аналогову фільтрацію, АЦП та ін. За рекомендацією [11] для окресленого вище діапазону частот f_1 та f_2 при аналоговій фільтрації доцільно застосовувати активні фільтри. При недостатній фільтрувальній здатності аналогового фільтра для підвищення точності отримання вхідної інформації можна використати цифрові фільтри (ЦФ). Аналіз можливих методів реалізації ЦФ для подібних задач здійснено у [12]. Для фільтрації сигналів y_{mn} можна використати, наприклад, фільтр високих частот на основі різницевої схеми [10]:

$$\hat{y}_{mn}(t+h) = \alpha \cdot \hat{y}_{mn}(t) + y_{mn}(t+h) - y_{mn}(t),$$

де $\hat{y}_{mn}$ – вихідний сигнал ЦФ, y_{mn} – вхідний сигнал ЦФ; t – час; h – крок дискретизації; α – параметр фільтра.

Крок дискретизації h і параметр α , який визначає чутливість фільтра, вибираються на основі гармонічного аналізу сигналів y_{mn} , отриманих при дослідженні бездефектних і дефектних роторів. Значення зовнішніх діаметрів роторів повинні знаходитись як в межах допустимих відхилень, так і перевищувати допуск на 15–20 %. Гармонічний аналіз, що базується на поданні періодичного сигналу рядом Фур'є, виконується багатьма сучасними математичними пакетами.

На основі рекомендацій, наприклад, [10] за необхідності можна реалізувати також ЦФ низьких частот для сигналів s_m .

Функції нейронної мережі, що здійснює обробку сигналів $\hat{y}_{mn}$ (рис. 2), та мережі, наведеної у [5], є подібними. Тому структура нейронної мережі в цьому випадку теж вибрана тришаровою односпрямованою. Порівняно з [5] тут змінилась кількість нейронів у прихованому та вихідному шарах (рис. 3).

У прихованому шарі один з нейронів отримує входні сигнали від усіх елементів входного шару, формуючи вихідний сигнал z_z . На входи інших нейронів прихованого шару надходять по два сигнали (на рис. 3 $\hat{y}_{mi}$ та $\hat{y}_{mj}$), які надходять від вимірювальних обмоток, що розташовані на діаметрально протилежних зубцях індуктора, тому їх кількість не може перевищувати $k/2$. Вихідний шар містить два нейрони. На їх виході формуються сигнали $K(\hat{s}_m)$ та $K(\hat{y}_m)$. Перший з них за своєю суттю є коефіцієнтом корекції сигналу $\hat{s}_m$ основного давача, що компенсує похибку, яка виникає внаслідок відхилення величин повітряних проміжків між ротором і магнітною системою діагностичного пристрою від їх номінальних значень. Другий сигнал несе інформацію про поточне значення величин повітряних проміжків в системі індуктор – ротор, що дає можливість визначити геометричні розміри останнього.

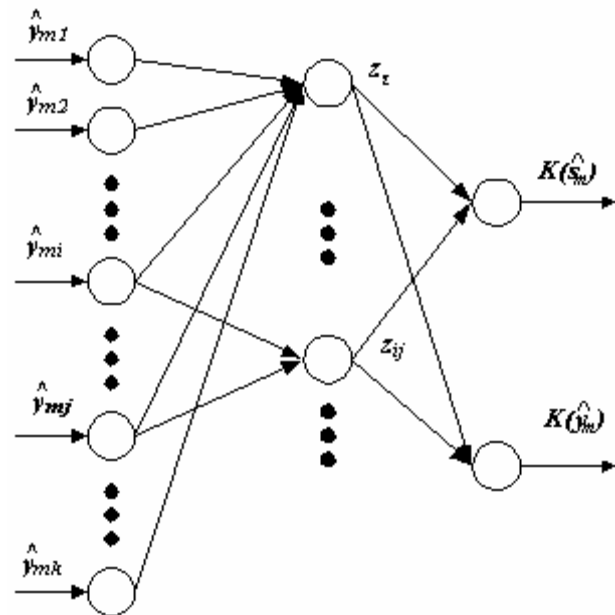


Рис. 3. Структура нейронної мережі

Функція активності елементів нейронної мережі подібно до [5] вибрана сігмоїдальною біполярною $f(x) = th(\beta x)$, де параметр β визначається експериментально. Процес навчання і тестування мережі реалізується на базі даних, отриманих під час випробувань взірцевих дефектних та бездефектних роторів.

Отже, за один цикл контролю ротора на вхід діагностичної моделі КЗ ротора надходять:

- N -мірний вектор вихідних сигналів основного давача $\hat{s} = (\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_N)^T$, який характеризує провідність всіх стрижнів та КЗ клітки загалом;
- N -мірний вектор коригуючих сигналів $K(\hat{s}) = (K(\hat{s}_1), K(\hat{s}_2), \dots, K(\hat{s}_N))^T$, що компенсують похибку базування ротора під час діагностування;
- N -мірний вектор сигналів $K(\hat{y}) = (K(\hat{y}_1), K(\hat{y}_2), \dots, K(\hat{y}_N))^T$, які характеризують геометричні розміри ротора АД.

Проведені розрахунки показали, що модифікований варіант нейронної мережі дозволяє порівняно з [5] зменшити похибку, зумовлену нестабільністю повітряних проміжків у системі індуктор – ротор, на 20–30 %.

Висновки. Запропонований спосіб отримання первинної інформації під час проведення безконтактного діагностування КЗ роторів АД трансформаторним методом дозволяє підвищити

точність визначення дефектів КЗ клітки та отримати дані про розміри осердя ротора. Порівняно із [5] спосіб забезпечує вищу точність та інформативність, проте вимагає складнішої обробки діагностичних сигналів та застосування двочастотної системи збудження.

1. Kratochwil Z. Wykrywanie uszkodzeń uzwojeń klatkowych silników indukcyjnych // *Wiadomości elektrotechniczne*. – 1985. – № 15–16. – S. 355–359. 2. Gąsiorowski T. Metody diagnozowania klatek wirników // *Międzynarodowe XI Sympozjum “Mikromaszyny i serwonapędy”*. T. II. – Malbork, 1998. – S. 274–281. 3. Matras A., Nykliński A., Rad M., Rams W. Kontrola klatek wirników silników indukcyjnych z wykorzystaniem czujników magnetorezystancyjnych // *Materiały konferencyjne BOBRME. Maszyny elektryczne. Zeszyty problemowe* № 64/2002. – Katowice (Polska), 2002. – S. 117–120. 4. Glinka T. Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle – Katowice: BOBRME KOMEL, 1998. – 168 s. 5. Хліпальський Ю.З. Безконтактне діагностування кліток роторів асинхронних двигунів з компенсацією похибки встановлення ротора // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2003. – № 487. – С. 211–217. 6. Czuczman J., Chlipalski J. Metody diagnozowania uzwojenia klatkowego wirników silników indukcyjnych // *Materiały konferencyjne BOBRME. Maszyny elektryczne. Zeszyty problemowe* № 64/2002. – Katowice (Polska), 2002. – S. 121–126. 7. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. – М.–Л.: Энергия, 1966. – 690 с. 8. Виноградов Н.В. Производство электрических машин. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 320 с. 9. Измерения в промышленности: Справочник / Под ред. П. Профоса; Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 648 с. 10. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский диалект, 2001. – 557 с. 11. Rusek M., Ćwirko R., Marciniak W. Przewodnik po elektronice – Warszawa: Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, 1986. – 280 s. 12. Łobos T. Cyfrowe wyznaczanie parametrów podstawowej składowej sygnałów w automatyce elektroenergetycznej // *XV Seminarium z podstaw elektrotechniki i teorii obwodów*. – T. II. – Gliwice – Wisła. – 1992. – S. 31–40.

УДК 621.313.33

В. Чабан, В. Лишук, О. Чабан

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ТЗЕ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВУЗЛА АСИНХРОННИХ МАШИН

© Чабан В., Лишук В., Чабан О., 2004

Запропоновано математичну модель вузла асинхронних моторів, що живляться від спільного трансформатора. Диференціальні рівняння електромеханічного стану системи записуються в нормальній формі Коші, що значно спрощує аналіз систем зі змінною структурою.

There is proposed the mathematical model of asynchronous motors power node, which is supplied by common transformer. The differential equations of electromechanical state are written in normal Cauchy form. It is very important for analysis of systems with variable structures.

Вступ. У багатьох галузях сучасної індустрії функціонують складні електромеханічні системи асинхронних моторів, наприклад, енергетиці, металургії, хемічній, до яких ставляться високі технологічні умови, надійність, швидке реагування на вхідні сигнали тощо. Розв’язання всього комплексу задач, що ставляться до таких систем, методами математичного моделювання є одна з невідкладних задач електромеханіки. У роботі пропонується математична модель вузла живлення групи асинхронних моторів від спільного трансформатора. Диференціальні рівняння електромеханічного стану системи записуються в нормальній формі Коші, що суттєво спрощує не тільки інтег-