

Вінницький національний технічний університет

Кравець Олександр Миколайович

УДК 621.313.333.1:621.317.73

**КОНТРОЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ
АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ МЕТОДОМ ЗРІВНОВАЖЕННЯ В СИСТЕМАХ
ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2011

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті
Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Бурбело Михайло Йосипович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електротехнічних систем
електроспоживання та енергетичного
менеджменту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, Міністерства освіти і науки, молоді та
спорту України, професор кафедри систем автоматичного
управління та електропривода;

доктор технічних наук, професор
Кутін Василь Михайлович,
Вінницький національний технічний університет
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України,
професор кафедри електричних станцій та систем

Захист відбудеться “**08**” **жовтня** 2011 р. о **9-30** годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою:
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд.210. З дисертацією можна
ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою:
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “**06**” **вересня** 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний рівень розвитку силової електроніки та мікропроцесорних засобів керування забезпечує широке поширення частотно-регульованого електроприводу. Системи векторного керування дозволяють створювати електроприводи, які за своїми характеристиками не поступаються приводам постійного струму. Переважно такі системи використовують принцип орієнтації поля, тобто забезпечують розділення каналів керування магнітним потоком та швидкістю шляхом регулювання у системі координат, що обертається і пов'язана, як правило, з вектором потокозчеплення ротора. Найбільш складною задачею, що затрудняє розробку систем векторного керування, є отримання поточних значень потокозчеплення, моменту та швидкості за відсутності сенсорів на валу асинхронного двигуна (АД). Для оцінювання регульованих параметрів АД необхідним є активний поточний контроль його електромагнітних параметрів. Використання значень, отриманих при стендових дослідженнях двигуна, є неможливим через те, що ці параметри не є константами і змінюються в процесі роботи (наприклад, при зміні температурних режимів АД активні опори ротора та статора досить сильно змінюються). Виходячи з цього, постає необхідність контролю електромагнітних параметрів АД в процесі роботи систем керування.

Контролю електромагнітних параметрів АД присвячені праці вчених О. Д. Гольдберга, Г. К. Жерве, Г. Г. Рогозіна, В. Ф. Сивокобиленка, О. С. Бешти, О. В. Волкова, А. О. Лозинського, С. М. Пересади, Д. Й. Родькіна та інших.

Однак відомі методи поточного контролю параметрів АД не задовольняють зростаючі потреби щодо точності за умов реального функціонування частотно-керованих електроприводів. Існує необхідність розробки методів активного контролю, які можуть забезпечити підвищення вірогідності визначення електромагнітних параметрів АД в темпі процесу векторного керування. Тому задача теоретичних досліджень і розробки методів контролю електромагнітних параметрів АД, в основу роботи яких покладено метод квазізрівноваження, характерною особливістю якого є поєднання швидкодії та точності, представляється важливою і актуальною.

Науково-прикладна задача полягає у необхідності вдосконалення методів та засобів контролю електромагнітних параметрів асинхронних двигунів з використанням зрівноваження безпосередньо в темпі процесу векторного керування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень які проводились у відповідності з науковим напрямком кафедри „Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” Вінницького національного технічного університету (ВНТУ), а також відповідно до „Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки” у рамках фінансування держбюджетної науково-дослідної роботи №2905 „Розробка математичних моделей і засобів підвищення надійності та енергозбереження в транспортних системах”, № державної реєстрації 0107U002089. Автор брав участь у виконанні вищевказаної роботи як виконавець (підрозділи 1.4 та 2.4).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в покращенні регульованих властивостей частотно-керованих електроприводів за рахунок підвищення вірогідності контролю електромагнітних параметрів асинхронних двигунів.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати системи векторного керування АД, існуючі методи контролю їх параметрів та систематизувати відомі теоретичні підходи;
2. Розробити математичні моделі контролю параметрів АД методом зрівноваження;
3. Проаналізувати алгоритми контролю параметрів АД методом зрівноваження;
4. Практично реалізувати та експериментально дослідити пристрій контролю параметрів АД у складі векторно-керованих електроприводів.

Об'єкт дослідження. Процес керування асинхронним електроприводом за умови нестабільних електромагнітних параметрів асинхронних двигунів.

Предмет дослідження. Методи та засоби контролю електромагнітних параметрів асинхронних двигунів в реальному часі.

Методи досліджень. Під час теоретичних узагальнень використовувались аналітичні методи досліджень, які базувалися на теоріях: лінійних і нелінійних електричних кіл для аналізу математичних моделей; диференційних рівнянь у матричній формі для розв'язання задач аналізу і синтезу методів контролю динамічних систем; математичної статистики для аналізу похибок вимірювань; методи математичного і фізичного моделювання та експериментальних досліджень в реальних умовах функціонування електроприводів.

Наукова новизна одержаних результатів і положень, що виносяться на захист, полягає в подальшому розвитку методів та засобів контролю електромагнітних параметрів асинхронних двигунів.

В роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше запропоновано компенсаційно-мостовий метод контролю електромагнітних параметрів АД з використанням багатоелементних схем заміщення за умов несинусоїдності напруги або струму живлення, який забезпечує отримання інформації в реальному часі та покращення регулювальних властивостей АД.

2. Вдосконалено метод контролю параметрів АД з використанням в якості інформативних параметрів системи зрівноваження внутрішніх недоступних величин – похідної потокозчеплення та потокозчеплення, що забезпечує можливість визначення параметрів АД за нелінійності індуктивності намагнічування.

3. Дістав подальший розвиток метод контролю параметрів нелінійних моделей шляхом введення нових спектральних параметрів та використання миттєвих значень струмів, що дає можливість експериментального оцінювання електромагнітних параметрів АД як в режимі ненасиченого стану, так і в режимі насичення магнітопроводу.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає, насамперед, у можливості покращення регулювальних властивостей частотно-керованих електроприводів змінного струму. Запропоновані та обгрунтовані в дисертаційній роботі методи дали можливість розробити і впровадити пристрій контролю, який забезпечує підвищення вірогідності контролю електромагнітних параметрів АД.

На основі наукових положень

- розроблено алгоритми вимірювальних перетворень електромагнітних параметрів АД;

- створено програмне забезпечення для отримання вимірювальної інформації про електромагнітні параметри АД.

Одержані наукові результати впроваджені в ТОВ „Промавтоматика Вінниця”. Результати роботи також використовуються у Вінницькому національному технічному університеті для підготовки фахівців за спеціальністю 7.090603 “Електротехнічні системи електроспоживання”.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем одноособово. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: [1, 6, 13] – проаналізовано алгоритми вимірювання параметрів АД в частотній області; [2] – проаналізовано похибки вимірювання параметрів нелінійних моделей в часовій області; [3] – проаналізовано похибки сумісного визначення параметрів АД в частотній області; [4] – проаналізовано еквівалентні пасивні параметри АД; [5] – вибрано інформативні параметри та проаналізовано роботу вимірювальних перетворювачів для індивідуальної компенсації реактивної потужності АД; [7] – обгрунтовано використання методу квазізрівноваження для контролю параметрів АД в динамічних режимах регулювання частоти напруги живлення; [8] – розроблено структурні схеми швидкодіючих вимірювальних каналів; [9] – показано, що при реалізації цифрових квазізрівноважених вимірювальних каналів доцільно

використовувати як інформативні параметри системи зрівноваження – внутрішні недоступні змінні схеми заміщення АД, наприклад, похідну потокозчеплення та потокозчеплення, що забезпечує роздільність контурів регулювання; [10] – показано, що в частотно-керованих електроприводах для контролю електромагнітних параметрів асинхронного двигуна доцільно застосовувати зрівноважувальні перетворення з використанням похідної потокозчеплення та потокозчеплення як інформативних параметрів для фіксування заданого стану, що забезпечує високу чутливість визначення параметрів; [11] – проаналізовано використання ковзного інтервалу часу для визначення параметрів АД; [12] – обґрунтовано доцільність введення провідностей нелінійного спотворення, які інтегрально характеризують нелінійність АД, і показано, що використання миттєвих значень струмів дозволяє здійснювати вимірювання параметрів нелінійних об'єктів;

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на 2-ох наукових конференціях: 6-й та 9-й Міжнародних науково-технічних конференціях “Контроль і управління в складних системах КУСС–2001 та КУСС–2008” (м. Вінниця, 2001, 2008 рр.), Результати дисертаційної роботи представлялись і обговорювались на щорічних науково-технічних конференціях ВНТУ.

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 11 статтях в наукових фахових виданнях, що входять до переліку ВАК України, 2 тезах конференцій, 1 патенті України на винахід.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, додатків і списку використаних джерел, загальний обсяг дисертації 148 сторінок, з яких основний зміст викладений на 108 сторінках друкованого тексту, містить 65 рисунків, 10 таблиць. Додатки містять програму роботи мікроконтролера, результати експериментальних досліджень, акти впровадження результатів роботи. Список використаних джерел складається з 92 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано мету та задачі дослідження. Сформульовано наукову новизну та положення, що виносяться на захист. Розглянуто практичне значення та впровадження одержаних результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та публікації.

У першому розділі розглянуто існуючі системи векторного керування асинхронним електроприводом. На основі аналізу методів та пристроїв контролю електромагнітних параметрів АД зроблено такі висновки:

1. Під час побудови систем векторного керування виникає необхідність контролю параметрів АД з високою точністю.

2. У теперішній час достатньо теоретично розроблені та експериментально апробовані методи контролю параметрів об'єктів, представлених лінійними багатоелементними схемами заміщення. Для об'єктів, що містять нелінійні елементи, відомі лише окремі реалізації засобів контролю.

3. Квазізрівноважені вимірювальні перетворювачі є одними з найбільш ефективних серед засобів експериментального визначення параметрів багатоелементних моделей електротехнічних об'єктів. Проте до теперішнього часу вони не адаптовані до контролю параметрів АД.

Тому на порядок денний уже сьогодні постає необхідність вдосконалення методів та засобів контролю параметрів векторно-керованих АД, що є актуальною науковою задачею.

Вирішення наукової задачі в першу чергу вимагає:

- обґрунтувати зрівноважувальний метод активного контролю електромагнітних параметрів АД з використанням в якості інформативних параметрів похідної потокозчеплення та потокозчеплення;
- розробити компенсаційно-мостовий метод контролю електричних параметрів АД

на основі використання чотирьохелементної або п'ятиелементної схем заміщення;

– обґрунтувати можливість використання в якості інформативних параметрів нелінійних об'єктів інтегральних пасивних параметрів, які характеризують нелінійність об'єкта, а також розробити фізичні основи контролю параметрів нелінійних об'єктів.

У другому розділі розроблено математичні моделі та функціональні схеми контролю параметрів АД, який в усталеному режимі можна представити п'ятиелементною схемою заміщення і для якого справедливою є система двох диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} L_s \frac{di_s}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} &= u_s - R_s i_s ; \\ -L'_r \frac{di_s}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} &= \frac{R'_r}{s} \left(i_s - \frac{\psi_m}{L_m} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

де u_s, i_s – миттєві напруга і струм статора; ψ_m – потокозчеплення кола намагнічування;

L_s – індуктивність розсіювання статора; R_s – активний опір статора;

$$R'_r = \frac{R_r}{1 + \frac{L_r}{L_m} \left(1 - \frac{\psi_m}{L_m} f'(\psi_m) \right)}; \quad L'_r = \frac{L_r}{1 + \frac{L_r}{L_m} \left(1 - \frac{\psi_m}{L_m} f'(\psi_m) \right)} - \text{еквівалентні}$$

параметри ротора. Оскільки індуктивність намагнічування є складною функцією потокозчеплення $L_m = f(\psi_m)$, то похідна індуктивності намагнічування по часу буде

$$\frac{dL_m}{dt} = f'(\psi_m) \frac{d\psi_m}{dt}, \quad \text{де } f'(\psi_m) - \text{похідна індуктивності намагнічування по}$$

потокозчепленню.

Перший підхід до контролю параметрів АД полягає у порівнянні миттєвих значень похідної потокозчеплення. Оскільки в процесі контролю напруга на статорі, струм статора та похідна струму статора можуть бути виміряні безпосередньо, то систему рівнянь (1) можна подати у вигляді двох рівностей, записаних відносно похідної потокозчеплення

$$\frac{d\psi_m}{dt} = u_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt}; \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_m}{dt} = L'_r \frac{di_s}{dt} + \frac{R'_r}{s} \left(i_s - \frac{\psi_m}{L_m} \right). \quad (3)$$

Функціональну схему перетворень, які необхідно здійснювати для визначення електричних параметрів АД за формулами (2) і (3), зображено на рис. 1.

Налагодження моделі здійснюється блоком порівняння та прийняття рішень (БР), який аналізує миттєві значення двох реалізацій похідної потокозчеплення, що поступають на його входи, і приймає рішення щодо зміни параметрів, які регулюються. Інформативним

в процесі регулювання R'_r у даному випадку є амплітудні значення $\frac{d\psi_m}{dt}$.

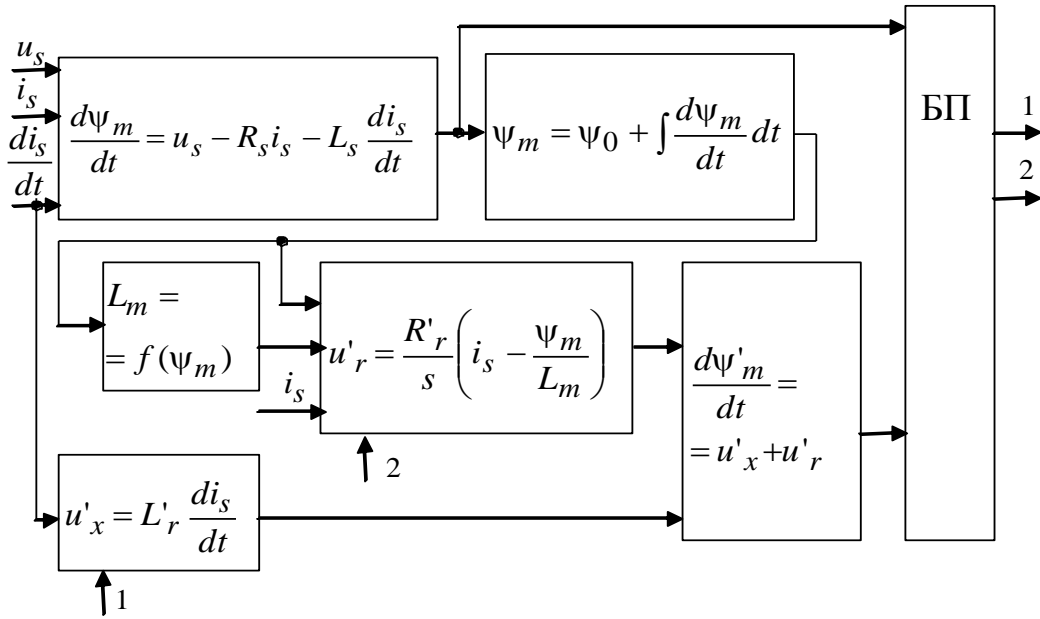


Рис. 1. Функціональна схема контролю з порівнянням похідної потокозчеплення за формулами (2) і (3)

Другий підхід до контролю параметрів АД полягає у порівнянні миттєвих значень потокозчеплення, розрахованих за формулами

$$\psi_m = \psi_0 + \int_0^t (u_s - R_s i_s) dt - L_s i_s; \quad (4)$$

$$\psi_m = L_m \left(i_s + \frac{L'_r}{R'_r} \frac{di_s}{dt} - \frac{1}{R'_r} \frac{d\psi_m}{dt} \right), \quad (5)$$

де ψ_0 – початкове значення потокозчеплення.

Функціональну схему контролю з порівнянням потокозчеплення зображено на рис. 2. В процесі регулювання параметра R'_r інформативним є фазовий зсув між потокозчепленнями, розрахованими за формулами (4) і (5). Відхилення миттєвих значень потокозчеплень приводить до висновку, що використання потокозчеплення може забезпечити порівняно вищу чутливість визначення параметрів АД, ніж у разі використання похідної потокозчеплення.

Розглянуті алгоритми можуть бути безпосередньо використані при визначенні одного параметра у разі відомих решти параметрів. За невідомих двох параметрів АД потрібний пошук станів квазірівноваги, які забезпечують роздільність двох контурів зрівноваження. Якщо невідомих параметрів три і більше, то необхідною також є зміна умов проведення експерименту, наприклад, використання двох режимів роботи з різним ковзанням або використання двох частот напруги чи струму живлення АД.

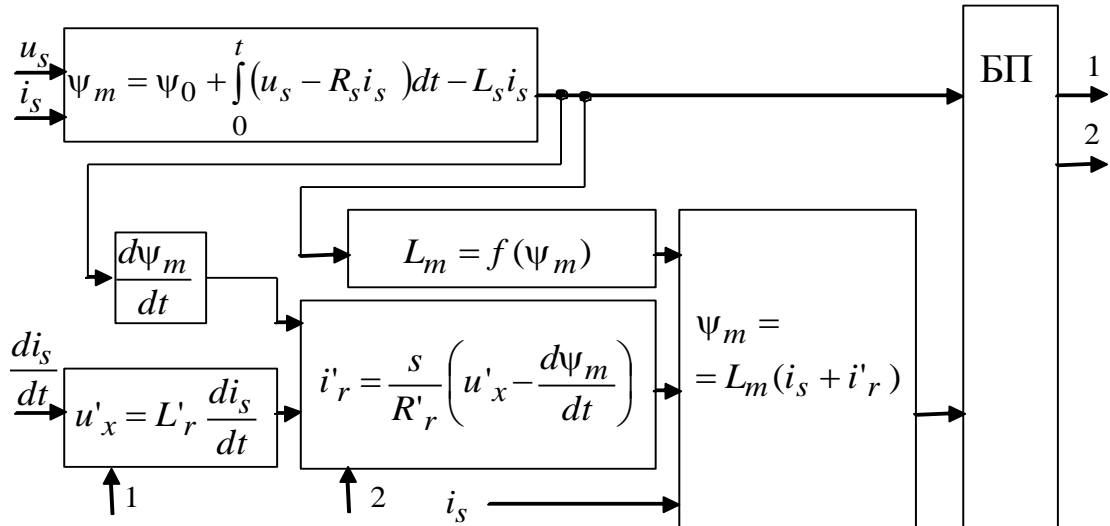


Рис. 2. Функціональна схема контролю з порівнянням потокозчеплення за формулами (4) і (5)

Третій підхід до контролю параметрів полягає у використанні чотирьохелементної схеми заміщення АД. Виразивши $\frac{d\Psi_m}{dt}$ з першого рівняння і підставивши в друге, систему (1) можна звести до одного рівняння

$$u_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} - L'_r \frac{di_s}{dt} = \frac{R'_r}{s} \left(i_s - \frac{\Psi_m}{L_m} \right).$$

Звідси випливає, що АД за незначної нелінійності індуктивності намагнічування та малого співвідношення індуктивності ротора до індуктивності кола намагнічування може бути представлений чотирьохелементною схемою заміщення (див. рис. 3). Причому $R_1 = R_s$, $L_1 = L_s + L'_r$, $R_2 = R'_r/s$. Індуктивність L'_2 є еквівалентним нелінійним елементом, значення якого залежить від струму статора $L'_2 = L_m \left(1 - \frac{j\omega L'_r \dot{I}_s}{\dot{U}_m} \right)$. Однак застосування такої схеми заміщення можливе лише за незначної нелінійності та малого співвідношення індуктивності ротора до індуктивності кола намагнічування і в усіх випадках має бути обґрунтованим, що не дозволяє однозначно рекомендувати такий підхід для контролю електромагнітних параметрів АД. Крім того, комплексний характер індуктивності намагнічування чотирьохелементної схеми заміщення вимагає більш ретельного аналізу та ускладнює можливість її застосування.

Найбільш простим є метод, який полягає в порівнянні струму або напруги статора АД зі струмом або напругою налагоджуваної моделі АД. Функціональну схему перетворень, які необхідно здійснювати для контролю електромагнітних параметрів АД з використанням мостового методу, зображено на рис. 3.

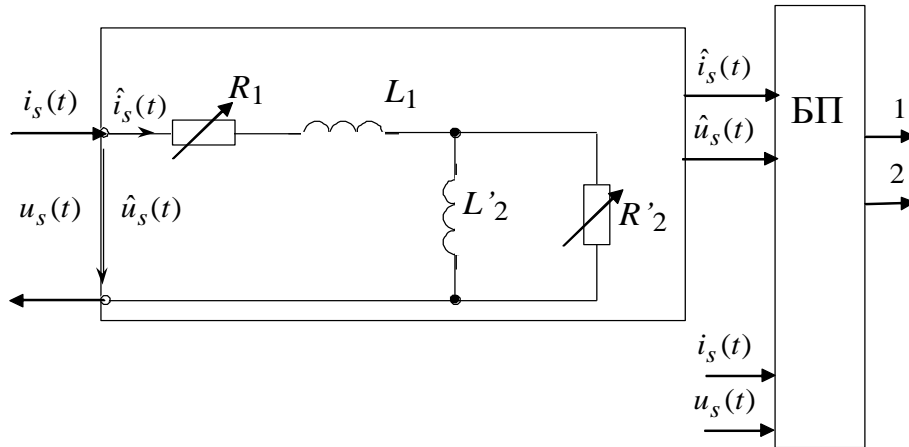


Рис. 3. Функціональна схема контролю з використанням мостового методу за чотирьохелементної схеми заміщення АД

Обґрунтовано компенсаційно-мостовий метод контролю електромагнітних параметрів АД. За допомогою компенсаційної схеми формується напруга, що пропорційна похідній потокозчеплення, яка подається на мостову схему, де здійснюється порівняння струму АД зі струмом двохелементної або трьохелементної його схем заміщення (рис. 4). Умова досягнення стану рівноваги або квазірівноваги формується у вигляді $R_2 = R_r / s$. Часові діаграми струму статора $i_s(t)$ та струму через трьохелементну модель $\hat{i}_s(t)$ за відсутності похибок перетворення повністю збігаються.

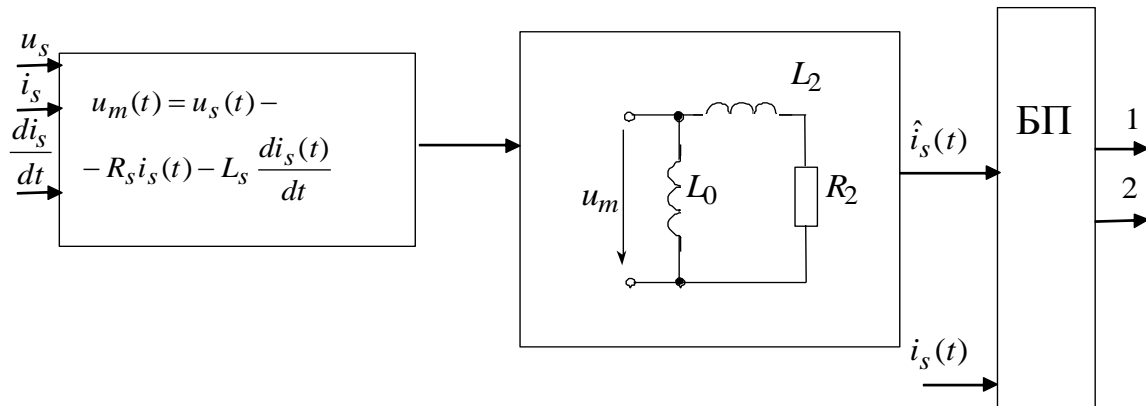


Рис. 4. Функціональна схема контролю з використанням компенсаційно-мостового методу

В режимі заданої напруги (струму) налагодження параметрів моделі АД може здійснюватися на основі порівняння розрахованих та дійсних залежностей струму (напруги) статора. Інформативним в процесі регулювання R_2 у даному випадку є амплітудні значення струму статора.

В нелінійних електричних колах за синусоїдної напруги або струму живлення процеси передавання та споживання електричної енергії характеризують за допомогою повної S , активної P , реактивної Q потужностей та потужності спотворення D , причому потужність нелінійного спотворення можна записати у вигляді ортогональних складових:

$$D_P = I_1^2 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} R_{1k}^2}; \quad D_Q = I_1^2 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} X_{1k}^2}. \quad (6)$$

Пропонуються оцінки потужностей спотворення

$$\hat{D}_P = I_1^2 \sum_{k=2}^{\infty} R_{1k}; \quad \hat{D}_Q = I_1^2 \sum_{k=2}^{\infty} X_{1k}. \quad (7)$$

У цьому випадку дійсні значення потужностей спотворення (6) можна визначити через їх оцінки (7) з урахуванням ефективного числа гармонічних складових з виразів

$$D_P^2 = \hat{D}_P^2 / n_P; \quad D_Q^2 = \hat{D}_Q^2 / n_Q, \quad (8)$$

де n_P , n_Q – ефективні числа гармонічних складових, що генеруються відповідно резистивним та індуктивним нелінійними елементами, які визначають за формулами

$$n_P = \frac{\left(\sum_{k=2}^{\infty} R_{1k} \right)^2}{\sum_{k=2}^{\infty} R_{1k}^2}; \quad n_Q = \frac{\left(\sum_{k=2}^{\infty} X_{1k} \right)^2}{\sum_{k=2}^{\infty} X_{1k}^2}. \quad (9)$$

Оцінки потужностей нелінійного спотворення зручно представити чотирма складовими D_{nP} , D_{nQ} , які характеризують дію непарних гармонік, та D_{pP} , D_{pQ} , які характеризують дію парних гармонік, з відповідними ефективними числами гармонічних складових.

Звідси випливає можливість введення складових спектрального опору, що характеризують нелінійність об'єкта, у вигляді

$$X_{nP} = \frac{D_{nP}}{I_1^2}; \quad X_{nQ} = \frac{D_{nQ}}{I_1^2}; \quad X_{pP} = \frac{D_{pP}}{I_1^2}; \quad X_{pQ} = \frac{D_{pQ}}{I_1^2}; \quad (10)$$

Розроблено метод роздільного контролю складових спектральних опору та провідності нелінійних об'єктів з використанням залежностей струму $i(t)$ та його складової, зумовленої нелінійністю $i_n(t) = i(t) - i_1(t)$, де $i_1(t)$ – струм першої гармоніки. Наприклад, віднявши миттєві значення струму в цих точках і розділивши на два $[i_n(t=10\text{мс}) - i_n(t=20\text{мс})]/2$, можна забезпечити визначення непарних косинусних гармонічних складових.

У **третьому розділі** проаналізовано алгоритми контролю параметрів АД, що оснований на зрівноваженні з отриманням інформації про миттєві значення внутрішніх параметрів схеми заміщення АД – похідної потокозчеплення або потокозчеплення (напруги \dot{U}_m , струму \dot{I}_m (рис. 5)).

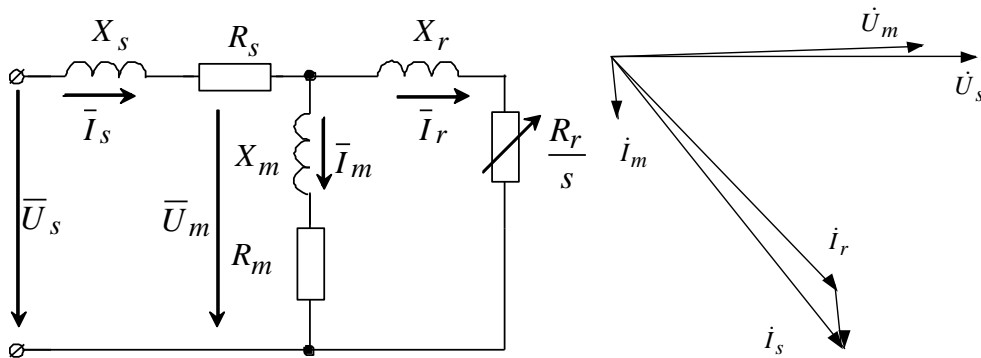


Рис. 5. Схема заміщення і векторна діаграма АД

За синусоїдної напруги живлення в основу алгоритмів, що базуються на використанні похідної потокозчеплення, покладено визначення електричних параметрів АД з системи рівнянь, записаних відносно напруги \dot{U}_m :

$$\begin{aligned} \dot{U}_s(j\omega) - (R_s + j\omega L_s)\dot{I}_s(j\omega) &= \dot{U}_m(j\omega); \\ (R_m + j\omega L_m)\dot{I}_m(j\omega) &= \dot{U}_m(j\omega); \\ (R_r/s + j\omega L_r)\dot{I}_r(j\omega) &= \dot{U}_m(j\omega); \\ -\dot{I}_s(j\omega) + \dot{I}_r(j\omega) + \dot{I}_m(j\omega) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Проаналізовано відносні похибки визначення параметрів АД за алгоритмом, в основу якого покладено напругу \dot{U}_m . Показано, що якщо напруга \dot{U}_m буде визначена з похибкою $\Delta\dot{U}_m = 1 + j1$ В, що складає приблизно 0,5 % по активній та реактивній складових, то для досягнення достатньої точності визначення опору ротора необхідним є ітераційне уточнення параметрів АД за результатами вимірювань.

Проаналізовано алгоритми контролю параметрів АД за широтно-імпульсною модуляції напруги живлення АД за використання α , β -системи координат. Для нелінійних диференціальних рівнянь АД в нерухомій системі координат α , β , відповідно до алгоритму (2) і (3), з одного боку, справедливі вирази, що записані відносно статора за формулою (2)

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{m\alpha}}{dt} &= u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} - L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt}; \\ \frac{d\psi_{m\beta}}{dt} &= u_{s\beta} - R_s i_{s\beta} - L_s \frac{di_{s\beta}}{dt}, \end{aligned} \quad (12)$$

а з іншого боку – відносно ротора за формулою (3)

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{m\alpha}}{dt} &= L'_r \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \frac{R'_r}{s} \left(i_{s\alpha} - \frac{\psi_{m\alpha}}{L_m} \right); \\ \frac{d\psi_{m\beta}}{dt} &= L'_r \frac{di_{s\beta}}{dt} + \frac{R'_r}{s} \left(i_{s\beta} - \frac{\psi_{m\beta}}{L_m} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

На основі аналізу встановлено, що алгоритми з порівнянням похідної потокозчеплення є значно стійкішими ніж алгоритми з порівнянням потокозчеплення. Потокозчеплення застосовувати для контролю параметрів потужних АД в частотно-керуваному електроприводі практично неможливо.

Розроблено структурні схеми вимірювальних перетворювачів параметрів АД. На рис. 6 представлена структурна схема квазірівноваженого вимірювального перетворювача параметрів АД. Вимірювальний перетворювач містить: функціональний перетворювач напруги ФПН, масштабний перетворювач струму ПС, інтегрувальний перетворювач ІП, що складається з кодированої резистивної матриці R_0 , зразкового індуктивного елемента L_0 , операційного підсилювача A із зразковим резистором R_{00} в колі від'ємного зворотного зв'язку, пристрій віднімання ПВ, диференціатор Д, перемикач П, два фазочутливих перетворювачі ФП1 та ФП2.

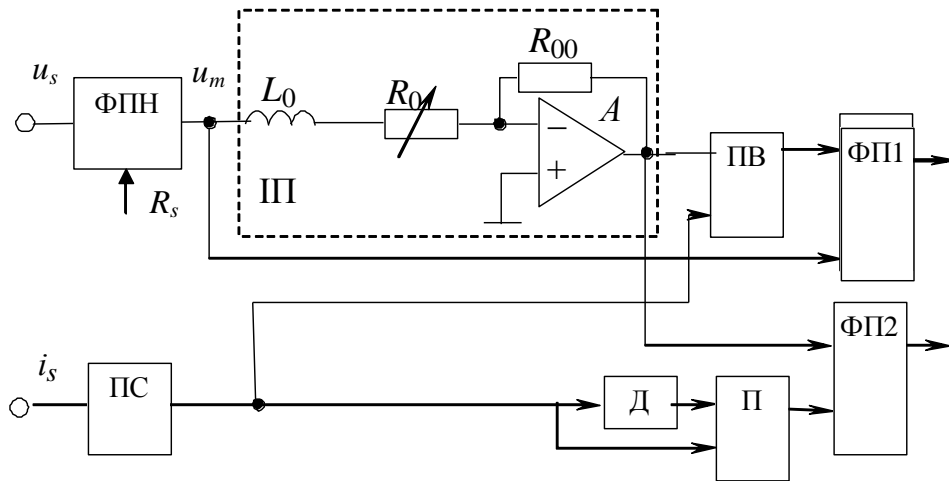


Рис. 6. Структурна схема квазірівноваженого вимірювального перетворювача параметрів АД

В момент досягнення стану квазірівноваги, що характеризується рівністю $R_0 = R_r / s$ напруга на виході фазочутливого перетворювача ФП1 дорівнює нулю. В цей момент на виході фазочутливого перетворювача ФП2 в залежності від положення перемикача П існують напруги

$$U'_{\text{ФП}} = \frac{k_I}{k_U} \left(\frac{L_0}{L_r} + \frac{L_0}{L_m} \right); U''_{\text{ФП}} = \frac{k_I}{k_U} \frac{R_0}{L_m}, \quad (14)$$

де k_U, k_I – коефіцієнти передачі входних кіл відповідно напруги та струму, за якими здійснюють відлік вимірюваних параметрів.

У даному випадку забезпечено роздільне зрівноваження по одному параметру, що є істотною перевагою цього пристрою. Два інших параметри визначаються без додаткового зрівноваження.

Розроблено структурну схему вимірювального перетворювача параметрів чотирьохелементної схеми заміщення АД на двох частотах напруги живлення.

В четвертому розділі розроблено функціональну схему системи векторного керування з контролем параметрів АД (рис. 7).

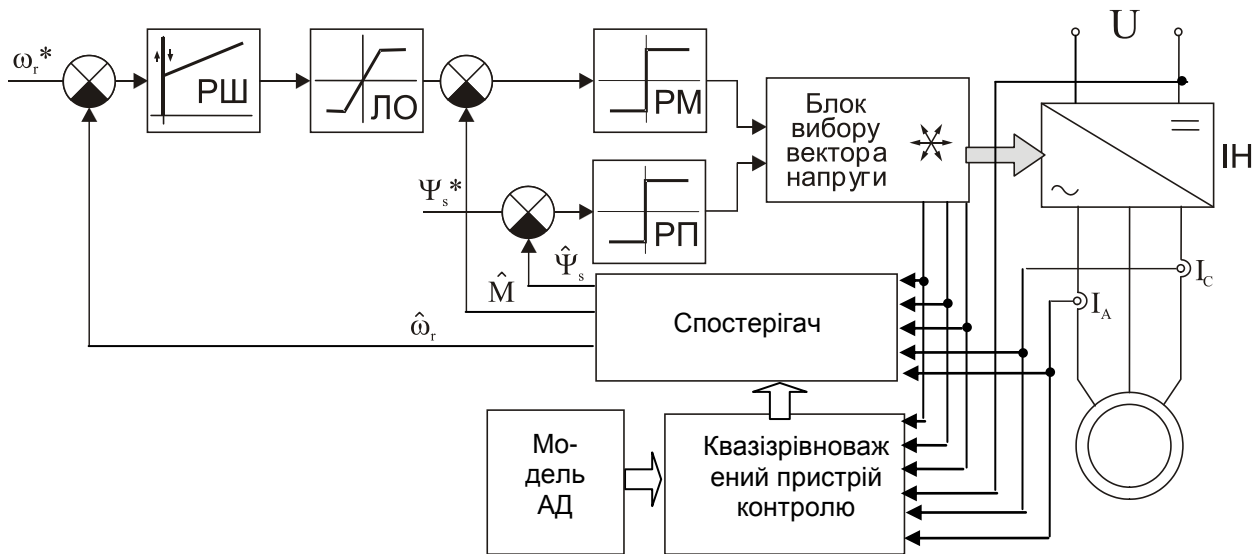


Рис. 7. Функціональна схема системи векторного керування з контролем параметрів АД

Основними вимірювальними перетвореннями, які реалізуються під час визначення електромагнітних параметрів АД, є визначення поточних значень активної потужності та квадрата струму на кожному інтервалі часу протягом половини періоду напруги живлення. Алгоритм визначення електромагнітних параметрів АД базується на використанні системи фазних координат. Поточні значення активної потужності визначаються за формулою

$$P(n) = \frac{U/\sqrt{2}}{6N} \sum_n^N \text{sgn}u_{AB(n)} \cdot (2i_{A(n)} - i_{C(n)}) + \text{sgn}u_{BC(n)} \cdot (i_{A(n)} - 2i_{C(n)}) + \text{sgn}u_{CA(n)} \cdot (i_{C(n)} - i_{A(n)}), \quad (15)$$

де $i_{A(n)}, i_{C(n)}$ – миттєві значення струмів в момент часу n фіксування миттєвих струмів; $\text{sgn}u_{AB(n)}, \text{sgn}u_{BC(n)}, \text{sgn}u_{CA(n)}$ – знаки напруг відповідно u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} в момент часу n фіксування миттєвих струмів; U – амплітудне значення напруг; N – число точок фіксування миттєвих струмів на половині періоду.

Поточні значення квадрата струму визначаються за формулою

$$I^2(n) = \frac{2}{N} \sum_n^N i_{A(n)}^2 + i_{A(n)} \cdot i_{C(n)} + i_{C(n)}^2. \quad (16)$$

Поточні значення активної та реактивної складових спектральних опорів АД визначаються з формул

$$R_c(n) = \frac{P(n)}{I^2(n)}; \quad X_c(n) = \sqrt{\frac{U^2}{I^2(n)} - R_c^2(n)}. \quad (17)$$

На рис. 8 наведена структурна схема вимірювального перетворювача поточних значень опорів ротора та кола намагнічування векторно-керованого АД.

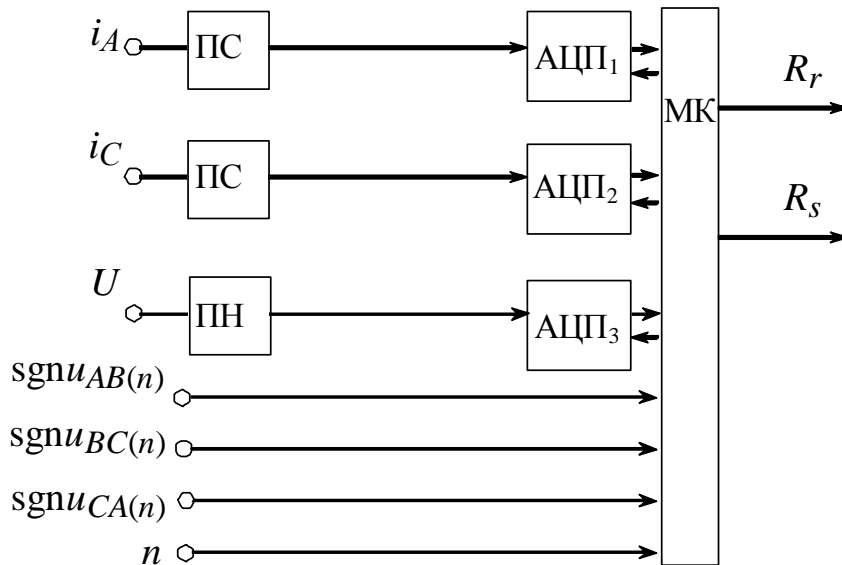


Рис. 8. Структурна схема вимірювального перетворювача поточних значень опорів ротора та кола намагнічування векторно-керованого АД

Активна та реактивна складові спектрального опору кола ротора та кола намагнічування знаходиться шляхом віднімання активного та реактивного опорів статора

$$R'_c(n) = R_c(n) - R_s; \quad X'_c(n) = X_c(n) - X_s. \quad (18)$$

В подальшому здійснюється регулювання активних опорів ротора і статора моделі (див. рис. 4) до досягнення двох станів квазірівноваги. В процесі регулювання опору ротора моделі використаний фазовий режим зрівноваження, оскільки в момент досягнення стану квазірівноваги

$$\operatorname{ctg}\varphi(n) = \frac{R'_c(n)}{X'_c(n)} = \frac{R_r(n)}{X_m + X_r} = \frac{R_2}{X_0 + X_2}. \quad (19)$$

В процесі регулювання опору статора моделі використаний модульний режим зрівноваження, який дозволяє забезпечити визначення опору статора АД.

Розроблені алгоритми перетворень параметрів схеми заміщення АД були промодельовані у середовищі Simulink пакету прикладних програм Matlab за синусоїдної та широтно-імпульсної модуляції синусоїдної напруги. На рис. 9 наведено графік залежності сигналу на виході моделі (різниця похідних потокозчеплення) від значення опору R'_2 . Аналізуючи отримані графіки, ми бачимо, що точність та чутливість визначення опору ротора схеми заміщення АД є достатньою.

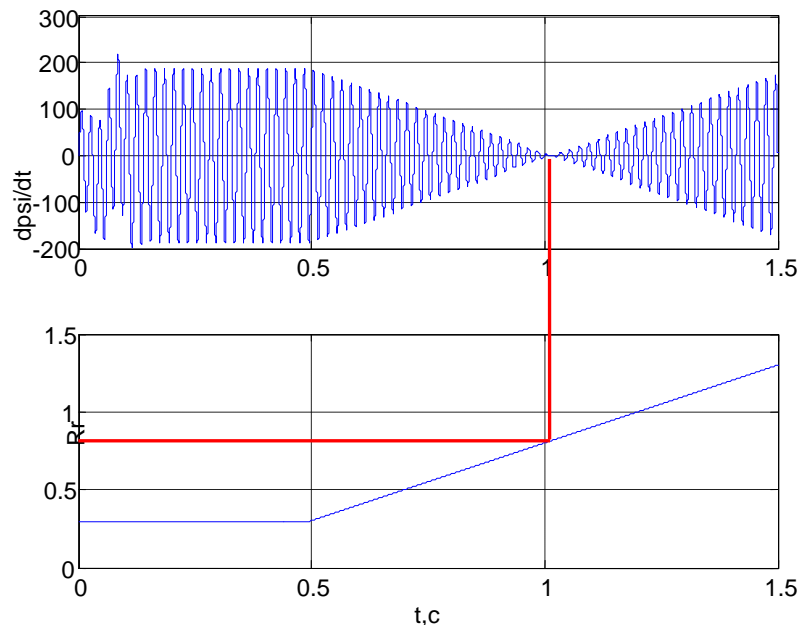


Рис. 9. Залежності сигналу на виході моделі з порівнянням похідної потокозчеплення, що отримані при зміні опору ротора

Розроблено принципову схему контролю параметрів АД, побудованого на основі мікроконтролера AT91SAM7S256 фірми Atmel. Розроблено програму роботи мікроконтролера пристрою контролю.

Проведено статистичну обробку результатів контролю параметрів АД з використанням розробленого пристрою контролю. Встановлено, що закон розподілу випадкової величини узгоджується з нормальним законом розподілу. Середньоквадратична похибка вимірювання активних опорів статора та ротора АД за умови швидкодії, що не перевищує половини періоду напруги живлення, не перевищує відповідно 2,5 % та 1,0 %.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання, яке полягає в необхідності вдосконалення методів та засобів контролю електромагнітних параметрів асинхронних двигунів з використанням зрівноваження.

Основні теоретичні та експериментальні дослідження, які виконані в дисертаційній роботі, можуть бути узагальнені такими висновками:

1. Показано, що під час контролю електромагнітних параметрів асинхронних двигунів з використанням зрівноваження в якості інформативних параметрів можна використовувати внутрішні недоступні параметри асинхронного двигуна, наприклад, похідну потокозчеплення та потокозчеплення, що забезпечує роздільність контурів зрівноваження. Встановлено, що методи, які основані на порівнянні похідної потокозчеплення та потокозчеплення, забезпечують можливість контролю електромагнітних параметрів АД за нелінійності індуктивності намагнічування. Причому в методі, що оснований на порівнянні похідної потокозчеплення, інформативним параметром

в процесі регулювання R'_r є амплітудні значення $\frac{d\psi_m}{dt}$, а в методі, що оснований на порівнянні потокозчеплення, інформативним параметром в процесі регулювання R'_r є фазовий зсув ψ_m . Метод контролю, який оснований на порівнянні потокозчеплення, має дещо більшу чутливість порівняно з методом, що оснований на порівнянні похідної потокозчеплення.

2. Отримано умови представлення асинхронних двигунів чотирьохелементною схемою заміщення. Для цього здійснюється порівняння двох залежностей похідної потокозчеплення і (або) потокозчеплення. І за незначних їх відхилень, які можна скоректувати налагодженням параметрів моделі, робиться висновок про можливість використання чотирьохелементної схеми заміщення.

3. Обґрунтовано компенсаційно-мостовий метод контролю електромагнітних параметрів АД на основі використання чотирьохелементної та п'ятиелементної схем заміщення. За допомогою компенсаційної схеми формується напруга, що пропорційна похідній потокозчеплення, яка подається на мостову схему, де здійснюється порівняння струму АД зі струмом двохелементної або трьохелементної його схем заміщення ротора і кола намагнічування.

4. Запропоновано в якості інформативних параметрів нелінійних об'єктів використовувати інтегральні пасивні параметри, які характеризують нелінійність об'єкта і рівень спотворення. Кількість таких параметрів становить від одного до чотирьох в залежності від кількості нелінійних елементів та характеру нелінійності. Розглянуто фізичні основи контролю параметрів нелінійних об'єктів. Показано, що використання миттєвих значень струмів дозволяє здійснювати визначення інтегральних параметрів нелінійних об'єктів.

5. Проаналізовано методи контролю електромагнітних параметрів АД за синусоїдної напруги живлення та широтно-імпульсного модулювання синусоїдної напруги статора. Показано, що методи з порівнянням похідної потокозчеплення є значно стійкішими при визначенні параметрів потужних АД, для яких характерним є істотне спотворення синусоїдності кривих порівнюваних складових потокозчеплення. Показано також, що методи з порівнянням потокозчеплення можна використовувати для визначення параметрів малопотужних АД, оскільки спотворення синусоїдності кривих порівнюваних складових потокозчеплення у цьому випадку є незначним.

6. Розроблено структурні схеми перетворювачів та алгоритми визначення параметрів АД на одній та двох частотах напруги або струму живлення.

7. Одержані наукові результати впроваджені в ТОВ „Промавтоматика Вінниця”. Результати роботи також використовуються у Вінницькому національному технічному

університеті для підготовки фахівців за спеціальністю 7.090603 “Електротехнічні системи електроспоживання”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бурбело М. Й. Квазізрівноважене мостове коло для вимірювання параметрів чотириелементних двополюсників / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець // Технічна електродинаміка. – 2001. – №5. – С. 64–67.
2. Кравець О. М. Аналіз похибок вимірювання параметрів нелінійних двополюсників часово-імпульсним методом / О. М. Кравець, М. Й. Бурбело // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – №6. – С. 27–29.
3. Бурбело М. Й. Аналіз похибок результатів сумісних вимірювань параметрів чотириелементних двополюсників / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – №2. – С. 47–50.
4. Бурбело М. Й. Вимірювання еквівалентних параметрів електричних кіл за умови дії періодичних несинусоїдних струмів / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – №3. – С. 59–62.
5. Бурбело М. Й. Квазізрівноважені вимірювальні перетворювачі для регуляторів конденсаторних установок, що застосовуються в умовах несинусоїдності / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець // Вісник НУ “Львівська політехніка” Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2002. – №449. – С. 24–29.
6. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів багатоелементних двополюсників при дії періодичних несинусоїдних струмів / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, О. В. Бабенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – №3. – С. 39 – 44.
7. Контроль електричних параметрів асинхронних двигунів в перехідних режимах / М. Й. Бурбело, В. В. Гаврилюк, О. М. Кравець, А. В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 6. – С. 66–68.
8. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, А. В. Гадай // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 11. – С. 42–45.
9. Бурбело М. Й. Алгоритми вимірювання електричних параметрів асинхронних двигунів / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 33–37.
10. Бурбело М. Й. Визначення електричних параметрів асинхронних двигунів в електроприводах з частотним керуванням / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 1. – С. 55–58.
11. Динамічна компенсація реактивної потужності в перехідних режимах електроприводів [Електронний ресурс] / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, О. М. Кравець, М. В. Никитенко // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 3. – 6 с.: Реж. дост. до журн. – http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-3.fils/uk/08mibpio_ua.pdf
12. Бурбело М. Й. Вимірювання інтегральних параметрів нелінійних об’єктів [Електронний ресурс] / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, К. С. Фомін // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – №2. – 8с.: http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-2.fils/09mjbeeo_ua.pdf
13. Пат. 57856 Україна, МКИ G 01R 17/10. Квазізрівноважений міст для роздільного вимірювання одного з параметрів нерезонансних чотириелементних двополюсників: Пат. 57856 Україна, МКИ G 01R 17/10 / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець (Україна). – №2001042380; Заявлено 10.04.01. Опубл. 15.07.03. Бюл. №7.

АНОТАЦІЇ

Кравець О. М. Контроль електромагнітних параметрів асинхронних двигунів методом зрівноваження в системах частотно-керованого електропривода – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 2011.

Дисертацію присвячено вирішенню наукового завдання, яке полягає у вдосконаленні методів та засобів контролю електромагнітних параметрів асинхронних двигунів з використанням зрівноваження.

Обґрунтовано компенсаційно-мостовий метод контролю електромагнітних параметрів АД на основі використання чотирьохелементної та п'ятиелементної схем заміщення. За допомогою компенсаційної схеми формується напруга, що пропорційна похідній потокозчеплення, яка подається на мостову схему, де здійснюється порівняння струму АД зі струмом двохелементної або трьохелементної його схем заміщення ротора і кола намагнічування.

Запропоновано в якості інформативних параметрів нелінійних об'єктів використовувати інтегральні пасивні параметри, які характеризують нелінійність об'єкта і рівень спотворення. Кількість таких параметрів становить від одного до чотирьох в залежності від кількості нелінійних елементів та характеру нелінійності. Розглянуто фізичні основи контролю параметрів нелінійних об'єктів.

Розроблено структурні схеми та алгоритми перетворювачів параметрів АД на одній та на двох частотах напруги або струму живлення.

Створено моделі пристрою контролю в пакеті Matlab, за допомогою яких проаналізовано чутливість контролю параметрів АД з використанням порівняння похідної потокозчеплення.

Ключові слова: асинхронний двигун, частотно-керований електропривод, параметри схеми заміщення, метод зрівноваження.

Kravets O.M. The testing of the electromagnetic parameters of induction motors by equilibration in frequency-control drive systems. - Manuscript

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 - Electrical equipment and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2011.

The dissertation is devoted to solving a scientific problem, which is to improve the methods and means for testing the parameters of induction motors with trim.

Justified compensatory bridge method for testing the electrical parameters of blood pressure based on the use of four-element and five-element equivalent circuits. With the compensation circuit is formed by a voltage proportional to the derivative of flux linkage, supplied to the bridge circuit, which carried out a comparison of current blood pressure with the current two-element or three-element equivalent circuits to the rotor and the magnetizing circuit.

Proposed as informative parameters of nonlinear objects using integrated passive parameters characterizing the nonlinearity of the object and the level of distortion. The number of these parameters varies from one to four depending on the number of nonlinear elements and the nature of the nonlinearity. The physical basis of measurements of nonlinear objects.

The structural scheme and algorithms for the induction motor parameters transducers on a single and dual-frequency voltage or current supply are designed.

The models of converters in the package Matlab, by which analyzed the sensitivity of the parameters of blood pressure using a comparison of the derivative of flux linkage.

Keywords: induction motor, a frequency-controlled electric drive, the parameters of equivalent circuit, the method of balancing.

Кравец А.Н. Контроль электромагнитных параметров асинхронных двигателей методом уравнивания в системах частотно-управляемого электропривода. – Рукопись

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Винницкий

национальный технический университет, г. Винница, 2011.

Диссертация посвящена решению научной задачи, которая состоит в совершенствовании методов и средств контроля параметров асинхронных двигателей с использованием уравнивания.

Показано, что при контроле электромагнитных параметров асинхронных двигателей с использованием уравнивания в качестве информативных параметров можно использовать внутренне недоступные параметры асинхронного двигателя, например, производную потокосцепления и потокосцепление, обеспечивающие разделение контуров уравнивания. Установлено, что алгоритмы контроля, основанные на сравнении производной потокосцепления и потокосцепления, обеспечивают возможность определения электрических параметров асинхронных двигателей при нелинейности индуктивности намагничивания.

Получены условия представления асинхронных двигателей четырехэлементной схемой замещения. Для этого проводится сравнение двух зависимостей производной потокосцепления и (или) потокосцепления. И при их незначительных отклонениях, которые можно скорректировать настройкой параметров модели, делается вывод о возможности использования четырехэлементной схемы замещения.

Обосновано компенсационно-мостовой метод контроля электромагнитных параметров асинхронных двигателей на базе использования четырехэлементной и пятиэлементной схем замещения. С помощью компенсационной схемы формируется напряжение, пропорциональное производной потокосцепления, подаваемой на мостовую схему, где осуществляется сравнение тока асинхронного двигателя с током двухэлементной или трехэлементной его схем замещения ротора и цепи намагничивания.

Предложено в качестве информативных параметров нелинейных объектов использовать пассивные параметры, интегрально характеризующие нелинейность объекта и уровень искажения. Количество таких параметров составляет от одного до четырех в зависимости от количества нелинейных элементов и характера нелинейности. Рассмотрены физические основы контроля параметров нелинейных объектов.

Проанализированы алгоритмы контроля электрических параметров асинхронных двигателей при синусоидальном напряжении питания и широтно-импульсной модуляции синусоидального напряжения статора. Показано, что алгоритмы со сравнением производной потокосцепления значительно устойчивее при определении параметров мощных асинхронных двигателей, для которых характерно существенное искажение синусоидальности кривых сравниваемых составляющих потокосцепления. Показано также, что алгоритмы со сравнением потокосцепления можно использовать для определения параметров маломощных асинхронных двигателей, поскольку искажение синусоидальности кривых сравниваемых составляющих потокосцепления в этом случае незначительно.

Разработаны структурные схемы и алгоритмы преобразователей спектральных параметров, интегрально характеризующих объект в условиях несинусоидальности, а также параметров схемы замещения асинхронных двигателей на одной и на двух частотах напряжения или тока питания.

Созданы модели преобразователей в пакете Matlab, с помощью которых проанализированы чувствительность контроля параметров асинхронных двигателей с использованием сравнения производной потокосцепления.

Разработана структурная и принципиальная электрическая схема преобразователя параметров асинхронных двигателей на базе микроконтроллера AT91SAM7S256 с ядром ARM. Преимуществом данной схемы является высокая степень интегрированности его составных частей и высокое быстродействие. Разработана программа работы микроконтроллера преобразователя, которая позволяет осуществлять контроль параметров схемы замещения асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотно-управляемый электропривод, параметры схемы замещения, метод уравнивания.

Підписано до друку 05.09.2011 р. Формат 29,7 x 42 ¼ .
Наклад 100 прим. Зам. № 2011-137.
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-39