

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

Перепелиця Владислав Сергійович

УДК 621.313.33

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА  
З УРАХУВАННЯМ НАСИЧЕННЯ МАГНІТОПРОВОДУ І ВТРАТ В  
СТАЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ ПЕРЕВАГ У ПОРІВНЯННІ З  
ЛІНІЙНИМИ МОДЕЛЯМИ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат магістерської роботи

Краматорськ 2019

Робота виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, доцент  
Шеремет Олексій Іванович,  
Донбаська державна машинобудівна  
академія, завідувач кафедри  
«Електромеханічні системи  
автоматизації».

**Рецензент:**

---

---

---

Захист відбудеться «\_\_\_» грудня 2019 р. о \_\_\_ годині на засіданні державної екзаменаційної комісії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Донбаській державній машинобудівній академії на кафедрі ЕСА за адресою: 84313, м. Краматорськ, бульвар Машинобудівників, 39, 2-й корпус, ауд. 2133.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### **Актуальність теми.**

Асинхронний двигун на сьогоднішній день є найбільш використовуваним в промисловості, внаслідок своєї простоти, дешевизни і зручності в експлуатації. При використанні сучасних мікропроцесорних засобів керування і перетворювачів частоти можливо їх застосування в тих галузях виробництва, де раніше використовувалися лише кривошипно-шатунні механізми, а також інші складні механічні вузли обертового і поступального руху. До таких завдань належить поперечне коливання дроту в процесі наплавлення при зварюванні. Режим роботи двигуна є повторно-короткочасним, причому робочий цикл не перевищує однієї секунди.

Для реалізації класичних принципів векторного керування асинхронним електроприводом необхідна повна і достовірна інформація про поточні значення змінних стану. Разом з тим, в силу конструктивних особливостей асинхронного двигуна, електромагнітні змінні його роторного кола (струм і потокозчеплення ротора) важкодоступні для прямого визначення за допомогою вимірювальних перетворювачів. У цих умовах поточний стан об'єкта керування оцінюється непрямо за допомогою ідентифікаторів стану, що представляють собою обчислювальні пристрої, які працюють в реальному масштабі часу. Математична структура подібних обчислювальних пристроїв, призначених для аналогової або цифрової реалізації, будується за рівняннями динаміки, що описують електромагнітні процеси в асинхронному двигуні.

При побудові векторних систем керування виникає також задача отримання інформації про швидкість обертання приводу. Тут можливі два підходи. Перший полягає в установці датчика швидкості на валу. Другий підхід полягає в тому, щоб оцінювати швидкість побічно за рахунок введення

в структуру ідентифікатора моделі електромеханічних процесів в автоматизованому електроприводі.

Розробка математичної моделі асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі є актуальною задачею, оскільки в перспективі вона дозволить врахувати фактори, вплив яких не можна оцінити за допомогою стандартних підходів щодо моделювання асинхронних двигунів.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Вибір напрямку досліджень здійснено у відповідності до Закону України від 11.07.2001 р. № 2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та змінам до цього закону від 09.09.2010 р. № 2519-VI (2519-17), а також постанови Президії Національної Академії Наук України від 22.10.2010 р. № 294 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року».

Робота виконана в рамках держбюджетної теми кафедри «Електромеханічні системи автоматизації» ДДМА, «Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації».

### **Мета і задачі дослідження.**

Метою роботи є розробка математичної моделі асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі та дослідження її переваг у порівнянні з лінійними моделями..

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні задачі:

- здійснено аналіз сучасних автоматизованих асинхронних електроприводів, розглянута теорія і практичні аспекти їх використання;
- розглянуті сучасні перетворювачі частоти, акцентовано увагу на їх технічних особливостях та експлуатаційних характеристиках;

– виконана розробка математичних моделей асинхронних двигунів з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі;

– розглянуто питання здійснення оптимального керування струмами асинхронного двигуна;

– здійснено моделювання електродинамічних процесів, що відбуваються у трифазному асинхронному двигуні з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі.

**Об'єктом дослідження** є процеси електромагнітного перетворення енергії в асинхронних двигунах.

**Предметом** є вплив насичення магнітопроводу і втрат в сталі асинхронного двигуна на адекватність його математичної моделі.

**Методи досліджень** – методи математичного моделювання, чисельні методи обчислень, методи теорії автоматичного керування, методи ідентифікації параметрів асинхронного двигуна, методи математичної статистики.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено диференціальні рівняння асинхронного двигуна, які враховують зміну довжини вектора основного магнітного потоку, за допомогою диференціальної магнітної провідності, а зміну вектора основного магнітного потоку при його обертанні зі збереженням довжини – за допомогою статичної магнітної провідності.

2. За допомогою комп'ютерного моделювання встановлено, що застосування математичної моделі узагальненої електричної машини з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі дозволяє істотно підвищити точність розрахунків при моделюванні процесів електромеханічного перетворення енергії в асинхронному двигуні, оскільки

максимальна відносна похибка при розрахунку динамічних процесів знизилася до 2,34%.

### **Практичне значення отриманих результатів:**

Виконані дослідження мають практичну цінність, оскільки дозволяють підвищити точність ідентифікації параметрів асинхронних двигунів у системах векторного керування, позбутись зайвих датчиків.

**Особистий внесок здобувача** полягає у розробці та дослідження математичних моделей асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі та дослідження їх переваг у порівнянні з лінійними моделями.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Результати досліджень обговорювались на щорічній науковій конференції студентів ДДМА, м. Краматорськ, 2019 р.

### **Публікація результатів наукових досліджень.**

Матеріали магістерської роботи опубліковано в науковій статті у фаховому виданні «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії» (перереєстровано – Наказ МОН України № 326 від 04.04.2018).

**Структура і обсяг магістерської роботи.** Магістерська робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи складається із 135 сторінок (113 сторінок основної частини), 28 рисунків, 25 таблиць. Список використаних джерел містить 134 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить обґрунтування актуальності теми дослідження, її основну мету, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** здійснено критичний аналіз сучасного стану розвитку асинхронного електропривода.

Експлуатаційну надійність електроприводу забезпечує система захистів перетворювача, що включає в себе максимально-струмовий захист, захист від перегріву двигуна і перетворювача, від перевантаження, надмірних відхилень напруги живлення, обриву фази, міжфазного короткого замикання, замикання фази на землю і ін.

АД можна класифікувати за кількістю фаз і конструкцією ротора.

За кількістю фаз АД поділяються на однофазні, двофазні і трифазні.

Однофазні АД знаходять широке застосування в побутовій техніці. Двофазні АД застосовуються в системах автоматичного керування. Найбільшого поширення у багатьох галузях промисловості та спеціальної техніки отримали трифазні АД.

За конструкцією ротора АД класифікуються наступним чином: з порожнистим, масивним, короткозамкненим і фазним ротором.

Порожній ротор може бути виконаний з магнітного або немагнітного матеріалу. АД з порожніми і масивними роторами знаходять застосування в пристроях автоматики. АД з короткозамкненим ротором знаходять широке застосування в побутовій, спеціальній та промисловій техніці. АД з фазним ротором використовуються для приводу технологічних машин і механізмів зі складними умовами пуску.

Підприємствами електротехнічної промисловості України випускаються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором загальнопромислового призначення серій 4А, АІР, 5А, 6А, РА. Для роботи в складі частотно-регульованого електроприводу випускаються двигуни серії

АДЧР. Двигуни АДЧР випускаються в наступних модифікаціях: стандартного виконання; з незалежною вентиляцією; з датчиком швидкості (положення) і незалежною вентиляцією; з вбудованим гальмом; з вбудованим гальмом і незалежною вентиляцією; з вбудованим гальмом, датчиком швидкості (положення) і незалежною вентиляцією.

У другому розділі виконується огляд методів аналізу і синтезу асинхронних електроприводів, розглядаються актуальні проблеми і методи їх вирішення.

Математичні моделі АД є основою для дослідження процесів електромеханічного перетворення енергії. Особливу значущість математичні моделі АД набувають при розробці енергозберігаючих алгоритмів керування автоматизованого асинхронного електроприводу.

У математичній теорії електричних машин існують два принципово різних підходи до опису процесів електромеханічного перетворення енергії:

- 1) з позицій теорії поля, що базується на рівняннях Максвелла;
- 2) з позицій теорії електричних ланцюгів, що базується на рівняннях Кірхгофа.

В даний час найбільш прогресивним підходом до аналізу процесів електромеханічного перетворення енергії в електричних машинах є комбінований підхід, що поєднує в собі теорію поля і теорію електричних ланцюгів. Виходячи з наближеного уявлення картини магнітного поля в повітряному зазорі електричної машини, з достатньою точністю визначаються її параметри і записуються диференціальні рівняння рівноваги напруг на обмотках, з яких обчислюються струми або потокозчеплення. Знаючи закон зміни струмів або потокозчеплення, отримують залежність електромагнітного моменту і записують рівняння руху в залежності від характеру навантаження і її інерційності.

Для дослідження АД в динаміці традиційно використовується система рівнянь електромеханічного перетворення енергії в фазних координатних



осях. Дана система рівнянь нелінійна, оскільки диференціальні рівняння фаз двигуна містять в собі змінні коефіцієнти, а рівняння електромагнітного моменту містить добуток струмів, які є залежними змінними. Взагалі рівняння з нелінійними параметрами не мають точного рішення, однак, застосовуючи чисельні методи, можна отримати високу точність, необхідну при вирішенні дослідницьких завдань.

У зв'язку з цим при аналізі електромагнітних і електромеханічних процесів в АД, а також при розробці алгоритмів керування автоматизованого асинхронного електроприводу широко використовується перетворення координат, що дозволяє перейти від системи диференціальних рівнянь в фазних координатних осях, що містить змінні коефіцієнти, до системи диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами в нерухомій або обертовій двофазній системі координат. Перетворення координат нерозривно пов'язане з питаннями теорії узагальненої електричної машини.

У **третьому розділі** виконується розробка математичної моделі асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі та дослідження її переваг у порівнянні з лінійними моделями.

Вважаємо, що даний АД має трифазну симетричну обмотку, як на статорі, так і на роторі. При цьому параметри обмотки ротора приведені до статора. У сердечниках статора і ротора існують втрати, що складаються з втрат на гістерезис і вихрові струми. Для їх врахування введемо в модель трифазні еквівалентні обмотки втрат в сталі. Просторова модель трифазної асинхронної електричної машини з еквівалентними обмотками втрат в сталі статора і ротора приведена на рисунку 1.

По фазам  $A_1, B_1, C_1$  обмотки статора протікають струми  $i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}$ , а по фазам  $A_2, B_2, C_2$  обмотки ротора – струми  $i_{2A}, i_{2B}, i_{2C}$ . Фази обмотки статора зсунуті на кут  $2\pi/3$ , на такий же кут зсунуті фази обмотки ротора. За фазами еквівалентної обмотки втрат в сталі статора протікають струми  $\tilde{i}_{1A}, \tilde{i}_{1B}, \tilde{i}_{1C}$

аналогічно по фазах еквівалентної обмотки втрат в стали ротора протікають струми  $\tilde{i}_{2A}$ ,  $\tilde{i}_{2B}$ ,  $\tilde{i}_{2C}$ .

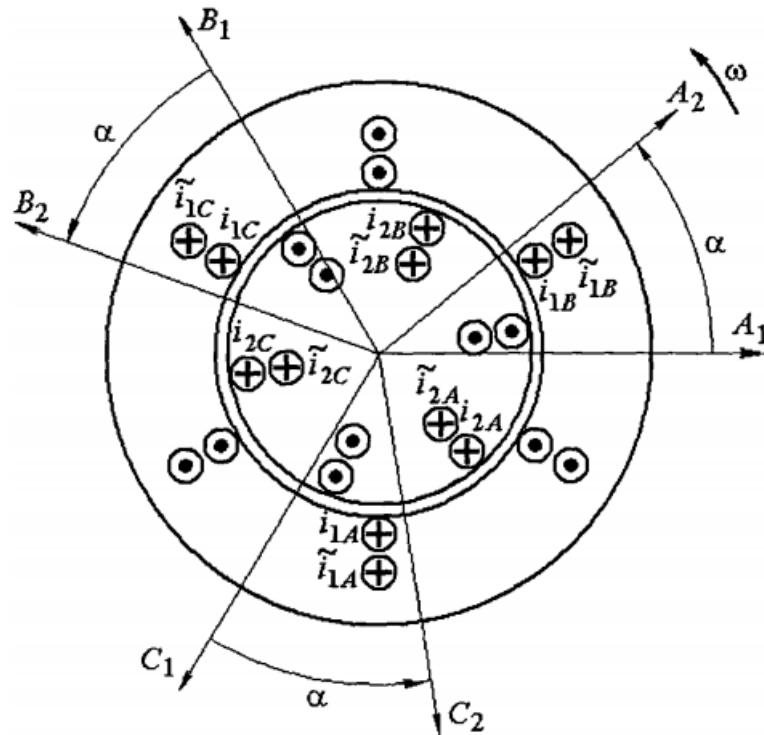


Рисунок 1 – Просторова модель трифазної асинхронної електричної машини з урахуванням втрат в стали

Для врахування насичення магнітопроводу будемо вважати, що амплітуда результуючої МДС пов'язана з основним магнітним потоком нелінійною залежністю – кривою намагнічування. Щоб аналітично задати залежність  $\Phi = f(F)$  можна скористатися виразом наступного вигляду:

$$\Phi = bF - c\sqrt{(F - F^0)^2 + a^2} + c\sqrt{(F^0)^2 + a^2}, \quad (1)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $F^0$  – емпіричні константи.

Вираз (1) дозволяє здійснити апроксимацію кривої намагнічування сплайнами і отримати функцію, представлену у вигляді кривої 1 на рисунку 2.

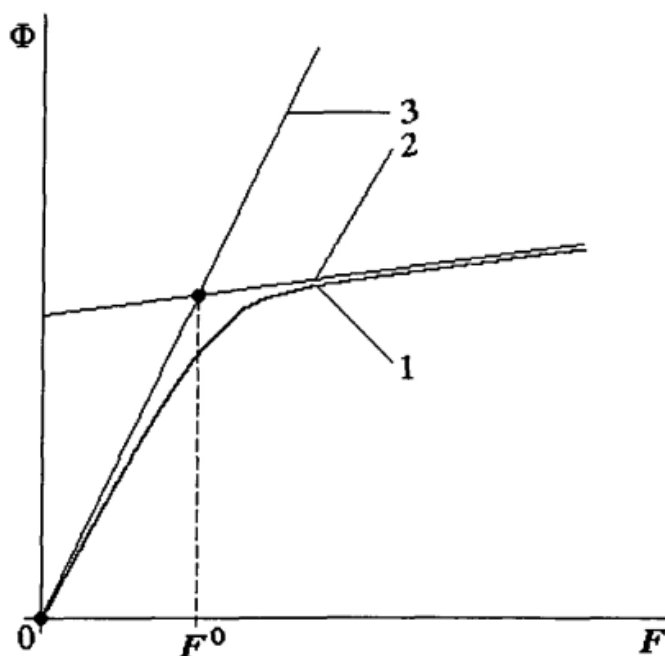


Рисунок 2 – Крива намагнічування  $\Phi = f(F)$

У **четвертому розділі** здійснено техніко-економічне обґрунтування виконаних досліджень. Розраховано оціночні результати вкладу магістра у наукові дослідження по магістерському проекту.

У **п'ятому розділі** наведено результати аналізу з охорони праці, а саме аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, заходи щодо забезпечення безпечних умов праці і дії при надзвичайних ситуаціях.

## ВИСНОВКИ

Аналіз процесів електромеханічного перетворення енергії в асинхронному двигуні з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі є доцільним з використанням математичного опису узагальненої електричної машини.

Насичення магнітної системи слід враховувати за допомогою нелінійного елемента, описуваного кривою намагнічування, а втрати в сталі введенням еквівалентних обмоток втрат в сталі, активні опори яких залежать від частоти.

Зміну довжини вектора основного магнітного потоку запропоновано враховувати за допомогою диференціальної магнітної провідності, а зміну вектора основного магнітного потоку при його обертанні зі збереженням довжини – за допомогою статичної магнітної провідності.

За допомогою комп'ютерного моделювання встановлено, що застосування математичної моделі узагальненої електричної машини з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі дозволяє істотно підвищити точність розрахунків при моделюванні процесів електромеханічного перетворення енергії в асинхронному двигуні, оскільки максимальна відносна похибка при розрахунку динамічних процесів знизилася до 2,34%.

## АНОТАЦІЯ

Перепелиця В.С. Розробка математичної моделі асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі та дослідження її переваг у порівнянні з лінійними моделями.

Магістерська робота за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2019.

Магістерська робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи складається із 135 сторінок (113 сторінок основної частини), 28 рисунків, 25 таблиць. Список використаних джерел містить 134 найменування.

Метою роботи є розробка математичної моделі асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі та дослідження її переваг у порівнянні з лінійними моделями.

Основні наукові результати магістерської роботи:

1. В результаті виконаних досліджень зміну довжини вектора основного магнітного потоку запропоновано враховувати за допомогою диференціальної магнітної провідності, а зміну вектора основного магнітного потоку при його обертанні зі збереженням довжини – за допомогою статичної магнітної провідності.

2. За допомогою комп'ютерного моделювання встановлено, що застосування математичної моделі узагальненої електричної машини з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі дозволяє істотно підвищити точність розрахунків при моделюванні процесів електромеханічного перетворення енергії в асинхронному двигуні, оскільки максимальна відносна похибка при розрахунку динамічних процесів знизилася до 2,34%.

Ключові слова: МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, МАГНІТОПРОВІД, ВТРАТИ В СТАЛІ

## ANNOTATION

Perepelytsia V.S. Development of a mathematical model of an asynchronous motor with regard to the saturation of the magnetic circuit and the losses in the steel and the study of its advantages in comparison with linear models.

Master's work in specialty 141 – "Power engineering, electrical engineering and electromechanics", Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, 2019.

The master's thesis consists of an introduction, five sections, general conclusions, a list of sources used. The total volume of the master's work consists of 135 pages (113 pages of the main part), 28 figures, 25 tables. The list of sources used contains 134 names.

The purpose of the work is to develop a mathematical model of an induction motor with a view of the saturation of the magnetic circuit and the losses in the steel and to study its advantages in comparison with linear models.

The main scientific results of the master's work:

1. As a result of the performed studies, the change in the length of the vector of the basic magnetic flux is proposed to be taken into account by differential magnetic conductivity and the change of the vector of the main magnetic flux during its rotation with the preservation of the length by means of static magnetic conductivity.

2. Using computer simulation, it is established that the use of a mathematical model of a generalized electric machine, taking into account the saturation of the magnetic circuit and the losses in the steel, can significantly increase the accuracy of calculations in the modeling of electromechanical energy conversion processes in an induction motor, since the maximum relative error in calculation is reduced 2.34%.

Keywords: MATHEMATICAL MODEL, ASYNCHRONOUS ENGINE, MAGNETIC CONDUCTOR, LOSS IN STEEL

Перепелиця Владислав Сергійович

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА  
З УРАХУВАННЯМ НАСИЧЕННЯ МАГНІТОПРОВОДУ І ВТРАТ В  
СТАЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ ПЕРЕВАГ У ПОРІВНЯННІ З  
ЛІНІЙНИМИ МОДЕЛЯМИ**

Підп. до друку

Формат 60×90/16

Офсетний друк

---

Умов. друк. арк. – 0,58

Тираж 1 прим.

Замовлення №

---

ДДМА, 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72