

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ ПОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ НЕСИМЕТРІЇ ПАРАМЕТРІВ РОТОРА

Васьковський Ю.М., докт. техн. наук, Гайденок Ю.А., Нацик О.В.,  
 Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"  
 Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, корп. 20, кафедра електромеханіки  
 тел. (044) 454-95-18, e-mail: ntuukafem@ua.fm

*Виконано моделювання та дослідження методами теорії поля механічних та робочих характеристик асинхронного електродвигуна в несиметричному режимі роботи при обриві стрижнів ротора. Досліджено особливості розподілу електромагнітного поля в активній зоні двигуна при наявності ушкоджених стрижнів ротора.*

*Выполнено моделирование и исследование методами теории поля механических и рабочих характеристик асинхронного электродвигателя в несимметричном режиме работы при обрыве стержней ротора. Исследованы особенности распределения электромагнитного поля в активной зоне двигателя при наличии поврежденных стержней ротора.*

### ВСТУП

Незважаючи на те, що дослідження несиметричних режимів роботи електричних машин (ЕМ) триває практично від початку їх створення і по цій проблемі опубліковано багато наукових праць, точність розрахунків параметрів і характеристик ЕМ в несиметричних режимах роботи в багатьох важливих випадках залишається незадовільною. Відомо, що несиметричні режими виникають внаслідок відхилення умов роботи машин від нормальних, скажімо через несправності в конструкції чи аварії в електромережі. В окремих випадках несиметричні режими використовуються спеціально - для отримання характеристик ЕМ з особливими властивостями.

Основними методами математичного аналізу, що і досі використовуються для розрахунку характеристик ЕМ в несиметричних режимах роботи, є методи, що ґрунтуються на лінійній теорії ЕМ. Лінійна теорія базується, як відомо, на припущенні, що електромагнітні зв'язки між обмотками ЕМ є лінійними, тобто магнітні потокозчеплення обмоток лінійно (пропорційно) залежать від їх струмів. Прийняття такого припущення дозволяє при аналізі машин широко використовувати принцип суперпозиції. Тому основним методом дослідження несиметричних режимів роботи ЕМ і досі залишається метод симетричних складових, що також ґрунтується на принципі суперпозиції. Проте експериментальні випробування і досвід експлуатації показують, що відхилення характеристик електричних машин в несиметричних режимах роботи від розрахованих за методом симетричних складових є надзвичайно значними (для деяких випадків відхилення по струму або електромагнітному моменту може сягати кількох разів). Таким чином, існуючі методи розрахунку характеристик ЕМ в несиметричних режимах роботи не задовольняють сучасні вимоги до достовірності результатів математичного моделювання характеристик ЕМ, що особливо важливо на етапі їх проектування.

Альтернативним підходом до розрахунку ЕМ в несиметричних режимах є безпосередній розрахунок характеристик машин за результатами аналізу їх електромагнітного поля. Польовий підхід дозволяє не тільки врахувати складну геометрію активної зони

машини, розподіл струмів по пазах статора і ротора, але й строго врахувати нелінійність властивостей матеріалів і тому взагалі не потребує використання принципу суперпозиції.

В попередніх роботах авторів польовий метод аналізу був використаний для розрахунку характеристик тягових асинхронних двигунів, що працюють в умовах несиметрії напруги живлення обмотки статора. Було доведено, що при цьому виді несиметричного режиму роботи польовий метод аналізу дозволяє отримати більш точні і достовірні результати моделювання.

Метою запропонованої статті є розробка методів та алгоритмів польового аналізу для дослідження іншого виду несиметричних режимів роботи короткозамкнених асинхронних двигунів (АД), що викликані несиметрією конструкції обмотки ротора. В статті також зроблена порівняльна оцінка розрахункових результатів, отриманих польовим методом і методом симетричних складових.

На практиці, при експлуатації асинхронних двигунів досить часто трапляються випадки виходу із ладу або порушення нормальної роботи двигунів через обрив стрижнів короткозамкненої обмотки ротора. Найчастіше це трапляється з двигунами, що працюють на електротранспорті [3] та в інших складних умовах експлуатації. Обрив стрижнів викликає несиметрію розподілу струмів в стрижнях ротора, що призводить до перегріву двигуна, появи паразитних моментів, погіршення віброакустичних показників тощо. Це призводить до перебоїв в роботі обладнання електровозів, виробничих ліній та різноманітного устаткування. Тому правильний і точний розрахунок характеристик АД при наявності несиметрії ротора є надзвичайно важливим як на етапі проектування, так і для подальшої експлуатації електродвигунів.

За об'єкт дослідження було обрано серійний АД з короткозамкненим ротором 4А180М4У3 потужністю 25 кВт, фазною напругою 220 В, синхронною частотою обертання 1500 об/хв. Двигун має 48 пазів на статорі і 38 на роторі.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ

Математична модель та методика розрахунку характеристик АД докладно викладена в роботах [1, 2, 4]. Зупинимось на особливостях польових розрахунків характеристик АД при обриві стрижнів короткозамкненої обмотки ротора. Як відомо, після формування конфігурації розрахункової області у відповідних підобластях (пазах статора) задається густина струму (джерело поля) та фізичні властивості матеріалів в усіх підобластях, з яких складається розрахункова область. Розглянемо, яким чином можливо врахувати наявність обірваних стрижнів ротора. Нехай два стрижня ротора АД типу 4A180M4У3 під номерами 3 і 4 обірвані. Задамо в цілих стрижнях (36 пазів ротора з усіх 38) електропровідність матеріалу, що дорівнює електропровідності алюмінію  $\sigma = \sigma_{Al}$ , а в останніх 2-ох (№3 і №4), що залишилися, задамо  $\sigma = 0$ . Далі за алгоритмом, створюємо сітку скінченних елементів і проводимо розрахунок поля. Головною відмінністю розрахунку поля при несиметрії ротора є необхідність вести розрахунок по всіх трьох фазах статора. Це пов'язано з тим, що при обриві стрижнів обмотки ротора у повітряному проміжку машини виникає еліптичне магнітне поле, яке призводить до несиметрії ЕРС фаз обмотки статора. У таких випадках дещо збільшується процесорний час, потрібний для розрахунку та аналізу характеристик двигуна. Після розрахунку поля знаходяться характеристики АД за методикою, яка описана в [1, 2, 4].

Сітка скінченних елементів (рис. 1) нараховує 117700 елементів і відповідно 59063 вузла, причому щільність елементів в пазах ротора значно більше ніж в інших областях АД через необхідність точнішого врахування ефекту витіснення струму.

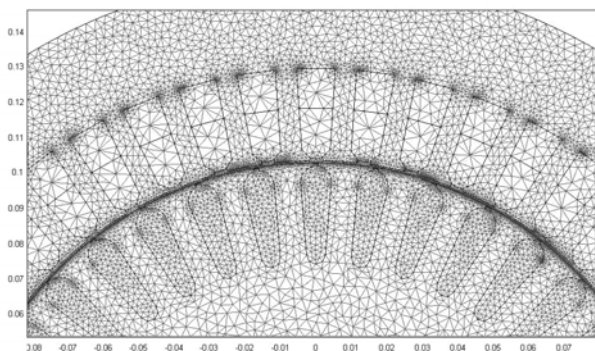


Рис. 1. Сітка скінченних елементів 4A180M4У3

### РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Згідно з розробленою методикою знаходимо розподіл векторного магнітного потенціалу. Для порівняння наведемо розподіл ізоліній векторного магнітного потенціалу АД в номінальному режимі при симетричному роторі (рис. 2а) та при обриві двох стрижнів (рис. 2б). Як видно з рисунків, при обриві стрижнів значно підвищується щільність силових ліній в зубцях, розташованих біля ушкодженої ділянки. Це спричиняє значне підвищення магнітної індукції в зубцях і зниження  $\cos \phi$ .

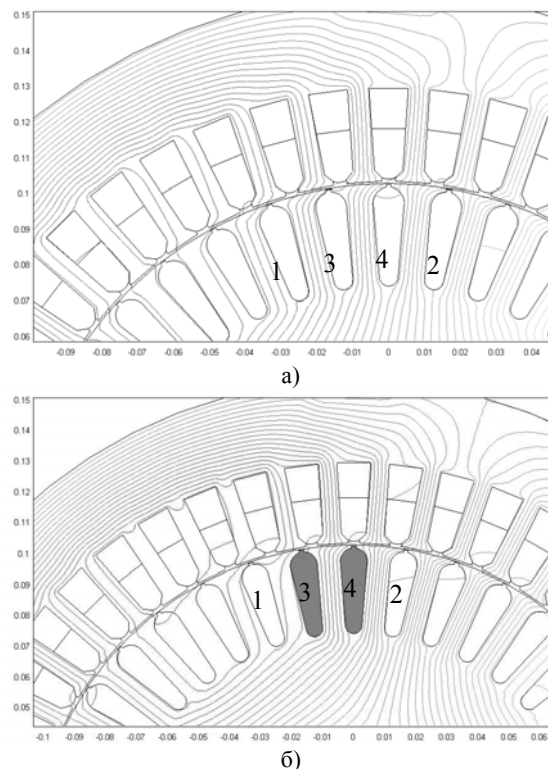


Рис. 2. Розподіл векторного магнітного потенціалу АД в номінальному режимі

На рис. 3 приведені картини розподілу магнітної індукції для номінального режиму в зубцово-пазовій зоні двигуна, причому рисунок а) відповідає симетричному режиму, а б) – несиметричному.

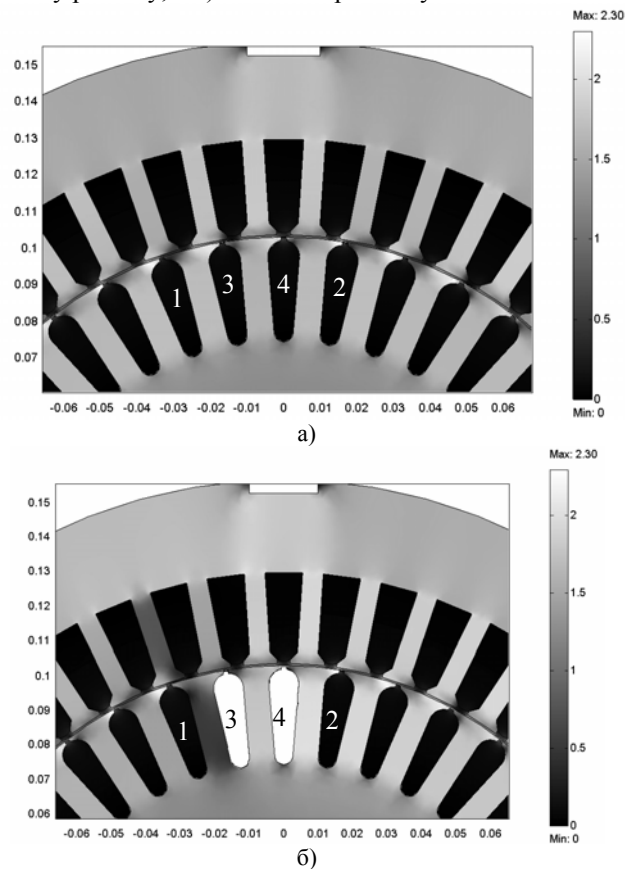


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції АД в номінальному режимі

Аналізуючи розподіли векторного магнітного потенціалу (рис. 2) і магнітної індукції (рис. 3) можна чітко відзначити суттєву деформацію магнітного поля в порівнянні з симетричним режимом. Зокрема в районі пазів ротора 2, 3, 4 спостерігається значне ущільнення силових ліній векторного магнітного потенціалу і, отже, істотного (більше ніж на 15%) збільшення магнітної індукції. Разом з тим в зубці між пазами 1 і 3 індукція зменшилася на 60%. На рисунку також можна побачити значне деформування магнітного поля і в магнітопроводі статора, що у свою чергу викликає нерівномірність розподілу потокозчеплень і ЕРС фаз статора.

Обрив двох стрижнів обмотки ротора і пов'язане з цим деформування магнітного поля викликає нерівномірність розподілу густини струму в стрижнях обмотки ротора машини. На рис. 4а зображено розподіл струмів при симетричному режимі АД, на рис. 4б – при обриві двох стрижнів ротора. Так густина струму в 3-му пазу ротора зростає на 35%, в 4-му – на 20%, що викликає значне (25 - 70%) збільшення, пропорційних квадрату струму електричних втрат у вказаних стрижнях. Крім того, пошкодження стрижнів ротора викликає пульсацію і несиметрію струмів в обмотці статора. Так у фазі статора, яка у даний момент часу знаходиться навпроти пошкодженої ділянки струм зменшується приблизно на 20% в порівнянні з іншими фазами.

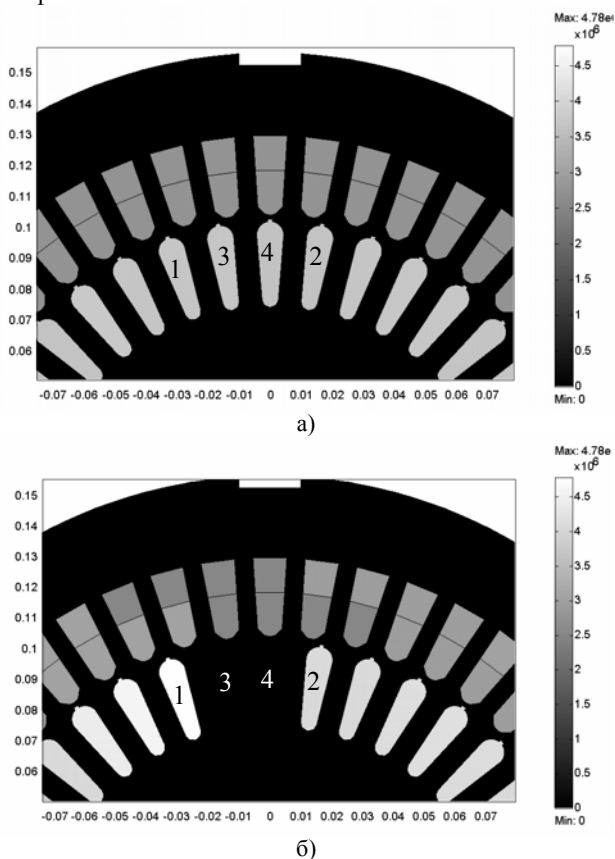


Рис. 4. Розподіл густини струмів в пазах статора і ротора АД в номінальному режимі

На рис. 5а і 5б показано розподіл векторного магнітного потенціалу при пуску – при ковзанні  $s=1$ .

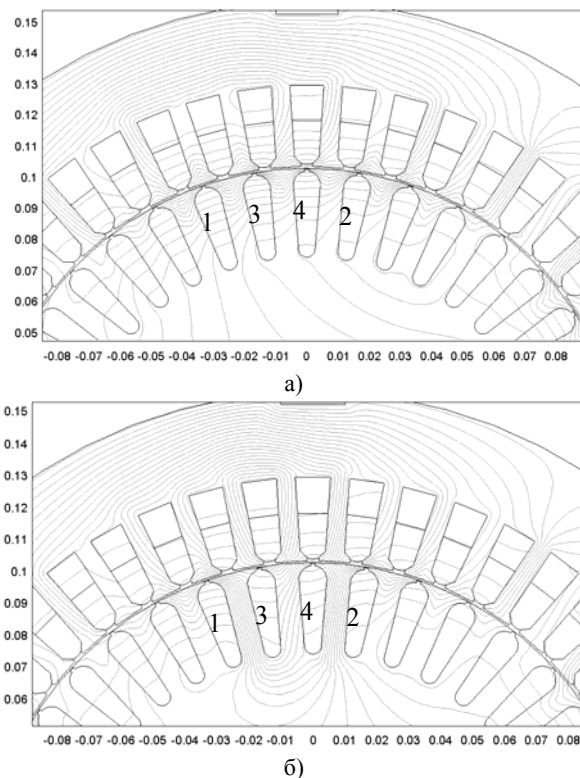


Рис. 5. Розподіл векторного магнітного потенціалу АД при пуску

На рис. 6 приведені механічні характеристики досліджуваного АД, який працює в несиметричному режимі в умовах відсутності двох стрижнів ротора (пунктирна лінія) і, для порівняння, механічні характеристики при симетричному режимі (суцільна лінія).

З графіків видно, що при обриві стрижнів при тій же потужності  $P2$  зростають струми в обмотках машини, зокрема в обмотці статора струм  $I1$ . До того ж амплітуди струмів в окремих фазах пульсують на 20-30%. Це приводить до таких небажаних ефектів, як пульсації моменту і "гойдання" ротора.

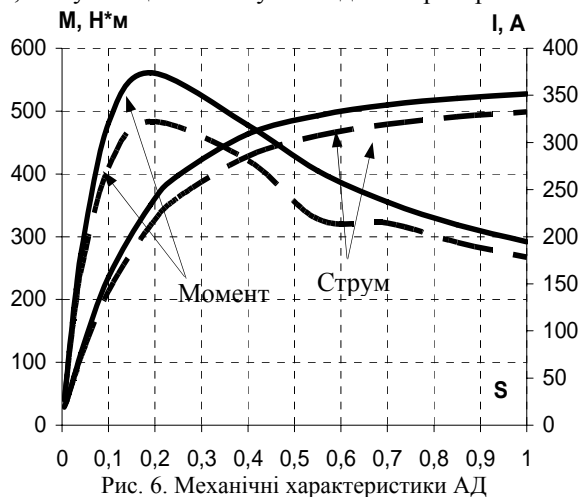


Рис. 6. Механічні характеристики АД

Ці чинники обумовлюють збільшення втрат і зниження ККД. Причому електричні втрати зростають в результаті збільшення струму, а втрати в сталі – через додаткових пульсацій магнітного потоку і значного зростання індукції в окремих частинах машини. Що

стосується  $\cos \phi$ , то він також знижується в результаті зростання реактивної потужності і втрат в сталі.

Польовий аналіз дозволяє також розрахувати електричні втрати в стрижнях ротора. В табл. 1 приведено збільшення електричних втрат в стрижнях №1 і №2 та загалом в обмотці ротора відносно показників симетричного режиму.

Таблиця 1

	Рст 1, в.о.	Рст 2, в.о.	Рел2
$P$ (несим. при $P2=25$ кВт)	1,65	1,25	1,10
$P_{п}$ (несим. при пуску)	2,59	2,54	0,95

З таблиці 1 видно, що втрати в стрижнях, які знаходяться в безпосередній близькості від uszkodженої ділянки, зростають приблизно в 1,3-2,5 рази, причому більше значення відповідає режиму пуску двигуна, а менше – номінальному режиму роботи. Разом з тим, нагрів в цих стрижнях збільшується на 150-160%. Тому, для збереження подальшої працездатності машини необхідно уникати частих пусків, особливо під навантаженням. Використання ж uszkodженого АД в реверсивному режимі взагалі неприпустимо, оскільки, навіть при реверсі без навантаження втрати і нагрів ротора значно перевищуватимуть допустимі і до того ж, при реверсі, час знаходження машини в перехідному режимі значно збільшується.

Як видно з рис.6 механічні характеристики АД при несиметрії ротора мають незначний провал при ковзанні  $s=0,5$ , що цілком відповідає теоретичним уявам щодо особливостей вигляду механічних характеристик АД в несиметричних режимах роботи при несиметричній конструкції ротора. Незначна величина провалу у даному випадку пов'язана з тим, що два зруйнованих стрижня складають незначну частку від загальної кількості стрижнів ротора (38). При збільшенні їх кількості провал механічної характеристики також збільшується.

Польовий аналіз є універсальним та дозволяє розрахувати характеристики АД і у випадках більш складної та комбінованої руйнації обмотки ротора, наприклад при обриві кількох стрижнів, що лежать в різних місцях клітки ротора.

## ВИСНОВКИ

1. Традиційний метод аналізу несиметричних режимів роботи АД, що базується на використанні принципу суперпозиції, не забезпечує необхідної точності розрахунків характеристик АД, особливо при аналізі несиметричних режимів, пов'язаних з несиметричністю конструкції короткозамкненої обмотки ротора. На протигагу методу симетричних складових польовий метод аналізу забезпечує високу достовірність результатів, оскільки дозволяє строго врахувати не тільки складну конфігурацію активної зони АД, але й нелінійність фізичних характеристик конструктивних матеріалів.

2. Наслідком обриву стрижнів є значна деформація магнітного поля, що призводить до надмірного на-

сичення окремих ділянок магнітопроводу, спотворення кривої ЕРС, а також до зниження  $\cos \phi$  і ККД.

3. В стрижнях, що знаходяться поруч з uszkodженими значно збільшуються електричні втрати та нагрів. Це призводить до подальшої лавиноподібної руйнації стрижнів ротора, що межують з uszkodженою ділянкою, до повної зупинки ротора. Крім того, при поступовому виходу з ладу стрижнів збільшується і ступінь несиметрії, що призводить до додаткового навантаження на обмотку статора. Таким чином недоцільно використовувати АД з обірваними стрижнями, навіть якщо їх кількість незначна.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Васьковский Ю.Н., Гайдено Ю.А., Цьвинский С.С. Определение интегральных характеристик электрических машин методами теории электромагнитного поля // "Электротехника і електромеханіка", №1, 2006, С. 28 – 32.
- [2] Васьковский Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії: – Київ, НТУУ "КПІ", 2003. – 164 с.
- [3] Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А., Горчаков Е.В. Тяговые электрические машины и трансформаторы. – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.
- [4] Папазов Ю.Н., Чувашев В.А., Васьковский Ю.Н., Гайдено Ю.А. Анализ механических характеристик короткозамкнутых асинхронных электродвигателей методами теории электромагнитного поля // "Электротехника і електромеханіка", №1, 2005, С. 45 –47.

Надійшла 07.09.2006