

О.С. КОСУХІНА, к.т.н., доцент

Р.М. ПОЛЯКОВ, аспірант

О.М. С'ЯНОВ, д.т.н., професор

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Математичне моделювання динамічних режимів роботи асинхронного двигуна з масивним феромагнітним ротором

Побудовано математичну модель асинхронного двигуна з масивним феромагнітним ротором з врахуванням зовнішніх кіл. Розглянуто симетричні і несиметричні режими роботи двигуна. Отримано графіки перехідних процесів, зображено розподіл електромагнітного поля в пазах статора і в роторі при динамічних і квазістатичних режимах роботи асинхронного двигуна.

Постановка проблеми

Розвиток електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) і нові числові математичні методи значно розширили можливості розв'язання диференціальних рівнянь і дослідження перехідних електромагнітних і механічних процесів в електромеханічних перетворювачах. Одночасно з цим з'явилися нові можливості розв'язання задач високої складності і точності. Висока швидкість обчислень на ЕОМ дозволяє використовувати польові моделі в середовищах з нелінійними і періодичними коефіцієнтами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На сьогоднішній день більшість моделей асинхронних двигунів (АД) з масивним феромагнітним ротором (МФР) будуються в нелінійному польовому середовищі [1], але без урахування зовнішніх кіл. В даній роботі розроблена математична модель АД з МФР в польовому середовищі з урахуванням зовнішніх кіл і обертання ротора. Це дає змогу керувати режимами роботи АД із заданими фізичними параметрами в зовнішній ланцюговій схемі і таким чином дослідити перехідні процеси в АД під час реверсу, обриву однієї з фаз або зміни частоти напруги живлення.

Формулювання мети дослідження

В роботі представлена математична модель АД з МФР в польовій постановці з урахуванням зовнішніх ланцюгових схем для проведення досліджень динамічних і квазістатичних режимів роботи двигуна. Це дає змогу керувати режимами роботи АД із заданими фізичними параметрами в зовнішній ланцюговій схемі і таким чином дослідити перехідні процеси в АД під час реверсу, обриву однієї з фаз або зміни частоти напруги живлення.

Виклад основного матеріалу

При розробці математичної моделі прийнято, що розглядається АД в площині і не враховуються торцеві частини. Польова математична модель побудована на основі геометричних параметрів АД із зовнішніми колами. Електромагнітне поле в поперечному перерізі АД описується рівняннями поля відносно векторного магнітного потенціалу наступного виду:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \sigma \left(v_x \frac{\partial A}{\partial x} - v_y \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \operatorname{grad} \phi + J, \quad (1)$$

де v — магнітний опір матеріалу, A — векторний магнітний потенціал, σ — електропровідність матеріалу, v_x і v_y — швидкість обертання ротора, ϕ — електричний потенціал, J — щільність струму.

Для окремих частин двигуна рівняння набуває вигляду:

$$-\nabla(v \nabla A) = \begin{cases} 0, & \text{у повітряному проміжку} \\ 0, & \text{у осереді статора} \\ \frac{W i_{01}}{\Omega}, & \text{в пазах статора} \\ -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \left(v_x \frac{\partial A}{\partial x} - v_y \frac{\partial A}{\partial y} \right), & \text{в осереді ротора} \end{cases} \quad (2)$$

де W — кількість витків обмотки фази; i_{01} — струм в обмотках статора; Ω — площа, яку займає котушка в пазах [2].

Щільність струму в обмотках статора визначається за виразом:

$$J = \frac{W i_{01}}{\Omega}. \quad (3)$$

Рівняння рівноваги напруг фази обмотки статора має вигляд:

$$u_{01} = r_{01} i_{01} + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (4)$$

де u_{01} — миттєве значення напруги фази в обмотці статора; r_{01} — активний опір фази обмотки статора; i_{01} — струм в обмотці статора; Ψ — повний потік-зчеплення фази обмотки статора [3].

Представимо повний потік-зчеплення фази обмотки статора в рівнянні (4) через векторний магнітний потенціал. Так як, рівняння (2) не дозволяє врахувати магнітне поле лобових частинах АД, введемо індуктивність лобових частин. Тоді рівняння прийме вигляд:

$$u_{01} = r_{01} i_{01} + \frac{W l}{\Omega} \int \frac{\partial A}{\partial t} d\Omega + L_l \frac{di_{01}}{dt}, \quad (5)$$

де L_l — індуктивність розсіяних лобових частин фази обмотки статора.

Електромагнітний момент визначається за виразом:

$$M = \frac{dW(\theta, i)}{d\theta}, \quad (6)$$

де M — електромагнітний момент на валу ротора; W — електромагнітна енергія; θ — кут повороту ротора [1].

Для розрахунку та дослідження властивостей двигунів застосовано метод кінцевих елементів, реалізований у програмному середовищі ANSOFT MAXWELL. Це дозволило проектувати і досліджувати двовимірні і тривимірні моделі двигунів, точно розра-

ховувати статичні, квазістатичні поля, а також перехідні процеси в польових задачах.

Для виконання розрахунків взято двигун типу 4AA63A4Y3. Обмотка статора представлена планарно в одній площині з відповідним заданим напрямком струму в кожному з пазів. Таким чином маємо поперечний переріз асинхронного двигуна (статор, ротор, обмотка в пазах.). Побудована геометрична модель двигуна розбивається на кінцеву кількість елементів, за якими потім і розраховується розподіл електромагнітного поля.

Алгоритм програми може автоматично генерувати «сітку» з трикутників на об'єкт, але краще це робити безпосередньо, адже від цього залежать і точність розрахунків розподілу електромагнітного поля, точність температурних характеристик тощо.

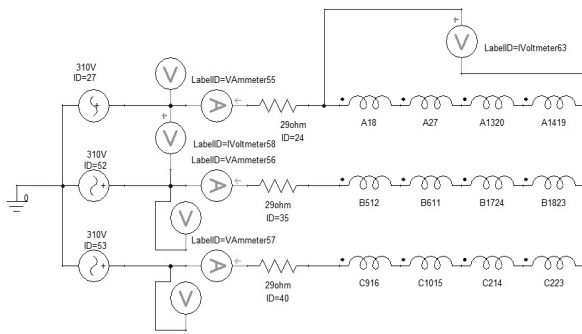


Рис. 1. Схема живлення АД від мережі 380В в Maxwell Circuit Editor

Обмотки статора в зовнішній схемі, розробленій для математичної моделі, представлені згідно із зазначеними напрямками струму в останній. Опір реальної обмотки враховано резисторами, які ввімкнено послідовно з джерелом гармонійного трифазного струму. Форми і величини струму та напруги знімаються з відповідних вимірювальних приладів. Розроблена схема для моделювання АД із заданими параметрами, представлена на рис. 1, експортується в польову модель.

В результаті проведеного моделювання АД в режимі короткого замикання (КЗ) отримано квазістатичні характеристики у вигляді розподілу ліній рівного рівня (рис. 2) і струм в обмотці статора та момент на валу двигуна в залежності від часу (рис. 3).

Як видно з графіків, момент на валу ротора носить коливальний характер, а струм в перший напівперіод склав майже 4А.

На рис. 4 зображено розподіл вектора магнітного потенціалу в АД з МФР при ідеальному холостому ході (ІХХ). На рис. 5 показано перехідний процес пуску АД.

Як видно з представлених вище результатів, струм в АД в момент часу 0.01с дорівнює 3.75А; коли швидкість обертання ротору АД становить 1500 об/хв, струм зменшується до значення 1.25А. Момент після виходу на 1500 об/хв стабілізується. Щодо розподілу магнітної індукції, то, як видно з рис. 4, в режимі ІХХ вона має спіралеподібний характер.

За допомогою розробленої моделі і відповідної зовнішньої схеми живлення розроблена модель реверса АД.

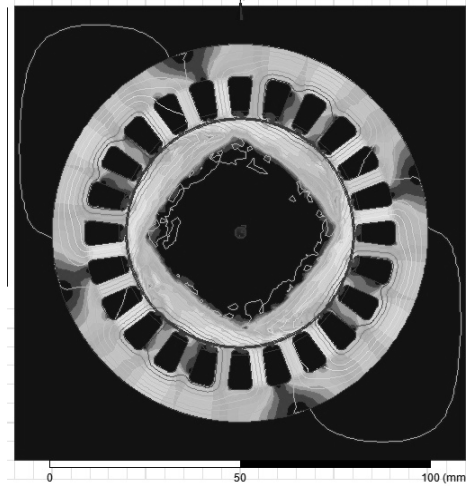
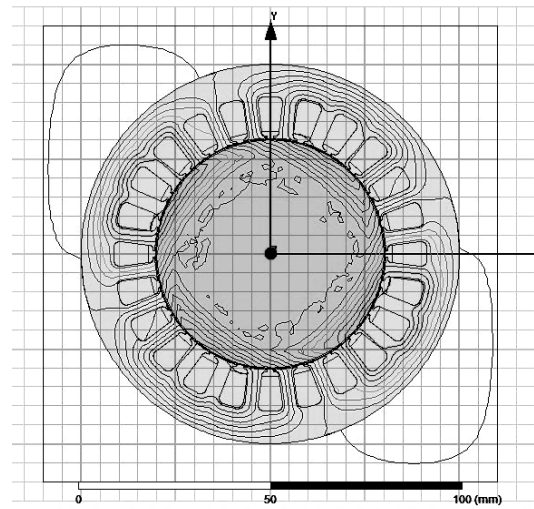


Рис. 2. Розподіл векторного магнітного потенціалу магнітної індукції в режимі КЗ

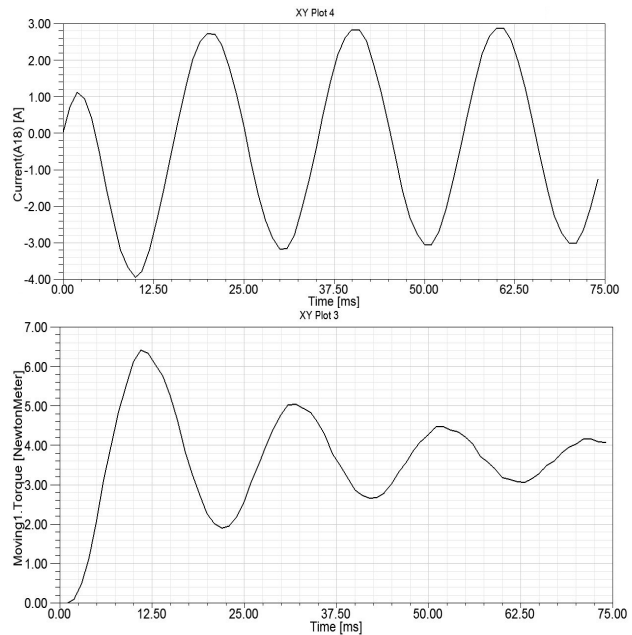


Рис. 3. Струм в обмотці фази А та момент на валу ротора в режимі КЗ

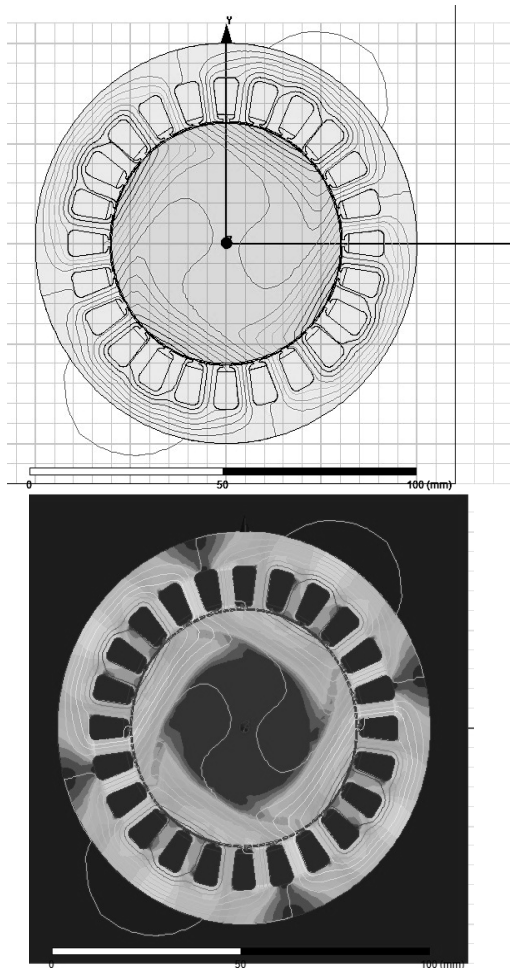


Рис. 4. Розподіл вектора магнітного потенціалу та розподіл магнітної індукції при ІХХ

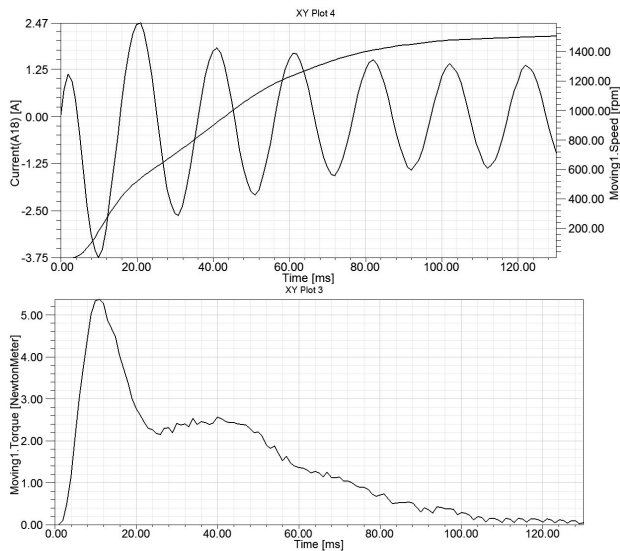


Рис. 5. Пуск АД і вихід на номінальну швидкість та момент на валу АД при ІХХ

Відповідна схема зображена на рис. 6. Режим реверсу в схемі реалізовано завдяки використанню спеціальних генераторів-лічильників, які керують силовими ключами. Перші три лічильники відраховують час, протягом якого АД виходить на номінальну швидкість, як тільки номінальна швидкість досягнута, вмикаються інші три генератори-лічильники, які через відповідні ключі в зворотному напрямку подають в АД трифазну напругу живлення, тим самим змінюючи напрямку обертання останнього. При цьому перші три переходять в стан «логічного нуля» і не пропускають напругу через ключі.

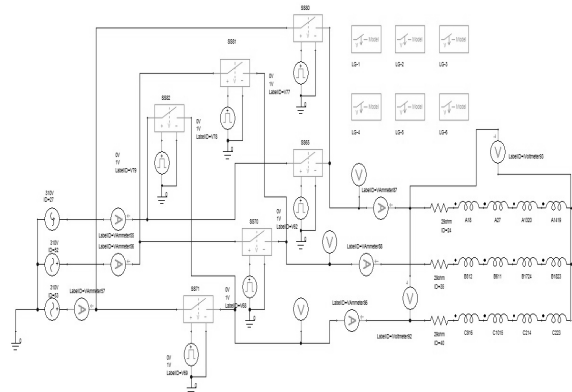


Рис. 6. Схема для реалізації режиму реверсу АД в середовищі Maxwell Circuit Editor

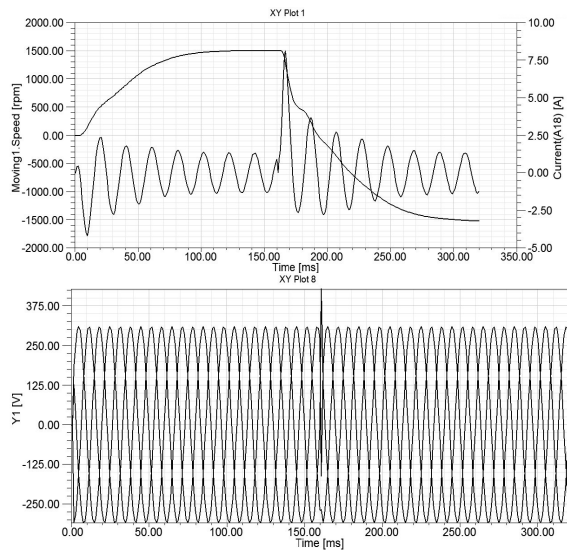


Рис. 7. Струм в АД і швидкість при реверсі та напруга живлення АД з реверсом фаз

На рис. 7—8 зображено графіки перехідних процесів в АД в режимі реверсу. З представлених рисунків можна бачити, що струм в АД під час перемикавання фаз виріс майже втричі (рис. 7). В момент перемикавання напруги фаз помічено деякий сплеск, обумовлений індуктивністю самого двигуна (рис. 7)

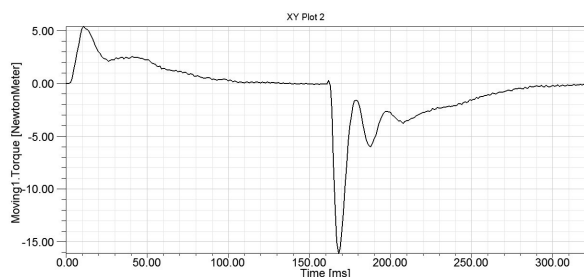


Рис. 8. Момент на валу ротора в режимі пуску та реверса

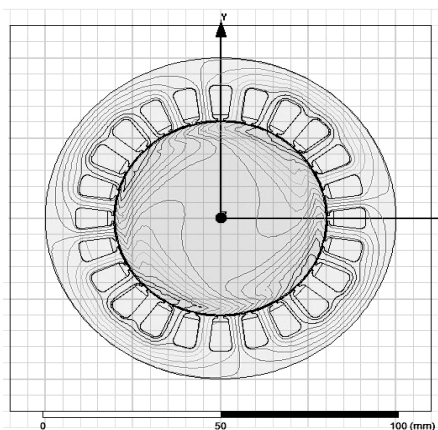


Рис. 9. Розподіл вектора магнітного потенціалу в АД у несиметричному режимі

Момент на валу ротора, зображений на рис. 8, свідчить про те, що АД в момент реверсу перейшов в режим генератора. Період реверсу фаз в схемі закладено із затримкою в 0.01с.

В роботі також була розглянута модель для несиметричного режиму, яка має лише один генератор-лічильник. В цьому випадку АД в польовій задачі розганяється до своєї номінальної швидкості, в певний момент часу на виході керуючого генератор-лічильника з'являється «логічний нуль», що обумовлює розмикання силового ключа, через який на АД подається одна із фаз. Таким чином в моделі реалізовано несподіваний обрив однієї з фаз або несиметричний режим роботи АД з МФР.

Деякі результати моделювання несиметричного режиму роботи АД представлені на рис. 9—10. При

асиметричному режимі роботи АД з МФР, як це видно з рис. 9, швидкість починає коливатись і повільно спадає, як тільки одна з фаз зникає. Характерною ознакою такого режиму є момент, який набуває коливального характеру синусоїди, як бачимо на рис. 10.

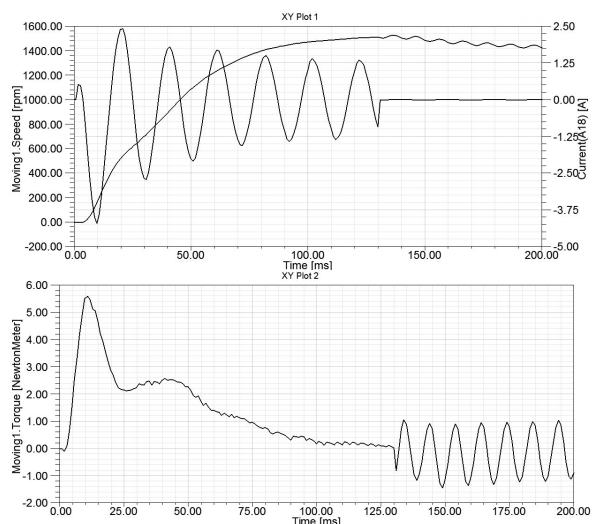


Рис. 10. Пуск АД та перехід в несиметричний режим

Висновки та перспективи подальших досліджень

В ході роботи розроблено польову математичну модель АД з МФР з урахуванням зовнішніх кіл. Виконано математичне моделювання симетричних та несиметричних режимів роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теорія, технологія та режими роботи асинхронних двигунів з двошаровим ротором: монографія // В.С.Могильников, О.М.Олейников; під заг. ред. О.М.Олейникова. 2-е вид. переробл. і доп. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2008. – 350с.
2. Індукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором: монографія/ О.В.Качура, С.В.Количев, О.С.С'янов – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. – 209 с.
3. Постников В.И. Волновые параметры массивнороторных электрических машин / Постников В.И. – К.: Наук. думка, 1986. – 184 с.

пост. 21.06.2017