

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Розроблено польову математичну модель і досліджено розподіл електромагнітного поля в активній зоні компенсованого асинхронного двигуна. Обґрунтовано фундаментальну умову внутрішньої ємнісної компенсації, якої слід дотримуватися при створенні компенсованих асинхронних двигунів.

Разработана полевая математическая модель и исследовано распределения электромагнитного поля в активной зоне компенсированного асинхронного двигателя. Обосновано фундаментальное условие оптимальной внутренней емкостной компенсации, которого нужно придерживаться при создании компенсированных асинхронных двигателей.

ВСТУП

Трифазний асинхронний двигун (АД), що складає основу електроприводу робочих машин, характеризується високими номінальними енергетичними показниками. Проте внаслідок технологічних похибок при виготовленні та важких умов експлуатації реальні енергетичні показники АД значно відрізняються від паспортних даних, що збільшує витрати електроенергії та знижує енергоефективність споживачів. Тому актуальним є вирішення проблеми підвищення енергетичних показників АД, зокрема його коефіцієнта потужності. Одним з ефективних методів розв'язання зазначеної проблеми є застосовувати внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності [2-4].

Внутрішня ємнісна компенсація реактивної потужності в асинхронному двигуні здійснюється шляхом поділу кожної фази обмотки статора на дві частини, які просторово зміщені між собою в пазах осердя статора на заданий кут θ і з'єднані за схемою поворотного автотрансформатора (АТ) на електричну ємність (рис. 1,а). Такі АД, виконані на базі серійних, називаються компенсованими АД (КАД). Кількість витків полуфаз статора, переріз їх проводу, кут просторового зміщення між ними можуть бути довільними ($\theta = 0 \dots 2\pi$). Але із умови технологічності і забезпечення ефективної роботи КАД цей кут доцільно обрати рівним 30° шляхом поділу фазної зони 60° обмотки статора серійного АД на дві рівні (однакові за кількістю витків) частини. Одна з полуфаз приймається за основну робочу обмотку статора і є первинною обмоткою АТ із увімкненням її на напругу мережі живлення, друга додаткова полуфаза статора або вторинна обмотка АТ зміщена відносно первинної на кут 30° проти напрямку обертання поля в двигуні.

При живленні обмотки статора за схемою КАД в окремих полуфазах можуть протікати різні струми, що призводить до зміни розподілу електромагнітного поля в активній зоні КАД. Тому при розробці КАД необхідно дослідити особливості розподілу поля та визначити умови, при яких цей розподіл є оптимальним. Метою статті є розробка польової математичної моделі КАД, аналіз його електромагнітного поля та визначення умов оптимальної компенсації.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Аналіз електромагнітного поля в активній зоні КАД виконується у двовимірному наближенні. Розрахунковою зоною є поперечний переріз двигуна. Ана-

лізуються сталі електромагнітні поля при синусоїдальній зміні у часі всіх величин. Рівняння для розрахунку розподілу аксіальної просторової складової комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу $\dot{A}_z$ в роторній системі координат має наступний вигляд [1]:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} - j\omega_1 s \mu \gamma \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{z\text{стор}}, \quad (1)$$

де ω_1 – кутова частота обертання поля статора, S – ковзання ротора, μ , γ – магнітна проникність і електропровідність середовища; $\dot{J}_{z\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів.

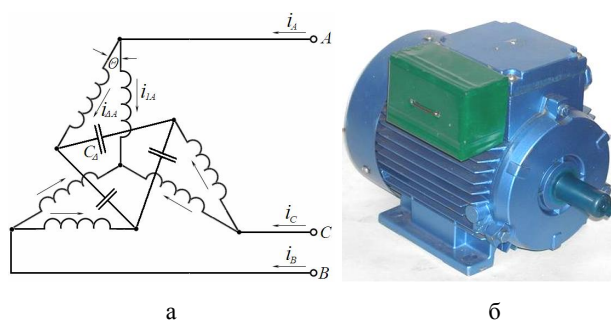


Рис. 1. Схема обмоток статора (а) та зовнішній вигляд (б) компенсованого асинхронного двигуна

Рівняння (1) доповнюється однорідною граничною умовою першого роду на поверхні ярма статора G

$$\dot{A}_z \Big|_G = 0 \quad (2)$$

Електромагнітне поле аналізується з урахуванням нелінійних залежностей магнітної проникності феромагнітної сталі осердя двигуна μ від магнітної індукції. Джерелами поля є густини сторонніх струмів в пазах статора, в яких укладено три фази обмотки статора. Наприклад, для некомпенсованих АД, в яких в межах кожної фазної зони протікає однаковий струм, маємо:

$$\begin{aligned} \dot{J}_{A\text{стор}} &= I_m / S_{II}, \\ \dot{J}_{B\text{стор}} &= -I_m [\cos(-2\pi/3) - j \sin(-2\pi/3)] / S_{II}, \\ \dot{J}_{C\text{стор}} &= -I_m [\cos(-4\pi/3) - j \sin(-4\pi/3)] / S_{II}, \end{aligned} \quad (3)$$

де I_m – амплітуда струму в фазі статора; S_{II} – площа перетину паза статора.

В компенсованих АД струми обмотки статора також задаються за формулами, ідентичними формулам (3). Але при цьому необхідно задати різні значення струмів в окремих полуфазах. Наприклад, якщо q котушок в кожній фазній зоні розділено на дві однакові групи, то в $q/2$ пазах статора, де лежить одна половина сторін котушок даної фазної зони, задається амплітуда струму I_{m1} , а в інших $q/2$ пазах статора – задається інша амплітуда струму I_{m2} , яка визначається схемою компенсації та режимом роботи КАД.

Струми в пазах з обмоткою ротора обчислюються "автоматично" в процесі розв'язання рівняння (1). В пазах ротора задається електропровідність матеріалу, що відповідає матеріалу стержнів короткозамкненої обмотки ротора (мідь, алюміній) і струми ротора індукуються при протіканні електромагнітного процесу. Такий підхід дозволяє також врахувати нерівномірність розподілу струму ротора уздовж висоти паза, яка обумовлена поверхневим ефектом в електропровідних середовищах.

Після розв'язання рівняння (1) з урахуванням умов (2), (3) складові магнітної індукції в декартових координатах знаходяться по наступним виразам:

$$\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y, \dot{B}_y = -\partial \dot{A}_z / \partial x. \quad (4)$$

Для аналізу магнітного поля в повітряному проміжку двигуна використовується нормальна складова магнітної індукції – просторова складова індукції, що направлена уздовж вектора нормалі до розрахункової лінії, яка проходить уздовж середини висоти повітряного проміжку. Нормальна складова індукції обумовлює величину магнітного потоку взаємодії між обмотками статора і ротора і знаходиться за відомими складовими $\dot{B}_x, \dot{B}_y$ по наступному виразу:

$$\dot{B}_n = (x \dot{B}_x + y \dot{B}_y) / R_\delta, \quad (5)$$

де x, y – координати точки на розрахунковій лінії, що розташована в повітряному проміжку, R_δ – радіус розрахункової лінії. Сформульована математична модель (1) – (5) дозволяє проаналізувати розподіл електромагнітного поля КАД для різних схем підключення компенсуючих конденсаторів до обмотки статора та для різних режимів роботи. Для чисельної реалізації моделі використовувався метод скінченних елементів [5].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Приведемо окремі розрахункові результати на прикладі серійного АД типу АИР71В2, що був модернізований з використанням внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності. Двигун має наступні вихідні дані: потужність $P_2 = 1,1$ кВт; номінальний фазний струм обмотки статора $I_{1N} = 2,6$ А; число пар полюсів $p = 1$; кількість пазів статора і ротора $Z_1 = 24$, $Z_2 = 20$; внутрішній діаметр осердя статора $D_1 = 65$ мм; зовнішній діаметр осердя статора $D_a = 116$ мм; висота повітряного проміжку $\delta = 0,35$ мм. Відкриття пазів статора $b_{m1} = 2$ мм, пази ротора закриті. Обмотка статора – одношарова концентрична. Число

пазів на полюс і фазу складає $q = 4$.

Проведемо порівняльний аналіз характеристик електромагнітного поля зазначеного вище серійного АД і створеного на його основі КАД. Використаємо наведену на рис. 1,а схему компенсації, в якій кожна фаза трифазної обмотки статора розподіляється на дві однакові полуфази, які з'єднуються паралельно, причому в одну з полуфаз послідовно до її витків включається компенсуючий конденсатор [2]. Будемо називати першу з полуфаз *робочою*, а ту, в яку включений конденсатор – *компенсованою* полуфазою. Кількість фазних зон в КАД за такою схемою компенсації збільшується удвічі: з 6-ти (як у серійному АД) до 12-ти, причому кожна фазна зона містить по дві котушки ($q = 2$) і її вісь зсунута у просторі до вісі іншої фазної зони на кут $\alpha = -30^\circ$.

Кут фазового зсуву δ між струмами в робочій I_{1P} і компенсованій I_{1K} полуфазах можна отримати різним за рахунок вибору співвідношення індуктивності полуфази обмотки статора і ємності конденсатора. В роботі [2] пропонується обирати такі параметри КАД, щоби виконувалася умова *оптимальної компенсації*

$$\alpha + \delta = 0, \quad (6)$$

при якій струм намагнічування двигуна є мінімальним. Для перевірки зазначеної умови виберемо таку величину ємності конденсатора, щоби кут фазового зсуву між струмами полуфаз дорівнював $\delta = 30^\circ$. Згідно з даними роботи [2] для підвищення $\cos \phi$ серійного АД з зазначеними вище параметрами від 0,8 до 0,95 при виборі оптимальної ємності компенсуючого конденсатора (для даного двигуна це $C = 15$ мкФ) струм в компенсованій полуфазі I_{1K} повинен приблизно в 1,25 рази перевищувати струм I_{1P} в робочій (некомпенсованій) полуфазі обмотки статора. Як показують дослідження, зазначене оптимальне співвідношення між струмами полуфаз є притаманним і для інших варіантів КАД і забезпечує найкращі енергетичні характеристики компенсованого АД.

Додатковою умовою, яку приймається при порівнянні АД і КАД, є однаковість сумарних теплових втрат в обмотках статорів цих двигунів, що при інших рівних умовах (незмінність умов вентиляції) забезпечує однаковість середнього перегріву витків обмоток. Струм в кожній полуфазі серійного АД при двох паралельних гілках обмотки статора дорівнює $I_{1N/2} = I_{1N}/2 = 1,3$ А (діюче значення). Прирівнюючи сумарні втрати в обмотці статора серійного АД до сумарних втрат в обмотці статора КАД, отримаємо наступне рівняння для визначення струму в I_{1P} в робочій полуфазі:

$$2I_{1N/2}^2 \cdot r_1 = I_{1P}^2 \cdot r_1 + (1,25 \cdot I_{1P})^2 \cdot r_1, \quad (7)$$

де r_1 – активний опір однієї полуфази.

Після розв'язання рівняння (7) отримаємо, що при незмінності сумарних теплових втрат в обмотках статора серійного АД і КАД струм в робочій полуфазі КАД повинен дорівнювати $I_{1P} = 0,884 I_{1N/2} = 1,15$ А, а струм в компенсованій полуфазі повинен дорівнювати $I_{1K} = 1,105 I_{1N/2} = 1,437$ А. Таким чином, незважаючи на те, що струм в компенсованій полуфазі перевищує номінальний струм серійного АД, сумарні теплові втрати в обмотці статора залишаються незмінними.

Прийнявши магніторушійну силу (МРС) одного пазу, в якому містяться витки зі струмом $I_{1N/2}$, за одну відносну одиницю, побудуємо криві МРС обмоток статора уздовж довжини повітряного проміжку для серійного АД і КАД. Ці криві зображено на рис. 2, де позначено також фазні зони обмотки статора. Фазні зони, які позначені літерою з дефісом, відносяться до шунтованої полуфази. Для серійного АД фазні зони, позначені однією літерою, наприклад, А і А', створюють єдину фазну зону.

З рис. 2 видно, що амплітуда МРС серійного АД на 8 % перевищує амплітуду МРС КАД. При цьому, обмотувальний коефіцієнт першої гармоніки серійного АД складає $k_{ob1} = 0,957$, а відповідно обмотувальний коефіцієнт першої гармоніки КАД складає $k_{ob1} = 0,924$. Тобто при однаковому магнітному потоку взаємодукції величина ЕРС першої гармоніки в КАД зменшиться усього на 3,5 %. Але з іншого боку форма кривої МРС КАД є більш наближеною до синусоїдальної, тобто містить в собі менші за амплітудою вищі гармоніки магнітного поля. Наприклад, якщо в серійному АД обмотувальні коефіцієнти для 5-ї і 7-ї гармонік складають відповідно $k_{ob5} = 0,205$ і $k_{ob7} = 0,157$, то в компенсованому АД ці коефіцієнти зменшуються відповідно до значень $k_{ob5} = 0,053$ і $k_{ob7} = 0,04$. Враховуючи малу висоту повітряного проміжку двигуна (0,35 мм) таке зменшення амплітуд вищих гармонік є дуже позитивним, оскільки призводить до суттєвого зменшення додаткових втрат в двигуні. Таким чином при дотриманні визначених вище умов оптимальної компенсації КАД характеризується не тільки суттєво збільшеним коефіцієнтом потужності, але й підвищеним ККД.

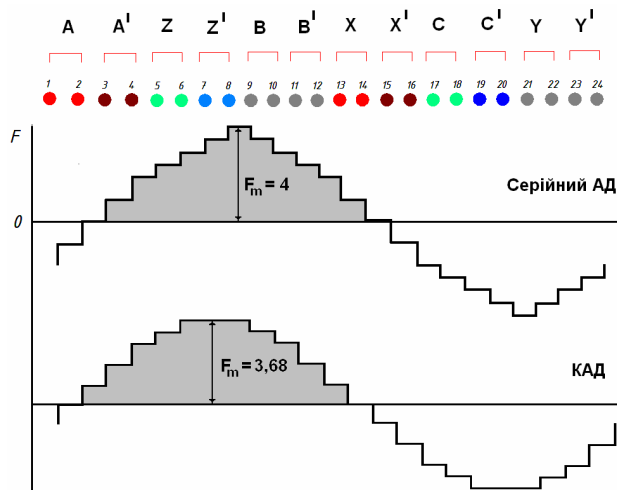


Рис. 2. Криві МРС статора серійного АД і КАД

На рис. 3 зображено розподіл поля магнітної індукції в активній зоні КАД. Рівні індукції на окремих ділянках активної зони відповідають фоновому зафарбленню у відповідності до наведеної поруч шкали.

На рис. 4 зображено криві розподілу нормальної складової магнітної індукції у повітряному проміжку, яка створює магнітний потік взаємодукції між статором і ротором. На рис. 4,а показано криву розподілу магнітної індукції серійного АД, а на рис. 4,б – компенсованого двигуна при дотриманні зазначених умов оптимальної компенсації (6).

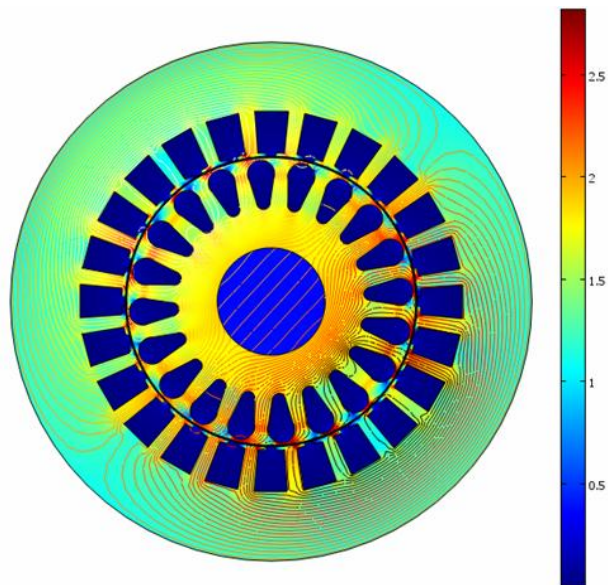


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції в активній зоні КАД

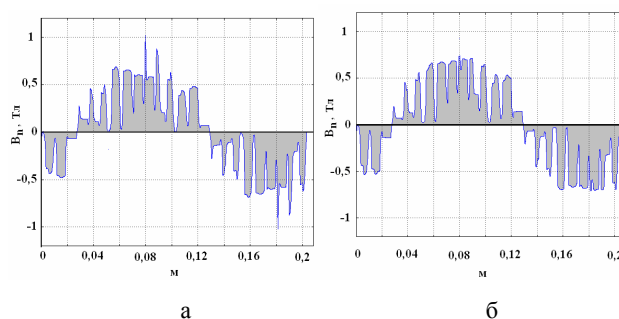


Рис. 4. Розподіл нормальної складової магнітної індукції в повітряному проміжку: а – серійного АД; б – КАД

Порівняльний аналіз наведених кривих дозволяє зробити наступні висновки. В наведених кривих індукції суттєво виражені зубцеві гармоніки, які на окремих ділянках повітряного проміжку створюють перепад індукції вище ніж 0,5 Тл. Зазначені перепади виникають при таких взаємних положеннях статора і ротора, при яких зубці статора розташовуються навпроти зубців ротора.

Такий результат цілком узгоджується з наведеними на рис. 2 кривими МРС і пов'язаний зі збільшенням кількості фазних зон обмотки статора в КАД з шести до дванадцяти.

Таким чином модернізація АД за технологією КАД при умовах оптимальної компенсації *покращує форму кривої розподілу магнітної індукції* у повітряному проміжку, що у цілому сприяє зниженню додаткових втрат потужності та підвищенню енергетичних показників асинхронного двигуна. Слід підкреслити, що, у випадках значного недотримання умов оптимальної компенсації (6) спостерігається різке спотворення магнітного поля у повітряному проміжку.

ВИСНОВКИ

1. Проведені дослідження електромагнітного поля КАД показали, що фундаментальною умовою оптимальної компенсації, яку необхідно дотримуватися при створенні компенсованих за реактивною потужністю асинхронних двигунів є умова $\alpha + \delta = 0$, де α – кут

просторового зсуву осей фазних зон полуфаз обмотки статора, δ – кут фазового зсуву між електричними струмами в полуфазах. Недотримання і суттєве відхилення від цієї умови призводить до спотворення електромагнітного поля і енергетичних характеристик КАД.

2. Показано, що при умові оптимальної компенсації магнітне поле в КАД має кращі характеристики, ніж в серійному двигуні, обраному за прототип. Зокрема крива магніторушійної сили обмотки статора уздовж довжини повітряного проміжку в КАД більш наближена до синусоїдальної, а значення обмотувальних коефіцієнтів для найбільш суттєвих 5-ї і 7-ї гармонік зменшені в 3,5...4 рази у порівнянні з серійним двигуном-прототипом.

3. Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку має менші зубцеві гармоніки і, як наслідок в двигуні виникають менші додаткові втрати потужності. Таким чином модернізація АД за технологією КАД при умовах оптимальної компенсації дозволяє не тільки суттєво підвищити коефіцієнт потужності двигуна, але й сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії асинхронного двигуна.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вас'ковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – Київ, НТУУ "КПІ", 2007. – 191 с.
2. Мишин В.И., Лут Н.Т. Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулирующими характеристиками // Вісник НТУ "ХПІ". – 2001. – № 17. – С. 110-112.
3. Мишин В.И., Чуєнко Р.Н., Кулинич А.Н. Принципы расчета характеристик в асимметричных режимах компенсированного асинхронного двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С. 36-41.
4. Мишин В.И., Чуєнко Р.Н. Методика расчета характеристик обобщенного компенсированного асинхронного электродвигателя // Вісник НТУ "ХПІ". – 2007. – № 55. – С. 83-85.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. – 392 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vas'kovskij Yu.M. Pol'ovij analiz elektrichnih mashin. - Kiiv, NTUU "KPI", 2007. - 191 s. 2. Mishin V.I., Lut N.T. Asinhronnye `elektrodvigateli s uluchshennymi `energeticheskimi i puskoregulirovochnymi harakteristikami // Visnik NTU "HPI". - 2001. - № 17. -S. 110-112. 3. Mishin V.I., Chuenko R.N., Kulinich A.N. Principy rascheta harakteristik v asimmetrichnyh rezhimakh kompensirovannogo asinhronnogo dvigatelya // Elektrotehnika i elektromekhanika. - 2006. - № 1. - S. 36-41. 4. Mishin V.I., Chuenko R.N. Metodika rascheta harakteristik obobschennogo kompensirovannogo asinhronnogo `elektrodvigatelya // Visnik NTU "HPI". - 2007. - № 55. - S. 83-85. 5. Segerlind L. Primenenie metoda konechnyh `elementov. M.: Mir, 1979. - 392 s.

Надійшла 22.12.2011

Вас'ковський Юрій Миколайович, д.т.н., проф.
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"
кафедра електромеханіки
03056, Київ, пр. Перемоги, 37
тел. (044) 4549518, e-mail: vun157@voliacable.com

Чуєнко Роман Миколайович, к.т.н., доц.
Національний університет біоресурсів і природокористування
кафедра електричних машин і експлуатації електрообладнання
03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 12
тел. (044) 5288755, e-mail: roman_chuenko@ukr.net

Vas'kovsky Y.N., Chuenko R.M.

Mathematical modelling of electromagnetic field in a compensated induction motor.

A field mathematical model is developed, electromagnetic field distribution in the active zone of a compensated asynchronous motor investigated. the fundamental condition of optimal internal capacitive compensation is validated to follow at compensated induction motor designing.

Key words – Compensated induction motor, mathematical model, field analysis.