

МАШИНОЗНАВСТВО. ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621. 313

Ю.В. Антипенко, здобувач

Житомирський державний технологічний університет

ВРАХУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЕФЕКТУ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ОБМОТОК РОТОРА ДВИГУНА З МОДУЛЬОВАНИМ ПОТОКОМ (ДМП)

(Представлено д.т.н., проф. Грабаром І.Г.)

Пропонується підхід, який дозволяє суттєво зменшити негативний вплив поверхневого ефекту на еквівалентний активний опір обмотки ротора двигуна з модульованим потоком шляхом відповідного вибору перетину та матеріалу провідників.

Вступ. Як відомо, ефективну роботу асинхронного двигуна (АД) неможливо забезпечити без наявності активних витрат енергії в його роторі [1]. З цієї причини в АД з короткозамкненим ротором з метою збільшення пускового моменту широко застосовується так званий „поверхневий ефект” [2], суть якого полягає в зростанні еквівалентного активного опору обмотувальних провідів за рахунок витиснення струму до поверхні при збільшенні його частоти.

Разом з цим, у сучасному автоматизованому електроприводі, окрім асинхронних двигунів, широко застосовуються різноманітні типи синхронних двигунів (СД), на роботу яких, на відміну від АД, поверхневий ефект впливає негативно.

Постановка проблеми. Теоретичні розрахунки та дослідні випробування підтверджують настійну необхідність враховувати негативний вплив зазначеного ефекту на характеристики моменту та енергетичні характеристики СД, особливо у випадках їх живлення від сучасних перетворювачів частоти.

У зв'язку з цим у даній статті пропонується підхід, який дозволяє враховувати поверхневий ефект при проектуванні обмоток ротора нового типу СД – двигуна з модульованим потоком (ДМП). Крім того, викладений у статті матеріал є корисним при проектуванні обмоток інших типів електродвигунів та різноманітних електромагнітних пристроїв.

Основна частина. 1. Вибір матеріалів та перетину провідників обмоток ротора ДМП, з точки зору максимально допустимих діаметрів.

Залежно від модифікації ДМП його короткозамкнена обмотка ротора може виконуватись методами литва, зварювання або намотування провідниками різного перетину [3], [4], [5]. При цьому матеріалами обмотки можуть бути мідь, алюміній, латунь і навіть залізо (для мікро-двигунів). Наприклад в обмотці ротора ДМП, яка виконана провідом, що має круглий перетин, щільність струму буде найбільшою біля його поверхні, а найменшою – біля осі. У цьому випадку еквівалентний активний опір r обмотки ротора буде тим більший, чим більшим діаметром проводу d вона виконана, чим більша питома провідність γ та магнітна проникність μ матеріалу провідника, а також чим більша частота f струму, що протікає по ньому.

Звідси випливає, що роторні обмотки двигуна доцільно виконувати провідом такого діаметра та з такого матеріалу, щоб при несучій частоті $f = f_{\text{нес}}$ живлячого струму активний опір r обмотки під впливом поверхневого ефекту збільшувався не більше ніж на 5...10 % порівняно з опором r_0 на постійному струмі, тобто щоб $r \leq (1,05...1,1) r_0$ і відповідно $r/r_0 \leq 1,05...1,1$.

Згідно з [2] відношення зазначених опорів $k = r/r_0$ за наявності поверхневого ефекту визначається виразом:

$$k = r/r_0 = 1 + \frac{\omega^2 \mu^2 \gamma^2 d^4}{3072} = 1 + \left[0,018 \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu \cdot d^2 \right]^2, \quad (1)$$

де γ , μ , d є відповідно питома провідність, магнітна проникність, та діаметр проводу обмотки; ω – кутова частота несучої статорних напруг двигуна.

Із співвідношення (1) знайдемо діаметр проводу обмотки ротора:

$$d = \frac{7,4448}{\sqrt{\omega \mu \gamma}} \sqrt[4]{k-1}, \quad (2)$$

звідки знайдемо відповідні діаметри d_{Cu} мідного проводу (з параметрами $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma\text{Н}}{\text{М}}$; $\gamma = 0,5714 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$),

$$d_{Cu} = \frac{7,4448}{\sqrt{2\pi f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,5714 \cdot 10^8}} \sqrt[3]{k-1} = \frac{0,3505}{\sqrt{f}} \sqrt[3]{k-1}. \quad (3)$$

Аналогічно знайдемо діаметри проводу з алюмінію ($\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma\text{Н}}{\text{М}}$; $\gamma = 0,3571 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$) та заліза ($\mu = 10^3 \mu_0$; $\gamma = 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$):

$$d_{Al} = \frac{0,4434}{\sqrt{f}} \sqrt[3]{k-1}; \quad d_{Fe} = \frac{0,0265}{\sqrt{f}} \sqrt[3]{k-1}. \quad (4)$$

З виразів (3), (4) випливає, що при одному й тому ж значенні $k = 1,05 \dots 1,1$ та одній і тій самій несучій частоті f співвідношення діаметрів проводів з алюмінію, міді та заліза співвідносяться як $d_{Al} : d_{Cu} : d_{Fe} = 0,4434 : 0,3505 : 0,0265 = 16,73 : 13,22 : 1,0 = 1,265 : 1 : 0,0756$.

Інакше кажучи, діаметр проводу із заліза має бути у 16,7 разів менший діаметра проводу з міді та у 13,22 рази менший за діаметр проводу з алюмінію відповідно.

Підкреслимо, що діаметри проводів, які розраховані за формулами (3), (4), є максимально припустимі діаметри, перевищення яких призведе до зростання опору обмоток r вище за припустимий. Так, наприклад, якщо опір r обмотки з міді не повинен перевищити r_0 на 10 %, тобто $k \leq 1,1$ при частоті $f = 400$ Гц, то згідно з (3) знайдемо:

$$d_{Cu_{max}} = d_{Cu} \leq \frac{0,3505}{\sqrt{400}} \sqrt[3]{1,1-1} = 0,00985 \text{ М} = 9,85 \text{ мм}.$$

Таким чином, діаметр стержнів роторної обмотки не повинен перевищувати 9,85 мм.

При збільшених частотах несучої, наприклад для мікромашин з ротором із фериту, діаметри проводів, які розраховані за формулами (3), (4), можуть виявитися настільки малими, що загальний необхідний перетин роторної обмотки слід набирати з паралельно з'єднаних та окремо ізольованих один від одного проводів типу „ліцендрат”. Спроба виготовити роторну обмотку в цьому випадку з товстого цільного проводу призведе до різкого зростання її активного опору і відповідного зменшення максимального навантажувального моменту двигуна та потужності, яка знімається з його вала.

2. Графічно-аналітичний підхід щодо вибору максимально припустимих діаметрів провідників.

Відповідно до формул (3), (4) визначені максимально припустимі діаметри проводів (з алюмінію, міді та заліза) залежно від частоти f несучої за умови $k = 1,1$ та $k = 1,05$. Результати розрахунків зведені в таблицю та оформлені графічно на рисунку.

З представлених на рисунку графіків 1, 2, 3, 4 видно, що необхідний перетин проводів з міді та алюмінію різко зменшується при зміні частоти несучої на інтервалі 20...300 Гц. На інтервалі 300...1000 Гц діаметр змінюється незначно, з чого випливає, що провід, який розраховано на частоту несучої 600 Гц (або близько до неї), буде задовільно працювати в діапазоні частот 300...1000 Гц. Виходячи із графіка 5 (рис. 1), необхідний діаметр проводів із заліза виявляється на порядок (точніше в 13...17 разів) меншим за провід з алюмінію чи міді. Отже в діапазоні 100...1000 Гц несучої частоти діаметр залізного проводу не повинен перевищувати 1,5...0,47 мм. Саме з таких, окремо ізольованих один від одного проводів, повинен виготовлятися провід (типу „ліцендрат”) будь-якого більшого перетину роторної обмотки мікродвигунів. Тільки в цьому випадку для залізного проводу поверхневий ефект не буде порушувати їх нормальної роботи.

f (Гц)	25	50	100	150	200	300	400	500	600	800	1000	k
d_{Al} (мм)	49,87	35,26	24,93	20,36	17,63	14,40	12,47	11,15	10,18	8,816	7,88	$k = 1,1$
d_{Al} (мм)	41,93	29,65	20,97	17,12	14,83	12,11	10,48	9,38	8,56	7,41	6,63	$k = 1,05$
d_{Cu} (мм)	39,42	27,82	19,71	16,09	13,94	11,38	9,86	8,82	8,05	6,97	6,23	$k = 1,1$
d_{Cu} (мм)	33,15	23,44	16,57	13,53	11,72	9,57	8,29	7,41	6,77	5,86	5,24	$k = 1,05$

d_{Fe} (мм)	3,0	2,1	1,5	1,21	1,05	0,86	0,75	0,67	0,61	0,526	0,47	$k = 1,1$
---------------	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	-------	------	-----------

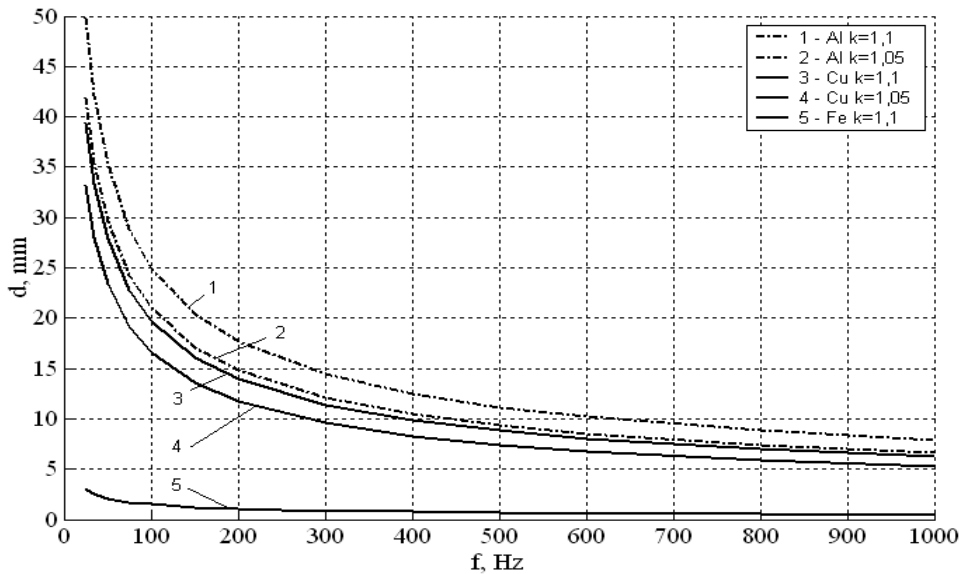


Рис. 1

Відповідно до рисунка діаметри проводів змінюються незначно на інтервалі частот несучої 400...1000 Гц. Це означає, що провідник, який розрахований на частоту несучої 600 Гц, буде задовільно працювати в розширеному діапазоні частот 400...1000 Гц і більше.

За допомогою наведених вище графіків зручно визначити реальні діаметри провідників обмоток ротора. Ефект витиснення струму в обмотці ротора ДМП є небажаним явищем, яке зменшує синхронізуючий момент двигуна та його ККД. Тому для зазначеного двигуна, в першому наближенні, необхідно вибрати короткозамкнену обмотку ротора за умов мінімально припустимого ефекту витиснення при заданому діапазоні зміни несучої частоти.

Метод перевірки перетину проводу обмотки ротора наведемо на прикладі.

3. Приклад розрахунку обмотки ротора.

Нехай необхідно виконати обмотку ротора ДМП з алюмінію для частоти несучої, яка змінюється в діапазоні 200...300 Гц. Номінальна величина ампер-витків обмотки ротора за умовою дорівнює $I_p \cdot W_p = 2000$ А (I_p , W_p – струм та кількість витків обмотки ротора відповідно), щільність струму в обмотці ротора $\delta_p = 5$ А/мм². Обмотка має бути виконана для $k = 1,05$.

Послідовність розрахунку.

1. Для $k = 1,05$ (матеріал – алюміній) та частоти несучої, яка дорівнює 200...300 Гц, відповідно до наведених вище даних знаходимо граничні діаметри проводів $d = 14,8...12,1$ мм. За найменший обираємо діаметр проводу – 12 мм. Це означає, що будь-яка обмотка ротора (будь-який її варіант) має бути виконаний проводом з алюмінію діаметром не більше 12 мм.

Збільшення опору такого проводу під впливом частоти несучої нижче 300 Гц не буде перевищувати заданого значення $k = 1,05$ (5 %) та навпаки, при підвищенні частоти несучої вище 300 Гц, згідно з (1), опір обмотки не буде перевищувати 5 %, 10 % і т. ін.

2. Перевіримо, чи можна виконати обмотку ротора методом заливання алюмінію в круглі пази щонайбільшого діаметра. Для цього візьмемо кількість витків ротора $W_p = 5$, тоді струм ротора:

$$I_p = \frac{2000}{5} = 400 \text{ А.}$$

Нова щільність струму ротора, з урахуванням ефекту витиснення, буде дорівнювати

$$\delta'_p = \frac{\delta_p}{k} = \frac{5}{1,05} = 4,762 \text{ А/мм}^2.$$

Звідки перетин стрижня обмотки ротора $S = \frac{I_p}{\delta'_p} = \frac{400}{4,762} = 84 \text{ мм}^2$, і відповідно діаметр стрижня з перетином $S = \frac{\pi d_p^2}{4}$ дорівнює $d_p = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 84}{\pi}} \approx 10,34 \text{ мм}$. Оскільки за умовою діаметр стрижня d_p обмотки не повинен перевищувати 12 мм ($k = 1,05$), округляємо значення d_p до 10,5...11 мм.

Якщо діаметр круглих пазів ротора прийняти меншими, наприклад рівними 6 мм, то ефект витиснення струму не буде позначатися в більш широкому діапазоні частот (0...1000 і вище) згідно з графіками на рисунку або згідно із співвідношенням (4).

3. Лита обмотка, що складається із стрижнів діаметром 10...11 мм, може працювати в діапазоні частот 0...360 Гц при $k = 1,05$. Якщо збільшити частоту несучої до значення 600 Гц, згідно з (1), отримаємо:

$$k = 1 + \frac{(\omega \cdot \mu \cdot \gamma \cdot d^2)^2}{3072} = 1 + \frac{(2\pi \cdot 600 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,3571 \cdot 10^8 \cdot 10,5^2 \cdot 10^{-6})^2}{3072} = 1 + 0,1132 = 1,1132.$$

В результаті опір обмотки ротора збільшився на 6 % у порівнянні з розрахунковим значенням, що несуттєво вплине на ефективність роботи двигуна (якщо не враховувати втрати в магнітопроводі).

Як впливає з (1), перевищення частоти несучої вдвічі проти номінального значення не призведе до перегріву обмотки ротора двигуна, якщо розрахунки виконані вірно.

Висновки. Таким чином, запропоновані в даній статті рекомендації щодо вибору діаметрів обмотувальних проводів дозволяють значною мірою компенсувати небажане проявлення поверхневого ефекту в усьому діапазоні регулювання швидкості обертання ротора ДМП.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Войтех А.А.* и др. Регулируемые асинхронные двигатели // Сб. науч. тр. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1994. – 174 с.
2. *Даревский А.И.* Теоретические основы электротехники / Под ред. проф. Л.А. Ионкина – М.: Высшая школа, 1965. – 228 с.
3. Патент України на винахід № 35641 від 16.04.2001 р. Синхронно-асинхронний електродвигун з короткозамкнутою обмоткою ротора.
4. Патент России на изобретение № 2153755 от 12.08.2000 г. Синхронно-асинхронный электродвигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора.
5. *Антипенко Ю.В.* Питання проектування синхронних двигунів з короткозамкнутим ротором // Вісник ЖІТІ. – № 4. – 2003. – 292 с.

АНТИПЕНКО Юрій Валентинович – здобувач кафедри автоматики і управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- електричний привід;
- перетворювальна техніка.

Подано 09.09.2005

Антипенко Ю.В. Урахування поверхневого ефекту при проектуванні обмоток ротора двигуна з модульованим потоком

Антипенко Ю.В. Учет поверхностного эффекта при проектировании обмоток ротора двигателя с модулированным потоком.

Antipenko U.V. The account of superficial effect at designing rotors windings of the motor with the modulated flow

УДК 621.313

Учет поверхностного эффекта при проектировании обмоток ротора двигателя с модулированным потоком / Ю.В. Антипенко

Предлагается подход, позволяющий существенно уменьшить негативное влияние поверхностного эффекта на эквивалентное активное сопротивление обмотки ротора двигателя с модулированным потоком, путем соответствующего выбора сечения и материала проводников.

УДК 621.313

The account of superficial effect at designing rotors windings of the motor with the modulated flow / U.V. Antipenko

The approach allowing reducing negative influence of superficial effect on equivalent active resistance of a rotor winding of a rotor of the motor with the modulated flow is offered by the appropriate choice of conductors section and material.