

А.П. СІНОЛИЦИЙ, д-р техн. наук, проф.,
 М.М. МАКСИМОВ, Ю.Б. ФІЛППІ, кандидати техн. наук, доценти,
 М.І. СІКОРА, магістрант, ДВНЗ «Криворізький національний університет»

ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ В КОЛАХ КОРОТКОЗАМКНЕНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Розглянуто спосіб формування в колах статора і ротора АД пульсуючого струму, який має широкі межі варіювання, з метою подальшого оцінювання роботоспроможності двигуна

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Сучасні економичні умови ставлять особливі завдання до надійності та довговічності обладнання, яке використовується. Особливою мірою це стосується такої групи електротехнічних виробів, як асинхронні короткозамкнені двигуни (АД), які використовуються практично на будь-якому промисловому підприємстві. На даний час аварійність АД на промислових підприємствах значна, оновлення парку двигунів складає до 20% щорічно. Однією з суттєвих причин такого стану є недостатня якість ремонту та відсутність засобів, які б дозволяли провести поглиблене дослідження стану ремонтного АД, беручи до уваги специфіку «випадковості» технічних параметрів випробуваної машини.

Дані обставини спричиняють до того, що післяремонтний варіант двигуна зорієнтовано на паспорт нової машини і використання його на доремонтному місці експлуатації, без попередніх випробувань на нагрів, призводить до швидкого виходу АД з ладу.

Аналіз досліджень та публікацій. Відомі роботи [1], в яких розглядається можливість навантаження АД без дії на вал шляхом чередування гальмівного та двигунного режимів роботи двигуна. В такому способі складними є підходи до еквівалентизації параметрів навантаження та визначення керуючих параметрів. Також відомі роботи [2,3] де процес формування струмового навантаження запропоновано шляхом завдання на вхід тиристорного регулятора простого модульованого сигналу. Головним недоліком таких систем є обмеженість зони варіювання керуючої дії для забезпечення потрібного рівня струмового навантаження обмоток статора і ротора.

Постановка завдання. Головним завданням статті є дослідження способу навантаження кіл статора і ротора АД пульсуючим струмом, який має широкі межі варіювання, з метою подальшого оцінювання роботоспроможності двигуна.

Викладення матеріалу та результати. Економичний навантажувальний режим АД можна отримати при формуванні напруги живлення за законом

$$U_n = U_0 \sin \omega t (k + m \cdot \sin \Omega t) .$$

де k, m - експериментальні коефіцієнти, Ωt - колова частота зміни коефіцієнта m .

При цьому напругу в загальному вигляді можна представити в наступній формі

$$U_n = U_1 \sin \omega t + U_2 \sin \omega t \cdot \sin \Omega t ,$$

де $U_1 = kU_0$ - амплітуда напруги промислової частоти; $U_2 = mU_0$ - амплітуда напруги комбінованої частоти.

Для розуміння процесів, що проходять в АД при живленні напругою представленої форми, необхідно отримати вирази, що описують фазні напруги окремо.

Використовуючи тригонометричні тотожності і проводячи наступні перетворення отримуємо наступні вирази напруги для кожної фази АД

$$U_A = U_1 \sin \omega t + \frac{U_2}{2} \cos(\omega - \Omega)t - \frac{U_2}{2} \cos(\omega + \Omega)t$$

$$\begin{aligned}
U_B &= U_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + U_2 \sin \Omega t \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) = \\
&= U_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + U_2 \sin \Omega t \cdot \sin \omega t \cdot \cos \frac{2\pi}{3} - U_2 \sin \Omega t \cdot \cos \omega t \cdot \sin \frac{2\pi}{3} = \\
&= U_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{U_2}{2} \cos(\omega - \Omega)t \cdot \cos \frac{2\pi}{3} - \frac{U_2}{2} \cos(\omega + \Omega)t \cdot \cos \frac{2\pi}{3} - \\
&- \frac{U_2}{2} \sin(\omega - \Omega)t \cdot \sin \frac{2\pi}{3} - \frac{U_2}{2} \sin(\omega + \Omega)t \cdot \sin \frac{2\pi}{3} = \\
U_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{U_2}{2} \cos \left[(\omega - \Omega)t + \frac{2\pi}{3} \right] - \frac{U_2}{2} \cos \left[(\omega + \Omega)t + \frac{2\pi}{3} \right] \\
U_C &= U_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + U_2 \sin \Omega t \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) = \\
&= U_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + U_2 \sin \Omega t \cdot \sin \omega t \cdot \cos \frac{2\pi}{3} + U_2 \sin \Omega t \cdot \cos \omega t \cdot \sin \frac{2\pi}{3} = \\
&= U_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{U_2}{2} \cos(\omega - \Omega)t \cdot \cos \frac{2\pi}{3} - \frac{U_2}{2} \cos(\omega + \Omega)t \cdot \cos \frac{2\pi}{3} + \\
&+ \frac{U_2}{2} \sin(\omega + \Omega)t \cdot \sin \frac{2\pi}{3} + \frac{U_2}{2} \sin(\omega - \Omega)t \cdot \sin \frac{2\pi}{3} = \\
U_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{U_2}{2} \cos \left[(\omega - \Omega)t - \frac{2\pi}{3} \right] - \frac{U_2}{2} \cos \left[(\omega + \Omega)t + \frac{2\pi}{3} \right]
\end{aligned}$$

Остаточно система отримає вигляд

$$\begin{aligned}
U_A &= U_1 \sin \omega t + \frac{U_2}{2} \cos(\omega - \Omega)t - \frac{U_2}{2} \cos(\omega + \Omega)t \\
U_B &= U_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{U_2}{2} \cos \left[(\omega - \Omega)t + \frac{2\pi}{3} \right] - \frac{U_2}{2} \cos \left[(\omega + \Omega)t - \frac{2\pi}{3} \right] \quad (1) \\
U_C &= U_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{U_2}{2} \cos \left[(\omega - \Omega)t - \frac{2\pi}{3} \right] - \frac{U_2}{2} \cos \left[(\omega + \Omega)t + \frac{2\pi}{3} \right]
\end{aligned}$$

З виразів (1) видно, що можна виділити три системи напруг, які обертаються в різних напрямках з різними частотами. Векторні діаграми (рис.1) дають наочне уявлення про сказане.

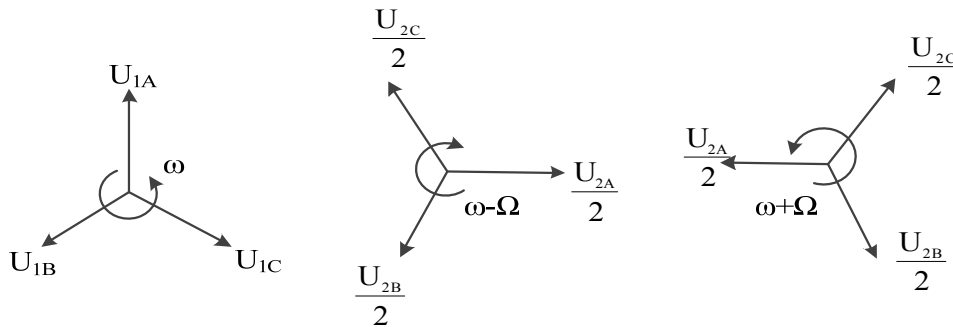


Рис. 1. Векторні діаграми сформованих систем напруг при навантаженні

У подальшому, для спрощення розрахунків та викладок дії здійснюються з припущенням, що система роторних струмів нерухома відносно системи напруг промислової частоти.

Враховуючи вищесказане припущення можна зробити висновок, що в роторному колі наводяться дві системи струмів, що обертаються в протилежних напрямках з однаковою частотою Ωt . Відповідно сумарний вектор роторного струму визначається двома складовими

$$I_{p1} = I_{p0} \sin \Omega t$$

$$I_{p2} = -I_{p0} \sin(\Psi - \Omega t),$$

де: I_{p1} , I_{p2} – струми, що наводяться в роторному колі системами напруг, що обертаються зі швидкостями відповідно $(\omega - \Omega)t$ та $(\omega + \Omega)t$. I_{p0} – амплітуда роторного струму, що наводиться системою напруг за амплітудою $\frac{U_2}{2}$; Ψ – початковий кут між векторами I_{p1} та I_{p2} .

Для зручності подальших розрахунків прийемо, що $\Psi = \frac{\pi}{2}$. Виконаємо розрахунок сумарного роторного струму при зміні колової частоти Ωt від 0 до 2π .

Розрахунок проводимо у відповідності з залежністю

$$I_p = \sqrt{(I_{p0} \sin \Omega t)^2 + (I_{p0} \sin(\Psi - \Omega t))^2 - 2 I_{p0} \sin \Omega t \cdot I_{p0} \sin(\Psi - \Omega t) \cos \varphi},$$

де: $\varphi = \Psi + \Omega t$ – кут між векторами I_{p1} та I_{p2} з урахуванням визначеного Ωt .

Так, наприклад, якщо $\Omega t = \frac{\pi}{6}$, (рис.2), то $\Psi - \Omega t = \frac{\pi}{3}$, при цьому $\varphi = \frac{2\pi}{3}$.

У результаті отримуємо

$$\begin{aligned} I_p &= \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_{p0}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} I_{p0}\right)^2 + 2 \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{2} I_{p0} I_{p0} \frac{1}{2}} = \\ &= \sqrt{\frac{3}{4} I_{p0}^2 + \frac{1}{4} I_{p0}^2 + \frac{\sqrt{3}}{4} I_{p0}^2} = I_{p0} \sqrt{1 + \frac{\sqrt{3}}{4}} = 1,2 I_{p0} \end{aligned}$$

Нижче подана табл. 1 з результатами розрахунків величин сумарного роторного струму, що обертається відносно ротора при найбільш зручних для обчислення параметрах Ωt .

Таблиця 1

$\Omega t, \text{рад}$	$\Psi - \Omega t, \text{рад}$	sin		I_{p1}	I_{p2}	I_p	Інші значення Ωt , при яких значення струму аналогічні
		Ωt	$\Psi - \Omega t$				
0	$\pi/2$	1	0	I_{p0}	0	I_{p0}	$\pi, 3\pi/2, \pi/2$
$\pi/6$	$\pi/3$	1/2	$\sqrt{3}/2$	$\frac{1}{2} I_{p0}$	$\frac{\sqrt{3}}{2} I_{p0}$	$1,2 I_{p0}$	$7\pi/6, 4\pi/3, \pi/3$
$\pi/4$	$\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{2}/2$	$\frac{\sqrt{2}}{2} I_{p0}$	$\frac{\sqrt{2}}{2} I_{p0}$	$1,41 I_{p0}$	$5\pi/4$
$\pi/3$	$\pi/6$	$\sqrt{3}/2$	1/2	$\frac{\sqrt{3}}{2} I_{p0}$	$\frac{1}{2} I_{p0}$	$1,2 I_{p0}$	
$\pi/2$	0	1	0	I_{p0}	0	I_{p0}	
$3\pi/4$	$-\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$-\sqrt{2}/2$	$\frac{\sqrt{2}}{2} I_{p0}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2} I_{p0}$	0	$7\pi/4$
$2\pi/3$	$-\pi/6$	$\sqrt{3}/2$	-1/2	$\frac{\sqrt{3}}{2} I_{p0}$	$-\frac{1}{2} I_{p0}$	$0,75 I_{p0}$	$5\pi/6, 11\pi/6, 5\pi/3$

Відповідно з наведеними розрахунками будемо діаграму зміни сумарного вектора роторного струму при зміні Ωt на проміжку $[0; 2\pi]$, яка приймає вигляд рис. 3.

Як видно з діаграми (рис.3а), огинаюча амплітуди обертового вектора роторного струму має форму вісімки, причому «вісімка» нерухома відносно ротора, отже, ті обмотки (стержні), на яких припадає максимальне значення пульсуючого струму I_p будуть перевантажені відносно інших, а обмотки (стержні), що знаходяться в площині їм перпендикулярній, взагалі не піддається навантаженню струмом I_p , що підтверджується рис. 3б, де показано, що обмотка В1-В4 найбільш навантажена, а обмотка В5-В13 – найменше.

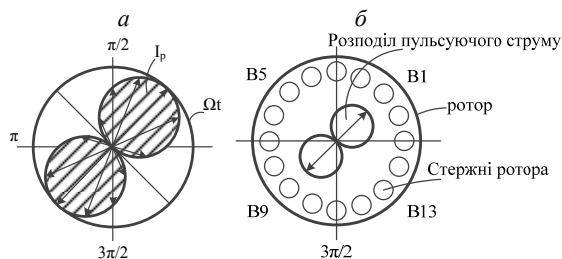


Рис. 2. Діаграми формування навантажувального струму

Отже, очевидно є проблема нерівномірності розподілу пульсуючого струму. Виправити цю проблему можна, якщо забезпечити рівномірне обертання «вісімки» відносно ротора, для чого треба задовольнити умові $\omega/\Omega \neq n$, де n – ціле число.

Висновки та напрямок подальших досліджень. На підставі аналізу можна зробити висновок про те, що формуючи певним чином на-

пругу живлення АД, можна досягти навантаження кіл статора і ротора АД пульсуючим струмом, який має широкі межі варіювання. Такий спосіб навантаження «випадкового» двигуна може бути використаний з метою подальшого оцінювання здатності роботи двигуна. Напямком подальших досліджень є аналіз і конкретизація умов рівномірного струмового навантаження кола вотора.

Список літератури

1. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях.-М.:Недра, 1992.-236 с.

2. Родькин Д.И., Максимов М.Н., Алистратенко Ю.В. Новое поколение систем нагружения и диагностики электрических машин//Тезисы докл. II Всесоюзного научно-практ. сем. по автоматизации инженерного труда.- Харьков.-1991.-С.18-22

3. АС СССР №1815613 Устройство для управления асинхронным двигателем. Родькин Д.И., Максимов М.М., Кочкин Г.И. и др. Опубл. в БИ.-1993.-№18

Рукопис подано до редакції 22.03.13

УДК 621.313.33

Э.А. ВОРОТЕЛЯК, канд. техн. наук, доц., А.В. КОЛОМИЦ, ассистент,
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ СИЛЫ И МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ МНОГОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ

Выполнен анализ влияния намагничивающих сил и магнитной индукции многофазного асинхронного двигателя в установившемся режиме.

Согласно общей теории во всех электрических машинах основной магнитный поток создается совместным действием токов, проходящих во всех обмотках и по всей магнитной цепи. Действие результирующего потока, в основном, и в первую очередь зависит от распределения магнитной индукции вдоль воздушного зазора. Кривая потока в любой момент времени может иметь произвольную форму и не обязательно синусоидальную. Поэтому стараются обычно считать, что главный поток машины определяется основной гармонической кривой поля, а радиус, проходящий через точку с амплитудным значением индукции, называют осью поля. Отсюда главный поток полностью определен как по величине, так и по направлению [1].

В идеализированной машине принимается, что все электродвижущие силы (ЭДС) пропорциональны создающим их токам, то есть, что насыщение стали отсутствует. Принимаются и другие допущения (явления, вызывающие отклонения от линейной зависимости между точками и ЭДС или падением напряжения). В реальных машинах влияние насыщения может оказаться весьма значительным и при разработке методов его учета неоднократно обращалось на это явление внимание [1,2]. Решение практических задач, с учетом вышесказанного, должно исходить из линейных соотношений, что позволяет использовать метод суперпозиции. Иначе общая теория будет слишком сложна.

Кривые намагничивающей силы (н.с.) и магнитной индукции изображаются пространственными векторами, отсюда необходимо различать два вида этих векторов. Следовательно, временной вектор, изображающий индуктируемую ЭДС непосредственно связан с пространственным вектором, представляющим магнитный поток. В случае, если асинхронный двигатель имеет равномерный воздушный зазор, а магнитная индукция в любой точке зазора пропорциональна н.с., то индуктируемая ЭДС может быть выражена непосредственно через н.с. Если н.с. вращается с той же скоростью, что и полюса ее можно разложить на составляющие по продольной и поперечной осям. После этого можно найти соответствующие составляющие магнитного потока.

Обычная теория асинхронных машин и неявнополюсных синхронных машин не требует разложения магнитного потока на составляющие по осям и является, таким образом, действительно теорией вращающихся полей. Результирующая волна н.с., представленная пространственным вектором \vec{F} расположена по продольной оси, совпадающей с осью абсцисс. Составляющие н.с. создаваемые первичными и вторичными токами в этот же момент времени \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , расположенными под углом φ_1 и $(180^\circ - \varphi_2)$ к оси ординат. Все три вектора вращаются со скоростью ω и могут быть представлены с помощью векторной диаграммы. (рис.1а). Внутренняя ЭДС, которая индуктируется в фазе первичной обмотки в рассматриваемый момент времени будет иметь амплитудное значение.

В это же время ось результирующей волны магнитной индукции, созданной н.с. и \vec{F} , также совпадает с продольной осью, внутреннее напряжение, уравнивающее эту ЭДС изображается U_δ . Напряжение, приложенное к зажимам U , равно сумме внутреннего напряжения U_δ и падение напряжения в активном сопротивлении $I_1 r_1$ и индуктивном сопротивлении рассеяния $jI_1 x_1$.