

## ЕНЕРГЕТИЧНІ СПІВВІДНОШЕННЯ ПРИ ЖИВЛЕННІ ДВИГУНІВ НЕСИМЕТРИЧНОЮ НАПРУГОЮ

Дмитрієва О. М.

Донецький національний технічний університет

Сидоренко О. О.

ДП "Донецький проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України"  
led@dts.com.ua

**Постановка задачі.** Несиметрія напруг електричної мережі у найбільшій мірі впливає на двигуни, створюючи в них додаткові втрати  $\Delta P_2$  активної потужності. У свою чергу, збільшення струму двигунів призводить до додаткових втрат потужності і у мережі. Для обґрунтування доцільності застосування засобів зменшення несиметрії потрібно знати залежності від показників несиметрії втрат потужності, коефіцієнтів корисної дії (ККД) і дійсних коефіцієнтів потужності (термін з [1]).

В [2] втрати потужності від несиметрії розраховувалися за двоконтурною схемою заміщення двигуна [3] для завантаження номінальною потужністю. Проте, звичайно двигуни працюють з коефіцієнтом завантаження, меншим за одиницю. Тому є доцільним узагальнити результати [2] на будь-які завантаження, що є метою статті.

Для стислості розглядається випадок живлення одного асинхронного двигуна (АД) від мережі великої потужності, проте метод, що пропонується, очевидним чином розповсюджується на групу АД, а також на синхронні двигуни. Якщо мережа має малу потужність, у схему заміщення потрібно додати опори мережі.

Сумарні втрати потужності в трьох фазах є інваріантними до кута зсуву між векторами лінійних напруг прямої  $U_1$  і зворотної  $U_2$  послідовностей, що дозволяє, як і в [4], розглядати симетричні складові окремо одна від одної. Напряга прямої послідовності вважається незміщеною і рівною номінальній фазній напрузі АД.

**Сутність методу.** Як і в [2] для урахування насичення магнітної системи і витіснення струму ротора приймаємо двоконтурну схему заміщення (рис. 1) з активними опорами  $r_s, r_m, r_r', r_{rn}'$  та індуктивностями  $L_s, L_m, L_r', L_{rn}'$  статора, контуру намагнічування, двох контурів ротора. Відповідно позначено:  $I_s, I_m, I_r', I_{rn}'$ .

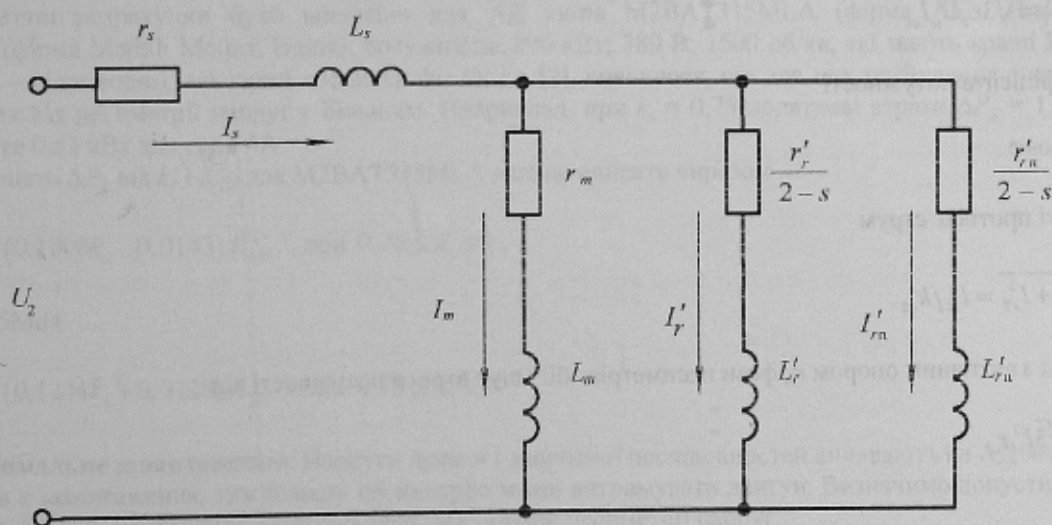


Рисунок 1

Параметри схеми заміщення визначаються через паспортні дані АД. Номінальні величини потужності  $P_n$ , напруги  $U_n$ , фазного струму  $I_{\Phi n}$  не залежать від коефіцієнта завантаження  $k_n$ . На відміну від [2], будемо використовувати не номінальні значення  $\cos\phi_n$ , ККД  $\eta_n$ , ковзання  $s_n$ , а каталожні залежності  $\cos\phi, \eta, s$ , від  $k_n$  за відсутності несиметрії. Перші дві з них є нелінійними, а залежність ковзання – практично лінійна.

Кожному значенню коефіцієнта завантаження відповідає своя схема заміщення. Це зумовлено тим, що аналіз показав: використання тільки однієї схеми, у якій завантаження враховується лише зміною ковзання, призводить до похибок. Оскільки несиметрія напруги, що зустрічається на практиці, майже не змінює частоту обертання, ковзання для кожної схеми вважається незмінним.

Для схеми заміщення за формулами (1) з [2] розраховуються вхідні провідності  $Y_s, Y_m, Y_r, Y_{rn}$  контурів і відповідні струми.

$$I_s = U_2 Y_s, \quad I_m = U_2 Y_m, \quad I_r = U_2 Y_r, \quad I_{rn} = U_2 Y_{rn}. \quad (1)$$

Додаткові втрати потужності в АД дорівнюють сумі втрат у контурах:

$$\Delta P_2 = \sqrt{3} U_2^2 (Y_s^2 r_s + Y_m^2 r_m + Y_r^2 r_r + Y_{rn}^2 r_{rn}) = \sqrt{3} \cdot 10^{-4} K_{2U}^2 U_n^2 (Y_s^2 r_s + Y_m^2 r_m + Y_r^2 r_r + Y_{rn}^2 r_{rn}), \quad (2)$$

де  $K_{2U}$  – коефіцієнт несиметрії напруг у відсотках.

Для кожного коефіцієнта завантаження схеми заміщення за прямою послідовністю є аналогічними – з тією відзнакою, що на вхід подається напруга прямої послідовності, а знаменники 2-х замінюються на  $s$ . За цими схемами достатньо розрахувати струми статора  $I_{s1}$ , оскільки втрати потужності знаходяться по ККД:

$$\Delta P_1 = k_s P_n (1/\eta - 1). \quad (3)$$

Несиметрія напруг зменшує ККД з  $\eta$  до величини

$$\tilde{\eta} = \frac{k_s P_n}{k_s P_n + \Delta P_1 + \Delta P_2} = \frac{\eta}{1 + \Delta P_2 / (\Delta P_1 / k_s P_n + 1)}. \quad (4)$$

Позначивши через

$$\varepsilon_2 = I_{s2} / I_{s1}$$

коефіцієнт несиметрії струмів, а також

$$k_{\varepsilon 2} = 1 / \sqrt{1 + \varepsilon_2^2},$$

згідно [1] запишемо вирази для потужності пульсації

$$S_2 = \varepsilon_2 S_1 = \sqrt{3} \varepsilon_2 U_n I_{s1} \quad (5)$$

і дійсного коефіцієнта потужності

$$\alpha = k_{\varepsilon 2} \cos \varphi. \quad (6)$$

В мережі протікає струм

$$I = \sqrt{I_{s1}^2 + I_{s2}^2} = I_{s1} / k_{\varepsilon 2}. \quad (7)$$

В мережі з активним опором  $r_n$  фази несиметрія збільшує втрати потужності від

$$\Delta P_{n1} = \sqrt{3} I_{s1}^2 r_n$$

до

$$\Delta \tilde{P}_n = \sqrt{3} I^2 r_n = \Delta P_{n1} / k_{\varepsilon 2}^2. \quad (8)$$

**Аналіз результатів.** Для визначеності розглянемо вплив несиметрії напруг на двигун 4A315M4Y3 з паспортними даними:  $P_n = 200$  кВт,  $U_n = 380$  В, синхронна частота обертання 1500 об/хв,  $\eta_n = 0,94$ ,  $\cos \varphi_n = 0,92$ ,  $s_n = 0,013$ .

Залежності ККД, косинуса і ковзання від завантаження приведені в табл. 1. За цими паспортними даними розраховуємо параметри схем заміщення (табл. 2).

Результати розрахунків графічно представлено на рис. 2-4, де потовщеними лініями показані криві при несиметрії 2 і 4 %, які є нормами для нормального і граничного режимів з [4].

Додаткові втрати потужності збільшуються як зі зростанням несиметрії (рис. 2), так і завантаження (рис. 3). Для кожного значення коефіцієнта завантаження втрати пропорційні квадрату коефіцієнта несиметрії. Встановлено, що коефіцієнт пропорційності залежить від коефіцієнта завантаження:

$$c_{2\Delta P} = a_2 k_3^2 + b_2 k_3 + c_2, \quad (9)$$

де  $a_2, b_2, c_2$  – коефіцієнти, які для двигуна, що розглядається, дорівнюють 0,0425; 0,0124; 0,004 кВт/(%)<sup>2</sup> при  $0,25 \leq k_3 \leq 1$ .

Таблиця 1

Параметр	Коефіцієнт завантаження				
	0	0,25	0,5	0,75	1,0
$\eta, \%$	0	91,5	94,0	94,5	94,0
$\cos\varphi$	0	0,82	0,9	0,92	0,92
$s$	0	0,0035	0,0065	0,0093	0,013

Таблиця 2

$k_3$	$r_s, \text{Ом}$	$r_m, \text{Ом}$	$r_r, \text{Ом}$	$r_{r1}', \text{Ом}$	$L_s, \text{мГн}$	$L_m, \text{мГн}$	$L_r', \text{мГн}$	$L_{r1}', \text{мГн}$
0,25	0,015	0,437	$8,66 \cdot 10^{-3}$	0,161	0,355	17,9	1,634	1,188
0,5	0,016	0,508	$8,23 \cdot 10^{-3}$	0,108	0,2	17,463	0,825	0,664
0,75	0,016	0,528	$7,86 \cdot 10^{-3}$	0,074	0,137	15,44	0,554	0,443
1,0	0,016	0,429	$8,15 \cdot 10^{-3}$	0,051	0,102	11,519	0,42	0,316

Це дозволяє визначити втрати потужності

$$\Delta P_2 = c_{2\Delta P} K_{2U}^2 = (a_2 k_3^2 + b_2 k_3 + c_2) K_{2U}^2 \quad \text{при } 0,25 \leq k_3 \leq 1 \quad (10)$$

в функції від двох аргументів  $k_3$  і  $K_{2U}$ , а не лише від коефіцієнта несиметрії, як в [5, 6].

Монотонною також є залежність від завантаження співвідношення струмів симетричних складових. Залежності ККД і коефіцієнта потужності не є монотонними (рис. 4 і 5), що пояснюється немонотонністю початкових даних (табл. 1).

Аналогічні розрахунки було виконано для АД типів M2BAT315MLA (фірма АББ, Німеччина) і В4С315Мd4 (фірма Marelli Motori, Італія), потужністю 200 кВт; 380 В; 1500 об/хв, які мають кращі ККД ( $\eta_n = 0,957$  і  $0,952$  – відповідно), але гірші косинуси фі. Як і в [2], виявилось, що для них погіршення енергетичних характеристик від несиметрії напруг є більшим. Наприклад, при  $k_3 = 0,75$  додаткові втрати  $\Delta P_2 = 1,001$  кВт і  $1,31$  кВт проти  $0,61$  кВт для серії 4А.

Залежність  $\Delta P_2$  від  $k_3$  і  $K_{2U}$  для M2BAT315MLA можна описати виразом

$$\Delta P_2 = (0,1008k_3 - 0,0143) K_{2U}^2 \quad \text{при } 0,75 \leq k_3 \leq 1, \quad (11)$$

а для В4С315Мd4

$$\Delta P_2 = (0,1244k_3 + 0,0128) K_{2U}^2 \quad \text{при } 0,75 \leq k_3 \leq 1. \quad (12)$$

**Максимальне завантаження.** Напруги прямої і зворотної послідовностей впливають на АД інтегрально. Чим меншим є завантаження, тим більшу несиметрію може витримувати двигун. Визначимо допустиме максимальне значення  $k_{\text{max}}$  коефіцієнта завантаження при заданій несиметрії напруг.

У стандарті на електричні машини за наявності відхилень напруги і частоти допустимим є перевищення температури на 10 або 5°C – для двигунів до або понад 100 кВт. До цих кондуктивних завод потрібно додати і несиметрію. У зв'язку з цим теоретично максимальне перевантаження визначається за умови не перевищення допустимої температури, яка 10 або 5°C є вищою за допустиму температуру  $\vartheta$  в тривалому режимі при відсутності завод. Однак з практичної точки зору природно зажадати, щоб температура перевищення була не більшою саме за  $\vartheta$ . Це дає деякий запас в оцінці максимального завантаження.

Оскільки температура перевищення є пропорційною втратам потужності, прийнята умова рівноцінна вимозі, щоб сумарні втрати потужності не були б більшими за номінальні втрати  $\Delta P_n$ . Це означає, що при  $k_{\text{max}}$  повинна виконуватися рівність

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 - \Delta P_n = 0. \quad (13)$$

Оскільки у виразі (9) ККД є залежним від коефіцієнта завантаження, виразимо втрати у вигляді

$$\Delta P_1 = a_1 k_3^2 + b_1 k_3 + c_1, \quad (14)$$

де для АД серії А4  $a_1 = 13,54$ ,  $b_1 = -7,542$ ,  $c_1 = 6,768$  кВт. Підставивши (10) і (14) в (13), отримаємо квадратне рівняння

$$(a_1 + a_2 K_{2U}^2) k_{\text{зmax}}^2 + (b_1 + b_2 K_{2U}^2) k_{\text{зmax}} + c_1 + c_2 K_{2U}^2 - (1/\eta_n - 1) P_n = 0, \quad (15)$$

Розв'язуючи це рівняння для кожного значення коефіцієнта несиметрії, отримаємо відповідні значення максимального навантаження. Для двигуна, що розглядається, вони апроксимуються виразом

$$k_{\text{зmax}} = -0,002333 K_{2U}^2 - 0,002167 K_{2U} + 1. \quad (16)$$

Аналогічні залежності отримано для двигунів 200 кВт фірм АВВ і Marelli Motori:

$$k_{\text{зmax}} = -0,007708 K_{2U}^2 + 0,002083 K_{2U} + 1, \quad (17)$$

$$k_{\text{зmax}} = -0,007167 K_{2U}^2 - 0,01533 K_{2U} + 1, \quad (18)$$

для яких показники є значно гіршими: наприклад, при несиметрії 6 % двигун серії А4 може працювати при навантаженні 0,9 і нижче, а для двигунів фірм АВВ і Marelli Motori навантаження обмежується значеннями 0,735 і 0,65. При межовій нормі 4 % з [4] відповідно маємо: 0,954 проти 0,885 і 0,824.

#### Заключні зауваження

1. Якщо несиметрія напруг змінюється за часом, то скорочення строку служби АД визначається за середніми втратами потужності, для отримання яких достатньо у формули підставити ефективне значення коефіцієнта зворотної послідовності. Середнє значення можна використовувати і для розрахунку температури додаткового перегріву, якщо несиметрія змінюється швидко або повільно відносно сталої часу нагрівання двигуна. У проміжному випадку за схемою заміщення розраховується графік зміни за часом втрат потужності, який є вхідним для теплової моделі двигуна.

2. Розрахунок енергетичних показників за схемою заміщення виконується, якщо двигун відрізняється потужністю або режимом роботи. Для техніко-економічних розрахунків великої кількості двигунів отримані залежності осереднюються для кожної серії АД.

#### Висновки

1. Вплив несиметрії напруг на двигуни доцільно оцінювати за двоконтурними схемами заміщення, параметри яких визначаються для кожного значення коефіцієнта навантаження двигуна.

2. Урахування навантаження двигунів дозволяє об'єктивно оцінити втрати від несиметрії напруг і в деяких випадках обґрунтувати можливість роботи двигуна при великих рівнях несиметрії але малих навантаженнях.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. – М. Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
2. Дмитрієва О. М., Сидоренко О. О. Вплив несиметрії напруг на втрати активної електроенергії у асинхронних двигунах і електричній мережі. – Наукові праці ДонНТУ. Серія "Електротехніка і енергетика", вип. 112. – Донецьк, 2006. – С. 91-96.
3. Сивокобыленко В. Ф., Костенко В. И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. – Донецк: ДПИ, 1979. – 110 с.
4. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине с 01.01.2000.
5. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
6. Кузнецов В. Г., Куренный Э. Г., Лютый А. П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 250 с.
7. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. – Введ. 01.01.1976.