

УДК. 621.316.91

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПРИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

Стьопін Ю.О., к.т.н.,

Попова І.О., к.т.н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел. 8(06192) 42-23-41

**Анотація** – робота присвячена дослідженню роботи асинхронних електродвигунів при несиметрії напруг у сільськогосподарських електричних мережах. Приведена математична модель електромагнітного розрахунку параметрів електродвигунів у перехідних режимах при несиметрії напруг.

**Ключові слова** – асинхронний електродвигун, несиметрія напруг, математична модель, перехідний режим.

*Постановка проблеми.* Дослідження режимів роботи сільських розподільних мереж 0,38/0,22 кВ, до яких приєднано електрообладнання господарств, свідчить про те, що в наслідок значної протяжності низьковольтних мереж, а також змішаного підключення однофазних та трифазних споживачів (де загальна потужність однофазних споживачів часто перевищує потужність трифазних) має місце недопустима несиметрія струмів та напруг. В реальних умовах експлуатації електроспоживачів України несиметричний режим є звичайним робочим режимом сільських мереж 0,38/0,22 кВ [1].

Несиметрія виявляється у різкому погіршенні техніко-економічних характеристик елементів мережі (зниженні експлуатаційної надійності і терміну роботи електродвигунів, виникненні ряду негативних явищ у мережах та ін.). Додаткові втрати у лініях 0,38 кВ, розподільних і споживчих трансформаторах тільки із-за нерівномірного навантаження по фазам складають 4% від всієї електроенергії, що споживає сільське господарство.

*Аналіз останніх досліджень.* Дослідження [3] показали, що відхилення напруги у сільських споживачів значно перевищують норми, що встановлені ГОСТ 13109-97. В господарствах, найбільш віддалених від джерел живлення, відхилення напруги знаходиться у допустимих межах тільки 54% часу, а нерівномірність навантаження фаз ко-

ливається в межах 16-22%. Математичне очікування величини несиметрії напруг по даним [2] складає 7,3%, що значно перевищує вимоги ГОСТ 13109-97. Напряга прямої послідовності складає 89% від номінальної, що на 3,5% нижче мінімально допустимої на затискачах електродвигунів по умовам їх пуску у симетричному режимі.

*Формулювання мети статті.* Теоретично (на основі комплексного дослідження електромагнітних процесів) визначити допустимі параметри експлуатації асинхронних електродвигунів при несиметрії напруг.

*Основна частина.* Аналіз електромагнітних процесів в асинхронних електродвигунах можна провести на основі математичної моделі. Запишемо систему рівнянь електричної рівноваги кіл статора і ротора трифазного симетричного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у вигляді:

$$\begin{aligned} u_A &= i_A r_1 + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ u_B &= i_B r_1 + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ u_C &= i_C r_1 + \frac{d\psi_C}{dt}; \\ 0 &= i_a r_2 + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 &= i_b r_2 + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 &= i_c r_2 + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $r_1, r_2$  – активні опори обмоток статора і ротора;

$\psi_A, \dots, \psi_c$  – потокозчеплення відповідних фаз двигуна.

Так як взаємне положення фаз статора і ротора при обертанні ротора двигуна зі швидкістю  $\omega$  безперервно змінюється і кут між осями фаз статора та ротора дорівнює

$$\gamma = \int_t \omega dt, \quad (2)$$

то взаємна індуктивність між обмотками однойменних фаз статора та ротора змінюється за законом

$$M_{Aa} = M_{\phi} \cos \gamma, \quad (3)$$

а різнойменних фаз

$$M_{Ab(c)} = M_{\phi} \cos(\gamma \pm \gamma), \quad (4)$$

де  $M_{\phi}$  – максимальна величина взаємної індуктивності між обмотками фаз при збігу їх осей;

$\gamma = 120^\circ$  – просторовий кут зсуву фаз обмоток трифазного статора та ротора.

Для симетричної приведенної трифазної машини прийнято, що взаємна індуктивність між обмотками фаз статора та ротора:

$$M_{\phi S} = M_{\phi} \cos 120^\circ = -0,5M_{\phi};$$

$$M_{\phi r} = M_{\phi} \cos 120^{\circ} = -0,5M_{\phi}. \quad (5)$$

- власна індуктивність фази статора та ротора

$$\begin{aligned} L_{\phi S} &= L_1 + M_{\phi}, \\ L_{\phi r} &= L_2 + M_{\phi}. \end{aligned} \quad (6)$$

Потокозчеплення фаз статора і ротора ідеалізованої лінійної машини визначаються сукупністю дій усіх струмів її як

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_{\phi S} i_A + M_{\phi S} i_B + M_{\phi S} i_C + M_{\phi} \cos \gamma i_a + M_{\phi} \cos(\gamma + \rho) i_b + \\ &M_{\phi} \cos(\gamma - \rho) i_c \quad ; \\ \Psi_B &= M_{\phi S} i_A + L_{\phi S} i_B + M_{\phi S} i_C + M_{\phi} \cos(\gamma - \rho) i_a + M_{\phi} \cos \gamma i_b + \\ &M_{\phi} \cos(\gamma + \rho) i_c \quad ; \\ \Psi_C &= M_{\phi S} i_A + M_{\phi S} i_B + L_{\phi S} i_C + M_{\phi} \cos(\gamma + \rho) i_a + M_{\phi} \cos(\gamma - \rho) i_b + \\ &M_{\phi} \cos \gamma i_c \quad ; \\ \Psi_a &= L_{\phi r} i_A + M_{\phi r} i_B + M_{\phi r} i_C + M_{\phi} \cos \gamma i_a + M_{\phi} \cos(\gamma - \rho) i_b + \\ &M_{\phi} \cos(\gamma + \rho) i_c \quad ; \\ \Psi_b &= M_{\phi r} i_A + L_{\phi r} i_B + M_{\phi r} i_C + M_{\phi} \cos(\gamma + \rho) i_a + M_{\phi} \cos \gamma i_b + \\ &M_{\phi} \cos(\gamma - \rho) i_c \quad ; \\ \Psi_c &= M_{\phi r} i_A + M_{\phi r} i_B + L_{\phi r} i_C + M_{\phi} \cos(\gamma - \rho) i_a + M_{\phi} \cos(\gamma + \rho) i_b + \\ &M_{\phi} \cos \gamma i_c \quad ; \end{aligned} \quad (7)$$

З метою вилучення з рівнянь періодичних коефіцієнтів систему рівнянь (1,7) трифазної машини, що обертається приводять до системи рівнянь двохфазної еквівалентної нерухомої машини [3].

Сутність перетворення системи рівнянь полягає у еквівалентній за м.р.с. зміні вісей координат. При цьому перетворення струмів ротора до нерухомих осей фаз статора здійснюється як

$$\bar{i}_2^T = \Pi \bar{i}_2, \quad (8)$$

а зворотне перетворення

$$\bar{i}_2 = \Pi^{-1} \bar{i}_2^T, \quad (9)$$

де  $\Pi$  – матриця перетворення.

$$\Pi = \frac{2}{3} \begin{vmatrix} \cos \gamma & \cos(\gamma + \rho) & \cos(\gamma - \rho) \\ \cos(\gamma - \rho) & \cos \gamma & \cos(\gamma + \rho) \\ \cos(\gamma + \rho) & \cos(\gamma - \rho) & \cos \gamma \end{vmatrix}, \quad (10)$$

а зворотна матриця, що дорівнює транспонованій

$$\Pi^{-1} = \frac{2}{3} \begin{vmatrix} \cos \gamma & \cos(\gamma - \rho) & \cos(\gamma + \rho) \\ \cos(\gamma + \rho) & \cos \gamma & \cos(\gamma - \rho) \\ \cos(\gamma - \rho) & \cos(\gamma + \rho) & \cos \gamma \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Так, еквівалентні за м.р.с. струми фаз ротора, що приведені до нерухомих осей фаз статора визначаються як:

$$\begin{aligned}i'_a &= \frac{2}{3}[i_a \cos \gamma + i_b \cos(\gamma + \rho) + i_c \cos(\gamma - \rho)]; \\i'_b &= \frac{2}{3}[i_a \cos(\gamma - \rho) + i_b \cos \gamma + i_c \cos(\gamma + \rho)]; \\i'_c &= \frac{2}{3}[i_a \cos(\gamma + \rho) + i_b \cos(\gamma - \rho) + i_c \cos \gamma].\end{aligned}\quad (12)$$

При перетворенні (12) та аналогічних перетвореннях для струмів статора у рівняння (7) отримуємо:

$$\begin{aligned}\Psi_A &= i_A L_S + i'_a M; \\ \Psi_B &= i_B L_S + i'_b M; \\ \Psi_C &= i_C L_S + i'_c M; \\ \Psi_a &= i_a L_r + i'_A M; \\ \Psi_b &= i_b L_r + i'_B M; \\ \Psi_c &= i_c L_r + i'_C M,\end{aligned}\quad (13)$$

де  $L_S, L_r$  – синхронні індуктивності фаз статора та ротора

$\begin{aligned}L_S &= L_{\phi S} - M_{\phi S} = L_1 + \frac{3}{2} M_{\phi} = L_1 + M; \\ L_r &= L_{\phi r} - M_{\phi r} = L_2 + \frac{3}{2} M_{\phi} = L_2 + M\end{aligned}$	(14)
---	------

де  $M$  – повна взаємна індуктивність між обмотками фаз статора та ротора.

Якщо знайти добутки поточкозчеплення фаз ротора із (13) на матрицю перетворення, то отримуємо їх значення, приведені вісей нерухомих фаз статора:

$$\left\{ \begin{aligned}u_A &= i_A r_1 + L_S \frac{di_A}{dt} + M \frac{di'_a}{dt} \\ u_B &= i_B r_1 + L_S \frac{di_B}{dt} + M \frac{di'_b}{dt} \\ u_C &= i_C r_1 + L_S \frac{di_C}{dt} + M \frac{di'_c}{dt} \\ 0 &= i'_a r_2 + L_r \frac{di'_a}{dt} + M \frac{di_A}{dt} + \frac{w}{\sqrt{3}} [L_r (i'_b - i'_c) + M (i_B - i_C)] \\ 0 &= i'_b r_2 + L_r \frac{di'_b}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + \frac{w}{\sqrt{3}} [L_r (i'_c - i'_a) + M (i_C - i_A)] \\ 0 &= i'_c r_2 + L_r \frac{di'_c}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + \frac{w}{\sqrt{3}} [L_r (i'_a - i'_b) + M (i_A - i_B)]\end{aligned}\right. \quad (15)$$

Система рівнянь (15) вирішена відносно реальних струмів статора  $i_A, i_B, i_C$  приведених струмів ротора  $i'_a, i'_b, i'_c$  в перехідних та встановлених режимах.

*Висновки.* За допомогою математичної моделі можна визначити параметри асинхронних електродвигунів при заданих напругах фаз статора, частоти обертання ротора  $w$  і параметрах машини. Напруги джерел живлення можуть бути несиметричними і несинусоїдальними,

задані фазними або лінійними величинами, у фази статора або ротора можуть бути включені додаткові опори, що знайде відображення у рівняннях (16) введенням в них відповідних падінь напруг.

#### Література

1. *Бакумов Ю.В.* Влияние температуры окружающей среды на тепловое состояние обретенных асинхронных двигателей / *Ю.В. Бакумов*//Электротехника. – 1974. – №3. – С.31-33.
2. *Деменин В.Н.* Анализ несимметрии в сельских сетях Новосибирской области / *В.Н. Деменин* // Механизация и электрификация сельского хозяйства Сибири. – 1978. – №3. – С.21-24.
3. *Нарожный В.Б.* Отключение напряжения в электрических сетях / *В.Б. Нарожный* // Электрические станции. - 1970. - №1. - С.55-59.
4. *Рожавский С.М.* Проблемы несимметрии в сельскохозяйственных электрических сетях / *С.М. Рожавский* // Энергетика и электрификация. – 1981. – Вып. 1. – С.14-16.

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Стёпин Ю.А., Попова И.А.

#### *Аннотация*

**Работа посвящена исследованию работы асинхронных электродвигателей при несимметрии напряжений в сельскохозяйственных электрических сетях. Приведена математическая модель электромагнитного расчета параметров электродвигателей в переходных режимах при несимметрии напряжений.**

### RESEARCH OF ASYNCHRONOUS MOTORS' WORK UNDER TENSION ASYMMETRY IN TRANSIENT CONDITIONS

Yu. Styopin, I. Popova

#### *Summary*

**The given papers are devoted to research of the work of asynchronous motors under asymmetry tension in agricultural electrical system. The rewash shown the mathematical model of electromagnetic calculation of motors parameters in transient conditions under asymmetry tension.**