

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ**

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.056>**АНАЛІТИЧНА МЕТОДИКА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА СХЕМ РЕГУЛЬОВАНИХ ЗА НАПРУГОЮ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У РАЗІ ОДНОФАЗНОГО ЖИВЛЕННЯ****Ю.В. Шуруб<sup>1\*</sup>**, канд. техн. наук, **Ю.Л. Цищурський<sup>2</sup>**<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

<sup>2</sup> – Національний університет біоресурсів і природокористування України,

вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна

e-mail: [yvshur@ukr.net](mailto:yvshur@ukr.net)

*На основі методу симетричних складових запропоновано аналітичну методику розрахунку коефіцієнтів, що визначають співвідношення між складовими прямої та зворотної послідовностей параметрів режиму роботи асинхронного двигуна та параметрами його живлення для деяких схем включення регульованих за напругою трифазних асинхронних двигунів із фазозміщуючими конденсаторами, що живляться від однофазної мережі. На основі цієї методики можуть бути визначені оптимальні параметри фазозміщуючих конденсаторів та вибрані раціональні схеми включення трифазних асинхронних двигунів в однофазну мережу. Бібл. 7, рис. 3, табл. 2.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, фазозміщуючий конденсатор, однофазне живлення, метод симетричних складових.

**Вступ.** Основними проблемами увімкнення трифазних асинхронних двигунів (АД) в однофазну мережу є вибір оптимального значення фазозміщуючого конденсатора [1, 2] та раціональної схеми [3, 4] з'єднання конденсатора з обмотками двигуна в разі його роботи в широкому діапазоні зміни швидкості та моменту внаслідок особливостей навантаження та живлення, зокрема живлення від регулятора напруги. У разі відхилення ковзання від розрахункових значень коефіцієнт несиметрії напруг різко зростає, що призводить до збільшення втрат потужності та зменшення надійності електропривода. Ефективним вирішенням мінімізації коефіцієнта несиметрії в разі роботи в широкому діапазоні зміни ковзання є регулювання ємності фазозміщуючого конденсатора, що, однак, погіршує масо-габаритні показники агрегата. Альтернативою може бути застосування комбінованої схеми включення в разі використання нерегульованої ємності. Відомо велику кількість схем під'єднання трифазного асинхронного двигуна з конденсатором у разі однофазного живлення [3, 5].

**Метою пропонованої статті** є визначення загальних співвідношень в асинхронному двигуні за однофазного режиму роботи для деяких із цих схем, що дали б змогу обирати оптимальні значення ємності фазозміщуючих конденсаторів та найбільш сприятливі за критерієм мінімуму коефіцієнта несиметрії схемні рішення таких електроприводів для різних режимів роботи.

**Загальні співвідношення в асинхронному двигуні за однофазного режиму роботи.**

Для аналізу роботи асинхронного двигуна в однофазному режимі й порівняння можливих варіантів схем включення будемо використовувати метод симетричних складових. В основу розрахунку покладемо характеристики АД у симетричному трифазному режимі роботи. Водночас введемо позначення:  $M_1, I_1, Z_1, \varphi_1$  – відповідно залежності моменту, струму, модуля й аргумента повного опору схеми заміщення АД у симетричному двигунному режимі, а  $M_2, I_2, Z_2, \varphi_2$  – у симетричному генераторному режимі у функції ковзання. Характеристики АД у трифазному й однофазному режимах роботи будемо розглядати за однакових ковзань, чим забезпечується рівність повних опорів схем заміщення машини для двигунного симет-

ричного режиму і для напруги прямої послідовності в однофазному режимі роботи, а також для генераторного симетричного режиму і для напруги зворотної послідовності в однофазному режимі.

Введемо складові прямої (позначені індексом  $p$ ), зворотної ( $n$ ) та нульової ( $0$ ) послідовностей:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_p + \dot{U}_n + \dot{U}_0; \dot{U}_B = \dot{U}_p a + \dot{U}_n a^2 + \dot{U}_0; \dot{U}_C = \dot{U}_p a^2 + \dot{U}_n a + \dot{U}_0; \dot{I}_A = \dot{I}_p + \dot{I}_n + \dot{I}_0, \quad (1)$$

$$\text{де } \dot{I}_p = \frac{\dot{U}_p}{\dot{Z}_1}, \dot{I}_n = \frac{\dot{U}_n}{\dot{Z}_2}, a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}, \dot{Z}_1 = Z_1 e^{j\varphi_1} = Z_1 (\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1), \dot{Z}_2 = Z_2 e^{j\varphi_2} = Z_2 (\cos \varphi_2 + j \sin \varphi_2).$$

Тут  $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2$  – комплексні опори (за параметрами Т-подібних схем заміщення, що не враховують магнітні втрати в осердях двигуна [6]) відповідно прямої та зворотної послідовностей:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= R_1 + jX_1 + \frac{jX_m \left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right)}{jX_m + \frac{R_2}{s} + jX_2} = R_1 + jX_1 + \frac{(-X_m X_2 + jX_m \frac{R_2}{s})}{\frac{R_2}{s} + j(X_m + X_2)} = \\ &= R_1 + jX_1 + \frac{(-X_m X_2 + jX_m \frac{R_2}{s}) \left( \frac{R_2}{s} - j(X_m + X_2) \right)}{\left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_m + X_2)^2} = \end{aligned} \quad (2)$$

$$= \left( R_1 + \frac{X_m \frac{R_2}{s} (X_m + X_2) - X_m X_2 \frac{R_2}{s}}{\left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_m + X_2)^2} \right) + j \left( X_1 + \frac{X_m \left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_m X_2 (X_m + X_2)}{\left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_m + X_2)^2} \right)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_2 &= R_1 + jX_1 + \frac{jX_m \left( \frac{R_2}{2-s} + jX_2 \right)}{jX_m + \frac{R_2}{2-s} + jX_2} = R_1 + jX_1 + \frac{(-X_m X_2 + jX_m \frac{R_2}{2-s})}{\frac{R_2}{2-s} + j(X_m + X_2)} = \\ &= R_1 + jX_1 + \frac{(-X_m X_2 + jX_m \frac{R_2}{2-s}) \left( \frac{R_2}{2-s} - j(X_m + X_2) \right)}{\left( \frac{R_2}{2-s} \right)^2 + (X_m + X_2)^2} = \end{aligned} \quad (3)$$

$$= \left( R_1 + \frac{X_m \frac{R_2}{2-s} (X_m + X_2) - X_m X_2 \frac{R_2}{2-s}}{\left( \frac{R_2}{2-s} \right)^2 + (X_m + X_2)^2} \right) + j \left( X_1 + \frac{X_m \left( \frac{R_2}{2-s} \right)^2 + X_m X_2 (X_m + X_2)}{\left( \frac{R_2}{2-s} \right)^2 + (X_m + X_2)^2} \right)$$

де  $R_1, R_2, X_1, X_2, X_m$  – параметри Т-подібної схеми заміщення АД.

Тоді модулі та фази комплексних опорів прямої та зворотної послідовностей  $Z_1, Z_2, \varphi_1, \varphi_2$  визначатимуться за формулами:

$$Z_1 = \sqrt{\left( R_1 + \frac{X_m \frac{R_2}{s} (X_m + X_2) - X_m X_2 \frac{R_2}{s}}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_m + X_2)^2} \right)^2 + \left( X_1 + \frac{X_m \left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_m X_2 (X_m + X_2)}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_m + X_2)^2} \right)^2}, \quad (4)$$

$$Z_2 = \sqrt{\left( R_1 + \frac{X_m \frac{R_2}{2-s} (X_m + X_2) - X_m X_2 \frac{R_2}{2-s}}{\left(\frac{R_2}{2-s}\right)^2 + (X_m + X_2)^2} \right)^2 + \left( X_1 + \frac{X_m \left(\frac{R_2}{2-s}\right)^2 + X_m X_2 (X_m + X_2)}{\left(\frac{R_2}{2-s}\right)^2 + (X_m + X_2)^2} \right)^2}, \quad (5)$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_1 + \frac{X_m \left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_m X_2 (X_m + X_2)}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_m + X_2)^2}}{R_1 + \frac{X_m \frac{R_2}{s} (X_m + X_2) - X_m X_2 \frac{R_2}{s}}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_m + X_2)^2}}, \quad (6)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_1 + \frac{X_m \left(\frac{R_2}{2-s}\right)^2 + X_m X_2 (X_m + X_2)}{\left(\frac{R_2}{2-s}\right)^2 + (X_m + X_2)^2}}{R_1 + \frac{X_m \frac{R_2}{2-s} (X_m + X_2) - X_m X_2 \frac{R_2}{2-s}}{\left(\frac{R_2}{2-s}\right)^2 + (X_m + X_2)^2}}. \quad (7)$$

У наведених виразах використано згадані вище рівності повних опорів схем заміщення для кожного з режимів і для відповідної складової напруги однофазного режиму:  $\dot{Z}_p = \dot{Z}_1$ ,  $\dot{Z}_n = \dot{Z}_2$  і рівності  $\varphi_p = \varphi_1$ ,  $\varphi_n = \varphi_2$ , що є наслідком рівності повних опорів схем заміщення.

Рівняння Кірхгофа для деяких схем з'єднання статорних обмоток (рис. 1) представлено в табл. 1 у разі прийняття додатного напрямку обходу фази від нульової точки [3].

Особливістю схеми 3 є наявність тиристорного регулятора напруги (ТРН), що включений послідовно з фазами *B* та *C* та не впливає на напругу конденсаторної фази. Тому ТРН у схемі 3 може розглядатись як додатковий до конденсатора симетруючий елемент.

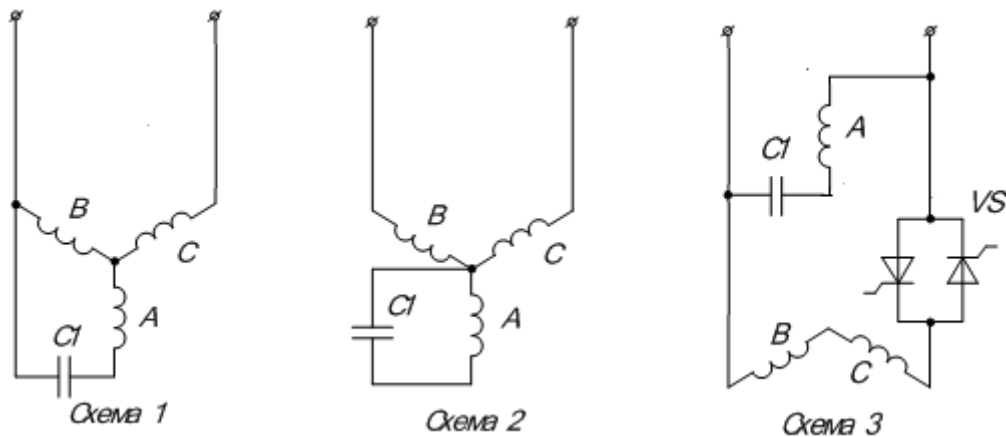


Рис. 1

Таблиця 1

Схема 1	Схема 2	Схема 3
$\dot{U}_C - \dot{U}_B = \dot{U}$	$\dot{U}_C - \dot{U}_B = \dot{U}$	$\dot{U}_C - \dot{U}_B = k\dot{U}$
$\dot{U}_A - \dot{U}_B = jX_{C1} \dot{I}_A$	$\dot{U}_A = jX_{C1} \dot{I}_A$	$\dot{U}_A = \dot{U} + jX_{C1} \dot{I}_A$

У формулах табл. 1  $jX_{C1} \dot{I}_A$  – напруга на фазозміщуючому конденсаторі, що має протилежний напрямок до напруги фази А, з'єднаної послідовно з конденсатором, де  $X_{C1} = -1/(\omega C1)$ . Для схеми 3 коефіцієнт  $k = \frac{U_{BC}}{U}$  позначає відношення напруги регульованої головної фази BC до напруги живлення. Запропонована пошукова методика для попереднього вибору ємності фазозміщуючого конденсатора базується на припущенні, що на виході ТРН присутня тільки перша гармонічна складова напруги.

Підставляючи (1) у рівняння табл. 1, дістанемо:

$$\text{для схеми 1: } (\dot{U}_p - \dot{U}_n)(a^2 - a) = \dot{U}; \quad \dot{U}_p \left(1 - a - \frac{jX_{C1}}{Z_1}\right) + \dot{U}_n \left(1 - a^2 - \frac{jX_{C1}}{Z_2}\right) = 0, \quad (8)$$

$$\text{для схеми 2: } (\dot{U}_p - \dot{U}_n)(a^2 - a) = \dot{U}; \quad \dot{U}_p \left(1 - \frac{jX_{C1}}{Z_1}\right) + \dot{U}_n \left(1 - \frac{jX_{C1}}{Z_2}\right) = 0, \quad (9)$$

$$\text{для схеми 3: } (\dot{U}_p - \dot{U}_n)(a^2 - a) = k\dot{U}; \quad \dot{U}_p \left(1 - \frac{jX_{C1}}{Z_1}\right) + \dot{U}_n \left(1 - \frac{jX_{C1}}{Z_2}\right) = \dot{U}. \quad (10)$$

Треба зазначити, що в схемах 2, 3 присутня складова напруги нульової послідовності, що породжує струм нульової послідовності, який не створює крутного моменту в зоні робочих ковзань, а впливає тільки на споживану потужність і втрати. У схемі "зірка" складової нульової послідовності немає [7].

Введемо базисні значення  $X_{C0}$  для ємнісного опору:

$$X_{C0} = -\frac{\sqrt{3}U}{I_1} = -\sqrt{3}Z_1, \quad (11)$$

де  $U$  і  $I_1$  – фазні значення напруги і струму в симетричному двигунному режимі.

Також введемо відносне значення ємності:

$$x = \frac{X_{C0}}{X_{C1}} \quad (12)$$

та коефіцієнт, що дорівнює відношенню струмів режимів противмикання і двигунного за симетричного живлення:

$$k_i = \frac{U/Z_2}{U/Z_1} = \frac{Z_1}{Z_2}. \quad (13)$$

Провівши низку перетворень, дістанемо вирази для напруг прямої та зворотної послідовностей:

$$\text{для схеми 1: } \dot{U}_p = \frac{U \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} x - k_i \sin \varphi_2 - j \left( \frac{1}{2} x + k_i \cos \varphi_2 \right) \right]}{\sqrt{3} \left\{ \cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2 + j \left[ \sqrt{3} x - (\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2) \right] \right\}}; \quad (14)$$

$$\dot{U}_n = -\frac{U \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} x - \sin \varphi_1 + j \left( \frac{1}{2} x - \cos \varphi_1 \right) \right]}{\sqrt{3} \left\{ \cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2 + j \left[ \sqrt{3} x - (\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2) \right] \right\}}, \quad (15)$$

$$\text{для схеми 2: } \dot{U}_p = \frac{\dot{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} x - k_i \sin \varphi_2 - j k_i \cos \varphi_2 \right]}{\sqrt{3} \left\{ \cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2 + j \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} x - (\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2) \right] \right\}}; \quad (16)$$

$$\dot{U}_n = \frac{\dot{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} x - \sin \varphi_1 - j \cos \varphi_1 \right]}{\sqrt{3} \left\{ \cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2 + j \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} x - (\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2) \right] \right\}}, \quad (17)$$

$$\text{для схеми 3: } \dot{U}_p = \frac{\dot{U} \left[ \frac{k}{\sqrt{3}} x - k k_i \sin \varphi_2 - j (x + k k_i \cos \varphi_2) \right]}{\sqrt{3} \left\{ \cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2 + j \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} x - (\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2) \right] \right\}}; \quad (18)$$

$$\dot{U}_n = \frac{\dot{U} \left[ \frac{k}{\sqrt{3}} x - k \sin \varphi_1 + j (x - k \cos \varphi_1) \right]}{\sqrt{3} \left\{ \cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2 + j \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} x - (\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2) \right] \right\}}. \quad (19)$$

Переходячи до модулів, знайдемо відношення  $\alpha = \frac{U_p}{U}$ ,  $\beta = \frac{U_n}{U}$  та коефіцієнт несиметрії  $\gamma = \frac{U_n}{U_p}$ .

Вирази для визначення коефіцієнтів  $\alpha, \beta, \gamma$  розглянутих схем наведено в табл. 2.

Симетричний режим у розглянутих схемах має місце за умови рівності нулю складової напруги зворотної послідовності, тобто в разі  $\beta = 0$ .

У випадку зміни кута  $\varphi_1$  у межах від 0 до 90 ел.град., поліноми, що стоять у чисельнику підкореневих виразів для  $\beta$  (див. табл. 2), у схемах 1,2,3 мають дійсні корені тільки у разі одного значення:  $\varphi_1 = 60$  ел. град. для схеми 1,  $\varphi_1 = 90$  ел.град. для схеми 2,  $\varphi_1 = 45$  ел.град. для схеми 3. Це означає, що вибір ємності згідно з умовою  $\beta = 0$  забезпечує в разі зазначених значень  $\varphi_1$  повністю симетричний режим, коли  $\alpha = 1$ , водночас  $x = 1$  (тобто

$X_C = \sqrt{3}Z_1$ ) для схеми 1,  $x = \sqrt{3}$  ( $X_C = Z_1$ ) для схеми 2,  $x = \frac{\sqrt{3}}{2}$  ( $X_C = 2Z_1$ ) для схеми 3. У

всіх інших випадках режим роботи – несиметричний. Знаючи параметри двигуна і конкретні діапазони зміни ковзання та навантаження, а, отже, і кута, можна вибрати схему з найбільш сприятливим характером зміни коефіцієнта несиметрії або здійснювати комбіноване управління, коли в одному діапазоні регулювання обмотки статора включаються в "зірку", а в іншому – послідовно-паралельно.

Умовою найбільшої симетрії напруг статора двигуна у разі значень  $\varphi_1$ , що не дають можливість виконати умову  $\beta = 0$ , є умова мінімуму коефіцієнта несиметрії  $\gamma = \min$ .

У разі відхилення ковзання (а, отже, і кута  $\varphi_1$ ) від розрахункових значень коефіцієнт несиметрії різко зростає. Ефективним вирішенням мінімізації  $\gamma$  у разі роботи в широкому діапазоні зміни ковзання є регулювання ємності фазозсуваючого конденсатора.

За формулами табл. 2, застосовуючи критерій  $\gamma = \min$ , можна знайти оптимальний опір фазозсуваючого конденсатора для всіх значень навантаження двигуна. Для розрахунку характеристик двигуна як вихідну інформацію задають значення модулів повних опорів  $Z$  і

фазових кутів  $\varphi$  схем заміщення прямої і зворотної послідовностей для різних ковзань. Причому параметри табл. 2 визначаються тільки ковзанням (для схем 1, 2) та коефіцієнтом  $k$  та ковзанням (для схеми 3) і не залежать від напруги живлення.

Таблиця 2

	Схема 1	Схема 2	Схема 3
$\alpha$	$\sqrt{\frac{x^2 - \theta_2 k_i x + k_i^2}{(\sqrt{3}x - \phi_2)^2 + \phi_1^2}}$	$\sqrt{\frac{\frac{1}{3}x^2 - \theta_2 k_i x + k_i^2}{\left(\frac{2}{\sqrt{3}}x - \phi_2\right)^2 + \phi_1^2}}$	$\sqrt{\frac{\frac{(k^2 + 3)}{3}x^2 - \theta_2 k k_i x + k^2 k_i^2}{\left(\frac{2}{\sqrt{3}}x - \phi_2\right)^2 + \phi_1^2}}$
$\beta$	$\sqrt{\frac{x^2 - \theta_1 x + 1}{(\sqrt{3}x - \phi_2)^2 + \phi_1^2}}$	$\sqrt{\frac{\frac{1}{3}x^2 - \theta_1 x + 1}{\left(\frac{2}{\sqrt{3}}x - \phi_2\right)^2 + \phi_1^2}}$	$\sqrt{\frac{\frac{(k^2 + 3)}{3}x^2 - \theta_1 k x + k^2}{\left(\frac{2}{\sqrt{3}}x - \phi_2\right)^2 + \phi_1^2}}$
$\gamma$	$\sqrt{\frac{x^2 - \theta_1 x + 1}{x^2 - \theta_2 k_i x + k_i^2}}$	$\sqrt{\frac{\frac{1}{3}x^2 - \theta_1 x + 1}{\frac{1}{3}x^2 - \theta_2 k_i x + k_i^2}}$	$\sqrt{\frac{\frac{(k^2 + 3)}{3}x^2 - \theta_1 k x + k^2}{\frac{(k^2 + 3)}{3}x^2 - \theta_2 k k_i x + k^2 k_i^2}}$
$\theta_1$	$\sqrt{3} \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_1$	$\frac{2k}{\sqrt{3}} \sin \varphi_1 + 2 \cos \varphi_1$
$\theta_2$	$\sqrt{3} \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_2$	$\frac{2k}{\sqrt{3}} \sin \varphi_2 - 2 \cos \varphi_2$
$\phi_1$	$\cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2$	$\cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2$	$\cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2$
$\phi_2$	$\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2$	$\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2$	$\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2$

**Результати досліджень.** Проведемо за пропонованою методикою порівняльний аналіз характеристик АД у разі з'єднання її обмоток за схемами Штейнметца (схема 1 на рис. 1) і "зірка з нульовим проводом" (схема 2 на рис. 1), розрахованих за вищенаведеною методикою. У зоні робочих ковзань, тобто коли  $s < s_k$ , в якості енергетичного критерію оцінки схем включення можна прийняти коефіцієнт несиметрії напруг прямої та зворотної послідовностей  $\gamma = \frac{U_n}{U_p}$ . На рис. 2 наведено залежності коефіцієнта несиметрії від ковзання для

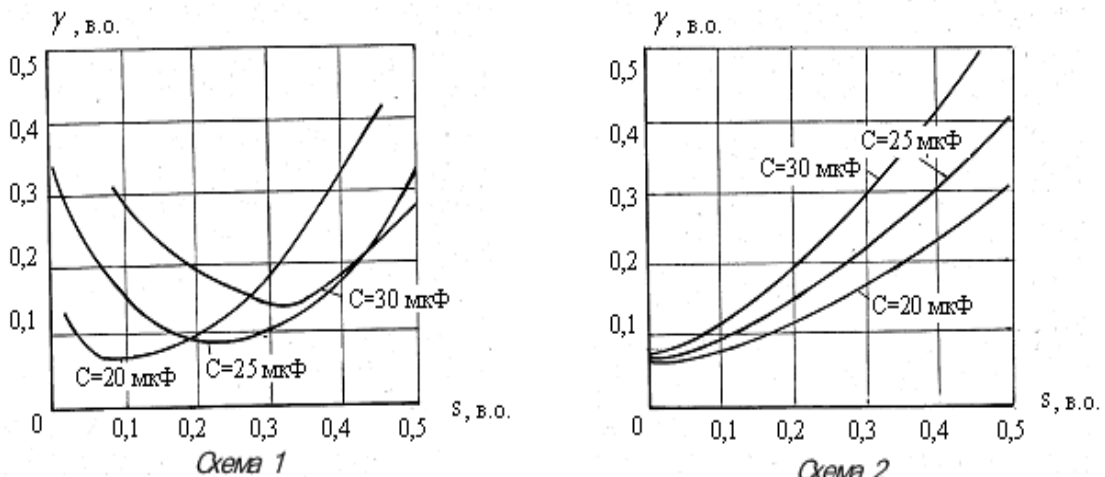


Рис. 2

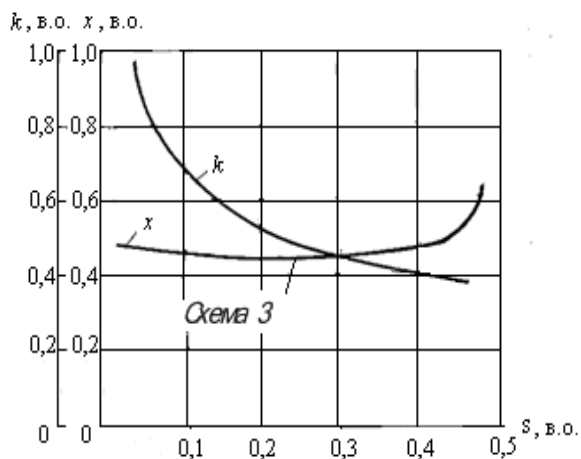


Рис. 3

зного проводу (схема 3 на рис. 1) є залежність параметрів  $\alpha, \beta, \gamma$  від відношення напруги регульованої головної фази до напруги живлення  $k = \frac{U_{BC}}{U}$ . На рис. 3 показано закони зміни

$k$  та відносного значення ємності  $x = \frac{X_{C_0}}{X_{C_1}}$  залежно від ковзання  $s$ , що забезпечують умову мінімуму коефіцієнта несиметрії  $\gamma = \min$ .

Найбільш важливим фактом, який вбачається з цих графіків, є відносна сталість оптимального значення ємності в широкому діапазоні ковзань. Тому в разі діапазону регулювання в межах робочих значень ковзання доцільним є застосування схеми 3, що дає змогу дістати прийнятний коефіцієнт несиметрії за постійного значення ємності фазозсуваючого конденсатора.

**Висновки.** Розроблений аналітичний метод дає змогу з достатньою точністю проводити попередній (пошуковий) аналіз системи й обирати оптимальні параметри фазозміщуючих елементів та схеми включення обмоток статора асинхронної машини в однофазному режимі. Особливістю пропонованого методу є те, що параметри отриманих виразів для розрахунку коефіцієнта несиметрії є незмінними в разі варіювання ємності фазозміщуючого конденсатора для кожного значення ковзання.

*Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробити засоби підвищення ефективності систем електро-механічного перетворення енергії з традиційними та відновлювальними джерелами» («Агрегат-2»), що виконується за відомчою тематикою НАН України. Державний реєстраційний номер 0119U001214. КПК ВК 6541030.*

1. Попович О.М., Бібік О.В. Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насосу за застосування комплексного проектування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"*. 2018. № 5. С. 79–82.
2. Malyar V., Namola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. Proc. 17th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering CPEE2016. Sandomierz, Poland, September 14–17, 2016. Pp. 1–4. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/CPEE.2016.7738735>.
3. Адаменко А.И., Кисленко В.И. Преобразование однофазного тока в многофазный. Киев: Техніка, 1971, 272 с.
4. Шуруб Ю.В. Трифазно-однофазний асинхронний електропривод з багатоелементним ємнісним фазозміщуючим модулем. *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 3. С. 49–50.
5. Торопцев Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором. М.: Энергоатомиздат, 1988. 95 с.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. М.: Энергия, 1966. 782 с.

двох схем за різних значень ємностей  $C_1$ . З них видно, що значення ковзань, відповідних мінімуму коефіцієнта несиметрії і мінімуму втрат, практично збігаються. Схема із самозбудженням конденсаторної фази має мінімум  $\gamma$ , тобто режим, найбільш близький до симетричного, на холостому ходу.

Отже, схема "зірка з нульовим проводом" позбавлена недоліків конденсаторних АМ, а саме – підвищених втрат на холостому ходу. Її застосування доцільно в разі необхідності тривалої роботи АМ за малих навантажень, що дає змогу знизити втрати холостого ходу приблизно в 2 рази.

Особливістю послідовно-паралельної схеми з включенням тиристорів до розсічки фазного проводу

7. Лесник В.А., Шуруб Ю.В. [Учет дифференциальных параметров при математическом моделировании несимметричных режимов работы асинхронных генераторов](#). *Техн. електродинаміка*. 2003. № 1. С. 45–48

#### ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING OPTIMAL PARAMETERS AND SCHEMES FOR VOLTAGE-REGULATED INDUCTION MOTORS WITH SINGLE-PHASE POWER SUPPLY

Yu.V. Shurub<sup>1</sup>, Yu.L. Tsitsyurskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

<sup>2</sup> – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,  
Heroiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

*On the basis of the method of symmetric components, an analytical method is proposed for calculating the coefficients that determine the relationship between the components of the positive and negative sequences of the parameters of the operating mode of an induction motor and the parameters of its power supply for some circuits for the inclusion of voltage-controlled three-phase induction motors with phase-shifting capacitors powered by a single-phase network. On the basis of this technique, the optimal parameters of phase-shifting capacitors can be determined and rational schemes for connecting three-phase induction motors to a single-phase network can be selected. Ref. 7, fig. 3, tables 2.*

**Keywords:** induction motor, phase-shifting capacitor, single-phase supply, method of symmetric components.

1. Popovych O.M., Bibik O.V. Search and evaluation of ways to increase the energy efficiency of a monoblock pump in the application of complex design. *Visnyk NTU KhPI*, 2018. No 5. Pp. 79–82. (Ukr)
2. Malyar V., Hamola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. Proc. 17th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering CPEE2016. Sandomierz, Poland, September 14-17, 2016. Pp. 1–4. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/CPEE.2016.7738735>.
3. Adamenko A.I., Kyslenko V.I. Single-phase to multi-phase current conversion. Kyiv: Technika, 1971, 272 p. (Rus)
4. Shurub Yu.V. A three-one phase induction electric drive with a multiple-unit capacitor phase-shifting modules. *Elektrotehnika i electromehaniika*. 2011. No 3. Pp. 49–50. (Ukr)
5. Toroptsev N.D. Three-phase induction motor with single-phase power supply through the capacitor. Moskva: Energoatomizdat, 1988. 95 p. (Rus)
6. Voldek A.I. Electric machines. Moskva: Energia, 1966. 782 p. (Rus)
7. Lesnik V.A., Shurub Yu.V. Taking into account the differential parameters in the mathematical simulation of non-symmetric operating modes of asynchronous generators. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2003. No 1. Pp. 45–48. (Rus)

Надійшла: 20.07.2021

Received: 20.07.2021