

УДК 621.313.333.004.58

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ПРИ З'ЄДНАННІ ОБМОТОК СТАТОРА ВІДКРИТИМ ТРИКУТНИКОМ

Вовк О.Ю., к.т.н.

Таврійська державна агротехнічна академія

Тел. (0619) 423-263

Анотація – Робота присвячена порівнянню параметрів Т-образної схеми заміщення асинхронного електродвигуна при з'єднанні його обмоток статора зіркою і відкритим трикутником.

Ключові слова – асинхронний електродвигун, відкритий трикутник, параметри схеми заміщення.

Постановка проблеми. Схеми з'єднання обмоток статора асинхронного електродвигуна, які існують до теперішнього часу, проаналізовано різними вченими, вони використовуються для теоретичних і практичних цілей [1]. Використання зазначених схем в експлуатації для аналізу функціонування електродвигуна можливе лише при створенні в ньому обертаючого магнітного поля. Тому необхідно обґрунтувати таку схему заміщення асинхронного електродвигуна, яка дозволить аналізувати функціонування електродвигуна в експлуатації при створенні в ньому пульсуючого магнітного поля.

Аналіз останніх досліджень. Існуючі Т-образні та Г-образні схеми заміщення асинхронного електродвигуна, їх спрощенні варіанти, схеми заміщення асинхронного електродвигуна, запропоновані Т.Г.Сорокером та іншими вченими [2], дозволяють аналізувати роботу асинхронного електродвигуна при створенні в ньому обертаючого магнітного поля.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). З метою аналізу функціонування асинхронного електродвигуна в експлуатації необхідно обґрунтувати параметри його Т-образної схеми заміщення при з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником, що дозволить використовувати зазначений електродвигун для певних цілей.

Основна частина. Розглянемо Т-образну схему заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна з фазним ротором (рис.1). При цьому будемо вважати, що асинхронний електродвигун є симетричним [3].

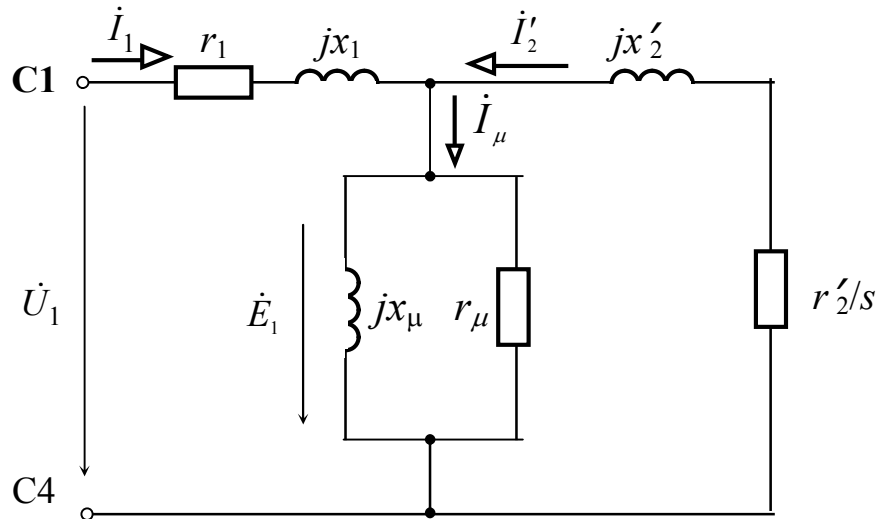


Рис.1. Т-образна схема заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна з фазним ротором.

На схемі (рис.1) наведено наступні умовні позначення:

- \dot{U}_1 — напруга джерела живлення, B ;
- \dot{E}_1 — електрорушійна сила взаємної індукції, B ;
- r_1 — активний опір фази обмотки статора, Om ;
- jx_1 — індуктивний опір розсіювання фази обмотки статора, Om ;
- \dot{I}_1 — сила струму у фазі обмотки статора, A ;
- jx_μ — індуктивний опір взаємної індукції, Om ;
- r_μ — активний опір, який враховує втрати активної потужності в магнітопроводі статора, Om ;
- \dot{I}_μ — сила струму намагнічування, A ;
- r'_2 — активний опір розсіювання фази обмотки ротора, приведений до обмотки статора, Om ;
- jx'_2 — індуктивний опір фази обмотки ротора приведений до обмотки статора, Om ;
- \dot{I}'_2 — сила струму у фазі обмотки ротора, приведена до обмотки статора A ;
- s — ковзання асинхронного електродвигуна.

Розглянемо кожен із параметрів схеми окремо. При цьому будемо враховувати, що при переключенні обмоток статора із зірки на відкритий трикутник трифазний асинхронний електродвигун перетворюється на однофазний з пульсуючим магнітним полем.

Активний опір фази обмотки статора при з'єднанні зіркою дорівнює [3]:

$$r_1 = k_r \cdot \rho_g \cdot \frac{l_{\text{СЕР}} \cdot w_1}{q_{\text{ЕЛ}} \cdot n_{\text{ЕЛ}}}, \quad (1)$$

- де k_r – коефіцієнт збільшення активного опору фази обмотки статора від впливу витиснення струму;
- ρ_g – питомий опір матеріалу обмотки статора при розрахунковій температурі, Ом·м;
- $l_{\text{СЕР}}$ – середня довжина витка обмотки статора, м;
- w_1 – кількість витків обмотки статора;
- $q_{\text{ЕЛ}}$ – переріз елементарного провідника обмотки статора, м²;
- $n_{\text{ЕЛ}}$ – кількість елементарних провідників обмотки статора в одному ефективному.

При з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником зневажимо незначною зміною k_r і ρ_g та врахуємо, що середня довжина витка обмотки, переріз елементарного провідника обмотки і кількість елементарних провідників в одному ефективному не зміняться, а кількість витків, що припадають на одну фазу обмотки, збільшиться в три рази. З урахуванням зазначеного вище перепишемо вираз (1) в наступному вигляді:

$$r_{1V} = 3r_1. \quad (2)$$

Індуктивний опір фази обмотки статора при з'єднанні зіркою дорівнює:

$$x_1 = 4\pi \cdot \mu_0 \cdot f_1 \cdot w^2 \cdot \frac{l_\delta \cdot \lambda}{p \cdot q}, \quad (3)$$

- де μ_0 – магнітна постійна, Гн/м;
- f_1 – частота струму в обмотці статора, Гц;

- l_{δ} – активна (розрахункова) довжина асинхронного електродвигуна, m ;
 λ – коефіцієнт магнітної провідності для потокозчеплення на одиницю довжини асинхронного електродвигуна;
 p – кількість пар полюсів асинхронного електродвигуна;
 q – кількість котушок в котушковій групі.

При з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником значення μ_0 , f , l_{δ} , λ не змінюються, а кількість витків, що припадають на одну фазу обмотки збільшується в три рази. З метою встановлення кількісної зміни кількості пар полюсів асинхронного електродвигуна при переключенні фаз обмотки статора із зірки на відкритий трикутник розглянемо схеми з'єднання для обох випадків обмоток статорів, кожна фаза якого містить по чотири котушкові групи (рис.2, рис.3). На рисунках стрілками позначено напрям струму.

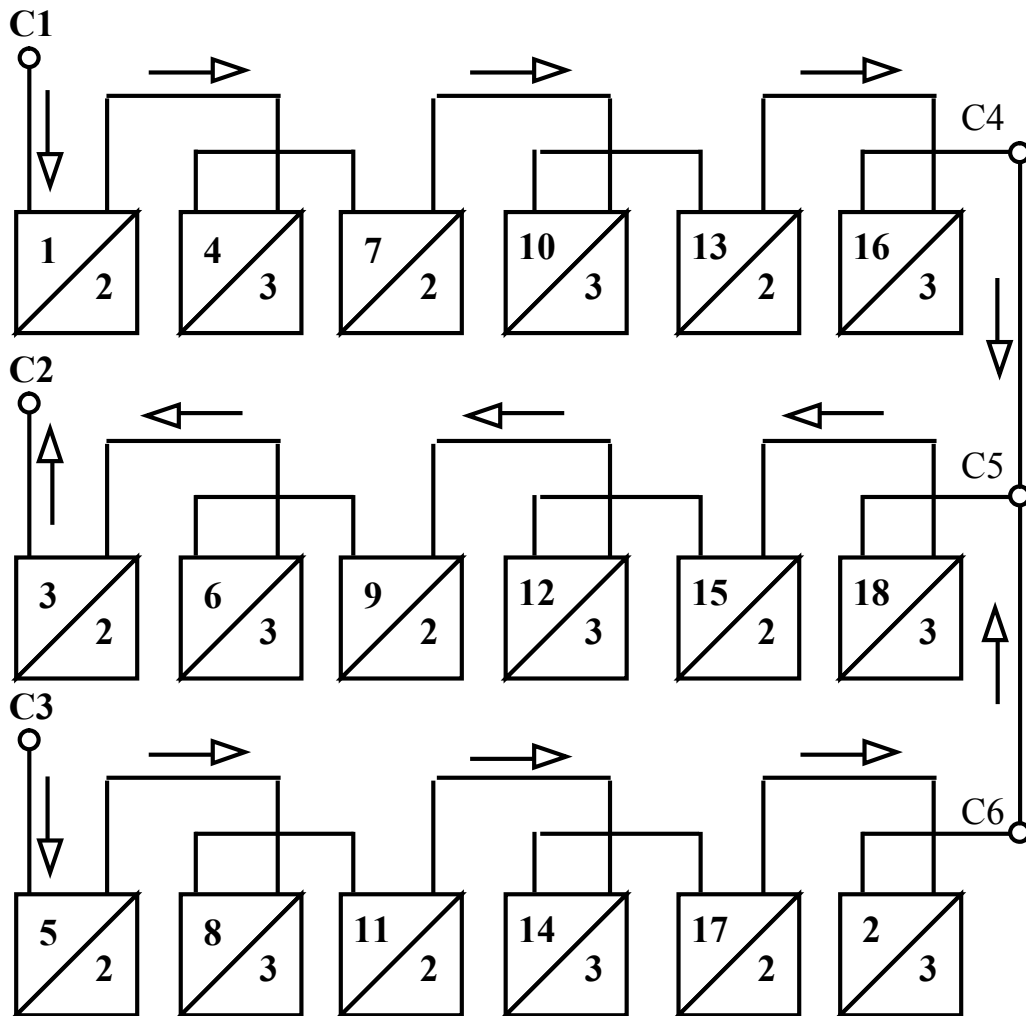


Рис.2. Електрична схема з'єднань обмотки статора зіркою із розміщенням зображення обмоток статора, що визначається зручністю читання схеми.

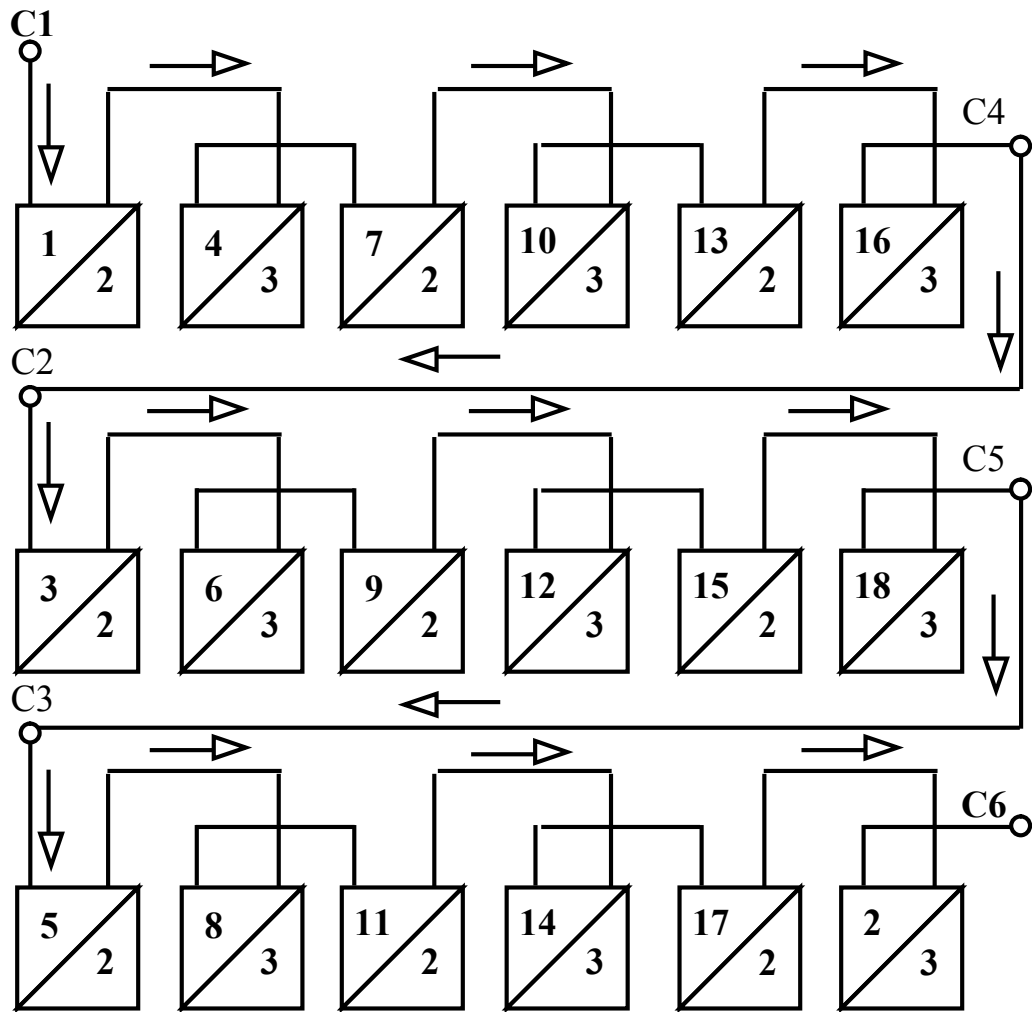


Рис.3. Електрична схема з'єднань обмотки статора відкритим трикутником із розміщенням зображення обмоток статора, що визначається зручністю читання схеми.

При порівнянні рис.2 та рис.3 робимо висновок: при переключенні обмоток статора із зіркою на відкритий трикутник кількість пар полюсів обмоток зменшується в три рази, що підтверджується даними особистих лабораторних випробувань (електродвигун 4A71BA2Y3 із синхронною швидкістю 3000 об/хв при переключенні обмоток статора із зірки на відкритий трикутник синхронна швидкість встановилась 1000 об/хв, в електродвигуна 4A80A4Y3 із синхронною швидкістю 1500 об/хв при переключенні обмоток статора із зірки на відкритий трикутник синхронна швидкість встановилась 750 об/хв, в електродвигуна 4A90LB4Y3 із синхронною швидкістю 750 об/хв при переключенні обмоток статора із зірки на відкритий трикутник синхронна швидкість встановилась 250 об/хв).

Кількість котушок в котушковій групі визначається так [3]:

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m_1}, \quad (4)$$

де Z_1 – кількість пазів статора;
 m_1 – кількість фаз обмотки статора.

При з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником кількість пазів статора не змінюється, а кількість фаз обмотки статора зменшується в три рази. З урахуванням цього, а також результатів порівняння рис.2 та рис.3, перепишемо вираз (4) в наступному вигляді:

$$q_v = 9 \cdot q, \quad (5)$$

З урахуванням зазначеного вище перепишемо вираз (3) в наступному вигляді:

$$x_{1v} = 3 \cdot x_1. \quad (6)$$

Індуктивний опір взаємної індукції при з'єднанні обмоток статора зіркою дорівнює [3]:

$$x_\mu = \frac{4 \cdot m_1 \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot w_1^2 \cdot k_{об1}^2}{\pi \cdot k_\delta \cdot \delta \cdot p}, \quad (7)$$

де τ – полюсне ділення, m^2 ;
 $k_{об1}$ – обмотковий коефіцієнт обмотки статора;
 k_δ – коефіцієнт повітряного зазору (коефіцієнт насичення);
 δ – довжина повітряного зазору, m .

Полюсне ділення визначається так [3]:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}, \quad (8)$$

де D – внутрішній діаметр статора, m^2 .

При з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником внутрішній діаметр статора не змінюється, кількість пар полюсів обмоток зменшується в три рази. З урахуванням цього перепишемо вираз (8) в наступному вигляді:

$$\tau_v = 3 \cdot \tau_v. \quad (9)$$

При з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником враховуємо незмінність значень f_1 , k_δ і δ , зневажаємо незначною зміною значень $k_{об\ 1}$ і ρ_g та врахуємо, що кількість фаз обмотки статора зменшується в три рази, полюсне ділення збільшується в три рази, кількість витків обмотки статора збільшується в три рази. З урахуванням зазначеного вище перепишемо вираз (7) в наступному вигляді:

$$x_{\mu v} = 3x_\mu. \quad (10)$$

Активний опір, який враховує втрати активної потужності в магнітопроводі статора, визначається так [3]:

$$r_\mu = m_1 \frac{E_1^2}{P_\mu}, \quad (11)$$

де E_1 – модуль електрорушійної сили взаємної індукції, B ;

P_μ – втрати активної потужності в магнітопроводі на гістерезис та вихрові струми, $Вт$.

Якщо активний опір обмотки статора збільшується у три рази відповідно до (2) та індуктивний опір розсіювання обмотки статора збільшується у три рази відповідно до (6), то можна припустити, що E_1 зменшується в три рази.

У разі з'єднання обмоток статора трифазного асинхронного електродвигуна відкритим трикутником двигун перетворюється на однофазний, а при підключенні його до мережі живлення в ньому буде створюватися пульсуюче електромагнітне поле. Через пульсуюче поле втрати активної потужності в магнітопроводі на гістерезис та вихрові струми будуть в два рази менше, ніж при обертаючому електромагнітному полі в робочому діапазоні магнітної індукції [4]. Враховуючи те, що у випадку з'єднання обмоток статора відкритим трикутником значення магнітної індукції в асинхронному електродвигуні буде приблизно в три рази нижче ніж у випадку з'єднання обмоток статора зіркою і живленні двигуна номінальною напругою, а також викладене вище, перепишемо вираз (11) в наступному вигляді:

$$r_{\mu v} = \frac{2}{3} r_\mu. \quad (11)$$

Активний опір розсіювання фази обмотки ротора, приведений до обмотки статора, дорівнює [3]:

$$r'_2 = k_R r_2, \quad (12)$$

де k_R – коефіцієнт приведення опорів обмотки ротора до обмотки статора,

r_2 – активний опір обмотки ротора, Ом.

Індуктивний опір розсіювання фази обмотки ротора, приведений до обмотки статора, дорівнює [3]:

$$x'_2 = k_R x_2, \quad (13)$$

де x_2 – індуктивний опір обмотки ротора, Ом.

Активний і індуктивний опори обмотки ротора при з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником у порівнянні із зіркою не змінюються.

Коефіцієнт приведення опорів обмотки ротора до обмотки статора визначається так [3]:

$$k_R = \frac{m_1 \cdot k_{\text{об1}}^2 \cdot w_1^2}{m_2 \cdot k_{\text{об2}}^2 \cdot w_2^2}, \quad (14)$$

де m_2 – кількість фаз обмотки ротора;

$k_{\text{об2}}$ – обмотковий коефіцієнт обмотки ротора;

w_2 – кількість витків обмотки ротора.

Враховуючи те, що при з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником в порівнянні із зіркою кількість фаз обмотки статора зменшується в три рази, кількість витків обмотки статора збільшується в три рази, зневажаючи незначною зміною $k_{\text{об1}}$ і прийняттям до уваги, що m_2 , $k_{\text{об2}}$ і w_2 не змінюються, можемо записати:

$$k_{RV} = 3 \cdot k_{RV}, \quad (15)$$

Звідки

$$r'_{2V} = 3 \cdot r'_2; \quad (16)$$

$$x'_{2V} = 3 \cdot x'_2. \quad (17)$$

Таким чином, Т-образна схема заміщення асинхронного електродвигуна з фазним ротором при з'єднанні його обмоток зіркою виглядає наступним чином (рис.4).

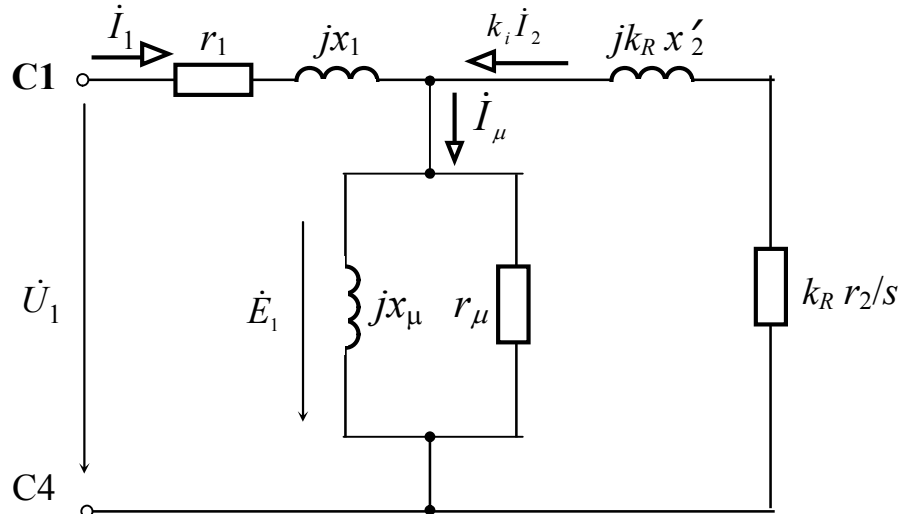


Рис.4. Т-образна схема заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна з фазним ротором при з'єднанні обмоток статора зіркою.

На схемі (рис.4), крім зазначеного вище (рис.1) позначено:

- k_i – коефіцієнт приведення струму в обмотці статора к обмотці ротора;
- k_R – коефіцієнт приведення опорів обмотки ротора к обмотці статора.

Коефіцієнт приведення струму в обмотці статора к обмотці ротора визначається так [3]:

$$k_i = \frac{m_1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot w_1}{m_2 \cdot k_{\text{об2}} \cdot w_1} \cdot \frac{1}{k_c}, \quad (18)$$

де k_c – коефіцієнт скоса пазів.

Враховуючи те, що при з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником в порівнянні із зіркою кількість фаз обмотки статора зменшується в три рази, кількість витків обмотки статора збільшується в три рази, зневажаючи незначною зміною значення $k_{\text{об1}}$ і прийняттям до уваги, що k_c , m_2 , $k_{\text{об2}}$ і w_2 не змінюються, можемо записати:

$$k_{iV} = k_i, \quad (15)$$

Відповідно до викладеного при з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником Т-образна схема заміщення асинхронного електродвигуна с фазним ротором буде мати вигляд (рис.5).

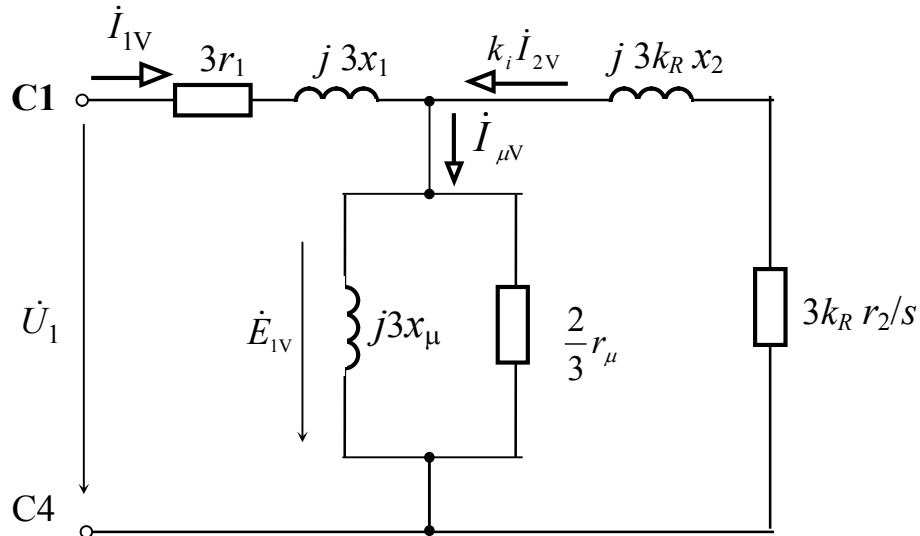


Рис.5. Т-образна схема заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна з фазним ротором при з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником.

Висновки. Таким чином, дослідження показує, що при переключенні фаз обмоток статора асинхронного електродвигуна з фазним ротором із зірки на відкритий трикутник та підключенні двигуна до мережі змінної синусоїдної напруги в електродвигуні створюється пульсуюче магнітне поле замість обертаючого, синхронна швидкість зменшується в три рази, активний опір обмоток статора збільшується в три рази, індуктивний опір розсіювання обмоток збільшується в три рази, індуктивний опір взаємної індукції збільшується в три рази, активний опір, який враховує втрати активної потужності в магнітопроводі статора, збільшується в півтора рази, коефіцієнт приведення опорів обмотки ротора к обмотці статора збільшується в три рази, коефіцієнт приведення струму в обмотці ротора к обмотці статора не змінюється. Використовувати асинхронний електродвигун із з'єднанням обмоток статора відкритим трикутником можна, наприклад, для вітрових електрогенеруючих установок

Література

1. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко Я.С. Проектирование электрических машин / Под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Высшая школа, 2001. – 430с.

2. *Домбровский В.В., Зайчик В.М.* Асинхронные машины: Теория, расчёт элементы проектирования. – Л.: Энероатомиздат, 1990. – 368с.
3. Электротехнический справочник: В 3-х т. Т.2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н.Орлов). – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712с.
4. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928с.

**THE ANALYSIS OF PARAMETERS
OF AN EQUIVALENT CIRCUIT OF AN ASYNCHRONOUS
MOTOR WITH A PHASE-WOUND ROTOR AT CONNECTION
OF STATORIC WINDINGS BY AN OPENED TRIANGLE**

O. Vovk

Summary

The activity is dedicated to matching of parameters of a T-shaped equivalent circuit of an asynchronous motor at connection of his winding by a star and opened triangle.