

Ю.В. Шуруб, В.Є. Василенков, Ю.Л. Цицюрський

Методика розрахунку електромагнітного моменту та втрат енергії трифазних асинхронних двигунів при живленні регульованою однофазною напругою

Розроблено аналітичну методику розрахунку електромагнітного моменту та втрат енергії регульованих за напругою трифазних асинхронних двигунів при живленні від однофазної мережі за схемою з фазозсуваючим конденсатором. В основу методики покладено метод симетричних складових та аналіз схем заміщення асинхронної машини у двигунному та генераторному режимі роботи. На основі цієї методики можуть бути визначені оптимальні параметри фазозсуваючих конденсаторів та вибрані раціональні схеми включення трифазних асинхронних двигунів в однофазну мережу з регульованою напругою. Показано, що регулятор напруги може бути використаний як енергозберігаючий елемент при однофазному живленні трифазних асинхронних двигунів та його застосування дозволяє використовувати постійну ємність фазозсуваючого конденсатора при зміні навантаження у широких межах. Бібл. 25, рис. 3.

Ключові слова: асинхронний двигун, однофазне живлення, регулятор напруги, метод симетричних складових, фазозсуваючий конденсатор.

Вступ. Однофазне живлення асинхронних двигунів (АД) знаходить застосування у побуті та комунальному господарстві [1], у системах регулювання мікроклімату сільськогосподарських споживачів [2], у системах водопостачання та трубопровідного транспорту [3]. На практиці спостерігається використання асинхронних двигунів з трифазною обмоткою статора в умовах однофазного живлення [4, 5]. Для можливості їх роботи при живленні від однофазної мережі використовуються пускові та робочі конденсатори [6,7]. Використання регульованих за напругою електроприводів на базі трифазних асинхронних двигунів дозволяє забезпечити технологічні та енергозберігаючі вимоги багатьох споживачів [8, 9], полегшити умови пуску [10], збільшити енергоефективність технологічних агрегатів за рахунок врахування у алгоритмі регулювання замкнених систем електроприводу характеру зміни навантаження [11].

Існує багато досить точних методик розрахунку [4-7, 12, 13] характеристик асинхронного двигуна у несиметричних, у тому числі і однофазних, режимах роботи, проте вони базуються на диференціальних рівняннях, що не дозволяє отримати аналітичні вирази для попереднього вибору ємності фазозсуваючого конденсатора та порівняльного аналізу можливих варіантів схем включення.

Метою статті є розробка аналітичної методики визначення електромагнітного моменту та втрат енергії регульованих за напругою трифазних асинхронних двигунів, що працюють за схемою однофазного включення з фазозсуваючим конденсатором.

Об'єкт дослідження. Аналітичні вирази для розрахунку електромагнітного моменту та втрат енергії регульованого за напругою трифазного асинхронного двигуна при однофазному живленні будемо розглядати на прикладі схеми Штейнметца (рис. 1).

Регулювання двигуна за напругою в даній схемі відбувається за допомогою тиристорного регулятора напруги (ТРН). Звернемо увагу, що розроблена у даній статті методика базується на припущенні, що на виході ТРН присутня тільки перша гармонічна складова напруги, тому може бути застосована до будь якого виду регулятора напруги [14, 15]. Причому регулятор напруги може розглядатись аналогічно до трифазних систем як енергозберігаючий елемент [8]. При цьому слід враховувати, що використана методика не враховує втрати від вищих гармонік струму, що

генеруються тиристорним регулятором, тому дійсний ефект енергозбереження буде менший при малих навантаженнях [16].

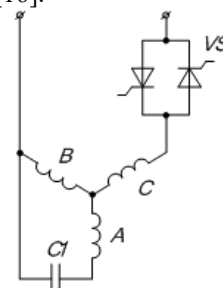


Рис. 1. Схема включення регульованого за напругою трифазного двигуна у однофазну мережу

Дана методика пропонується для попереднього пошукового аналізу величин електромагнітного моменту та втрат енергії асинхронного двигуна, що живиться від однофазної мережі за схемою з тиристорним регулятором напруги та фазозміщуючим конденсатором. Для більш точних досліджень необхідно використовувати моделі, що враховують вплив несинусоїдності та несиметрії на параметри двигуна [17-20].

Загальні співвідношення в асинхронному двигуні при однофазному режимі роботи. Для аналізу роботи асинхронного двигуна в однофазному режимі будемо використовувати метод симетричних складових. В основу розрахунку покладемо характеристики АД в симетричному трифазному режимі роботи. При цьому введемо позначення: M_1, I_1, Z_1, φ_1 – відповідно залежності від ковзання моменту, струму, модуля і аргументу повного опору схеми заміщення АД в симетричному двигунному режимі, а M_2, I_2, Z_2, φ_2 – ці ж залежності в симетричному генераторному режимі.

Рівняння Кірхгофа для схеми на рис. 1 будуть наступні:

$$\underline{U}_C - \underline{U}_B = \underline{U}; \quad (1)$$

$$\underline{U}_A - \underline{U}_B = jX_{C1}I_A, \quad (2)$$

де \underline{U} – комплексне значення напруги живлення АД, що є вихідною напругою ТРН; $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ – комплексні значення фазних напруг статора; $jX_{C1}I_A$ – комплексне значення напруги на фазозсуваючому конденсаторі, де $X_{C1} = 1/(\omega C1)$.

© Ю.В. Шуруб, В.Є. Василенков, Ю.Л. Цицюрський

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

$$\underline{U}_A = \underline{U}_p + \underline{U}_n + \underline{U}_0; \quad (3)$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_p a + \underline{U}_n a^2 + \underline{U}_0; \quad (4)$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_p a^2 + \underline{U}_n a + \underline{U}_0; \quad (5)$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_p + \underline{I}_n + \underline{I}_0, \quad (6)$$

де $\underline{U}_p, \underline{U}_n, \underline{U}_0$ – комплексні значення напруг прямої,

зворотної та нульової послідовностей; $a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ –

поворотний множник; $\underline{I}_p = \frac{U_p}{Z_1}, \underline{I}_n = \frac{U_n}{Z_2}, \underline{I}_0 = \frac{U_0}{Z_0}$ –

комплексні значення струмів прямої та зворотної послідовностей.

Відзначимо, що для схеми на рис. 1 нульова послідовність відсутня через відсутність нульового проводу.

Тут Z_1, Z_2 – комплексні опори за параметрами схем заміщення відповідно прямої та зворотної послідовностей:

$$\underline{Z}_1 = Z_1(\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1); \quad (7)$$

$$\underline{Z}_2 = Z_2(\cos \varphi_2 + j \sin \varphi_2), \quad (8)$$

де $Z_1, Z_2, \varphi_1, \varphi_2$ – модулі та фази комплексних опорів прямої та зворотної послідовностей

Підставляючи (3) – (6) в рівняння (1) – (2), отримаємо:

$$(\underline{U}_p - \underline{U}_n)(a^2 - a) = \underline{U}; \quad (9)$$

$$\underline{U}_p \left(1 - a - \frac{jX_{C1}}{Z_1} \right) + \underline{U}_n \left(1 - a^2 - \frac{jX_{C1}}{Z_2} \right) = 0. \quad (10)$$

Введемо базисні значення X_{C_0} для ємнісного опору:

$$X_{C_0} = \frac{\sqrt{3}U}{I_1} = \sqrt{3}Z_1, \quad (11)$$

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

Також введемо відносне значення ємності:

$$x = \frac{X_{C_0}}{X_{C1}} = \frac{1/\omega C_0}{1/\omega C_1} = \frac{C_1}{C_0} \quad (12)$$

та коефіцієнт, що дорівнює відношенню струмів режимів противовключення і двигунного при симетричному живленні:

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

Провівши ряд перетворень, отримаємо вирази для напруг прямої та зворотної послідовностей:

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

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

Введемо параметри, що характеризують рівень напруги прямої послідовності

$$\alpha = U_p/U, \quad (16)$$

$$\text{рівень напруги зворотної послідовності} \quad \beta = U_n/U \quad (17)$$

$$\text{та коефіцієнт несиметрії} \quad \gamma = U_n/U_p. \quad (18)$$

У (16) – (18) U_p, U_n, U – модулі відповідно напруг прямої, зворотної послідовностей та напруги живлення.

Переходячи до модулів у (14), (15), знайдемо ці параметри:

$$\alpha = \sqrt{\frac{x^2 - \theta_2 k_i x + k_i^2}{(\sqrt{3}x - \varphi_2)^2 + \varphi_1^2}}; \quad (19)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{x^2 - \theta_1 x + 1}{(\sqrt{3}x - \varphi_2)^2 + \varphi_1^2}}; \quad (20)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{x^2 - \theta_1 x + 1}{x^2 - \theta_2 k_i x + k_i^2}}, \quad (21)$$

де $\theta_1 = \sqrt{3} \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1, \theta_2 = \sqrt{3} \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2, \varphi_1 = \cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2, \varphi_2 = \sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2.$

За викладеною методикою можуть бути визначені ці параметри несиметрії також і для інших схем включення трифазного двигуна у однофазну мережу, наприклад, для послідовно-паралельної схеми [3] або для схеми «зірка з нульовим проводом» з самозбудженням конденсаторної фази через ротор, що обертається [21]. Для цього необхідно записати відповідні кожній схемі рівняння Кірхгофа (1) – (2) та виконати наступні аналітичні перетворення (3) – (15). Тоді параметри (16) – (18) можна використовувати у подальших розрахунках для цих схем. Отже, методика, що пропонується може бути узагальнена також і на інші можливі схеми включення трифазного двигуна з фазозсуваючим конденсатором у однофазну мережу.

Розрахунок електромагнітного моменту асинхронної машини при однофазному режимі роботи. Електромагнітний момент при симетричному двигунному режимі у разі трифазного живлення M_1 може бути визначений з виразів електромагнітної потужності P_{em} . З одного боку вона дорівнює

$$P_{em} = M_1 \cdot \omega_0, \quad (22)$$

де ω_0 – кутова частота обертання холостого ходу.

З іншого боку

$$P_{em} = 3I_{r1}^2 \frac{R_2}{s}, \quad (23)$$

де $I_{r1} = U/Z_{1r}$ – діюче значення приведенного струму ротора при симетричному режимі; s – ковзання; R_2 – приведений до обмотки статора активний опір ротора.

Прирівнюючи ці два вирази, отримаємо:

$$M_1 = \frac{3}{\omega_0} \left(I_{r1}^2 \frac{R_2}{s} \right). \quad (24)$$

Електромагнітний момент в однофазному режимі визначається як різниця моментів прямої та зворотної послідовностей:

$$M = M_p - M_n = \frac{3}{\omega_0} \left(I_{rp}^2 \frac{R_2}{s} - I_{rn}^2 \frac{R_2}{2-s} \right), \quad (25)$$

де $I_{rp} = U_p / Z_{1r}$, $I_{rn} = U_n / Z_{2r}$ – модулі приведених струмів ротора прямої та зворотної послідовностей; Z_{1r} , Z_{2r} – відповідно модулі еквівалентних опорів гілки навантаження Г-подібних схем заміщення прямої і зворотної послідовностей.

Введемо коефіцієнт μ , що дорівнює співвідношенню моментів для однофазного режиму та двигунного трифазного симетричного режиму $\mu = M/M_1$:

$$\mu = \alpha^2 + k_\mu \beta^2 = \alpha^2 (1 + k_\mu \gamma^2), \quad (26)$$

де $k_\mu = M_2/M_1$ – коефіцієнт, що дорівнює відношенню генераторного M_2 та двигунного M_1 моментів у трифазному симетричному режимі:

$$k_\mu = -\frac{Z_{1r}^2}{Z_{2r}^2} \cdot \frac{s}{2-s}. \quad (27)$$

Оскільки однофазний режим і трифазний двигунний режим розглядаються при однакових ковзаннях, то коефіцієнт μ визначає також і співвідношення електромагнітних потужностей АД при роботі в цих режимах.

Використовуючи отримані коефіцієнти α , β , γ , μ можна аналізувати характеристики АД за допомогою формул, справедливих для трифазного симетричного режиму роботи, отриманих зі схеми заміщення.

Згідно (24), електромагнітний момент в трифазному симетричному режимі визначається:

$$M_1 = \frac{3U^2 R_2}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}. \quad (28)$$

де R_1 , R_2 , X_1 , X_2 – параметри схеми заміщення АД.

Електромагнітний момент АД в однофазному режимі визначається виразом:

$$M = \mu M_1 = \frac{\alpha^2 (1 + k_\mu \gamma^2) 3U^2 R_2}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}. \quad (29)$$

Як видно з (29), момент однофазного асинхронного двигуна з регульованою напругою при заданому ковзанні залежить від напруги живлення, рівня напруги прямої послідовності і коефіцієнта несиметрії, які в свою чергу, залежать від відносного значення ємності фазозсуваючого конденсатора $x = X_{C_0} / X_{C_1}$.

Розрахунок втрат в асинхронному двигуні при однофазному режимі роботи. При роботі з постійною напругою втрати в АД у симетричному трифазному режимі поділяються на постійні втрати (що складаються з втрат в міді статора від струму намагнічування і втрат в сталі), які не залежать від навантаження, і змінні втрати (що складаються з втрат в міді статора і ротора від струму навантаження), які при роботі з постійною напругою залежать від електромагнітного моменту [8]:

$$\Delta P_3 = \left(\frac{M}{M_N} \right)^2 \Delta P_{var.N} + \Delta P_{const.N}, \quad (30)$$

де $\Delta P_{var.N}$, $\Delta P_{const.N}$ – номінальні змінні і постійні втрати; M_N – номінальний момент.

У асинхронному двигуні при роботі із змінною напругою обидві згадані складові втрат стають змін-

ними, причому змінні втрати залежать від ковзання і моменту, а постійні втрати – від напруги обмоток статора. Потужність втрат в роторі (втрати ковзання):

$$\Delta P_r = M \omega_0 s, \quad (31)$$

де ω_0 – частота обертання холостого ходу.

Потужність втрат в статорі від струму навантаження перераховується через потужність втрат в роторі та співвідношення активних опорів статора і ротора:

$$\Delta P_s = \Delta P_r \frac{R_1}{R_2}, \quad (32)$$

де R_1 , R_2 – активні опори схеми заміщення АД.

Таким чином, вираз змінних втрат має вигляд:

$$\Delta P_{var} = M \omega_0 s \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (33)$$

Друга складова втрат в АД, ΔP_{const} , залежить від напруги обмоток статора, що побічно рівнозначно залежності від моменту. Так, при прийнятті припущень про лінійність параметрів магнітного кола та врахуванні тільки першої гармонійної складової струмів і напруг, постійні втрати пропорційні квадрату напруги, який, в свою чергу, пропорційний електромагнітному моменту:

$$\frac{\Delta P_{const}}{\Delta P_{const.N}} = \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 = \frac{M}{M_{nat}}, \quad (34)$$

де ΔP_{const} , U , M – поточні значення постійних втрат, напруги і моменту; $\Delta P_{const.N}$, U_N , M_{nat} – постійні втрати в номінальному режимі, номінальна напруга і момент на природній механічній характеристиці при номінальній напрузі та відповідному ковзанні. Тому постійні втрати можуть бути виражені:

$$\Delta P_{const} = \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 \Delta P_{const.N}. \quad (35)$$

Базові величини основних видів втрат визначаються в номінальному режимі і представляються у вигляді двох складових. Виразимо їх через параметри схеми заміщення. Перша складова – змінні втрати (втрати в міді ротора і статора від струму навантаження) в номінальному режимі:

$$\Delta P_{var.N} = M_N \omega_0 s_N \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (36)$$

де s_N – номінальне ковзання.

Тоді з (33) і (36):

$$\Delta P_{var} = \frac{M}{M_N} \frac{s}{s_N} \Delta P_{var.N}. \quad (37)$$

Друга складова – постійні втрати (втрати в міді статора від струму намагнічування і втрати в сталі) в номінальному режимі:

$$\Delta P_{const.N} = \frac{M_N \omega_0}{s_N} \left(\frac{R_1 R_2}{X_0^2} + \frac{R_2}{R_0} \right), \quad (38)$$

де R_0 , X_0 – параметри гілки намагнічування схеми заміщення АД.

При роботі АД в однофазному режимі повні електричні втрати дорівнюють сумі втрат від струмів прямої і зворотної послідовностей:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{var.p} + \Delta P_{const.p} + \Delta P_{var.n} + \Delta P_{const.n}. \quad (39)$$

У загальному випадку постійні і змінні втрати розраховуються за виразами (33) та (35) окремо для прямої і зворотної послідовностей. У першому випадку в них підставляються значення моменту, ковзання і напруги для прямої послідовності: M_p , s та U_p . У другому – M_n , $2-s$, та U_n .

У подальшому аналізі будемо використовувати коефіцієнти α , β , γ , k_μ , μ , що були отримані раніше. При регулюванні напруги АД змінні втрати виражаються залежностями:

- для прямої послідовності:

$$\Delta P_{var.p} = \frac{M_p}{M_N} \frac{s}{s_N} \Delta P_{var.N}, \quad (40)$$

- для зворотної послідовності:

$$\Delta P_{var.n} = \frac{M_n}{M_N} \frac{2-s}{s_N} \Delta P_{var.N}. \quad (41)$$

Виразимо моменти від струмів прямої і зворотної послідовностей через моменти двигунний M_1 та генераторний (протиключення) M_2 у симетричному режимі:

$$M_p = M_1 \left(\frac{U_p}{U} \right)^2 = \alpha^2 M_1, \quad (42)$$

$$M_n = M_2 \left(\frac{U_n}{U} \right)^2 = \beta^2 M_2. \quad (43)$$

Враховуючи, що

$$M_2 / M_1 = k_\mu, \quad (44)$$

отримаємо:

$$M_n = k_\mu \beta^2 M_1. \quad (45)$$

Тоді загальні змінні втрати:

$$\begin{aligned} \Delta P_{var} &= \Delta P_{var.p} + \Delta P_{var.n} = \\ &= \alpha^2 \frac{M_1}{M_N} \frac{s}{s_N} \Delta P_{var.N} + k_\mu \beta^2 \frac{M_1}{M_N} \frac{2-s}{s_N} \Delta P_{var.N}. \end{aligned} \quad (46)$$

Виразимо ΔP_{var} через коефіцієнт несиметрії $\gamma = \beta/\alpha$:

$$\Delta P_{var} = \alpha^2 M_1 A (s + k_\mu \gamma^2 [2-s]), \quad (47)$$

де $A = \frac{\Delta P_{var.N}}{M_N s_N}$ – постійний коефіцієнт.

Постійні втрати при регулюванні напруги виражаються залежностями:

- для прямої послідовності:

$$\Delta P_{const.p} = \left(\frac{U_p}{U_N} \right)^2 \Delta P_{const.N} = \alpha^2 \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 \Delta P_{const.N}, \quad (48)$$

- для зворотної послідовності:

$$\Delta P_{const.n} = \left(\frac{U_n}{U_N} \right)^2 \Delta P_{const.N} = \beta^2 \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 \Delta P_{const.N}. \quad (49)$$

З огляду на співвідношення

$$\left(\frac{U}{U_N} \right)^2 = \frac{M_1}{M_{nat}}, \quad (50)$$

де M_{nat} – момент на природній механічній характеристиці у двигунному режимі при трифазному симетричному живленні при ковзанні, рівному ковзанню у однофазному режимі, отримаємо:

$$\Delta P_{const.p} = \alpha^2 \frac{M_1}{M_{nat}} \Delta P_{const.N}, \quad (51)$$

$$\Delta P_{const.n} = \beta^2 \frac{M_1}{M_{nat}} \Delta P_{const.N}. \quad (52)$$

Для лінеаризованих механічних характеристик АД є справедливим співвідношення $M_{nat}/s = M_N/s_N$, що дозволяє виразити M_{nat} через s . Тоді загальні змінні втрати АД можуть бути подані виразом

$$\Delta P_{const} = \Delta P_{const.p} + \Delta P_{const.n} = \alpha^2 M_1 B \frac{1}{s} (1 + \gamma^2), \quad (53)$$

де $B = \frac{\Delta P_{const.N} s_N}{M_N}$ – постійний коефіцієнт.

Електромагнітний момент в несиметричному режимі M і момент двигунного симетричного режиму M_1 пов'язані коефіцієнтом μ :

$$\mu = \frac{M}{M_1} = \alpha^2 (1 + k_\mu \gamma^2). \quad (54)$$

Тоді повні електричні втрати в АД від струмів прямої і зворотної послідовностей:

$$\Delta P_1 = \frac{M}{1 + k_\mu \gamma^2} \left(A [s + k_\mu \gamma^2 (2-s)] + B \frac{1}{s} [1 + \gamma^2] \right). \quad (55)$$

Запропонована методика дозволяє проводити попередній пошуковий аналіз даної системи.

Результати розрахунків. Проведемо аналіз енергетичних характеристик АД 4A71B2У3 з фазозсуваючим конденсатором при з'єднанні за схемою Штейнметца (рис. 1), розрахованих за вищенаведеною методикою. На рис. 2 подані графіки залежностей відносних втрат однофазного режиму ΔP_1 до втрат трифазного симетричного режиму ΔP_3 від ковзання при різних значеннях ємності фазозсуваючого конденсатора та постійній номінальній напрузі. З цих графіків видно, що при зміні навантаження для того, щоб втрати не перевищували більше ніж на 20 % втрати симетричного режиму, необхідно змінювати ємність конденсатора.

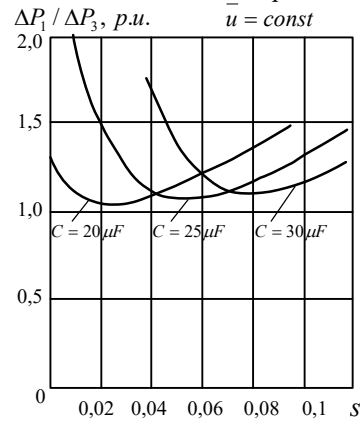


Рис. 2. Залежності відносних втрат від ковзання при різних значеннях ємності

Разом з тим, якщо при зміні навантаження змінювати напругу живлення, можна досягнути режиму економії енергії, як і у випадку симетричного трифазного живлення [8]. Так, на рис. 3 подані графіки залежностей відносних втрат $\Delta P_1/\Delta P_3$ від ковзання при різних значеннях відносної напруги однофазного живлення $\bar{u} = U/U_N$ та постійному значенні ємності фазозсуваючого конденсатора $C = 20$ мкФ. З цих характеристик видно, що при постійному значенні ємності АД має мінімум відносних втрат при приблизно

постійному значенні ковзання при різних значеннях напруги живлення.

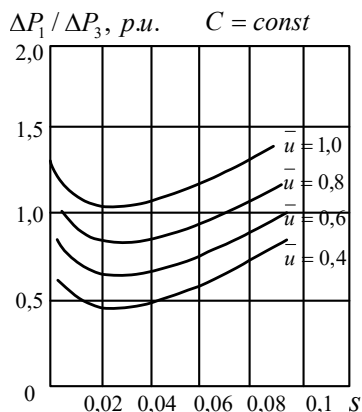


Рис. 3. Залежності відносних втрат від ковзання при різних значеннях напруги живлення

Отже, якщо підтримувати це ковзання постійним при зміні навантаження, можна досягти режиму мінімізації втрат при постійному оптимальному за критерієм мінімуму відношення втрат однофазного режиму до втрат трифазного режиму значенні ємності, визначеному за кривими на рис. 3, для деякого ковзання, що може бути задано, наприклад, за рекомендаціями [8], при умові неперевикнення електричними втратами номінального значення. Це показує, що тиристорний регулятор напруги може бути використаний як енергозберігаючий елемент при змінному навантаженні, при цьому ємність конденсатора може залишатись постійною при зміні навантаження у широкому діапазоні.

Порівняння розрахованих за запропонованою методикою величин з отриманими за моделлю [20], що враховує вплив несинусоїдності та несиметрії та базується на диференціальних рівняннях електричної машини, показало відхилення у 3...15 % при визначенні моментів та у 5...20 % при визначенні втрат. Менші цифри відповідають режимам з близькими до номінальних ковзаннями. Проте наведена у статті аналітична методика дозволяє проводити порівняльний аналіз характеристик двигуна з різними ємностями фазозсуваючого конденсатора при різних схемах включення в однофазну мережу та у симетричному режимі при однакових допущеннях, таких як незмінність параметрів схем заміщення та неврахування механічних та додаткових втрат. Це дає можливість побачити обумовлений саме несиметричним режимом роботи вплив ємності фазозсуваючого конденсатора та схеми включення [3, 21] на втрати енергії.

Вплив вищих гармонік. Функціональні можливості регульованих за напругою асинхронних електроприводів реалізуються у двох основних напрямках. Перший пов'язаний з регулюванням швидкості у невеликому (до 30 %) діапазоні при переважно вентиляторному характері навантаження та забезпеченням м'якого пуску [8]. При живленні від ТРН споживана потужність вища, ніж при синусоїдному живленні внаслідок збільшення втрат від вищих гармонік, при однакових моментах та ковзанні досягаючи при $\alpha = 90...110$ ел. град. перевищення на 20–30 % [16]. Причому, вказаний діапазон зміни швидкості забезпечується зміною кута керування тиристорами $\alpha < 60$ ел. град [3]. При необхідності збільшення діапазону регулювання можна використовувати комбіновану схему з перемиканням схеми з'єднань силової частини Штей-

нметца на послідовно-паралельну, що має кращий гармонійний склад [16].

Ця ж схема може забезпечити вищий порівняно з схемою Штейнметца пусковий момент з робочою ємністю [3]. Тоді як для схем з постійною структурою силової частини використання робочої ємності може не забезпечувати необхідні пускові властивості, та вимагає використання окремого пускового конденсатора, що погіршує масо-габаритні показники агрегату.

Другий напрямок розвитку цих електроприводів пов'язаний з мінімізацією втрат потужності при зміні навантаження, що у випадку припущення про синусоїдну напругу на виході регулятора напруги досягається шляхом стабілізації ковзання [8]. При практичній реалізації закону оптимізації енергоспоживання, внаслідок впливу вищих гармонік зменшується діапазон зміни моменту навантаження, за якого можливе енергозбереження. Збільшити цей діапазон можливо теж за рахунок використання комбінованої схеми з перемиканням схеми Штейнметца на схему «зірка з нульовим проводом» при малих навантаженнях [21].

Також запропонована у статті методика, що враховує тільки першу гармоніку, може бути застосована до регуляторів напруги з сучасними засобами корекції якості електроенергії [22–25].

Висновки. На прикладі схеми Штейнметца розроблена аналітична методика розрахунку електромагнітного моменту та втрат енергії трифазного асинхронного двигуна за схемою включення у однофазну мережу з фазозсуваючим конденсатором, що дозволяє при деяких припущеннях проводити попередній пошуковий аналіз регульованих за напругою однофазних асинхронних електроприводів і вибирати оптимальні параметри конденсатора. Запропонована методика може бути застосована також і до інших можливих схем включення трифазного двигуна у однофазну мережу при застосуванні відповідних даним схемам рівнянь Кірхгофа. Показано, що регулятор напруги може бути застосований як енергозберігаючий пристрій, та його застосування дозволяє використовувати постійну ємність фазозсуваючого конденсатора, оптимальну для одного значення ковзання, при зміні навантаження у широких межах за умови стабілізації цього ковзання.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Попович О.М., Бібік О.В. Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насосу за застосування комплексного проектування. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії», 2018, № 5, С. 79–82. Режим доступу: <http://emepe.khpi.edu.ua/article/view/135209> (Дата звернення: 16.03.2022).
2. Хижняк Т.А., Гусев О.О., Ліпінський І.С. Дистанційне керування електротехнічними пристроями в системах регулювання мікроклімату. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 5, С. 32–34. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.032>.
3. Шуруб Ю.В., Василенков В.С., Цицюрський Ю.Л. Дослідження властивостей комбінованої схеми однофазного включення асинхронного електроприводу насосних установок. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 6, С. 50–53. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.050>.
4. Маляр В.С., Маляр А.В. Установившиеся режимы и статические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при питании от однофазной сети. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 2016, Т. 59, № 6, С. 536–548. doi: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-536-548>.

5. Malyar S.V., Malyar A.V. Mechanical characteristics of three-phase induction motors with single-phase power supply. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 3, pp. 21-24. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.3.03>.
6. da Silveira E.P., Pires R.C., de Almeida A.T.L., Jose A., Rezek J. Direct on line starting induction motor with Thyristor Switched Capacitor based voltage regulation. *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, 2009, pp. 1124-1129. doi: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347707>.
7. Malyar V., Hamola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. *2016 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2016, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2016.7738735>.
8. Андрущенко О.А. Требования к асинхронному электродвигателю и тиристорному преобразователю в электроприводе ТПН-АД. *Електромашинобудування та електрообладнання*, 1998, № 50, С. 10-16. Режим доступу: <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/2820> (Дата звернення: 16.03.2022).
9. Шуруб Ю.В. Статистична оптимізація регульованих за напругою асинхронних електроприводів. *Технічна електродинаміка*, 2014, № 5, С. 116-118.
10. Rajaji L., Kumar C. Adaptive Neuro Fuzzy based soft starting of voltage-controlled induction motor drive. *IEEE SoutheastCon 2008*, pp. 448-453. doi: <https://doi.org/10.1109/SECON.2008.4494337>.
11. Shurub Y., Dudnyk A., Vasilenkov V., Tsitsyurskiy Y. Simulation of Random Loads Applied to Statistical Optimal Synthesis of Electric Drives. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019, pp. 354-357. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896464>.
12. Бешта А.С., Семин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя при несимметричном питании статоров. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2014, № 2, С. 10-16. Режим доступу: <http://ees.kdu.edu.ua/en/22014-26> (Дата звернення: 16.03.2022).
13. Savchenko V., Synyavskiy O., Dudnyk A., Nesvidomin A. Influence of Voltage Deviation and Asymmetry on Transitional Processes in Asynchronous Electric Drive. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2021, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598660>.
14. Zigirkas G., Kalomiros J. Voltage control of single-phase induction motors using asymmetrical PWM and fuzzy logic. *2016 5th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, 2016, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/MOCASST.2016.7495119>.
15. Sowmmiya U., Jamuna V. Voltage control scheme for three phase SVM inverter fed induction motor drive systems. *2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems*, 2011, pp. 207-211. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEES.2011.5725329>.
16. Shurub Y.V., Tsitsyurskiy Y.L. Harmonic analysis of the combined circuit of single-phase switching of induction electric drive with thyristor control. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 25-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.04>.
17. Мильх В.И. Численно-полевой анализ адекватности проектных данных трехфазных асинхронных двигателей и метод их уточнения на этой основе. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 1, С. 47-55. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.047>.
18. Мильх В.И. Система автоматизованого формування розрахункових моделей електричних машин для програмного середовища FEMM. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 4, С. 74-78. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.074>.
19. Popovych O., Golovan I. Currents System for Efficient Mathematical Modeling of an Induction Motor Using the Field Analysis. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019, pp. 142-145. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896624>.
20. Popovych O.M., Golovan I.V. Study of changed main flux reactance of squirrel-cage induction motors using field analysis of their starting characteristics. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 5, pp. 69-72. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.069>.
21. Шуруб Ю.В., Цицюрський Ю.Л., Руденко С.М. Підвищення ефективності асинхронного конденсаторного двигуна в режимах неповного навантаження. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: «Електричні машини та електро механічне перетворення енергії»*, 2019, № 4, С. 107-110. doi: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.4.16>.
22. Артеменко М.Ю., Каплун В.В., Бобровник В.М., Поліщук С.Й. Застосування активних фільтрів для зменшення втрат енергії трифазних систем електропостачання. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 4, С. 53-56. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.053>.
23. Чиженко О.І., Рибіна О.Б., Трач І.В. Напівпровідниковий регулятор для коригування режимами мережі в разі прямого запуску асинхронних двигунів зіставної потужності. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*, 2019, Вип. 54, С. 95-102. doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.095>.
24. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В. Вплив FACTS на режими електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 6, С. 62-68. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>.
25. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A Study of Transitional Modes of the Electric Network with the Powerful Electromechanical Load and FACTS. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2019, pp. 261-266. doi: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.

REFERENCES

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. *Bulletin of the NTU «KhPI». Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*, 2018, no. 5, pp. 79-82. (Ukr). Available at: <http://emepe.khpi.edu.ua/article/view/135209> (accessed 16 March 2022).
2. Khizhniak T.A., Husev O.O., Lipinskiy I.S. Remote control of electromechanical devices in the climate control system. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 5, pp. 32-34. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.032>.
3. Shurub Yu.V., Vasilenkov V.Ye., Tsitsyurskiy Yu.L. Investigation of properties of combined scheme of single-phase switching of induction electric drive of pumping plants. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 6, pp. 50-53. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.050>.
4. Malyar V.S., Malyar A.V. Established modes and static characteristics of three phase asynchronous motor powered with single phase network. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2016, vol. 59, no. 6, pp. 536-548. (Rus). doi: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-536-548>.
5. Malyar S.V., Malyar A.V. Mechanical characteristics of three-phase induction motors with single-phase power supply. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 3, pp. 21-24. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.3.03>.
6. da Silveira E.P., Pires R.C., de Almeida A.T.L., Jose A., Rezek J. Direct on line starting induction motor with Thyristor Switched Capacitor based voltage regulation. *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, 2009, pp. 1124-1129. doi: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347707>.
7. Malyar V., Hamola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. *2016 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2016, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2016.7738735>.
8. Andryushchenko O.A. Requirements for asynchronous electric motor and thyristor converter in electric drive ТПН-АД. *Електромашинобудування та електрообладнання*, 1998, no. 50, pp. 10-16. (Rus). Available at: <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/2820> (accessed 16 March 2022).
9. Shurub Yu.V. Statistical optimization of voltage regulated induction electric drives. *Technical Electrodynamics*, 2014, no. 5, pp. 116-118. (Ukr).
10. Rajaji L., Kumar C. Adaptive Neuro Fuzzy based soft starting of voltage-controlled induction motor drive. *IEEE SoutheastCon 2008*, pp. 448-453. doi: <https://doi.org/10.1109/SECON.2008.4494337>.

11. Shurub Y., Dudnyk A., Vasilenkov V., Tsitsyurskiy Y. Simulation of Random Loads Applied to Statistical Optimal Synthesis of Electric Drives. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019, pp. 354-357. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896464>.
12. Beshta A., Syomin A. Parameters estimation of induction motor equivalent circuit using asymmetrical stator supply. *Electromechanical and Energy Saving Systems*, 2014, no. 2, pp. 10-16. (Rus). Available at: <http://ees.kdu.edu.ua/en/22014-26> (accessed 16 March 2022).
13. Savchenko V., Synyavskiy O., Dudnyk A., Nesvidomin A. Influence of Voltage Deviation and Asymmetry on Transitional Processes in Asynchronous Electric Drive. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2021, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598660>.
14. Zigirkas G., Kalomiroso J. Voltage control of single-phase induction motors using asymmetrical PWM and fuzzy logic. *2016 5th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*, 2016, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/MOCAST.2016.7495119>.
15. Sowmiya U., Jamuna V. Voltage control scheme for three phase SVM inverter fed induction motor drive systems. *2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems*, 2011, pp. 207-211. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEES.2011.5725329>.
16. Shurub Y.V., Tsitsyurskiy Y.L. Harmonic analysis of the combined circuit of single-phase switching of induction electric drive with thyristor control. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 25-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.04>.
17. Milykh V.I. Numerically-field analysis of the adequacy of the design data of three-phase induction motors and the method of their refinement on this basis. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 1, pp. 47-55. (Rus). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.047>.
18. Milykh V.I. The system of automated formation of electrical machines computational models for the FEMM software environment. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 4, pp. 74-78. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.074>.
19. Popovych O., Golovan I. Currents System for Efficient Mathematical Modeling of an Induction Motor Using the Field Analysis. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019, pp. 142-145. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896624>.
20. Popovych O.M., Golovan I.V. Study of changed main flux reactance of squirrel-cage induction motors using field analysis of their starting characteristics. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 5, pp. 69-72. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.069>.
21. Shurub Y.V., Tsitsyurskiy Y.L., Rudenko Y.M. Improving the efficiency of an induction capacitor motor at partial load modes. *Bulletin of the NTU «KhPI». Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*, 2019, no. 4, pp. 107-110. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.4.16>.
22. Artemenko M.Y., Kaplun V.V., Bobrovnyk V.M., Polishchuk S.Y. Active filters application for energy losses reduction in three-phase power supply systems. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 4, pp. 53-56. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.053>.
23. Chyzenko O.I., Rybina O.B., Trach I.V. Semiconductor regulator for managing the network modes running in direct start of the asynchronous machine of the comparable capacity. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2019, no. 54, pp. 95-102. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.095>.
24. Butkevych O.F., Chyzenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V. An influence of the facts upon an electrical network's mode during direct start-up of an asynchronous machine in the complex load's composition. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 6, pp. 62-68. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>.
25. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A Study of Transitional Modes of the Electric Network with the

Powerful Electromechanical Load and FACTS. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2019, pp. 261-266. doi: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.

Надійшла (Received) 10.02.2022
 Прийнята (Accepted) 23.06.2022
 Опублікована (Published) 06.11.2022

Шуруб Юрій Вікторович¹, к.т.н., с.н.с.,
 Василенков Віктор Єгорович², к.т.н., доц.,
 Цицюрський Юрій Леонтійович²,
¹ Інститут електродинаміки НАН України,
 03680, Київ, пр. Перемоги, 56,
 e-mail: yvshur@ukr.net (Corresponding Author)
² Національний університет біоресурсів
 і природокористування України,
 03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 11,
 e-mail: wasil14@ukr.net; geosfera@nubip.edu.ua

Yu.V. Shurub¹, V.Ye. Vasilenkov², Yu.L. Tsitsyurskiy²
¹ Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine,
 56, Peremogy Avenue, Kyiv, 03680, Ukraine.
² National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
 11, Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine.
Method of calculation of electromagnetic torque and energy losses of three-phase induction motors when powered by a regulated single-phase voltage.

Introduction. Single-phase power supply of induction motors is used in public utilities, in microclimate control systems for remote agricultural consumers, in water supply and pipeline transport systems, etc. In practice, there is the use of induction motors with three-phase stator winding in the conditions of single-phase power supply. Starting and operating capacitors are used to enable their operation when powered by a single-phase network. **Problem.** There are many fairly accurate methods for calculating the characteristics of an induction motor in asymmetric, including single-phase, modes of operation, but they are based on differential equations, which does not allow to obtain analytical expressions for preliminary analysis and synthesis of such systems. **Goal.** The purpose of this article is to develop the analytical method of definition of electromagnetic torque and energy losses of voltage-regulated three-phase induction motors working according to the scheme of single-phase inclusion with the phase-shifting capacitor. **Methodology.** The method is based on the theory of symmetric components and analysis of replacement schemes of induction machine in motor and generator modes. **Results.** The analysis of the obtained data shows that at a constant value of the phase-shifting capacitor capacity induction motor working according to the scheme of single-phase inclusion has a minimum of losses at one value of slip at different values of supply voltage. Therefore, if you keep this slip constant when the load changes, you can achieve a mode of minimizing losses at a constant value of the capacity, optimal for this slip. This shows that the thyristor voltage regulator can be used as an energy-saving element under variable load, while the capacitance of the phase-shifting capacitor can remain constant when changing the load in a wide range provided that this slip is stabilized. **Originality.** The developed method allows to obtain analytical expressions for comparative analysis of electromagnetic torque and energy losses of three-phase induction motors powered by a single-phase network at different values of the capacity of the phase-shifting capacitor, supply voltage for different variants of schemes for including three-phase induction motors in a single-phase network. **Practical value.** Based on the developed analytical method, the optimal parameters of phase-shifting capacitors and rational schemes for including three-phase induction motors in a single-phase network can be determined. References 25, figures 3.

Key words: induction motor, single-phase supply, voltage regulator, method of symmetric components, phase-shifting capacitor.

How to cite this article:

Shurub Yu.V., Vasilenkov V.Ye., Tsitsyurskiy Yu.L. Method of calculation of electromagnetic torque and energy losses of three-phase induction motors when powered by a regulated single-phase voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 8-14. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.02>