

Ю.В. ШУРУБ, Ю.Л. ЦИЦЮРСЬКИЙ, Є.М. РУДЕНКО

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННОГО КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГУНА В РЕЖИМАХ НЕПОВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Пропонується застосування комбінованої схеми двигуна із змінною структурою силової частини та постійною ємністю фазозміщуючого конденсатора. Аналіз варіантів даної схеми показав, що схема з самозбудженням конденсаторної фази має режим, найбільш близький до симетричного, на холостому ході, але не дозволяє отримати номінальний момент. Тому використання комбінованої схеми є доцільним в режимах роботи із змінними у широкому діапазоні навантаженнями. Такі режими роботи характерні для приводів поршневих компресорів, конвеєрів, тощо.

Ключові слова: асинхронний конденсаторний двигун, коефіцієнт несиметрії, режим холостого ходу, метод симетричних складових, однофазне живлення.

Предлагается применение комбинированной схемы двигателя с переменной структурой силовой части и постоянной емкостью фазосдвигающего конденсатора. Анализ вариантов данной схемы показал, что схема с самозбуджением конденсаторной фазы имеет режим, наиболее близкий к симметричному, на холостом ходу, но не позволяет получить номинальный момент. Поэтому использование комбинированной схемы целесообразно в режимах работы с переменными в широком диапазоне нагрузками. Такие режимы работы характерны для приводов поршневых компрессоров, конвейеров и других.

Ключевые слова: асинхронный конденсаторный двигатель, коэффициент несимметрии, режим холостого хода, метод симметричных составляющих, однофазное питание.

Purpose. Induction capacitor motors are widely used as an actuator of electric drives of operating mechanisms in the conditions of single-phase power supply. The disadvantage of the traditional schemes of such engines is increased no-load losses. Such operating modes are characteristic for drives of piston compressors, conveyors, and others. The purpose of this work is to develop circuit solutions that allow to increase the energy efficiency of induction capacitor motors in incomplete load modes. **Methodology.** It is proposed to use a combined motor scheme with a variable structure of the power circuit and a constant capacitance of the phase-shifting capacitor. The motor windings in working mode are activated according to the Steinmetz scheme, in the mode of operation with low load - according to the scheme of self-excitation of the capacitor phase through the rotating rotary shaft. **Results.** The analysis of these schemes showed that the circuit with self-excitation of the condenser phase has a mode most close to the symmetric, at no-load operating, but does not allow to obtain a nominal torque. **Originality.** The use of the combined scheme is advisable in the modes of operation with variables in a wide range of loads. **Practical value.** The application of the self-excitation circuit of the capacitor phase is advisable in case of necessity of long operation of the motor at low loads. This scheme allows significantly to reduce the no-load losses.

Keywords: induction capacitor motor, asymmetry coefficient, no-load mode, symmetrical component method, single-phase power supply.

Вступ. Асинхронні конденсаторні двигуни (АКД) з трифазною обмоткою статора і короткозамкненим ротором знаходять широке застосування у якості виконавчого механізму електроприводів робочих механізмів в умовах однофазного живлення завдяки простоті конструкції і високим енергетичним характеристикам. Останнє справедливо для двигунів, які працюють при постійних навантаженнях і напрузі мережі. Однак багато технологічних машин працюють із змінним навантаженням, внаслідок чого енергетичні характеристики АКД з постійною ємністю фазозсуваючого конденсатора, обраної для номінальної точки механічної характеристики, можуть значно погіршуватися. Особливо небезпечні режими, близькі до холостого ходу [1]. Якщо врахувати складність регулювання ємності конденсаторів і випадковий характер зміни напруги мережі, тоді застосування тиристорного регулятора напруги (ТРН) буде виправдано, оскільки, крім функції управління швидкістю механізму, ТРН може здійснювати також функції оптимізації енергоспоживання та симетрування [2].

Однофазне живлення асинхронних електроприводів (ЕП) на базі АКД – трифазно-однофазних електроприводів - застосовується при ускладнених умовах електропостачання, наприклад, у побуті, комунальному та сільському господарстві [3,4]. Режими роботи з неповним навантаженням та близькі до хо-

лостого ходу є характерними для таких механізмів, як конвеєри, підйомні машини, зернодробарки, поршневі компресори, тощо. Цікавим є питання про вибір схеми з'єднання силової частини трифазно-однофазного електроприводу за системою ТРН-АКД при змінному у широкому діапазоні навантаженні, оскільки відомо велику кількість схем включення трифазного асинхронного двигуна з конденсатором при однофазному живленні [1]. Використання у таких електроприводах відомих схем включення трифазного двигуна з фазозміщуючим конденсатором з постійною ємністю може значно погіршувати енергетичні характеристики електроприводу при роботі з малими навантаженнями. Використання конденсатора з регульованою ємністю збільшує масогабаритні показники ЕП. Тому у даній роботі пропонується застосування комбінованої схеми ЕП із змінною структурою силової частини та постійною ємністю фазозміщуючого конденсатора, що подана на рис. 1. Обмотки двигуна у робочому режимі вмикаються за схемою Штейнметца (положення 1 контактора К), у режимі роботи з малим навантаженням – за схемою "зірка з нульовим проводом" з самозбудженням конденсаторної фази через ротор, що обертається (положення 2 контактора К).

Постановка задачі. Метою даної роботи є аналіз ефективності застосування комбінованої схеми асинхронного електроприводу механізмів із змінним навантаженням при однофазному живленні.

Об'єкт дослідження. Надалі схему силової частини ЕП при положенні контактора 1 на рис. 1 називатимемо схемою 1, а схему при положенні контактора 2 називатимемо схемою 2. Проведемо порівняльний аналіз енергетичних характеристик цих схем. В якості енергетичного критерію оцінки схем включення можна прийняти коефіцієнт несиметрії напруг прямої та зворотної послідовностей $\gamma = \frac{U_n}{U_p}$, який при нехтуванні впливом на параметри двигуна насичення і ефекту витіснення струму в розглянутих схемах визначається ковзанням.

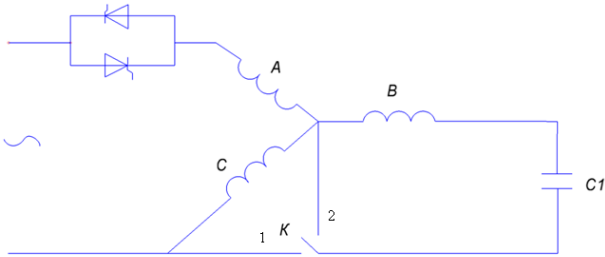


Рис. 1 – Комбінована схема асинхронного конденсаторного двигуна

Введемо також такі позначення, як $x = X_{C_0}/X_C$ – відносне значення ємності, $k_i = Z_1/Z_2$ – коефіцієнт, що дорівнює відношенню струмів режимів противовключення і двигуна.

З метою знаходження коефіцієнта несиметрії скористаємося методом симетричних складових. Для розглянутих схем з'єднання обмоток асинхронного двигуна (АД) і конденсатора за законами Кірхгофа можна отримати вирази для визначення комплексних значень напруг статора прямої \underline{U}_p та зворотної \underline{U}_n послідовностей:

для схеми 1:

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

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

для схеми 2:

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

$$\underline{U}_n = - \frac{\underline{U} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} x - \sin \varphi_1 - j \cos \varphi_1 \right]}{\sqrt{3} \left\{ \cos \varphi_1 + k_i \cos \varphi_2 + j \left[\frac{2}{\sqrt{3}} x - (\sin \varphi_1 + k_i \sin \varphi_2) \right] \right\}}. \quad (4)$$

Тут Z_1, Z_2 – модулі повних опорів схем заміщення прямої та зворотної послідовності, φ_1, φ_2 – фазові кути схем заміщення відповідно прямої та зворотної послідовностей. При цьому $Z_1, Z_2, \varphi_1, \varphi_2$ є функціями ковзання s .

Переходячи до модулів, знайдемо значення коефіцієнтів несиметрії:
для схеми 1:

$$\gamma = \sqrt{\frac{x^2 - \theta_1 x + 1}{x^2 - \theta_2 k_i x + k_i^2}}, \quad (5)$$

для схеми 2:

$$\gamma = \sqrt{\frac{\frac{1}{3} x^2 - \theta_1 x + 1}{\frac{1}{3} x^2 - \theta_2 k_i x + k_i^2}}; \quad (6)$$

де коефіцієнти θ_1, θ_2 дорівнюють:
для схеми 1:

$$\theta_1 = \sqrt{3} \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1, \quad \theta_2 = \sqrt{3} \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2;$$

для схеми 2:

$$\theta_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_1, \quad \theta_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_2.$$

Симетричний режим в розглянутих схемах має місце за умови рівності нулю коефіцієнту несиметрії, тобто при $\gamma = 0$. При зміні кута φ_1 в межах від 0 до 90 ел. град. поліноми, які стоять в чисельнику підкореневих виразів для γ у формулах (5) - (6) для обох схем мають дійсні корені тільки при одному значенні φ_1 : $\varphi_1 = 60$ ел. град. для схеми Штейнметца, $\varphi_1 = 90$ ел. град. для схеми "зірка з нульовим проводом". Це означає, що вибір ємності згідно з умовою $\gamma = 0$ забезпечує при значеннях φ_1 повністю симетричний режим, при цьому $X_c = \sqrt{3} Z_1$ для схеми Штейнметца, $X_c = Z_1$ для схеми "зірка з нульовим проводом". У всіх інших випадках режим живлення є несиметричним.

Умовою найбільшої симетрії напруг статора двигуна при значеннях φ_1 , що не дозволяють виконати умову $\gamma = 0$, є умова мінімуму коефіцієнта несиметрії $\gamma = \min$. При цьому вирази (5) - (6) є цільові функції виду $f(X_c)$, дослідження на екстремум яких і дає шуканий закон зміни оптимального ємнісного опору фазозсуваючого конденсатора в залежності від фазового кута φ_1 , який в свою чергу при допущенні про лінійність параметрів схеми заміщення АД визначається ковзанням.

Знаючи параметри двигуна і конкретні діапазони зміни навантаження, а, отже, знаючи і діапазон зміни кута φ_1 , можна вибрати схему з найбільш сприятливим характером зміни коефіцієнта несиметрії при $X_c = \text{const}$ або здійснювати комбіноване управління, коли в одному діапазоні навантаження обмотки статора включаються у схему 1, а в іншому – у схему 2.

Схема "зірка з нульовим проводом" 2 не має пускового моменту. Проблема пуску для неї вирішується за допомогою включення двигуна в пусковому режимі за

схемою Штейнметца 1. Однак, як було показано раніше, схема 2 може забезпечити повністю симетричний режим $\gamma = 0$ на холостому ході, тобто при $\varphi_1 = 90$ ел. град, що виправдовує її використання в режимі роботи S6, оскільки інші схеми АКД мають підвищені втрати холостого ходу.

Результати досліджень. Проведемо порівняльний аналіз відносних втрат АКД при підключенні його обмоток за схемами Штейнметца 1 і "зірка з нульовим проводом" 2, розрахованих за наступною методикою.

Величина ковзання s відповідає значенням змінних втрат (втрат ковзання), що обчислюються за формулою:

$$\Delta P_{var} = \frac{M}{M_n} \frac{s}{s_n} \Delta P_{var n}. \quad (7)$$

Постійні втрати в АД залежать від прикладеної до обмоток статора напруги, що побічно рівнозначно залежності від моменту, і в разі регульованого за напругою асинхронного електроприводу також стають змінними. Тоді постійні втрати можуть бути виражені через момент і ковзання:

$$\Delta P_{var} = \frac{M}{M_n} \frac{\Delta P_{const n} \cdot s_n}{s}. \quad (8)$$

У виразах (7) і (8) $\Delta P_{var n}$, $\Delta P_{const n}$ – відповідно змінні і постійні втрати в номінальному режимі, M_n , s_n – номінальні момент і ковзання.

Номінальні втрати визначаються через параметри схеми заміщення асинхронного двигуна:

$$\Delta P_{var n} = M_n \omega_0 s_n \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (9)$$

$$\Delta P_{const n} = \frac{M_n \omega_0}{s_n} \left(\frac{R_1 R_2}{X_0^2} + \frac{R_2}{R_0} \right), \quad (10)$$

де R_1 , R_2 , R_0 , X_0 – параметри схеми заміщення АД.

На обмотках статора АКД в загальному випадку присутня несиметрична система напруг, тому повні електричні втрати в двигуні дорівнюють сумі втрат від струмів прямої і зворотної послідовностей:

$$\Delta P = \Delta P_{var p} + \Delta P_{const p} + \Delta P_{var n} + \Delta P_{const n}, \quad (11)$$

Змінні і постійні втрати розраховуються за (7) та (8) окремо для прямої і зворотної послідовностей. У першому випадку в них підставляються значення моменту прямої послідовності M_p і ковзання s . У другому – момент зворотної послідовності M_n і $2-s$.

Після ряду перетворень залежність повних електричних втрат в АКД від ковзання матиме вигляд:

$$\Delta P = \frac{M}{1 + k_\mu \gamma^2} \left(A [s + k_\mu \gamma^2 (2-s)] + B \frac{1}{s} [1 + \gamma^2] \right), \quad (12)$$

де $A = \frac{\Delta P_{var n}}{M_n s_n}$, $B = \frac{\Delta P_{const n} s_n}{M_n}$ – постійні коефіцієнти,

$$k_\mu = \frac{M_2}{M_1} = - \frac{\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{2-s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \cdot \frac{s}{2-s}$$

– коефіцієнт, що дорівнює відношенню моменту проти-включення і двигунного моменту при симетричному живленні.

З виразу (12) видно, що величина оптимального ковзання не залежить від моменту опору, що дозволяє для визначення s_{opt} досліджувати на екстремум відношення $\frac{\Delta P}{M}$, що являє собою величину втрат на одиницю моменту.

На рис. 2 подані залежності відносних втрат $\frac{\Delta P}{M}$ двигуна 4A71B2 (1,1кВт) від ковзання для схем, що розглядаються, при однаковій ємності.

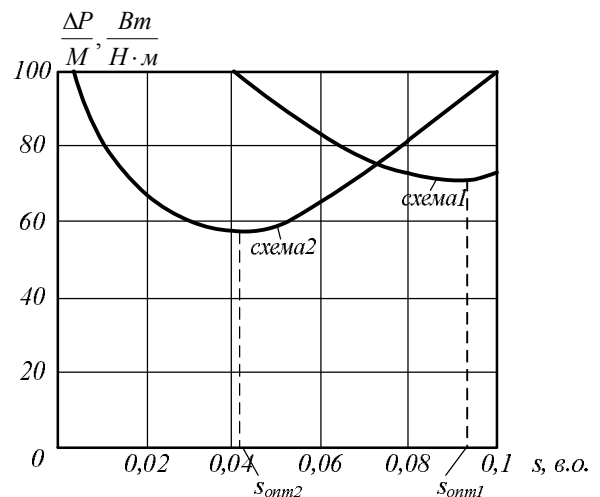


Рис. 2 – Залежності відносних втрат від ковзання

Як було показано вище, схема 2, на відміну від схеми 1, має мінімум коефіцієнту несиметрії при будь-яких значеннях ємності на холостому ході. Тому оптимальне ковзання, що відповідає мінімуму втрат, у схемі 2 значно менше, ніж у схемі 1. Отже, виявляється доцільним при малих навантаженнях та холостому ході перемикавання зі схеми Штейнметца на схему "зірка з нульовим проводом", при цьому ємність конденсатора залишається незмінною.

Висновки.

1. Запропонована комбінована схема однофазного включення асинхронного двигуна дозволяє зменшити до допустимих втрати холостого ходу та отримати номінальний момент при постійній ємності фазозміщуючого конденсатора.

2. Розроблена методика дозволяє обґрунтовано за критерієм мінімуму коефіцієнту несиметрії напруг статора вибрати схему силової частини при неномінальних режимах роботи, пов'язаних із змінним навантаженням, в залежності від положення робочої точки на механічній характеристиці.

3. Схема з самозбудженням конденсаторної фази позбавлена недоліків конденсаторних двигунів – під-

вищених втрат на холостому ході. Її застосування доцільно при необхідності тривалої роботи двигуна при малих навантаженнях, що дозволяє значно знизити втрати холостого ходу.

Список літератури

1. Торопцев, Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором / Н. Д. Торопцев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 95 с.
2. Браславский И.Я. Разработка, исследование, внедрение систем «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» / Браславский И.Я., Зюзев А.М., Костылев А.В. // Электротехника. – 2004. – №9. – С.13-17.
3. Шуруб Ю.В. Дослідження властивостей комбінованої схеми однофазного включення асинхронного електроприводу насосних установок / Ю.В. Шуруб, В.С. Василенков, Ю.Л. Цищорський // Технічна електродинаміка. – 2018. – №6. – С.50-53.
4. Попович О.М. Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насоса за застосування комплексного проектування / О. М. Попович, О. В. Бібік // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – 2018. – № 5. – С. 79–82.

References (transliterated)

1. Toroptsev N. D. Trekhfaznyy asinkhronnyy dvigatel' s odnofaznym pitaniyem cherez kondensator [Three-phase asynchronous motor with single-phase power supply through the capacitor], Moscow : Entrgoatomizdat, 1988, 95 p.
2. Braslavskiy I.Y., Ziuzev A.M. and Kostylev A.V. Razrabotka, issledovaniye, vnedreniye sistem «tiristornyy preobrazovatel' napryazheniya – asinkhronnyy dvigatel'» [Working out, research, introduction of systems «thyristor voltage converter – induction motor»], *Elektrotehnika*, 2004, no. 9, pp. 13-17.
3. Shurub, Y., Vasilenkov, V. and Tsitsyurskiy, Y. Doslidzhennya vlastyivostey kombinovanoi skhemy odnofaznoho vklyuchennya asynkhronnoho elektropryvodu nasosnykh ustanovok Investigation of [Properties of Combined Scheme of Single-Phase Switching of Induction Electric Drive of Pumping Plants] *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2018, no.6, pp.50-53.
4. Popovych O.M., Bibik O.V. Poshek i otsinka shliahiv pidvyshchennia energoefektyvnosti monoblochnogo nasosu za zastosuvannia kompleksnogo proektuvannia [Search and evaluation of ways to increase the energy efficiency of a monoblock pump in the application of complex design] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 5, pp. 79–82.

Надійшла (received) 25.03.2019

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Підвищення ефективності асинхронного конденсаторного двигуна в режимах неповного навантаження / Ю.В.Шуруб, Ю.Л.Цищорський, Є.М.Руденко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 107-110. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2409-9295.

Повышение эффективности асинхронного конденсаторного двигателя в режимах неполной нагрузки / Ю.В.Шуруб, Ю.Л.Цищорский, Е.М.Руденко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 107-110. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2409-9295.

Improving the efficiency of an induction capacitor motor at partial load modes / Y.V.Shurub, Y.L.Tsitsyurskiy, Y.M.Rudenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 107-110. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шуруб Юрій Вікторович, кандидат технічних наук, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, старший науковий співробітник, тел. (044)366-26-37; e-mail: shurub@bigmir.net.

Шуруб Юрий Викторович, кандидат технических наук, Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, старший научный сотрудник, тел. (044)366-26-37; e-mail: shurub@bigmir.net.

Shurub Yuriy Victorovich, Ph.D., Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Research Officer, tel. +38 (044)366-26-37; e-mail: shurub@bigmir.net.

Цищорський Юрій Леонтійович, Національний університет біоресурсів і природокористування України, асистент кафедри автоматизації та робототехнічних систем.

Цищорский Юрий Леонтьевич, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ассистент кафедры автоматизации и робототехнических систем.

Tsitsyurskiy Yuriy Leontiyevich, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, assistant of Department of Automatics and Robototechnical Systems.

Руденко Євген Михайлович, Національний університет біоресурсів і природокористування України, магістрант кафедри автоматизації та робототехнічних систем.

Руденко Евгений Михайлович, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, магистрант кафедры автоматизации и робототехнических систем.

Rudenko Yevgen Mikhailovich, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, master student of Department of Automatics and Robototechnical Systems.