

Ю.В. Шуруб, Ю.Л. Цищорський

ГАРМОНІЙНИЙ АНАЛІЗ КОМБІНОВАНОЇ СХЕМИ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ТИРИСТОРНИМ КЕРУВАННЯМ

Розроблено узагальнену для різних варіантів з'єднання силової частини електроприводу з тиристорним керуванням математичну модель комбінованої схеми однофазного включення асинхронного двигуна із змінною структурою силової частини та постійною ємністю фазозміщуючого конденсатора. Проведено порівняльний гармонійний аналіз струмів та моментів двигуна та визначено фактори, що впливають на енергоефективність електроприводу, при різних схемах включення силової частини. Бібл. 4, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: асинхронний двигун, однофазне живлення, тиристорне керування, гармоніка.

Разработана обобщенная для разных вариантов соединения силовой части электропривода с тиристорным управлением математическая модель комбинированной схемы однофазного включения асинхронного двигателя с переменной структурой силовой части и постоянной емкостью фазосдвигающего конденсатора. Проведен сравнительный гармонический анализ токов и моментов двигателя и определены факторы, влияющие на энергоэффективность электропривода, при разных схемах включения силовой части. Библ. 4, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, однофазное питание, тиристорное управление, гармоника.

Вступ. Схеми однофазного включення трифазних асинхронних двигунів (АД) з фазозміщуючим конденсатором та постійною структурою силової частини знаходять широке застосування у нерегульованих електроприводах завдяки простоті конструкції та досить високим енергетичним характеристикам [1-3]. У випадках регульованого електроприводу (ЕП) застосування схем включення фазозміщуючого конденсатора з постійною ємністю може значно погіршувати експлуатаційні та енергетичні характеристики електроприводу у пускових режимах та при роботі із змінною швидкістю [2, 3]. Використання конденсатора з регульованою ємністю збільшує масогабаритні показники ЕП. У [4] для роботи регульованих насосів при однофазному живленні пропонується застосування комбінованої схеми регульованого тиристорним перетворювачем напруги (ТПН) електроприводу із змінною структурою силової частини, що показана на рис. 1. Застосування цієї схеми дозволяє використовувати постійну ємність в широкому діапазоні регулювання швидкості.

Метою даної статті є порівняльний аналіз впливу гармонійних складових координат однофазного електроприводу, що виникають внаслідок фазового способу керування, на експлуатаційні характеристики електроприводу при різних варіантах включення силової частини.

Математична модель. Схема комбінованого включення (рис. 1) має два варіанти з'єднання силової частини. Обмотки двигуна у пусковому режимі та при роботі із зниженими швидкостями вмикаються за схемою послідовно-паралельного включення (положення 2 контактора K), у робочому режимі – за схемою Штейнметца (положення 1 контактора K). Для аналізу процесів у цій схемі при тиристорному керуванні була розроблена узагальнена математична модель, у якій структура диференціальних рівнянь залишається незмінною незалежно від схеми з'єднання силової частини.

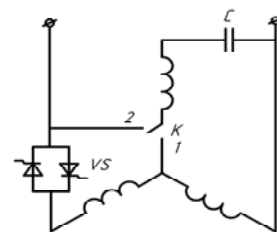


Рис. 1. Комбінована схема однофазного включення асинхронного електроприводу

В системі координат статора $\alpha, \beta, 0$ електромеханічні процеси в АД описуються наступною системою рівнянь в матричній формі:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = R_s \cdot \bar{i}_s + \sigma \cdot L_s \cdot p \cdot \bar{i}_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot p \cdot \bar{\psi}_r; \\ 0 = -R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{i}_s + \frac{R_r}{L_r} \cdot \bar{\psi}_r' + p \cdot \bar{\psi}_r' + \omega \cdot \bar{\psi}_r'; \\ M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (\bar{\psi}_\alpha^r \cdot \bar{i}_\beta^s - \bar{\psi}_\beta^r \cdot \bar{i}_\alpha^s); \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \end{cases} \quad (1)$$

де $\bar{u}_s = \begin{bmatrix} u_\alpha^s & u_\beta^s \end{bmatrix}^t$ – вектор напруг статора; $\bar{i}_s = \begin{bmatrix} i_\alpha^s & i_\beta^s \end{bmatrix}^t$ – вектор струмів статора; $\bar{\psi}_r' = \begin{bmatrix} \psi_\alpha^r & \psi_\beta^r \end{bmatrix}^t$ – вектор потокозчеплень ротора; $L_s = L_m + L_{\sigma s}$, L_r – повні індуктивності статора і ротора; L_m – індуктивність на магнітуючого контуру; $L_{\sigma s}$ – індуктивність розсіювання статора; R_s, R_r – активні опори статора і ротора; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r \cdot L_s}$ – коефіцієнт розсіювання; J – момент інерції; $\bar{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}$ – матриця, що визначає ЕРС обертання; p – символ диференціювання за часом.

© Ю.В. Шуруб, Ю.Л. Цищорський

Для вирішення системи (1) необхідно виразити вектор напруг статора $\bar{u}_s = \left[u_\alpha^s, u_\beta^s \right]^t$ через параметри зовнішнього кола двигуна і змінні стану, за які приймаються струми статора $\bar{i}_s = \left[i_\alpha^s, i_\beta^s \right]^t$ та потокозчеплення ротора $\bar{\psi}_r' = \left[\psi_\alpha^r, \psi_\beta^r \right]^t$. Опираючись на рівняння Кірхгофа та відомі співвідношення між електромагнітними змінними в ортогональній системі координат $\alpha, \beta, 0$ і в природній системі координат А, В, С можливо визначити, що в загальному випадку вектор напруг статора для досліджуваних схем (Штейнметца і послідовно-паралельної) є функцією напруги мережі u , вектора струму статора $\bar{i}_s$, вектора потокозчеплень ротора $\bar{\psi}_r$ і напруги на конденсаторі u_C , яка в свою чергу може бути визначена через складові вектора $\bar{i}_s$. Тоді загальний вираз для визначення вектора напруг статора буде мати вигляд:

$$\bar{u}_s = \bar{k}_1 \cdot u + \frac{1}{C_1} \cdot \bar{k}_2 \cdot \frac{1}{p} \cdot \bar{i}_s + (R_s \cdot \bar{k}_3 + \sigma \cdot L_s \cdot \bar{k}_3 \cdot p) \cdot \bar{i}_s + L_m \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} - 1 \right) \cdot \bar{k}_4 \cdot p \cdot \bar{i}_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{k}_5 \cdot p \cdot \bar{\psi}_r' \quad (2)$$

У правій частині виразу (2) перша складова обумовлена дією напруги мережі, друга – напругою на конденсаторі, третя – дією протиЕРС від струмів нульової послідовності, четверта – протиЕРС обертання.

Робота тиристорного регулятора описується логічною функцією

$$F = X_1 \cdot \Pi + Y_1 + X_2 \cdot \Pi + Y_2, \quad (3)$$

де логічні функції Y_1, Y_2 відповідають ненульовому значенню струмів через тиристори, логічні функції X_1, X_2 – зворотним напругам на тиристорах, Π – перемикаюча функція, що відповідає сигналу керування тиристорами.

Перемикаюча функція Π при фазовому керуванні має наступний вигляд:

$$\Pi = 1 \text{ при } \alpha + \pi \cdot k < \omega_0 \cdot t < (\alpha + \theta) + \pi \cdot k;$$

$$\Pi = 0 \text{ при } 0 + \pi \cdot k < \omega_0 \cdot t < \alpha + \pi \cdot k \cup \quad (4)$$

$$\cup (\alpha + \theta) + \pi \cdot k < \omega_0 \cdot t < \pi + \pi \cdot k$$

де α – кут керування тиристорами (в ел. град.); ω_0 – частота напруги живлення; θ – тривалість імпульсів керування (в ел. град.), що обираються з умов надійного відкривання тиристорів; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ Для надійного відкривання тиристорів система керування ТПН повинна формувати імпульси тривалістю не менше ніж 70 ел. град.

Провідному стану тиристорного регулятора відповідає значення $F = 1$, непровідному – $F = 0$.

Числові значення матриць коефіцієнтів $\bar{k}_1 - \bar{k}_4$, що дозволяють зв'язати вектор напруги статора двофазної моделі АД в координатах статора $\alpha, \beta, 0$, з параметрами зовнішнього кола двигуна (напруга мережі, ємність конденсатора) і змінними стану, приведені в табл. 1 в залежності від положення комутатора K і стану (провідного чи непровідного) тиристорного регулятора.

Таким чином, зміна структури силового кола не вимагає зміни системи диференціальних рівнянь, а супроводжується тільки зміною коефіцієнтів $\bar{k}_1 - \bar{k}_4$ в рівнянні (2), не порушуючи при цьому закони безперервності потокозчеплень двигуна та зарядів конденсатора.

Таблиця 1

Матриці коефіцієнтів рівняння (2)

Схема (положення ключа K)	Стан тиристорів (значення F)	$\bar{k}_1$	$\bar{k}_2$	$\bar{k}_3$	$\bar{k}_4$
1	1	2/3 0	-1/6 -1/2√3 -1/2√3 -1/2	0 0 0 0	0 0 0 0
	0	0 0	0 0 -1/2√3 -1/2	0 0 0 0	1 0 0 0
2	1	2/3 1/√3	-1 0 0 0	-1/3 0 0 0	1/3 0 0 0
	0	2/3 0	-1 0 0 0	-1/3 0 0 0	1/3 0 0 0

Результати досліджень. Розглянемо спочатку роботу ЕП з двигуном 4А71В2 потужністю 1,1 кВт при включенні за схемою Штейнметца. Криві зміни у часі лінійного струму i та миттєвого електромагнітного моменту M при з'єднанні обмоток двигуна за схемою Штейнметца показані на рис. 2.

Під час непровідного стану тиристорів струм фази А дорівнює нулю, а конденсатор аперіодично розряджається через фази В та С. Двигун у ці інтервали переходить у режим гальмування, внаслідок чого максимальне (за модулем) значення коливальних моме-

нтів ΔM значно перевищує середній момент M_{avg} ($\Delta M_{max} = 3 \dots 4 \cdot M_{avg}$).

Гармонійний аналіз лінійного струму двигуна показав, що у кривій струму при фазовому керуванні присутні усі непарні гармоніки. Найбільш значимою вищою гармонікою у кривій лінійного струму двигуна є третя, амплітуда якої досягає при кутах α , більших за 90 ел. град., значень 50...60 % амплітуди основної гармоніки. Амплітуди п'ятої та сьомої гармонік у цьому випадку складають відповідно 30...35 % та 15...20 %.

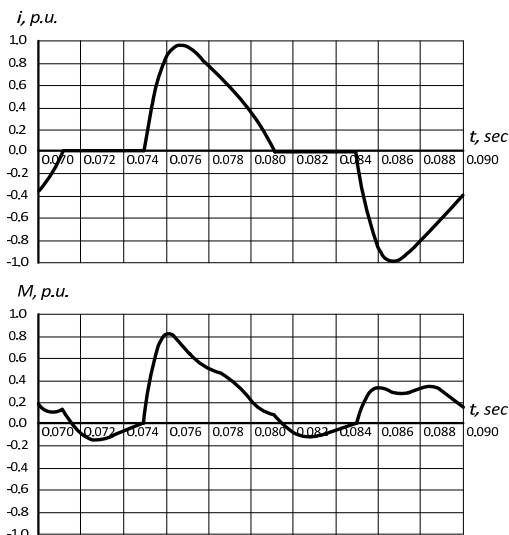


Рис. 2. Криві зміни струму та моменту при включенні за схемою Штейнметца

Залежності відношення споживаних двигуном потужностей при живленні від ТПН з заданим кутом відкриття P_{1T} та при живленні синусоїдною напругою, що дорівнює значенню першої гармоніки при тиристорному керуванні, $P_{1\sim}$ у відносних одиницях (р.у.) від ковзання (рис. 3) показують, що при живленні від ТПН споживана потужність вища, ніж при синусоїдному живленні. ККД двигуна при живленні від ТПН нижчий, ніж при синусоїдному живленні (рис. 4), при цьому зниження ККД тим більше, чим більше кут відкриття тиристорів, досягаючи при $\alpha = 90 \dots 110$ ел. град. 20 %.



Рис. 3. Залежності відношення споживаних двигуном потужностей

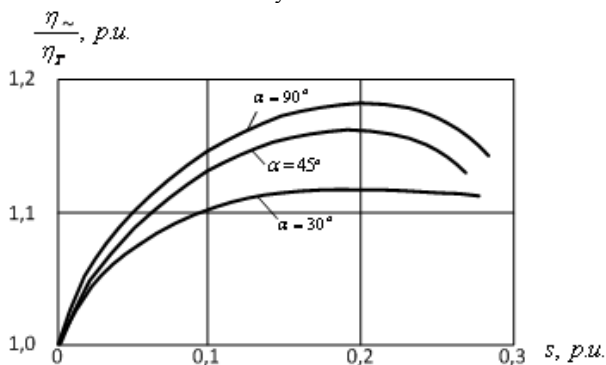


Рис. 4. Залежності відношення ККД двигуна

Для покращення енергетичних характеристик необхідно застосовувати засоби зменшення вмісту вищих гармонійних складових струму двигуна.

Одним з можливих засобів покращення гармонійного складу лінійного струму двигуна при тиристорному керуванні є включення двигуна за послідовно-паралельною схемою з регулюванням напруги тільки однієї фази (положення 2 контактора K на рис. 5). У цьому разі обмотка нерегульованої фази виконує роль фільтру. Криві зміни у часі лінійного струму i та миттєвого електромагнітного моменту M послідовно-паралельної схеми подані на рис. 5.

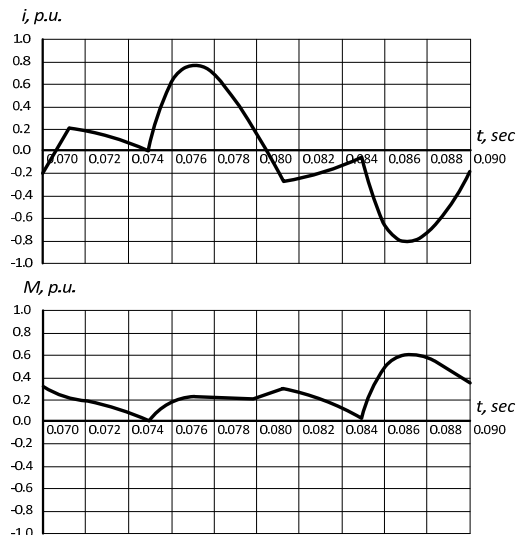


Рис. 5. Криві зміни струму та моменту при включенні за послідовно-паралельною схемою

Дана схема з включенням ТПН послідовно з головною фазою характеризується кращим гармонійним складом лінійного струму (амплітуда третьої гармоніки складає 20-30 % амплітуди першої гармоніки). Аналіз результатів моделювання даної схеми показав значне зниження коефіцієнту гармонік (при кутах відкриття тиристорів $90 \dots 120$ ел.град. k_v не перевищує 40 %) та зменшення амплітуди третьої гармоніки лінійного струму на 30...40 % у всьому діапазоні зміни моменту та швидкості.

Однак слід відзначити, що покращення гармонійного складу у даній схемі досягається ціною збільшення коефіцієнту несиметрії, та, відповідно, втрат від струмів зворотної послідовності. Підвищення коефіцієнту несиметрії при фазовому керуванні конденсаторного АД за послідовно-паралельною схемою обумовлена запізнюючим характером кута фазового зсуву першої гармоніки напруги головної фази відносно напруги живлення через застосування тиристорів з природною комутацією.

При співставленні рис. 2 та рис. 5 видно, що послідовно-паралельна схема має меншу амплітуду коливальних моментів. Максимальне значення (за модулем) коливальних моментів ΔM не перевищує значень $1 \dots 1,5$ середнього моменту M_{avg} . Це пояснюється тим, що у інтервали несповідного стану тиристорів двигун продовжує працювати у двигунному режимі однофазного включення, а не переходить у режим гальмування, як у схемі Штейнметца. З рис. 5 видно, що несинусоїдна коливальна складова, що обумовлена комутацією тиристорів, слабо виражена у кривій миттєвого електромагнітного моменту у послідовно-паралельній схемі.

Висновки.

Використання комбінованої схеми однофазного включення трифазного асинхронного двигуна дозволяє використовувати постійну ємність у діапазоні ковзання від номінального до критичного без перевищення номінальних втрат.

Аналіз отриманих даних показує, що послідовно-паралельна схема має кращий гармонійний склад споживаного струму та менші амплітуди коливань моменту, ніж схема Штейнметца, практично у всьому діапазоні змін моменту навантаження та швидкості.

Основний вплив на збільшення втрат порівняно з симетричним синусоїдним амплітудним керуванням здійснюють несиметрія струмів у послідовно-паралельній схемі та вищі гармоніки струмів у схемі Штейнметца.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Попович О.М. Бібік О.В. Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насоса за застосування комплексного проектування // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2018. – №5(1281). – 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 // 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Sep. 2016. doi: 10.1109/cpee.2016.7738735.
3. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Петров А.П. Динамические показатели трехфазных асинхронных двигателей, включаемых в однофазную сеть // Электротехника. – 2000. – №1. – С. 13-19.
4. Шуруб Ю.В. Василенков В.Є., Цицюрський Ю.Л. Дослідження властивостей комбінованої схеми однофазного включення асинхронного електроприводу насосних установок // Технічна електродинаміка. – 2018. – №6. – С. 50-53. doi: 10.15407/techned2018.06.050.

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 NTU «KhPI». Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion»*, 2018, no.5(1281), pp. 79-82. (Ukr).
2. Malyar V., Namola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. *17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Sep. 2016. doi: 10.1109/cpee.2016.7738735.
3. Bepalov V.Ya., Moshchinskiy Yu.A., Petrov A.P. Dynamic parameters of three-phase asynchronous motor with single-phase power supply. *Russian Electrical Engineering*, 2000, no.1, pp. 13-19. (Rus).
4. 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: 10.15407/techned2018.06.050.

Надійшла (received) 23.10.2019

Шуруб Юрій Вікторович¹, к.т.н., с.н.с.,

Цицюрський Юрій Леонтійович²

¹ Інститут електродинаміки НАН України,

03057, Київ, пр. Перемоги, 56,

тел/phone +380 44 3662637, e-mail: shurub@bigmir.net

² Національний університет біоресурсів і природокористування України,

03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 15

Yu. V. Shurub¹, Yu. L. Tsitsyurskiy²

¹ The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 56, prospect Peremogy, Kiev, 03057, Ukraine.

² National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

15, Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine.

Harmonic analysis of the combined circuit of single-phase switching of induction electric drive with thyristor control.

Purpose. The purpose of this article is to provide a comparative analysis of influence of the phase controlled single-phase induction electric drive coordinates harmonic components on the operational characteristics of the electric drive under different variants of the power part. **Methodology.** A mathematical model of the combined circuit of a single-phase induction motor with a variable structure of the power part and a constant capacitance of the phase-shifting capacitor is generalized for various variants of connection of the power part of the electric drive with thyristor control. The comparative harmonic analysis of currents and torques of the motor is carried out and the factors influencing the energy efficiency of the electric drive at different circuit of connection of the power part are determined. **Results.** The analysis of the obtained data shows that the series-parallel circuit has the best harmonic composition of the consumed current in practically the whole range of changes of load torque and speed. The main effect on the loss increase is due to the asymmetry of the currents in the series-parallel circuit and the higher harmonics in the Steinmetz circuit. **Originality.** For the analysis of the processes in these circuits, a generalized thyristor control single-phase electric drive mathematical model, in which the structure of differential equations remains unchanged regardless of the circuit of connections of the power part, is developed. **Practical value.** Using of the combined circuit of single-phase switching on of a three-phase induction motor allows to use a constant capacity in the range of slips from nominal to critical without exceeding the nominal losses. References 4, tables 1, figures 5.

Key words: induction motor, single-phase power, thyristor control, harmonics.