

ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СХЕМИ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОПРИВОДУ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

Ю.В. Шуруб^{1*}, канд.техн.наук, Ю.Л. Цицюрський²

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

² Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна.

E-mail: yvshur@ukr.net

Розглянуто особливості режимів роботи гідроприводу поступального руху з дросельним регулюванням швидкості, у якому як первинний виконавчий механізм використовується асинхронний двигун з однофазним живленням. Запропоновано комбіновану схему включення такого виконавчого двигуна з фазозміщуючим конденсатором, що дає змогу підвищити його енергоефективність у режимах прямого та зворотного ходу штока гідродвигуна за зміни ступеня відкриття регульовального клапану гідроприводу за рахунок перемикання силових схем та використання регулювання напруги живлення. Бібл. 10, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: гідропривод, асинхронний двигун, фазозміщуючий конденсатор, однофазне живлення.

Вступ. Регульовані гідроприводи використовуються як виконавчі пристрої у машинобудуванні, підйомно-транспортних механізмах тощо [1, 2]. У свою чергу регульований гідропривод являє собою керований технічний комплекс, який містить у собі як об'єкт керування гідродвигун, як керуючі елементи – гідронасос із змінною продуктивністю або регульовальний клапан, як силові виконавчі механізми – первинний електродвигун, у більшості випадків асинхронний. У разі однофазного живлення первинного асинхронного двигуна (АД) може бути використана схема включення асинхронного двигуна з фазозміщуючим конденсатором [3-5].

В залежності від виду гідродвигуна гідроприводи можуть бути обертального або поступального руху. Гідродвигуном поступального руху є гідроциліндр, швидкість якого може регулюватися двома способами: зміною продуктивності гідронасосу (об'ємне регулювання) та зміною гідравлічного опору трубопроводу (дросельне регулювання). Об'ємне регулювання має вищі ККД та стабільність швидкості, ніж гідропривод з дросельним регулюванням, але потребує гідронасос регульованою продуктивністю, що значно збільшує вартість гідропривода. Більш економічним за капітальними вкладеннями способом зміни швидкості гідродвигуна є зміна гідравлічного опору за допомогою регульовального клапану. Причому момент навантаження первинного електродвигуна у разі зміни ступеня відкриття регульовального клапану змінюється у широких межах.

Застосування регульованого за напругою асинхронного електропривода дає змогу знизити енергоспоживання недовантаженого АД, забезпечивши його роботу на регульовальній характеристиці з постійним оптимальним ковзанням за напруги живлення менше номінальної [6, 7]. Економія електроенергії буде тим більшою, чим менше навантаження та більше часу роботи двигуна з недовантаженням.

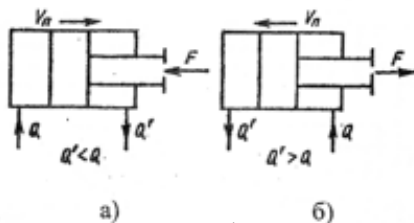


Рис. 1

При цьому слід враховувати, що гідроциліндри можуть бути з двостороннім та одностороннім штоком. У гідроциліндрах з двостороннім штоком швидкості переміщення поршня за прямого та зворотного ходу однакові. У найбільш поширених гідроциліндрах з одностороннім штоком швидкість прямого ходу (рис. 1, а) не дорівнює швидкості зворотного ходу (рис. 1, б) через те, що ефективна площа перетину штока поршня з однієї сторони менша, ніж з іншої. Відповідно і витрати Q робочої рідини у напірній лінії не дорівнюють витратам Q' робочої рідини у зливній лінії.

Тому за прямого та зворотного ходах одностороннього штоку гідроциліндра первинний електродвигун працює з різними навантаженнями. Дослідження [2] показують, що момент навантаження первинного електродвигуна під час зворотного ходу може досягати 0,2...0,4 моменту

навантаження у разі прямого ходу штоку. Тобто первинний електродвигун протягом технологічного циклу працює в режимі роботи із змінним навантаженням.

Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування та дослідження комбінованої схеми включення у однофазну мережу регульованого за напругою асинхронного виконавчого двигуна гідроприводу поступального руху з дросельним регулюванням, що дало б змогу збільшити його енергоефективність як у разі зміни ступеня відкриття регульовального клапану гідроприводу, так і зворотного ходу одностороннього штоку гідроциліндру.

Обґрунтування доцільності використання комбінованої схеми. Використання у однофазних електроприводах (ЕП) відомих схем включення трифазного двигуна з фазозміщуючим конденсатором з постійною ємністю може значно погіршувати енергетичні характеристики електроприводу під час роботи у режимах із змінним навантаженням [8, 9]. Використання конденсатора з регульованою ємністю збільшує масо-габаритні показники ЕП. Тому пропонується застосування комбінованої схеми ЕП із змінною структурою силової частини та постійною ємністю фазозміщуючого конденсатора (рис. 2). Обмотки двигуна у режимі навантажень, близьких до номінальних, що відповідають прямому ходу штоку, вмикаються за схемою «зірка» Штейнметца (положення 1 контактора К). У режимі роботи з малими навантаженнями, що відповідають зворотному ходу штоку, – за схемою "зірка з нульовим проводом" з самозбудженням конденсаторної фази через ротор, що обертається (положення 2 контактора К). Регулювання двигуна за напругою для кожної із схем через зміну ступеня відкриття регульовального клапану гідроприводу відбувається за допомогою тиристорного регулятора напруги (ТРН). Отже, тут здійснюється комбіноване регулювання, що сполучає в собі дискретне та плавне.

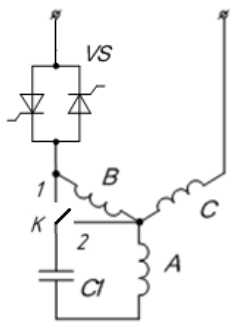


Рис. 2

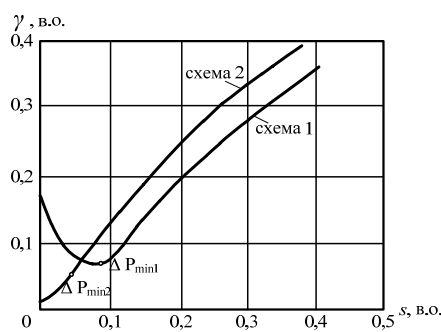


Рис. 3

Надалі схему силової частини під час положення контактора 1 на рис. 2 називатимемо схемою 1, а схему у разі положення контактора 2 – схемою 2. На рис. 3 наведено залежності коефіцієнта несиметрії $\gamma = U_n/U_p$ від ковзання γ для цих схем на прикладі АД 4А71В2У3 з конденсатором ємністю $C = 20$ мкФ, отриманих за методикою [10]. З цих графіків видно, що схема 2, на відміну від схеми 1, має мінімум коефіцієнта несиметрії на холостому ході. Отже, виявляється доцільним за малих наванта-

женнях здійснювати перемикання зі схеми "зірка" Штейнметца на схему "зірка з нульовим проводом", при цьому ємність конденсатора залишається незмінною.

Схема "зірка з нульовим проводом" 2 не має пускового моменту. Проблема пуску для неї може вирішуватися за допомогою включення двигуна в пусковому режимі за схемою Штейнметца 1.

Математична модель. Схема комбінованого включення має два варіанти з'єднання силової частини. Для аналізу процесів у цій схемі у разі тиристорного керування розроблено узагальнену математичну модель, у якій структура диференціальних рівнянь залишається незмінною незалежно від схеми з'єднання силової частини.

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

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

де $\bar{u}_s = |u_\alpha^s, u_\beta^s|^t$ – вектор напруг статора; $\bar{i}_s = |i_\alpha^s, i_\beta^s|^t$ – вектор струмів статора; $\bar{\psi}_r = |\psi_\alpha^r, \psi_\beta^r|^t$ – вектор потокозчеплень ротора; $L_s = L_m + L_{\sigma s}$, L_r – повні індуктивності статора і ротора; L_m – індуктивність

намагнічуючого 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; $\bar{\omega} = \begin{vmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{vmatrix}$ – матриця, що визначає ЄРС обертання; p – символ диференціювання по часу.

Рівняння зв'язку між струмами у ортогональній системі координат статора $\alpha, \beta, 0$ та струмами у фазній системі координат A, B, C мають вигляд

$$\begin{vmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{vmatrix}; \quad \begin{vmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Рівняння зв'язку між напругами мають такий самий вигляд.

Оскільки для схеми "зірка" виконується рівність $i_{sA} + i_{sB} + i_{sC} = 0$, то струм статора нульової послідовності i_0^s у схемі 1 дорівнює нулю. Для схеми "зірка з нульовим проводом" (схема 2), оскільки $i_{sB} = -i_{sC}$, з (2) отримаємо $i_0^s = \frac{1}{3} i_{sA}$ та $i_{sA} = i_\alpha^s + i_0^s$. Тоді $i_0^s = \frac{1}{2} i_\alpha^s$. Напряга нульової послідовності за припущення, що індуктивний опір нульової послідовності визначається тільки розсіюванням статорної обмотки, знаходиться за рівнянням

$$3u_0^s = R_s i_0^s + L_{\sigma s} \cdot p i_0^s. \quad (3)$$

Використання законів Кірхгофа для кожної з схем та виразів (2)-(3) показує, що загальний вираз для визначення вектора напруг статора (ліва частина першого рівняння (1)) має вигляд

$$\bar{u}_s = \bar{k}_1 \cdot u + \frac{1}{C_1} \cdot \bar{k}_2 \cdot \frac{1}{p} \bar{i}_s + L_m \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} - 1 \right) \cdot \bar{k}_3 \cdot p \bar{i}_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{k}_4 \cdot p \bar{\psi}_r'. \quad (4)$$

У правій частині виразу (4) перша складова обумовлена дією напруги мережі, друга – напругою на конденсаторі, третя – дією протиЄРС від струмів нульової послідовності, четверта – протиЄРС обертання.

Числові значення матриць коефіцієнтів $\bar{k}_1 - \bar{k}_4$, що дають змогу зв'язати вектор напруги статора двофазної моделі АД в координатах статора $\alpha, \beta, 0$, з параметрами зовнішнього кола двигуна (напряга мережі, ємність конденсатора) і змінними стану, наведено у табл. в залежності від

1	2	\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	0 0 0 1

положення комутатора К (стовпець 1) і стану (провідного чи непровідного) тиристорного регулятора (стовпець 2).

Робота тиристорного регулятора описується логічною функцією

$$F = X_1 \cdot \Pi + Y_1 + X_2 \cdot \Pi + Y_2, \quad (5)$$

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

Перемикаюча функція Π за

фазового керування має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Pi &= 1 \text{ за } \alpha + \pi \cdot k < \omega_0 \cdot t < (\alpha + \theta) + \pi \cdot k; \\ \Pi &= 0 \text{ за } 0 + \pi \cdot k < \omega_0 \cdot t < \alpha + \pi \cdot k \cup (\alpha + \theta) + \pi \cdot k < \omega_0 \cdot t < \pi + \pi \cdot k' \end{aligned} \quad (6)$$

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 відкриття тиристорів; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Для надійного відкриття тиристорів система керування ТРН повинна формувати імпульси тривалістю не менше, ніж 70 ел. град.

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

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 (4).

Оцінку енергетичних характеристик даної схеми у різних режимах роботи можливо надати за допомогою ККД, що розраховується за формулою

$$\eta = \frac{\int_0^T p_{MEK}(t) dt}{\int_0^T p_{EЛ}(t) dt} = \frac{\int_0^T M(t) \omega(t) dt}{\int_0^T u(t) i_{sc}(t) dt} \quad (7)$$

Криві зміни у часі лінійного струму i та миттєвого електромагнітного моменту M за з'єднання обмоток двигуна за схемою Штейнметца показано на рис. 4.

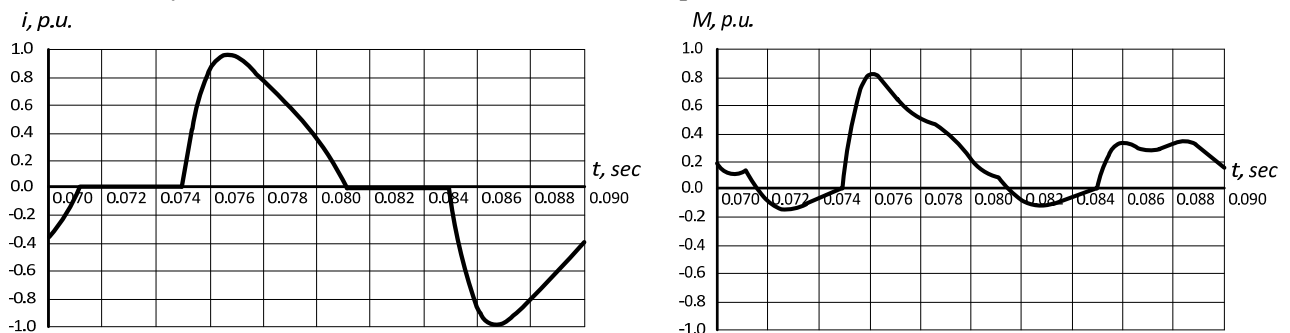


Рис. 4

Гармонійний аналіз лінійного струму двигуна показав, що амплітуда третьої гармоніки може досягати за кутів α , більших за 90 ел. град., до 60% амплітуди основної гармоніки. Поліпшення гармонійного складу струму статора i , як наслідок, підвищення ККД двигуна можливо шляхом перемикання схеми з'єднання обмоток двигуна в залежності від величини навантаження. У разі глибокої зміни навантаження доцільно застосовувати комбіноване регулювання, що сполучає в собі дискретне та плавне. Дискретне здійснюється шляхом перемикання схем з'єднання обмоток. В рамках кожної ступені здійснюється плавне регулювання напруги шляхом зміни кута відкриття вентилів ТРН.

Оптимальне ковзання, що відповідає мінімуму втрат ΔP_{\min} , в схемі 2 менше, ніж в схемі 1 (рис. 3), що вимагає використовувати для різних схем різні сигнали завдання у системі регулювання, що має стабілізувати ці значення оптимальних ковзань. Це ускладнює технічну реалізацію системи регулювання. Але для первинного двигуна гідроприводу схема 1 рекомендується для використання за прямого ходу штока гідродвигуна за близьких до номінальних моментів навантаження, а схема 2 – за зворотного хода, коли моменти навантаження є малими порівняно з моментами за прямого хода. Це дає змогу узгодити зміну сигналу завдання ковзання та зміну силової схеми до зміни напрямку руху штока гідродвигуна.

На рис. 5 показано графіки залежностей ККД, розрахованих за (7) у припущенні незмінності параметрів схем заміщення та неврахуванні механічних, додаткових втрат та втрат у сталі, від навантаження на валу двигуна за постійної напруги живлення АД, включеного за схемою Штейнметца, ємності фазозсуваючого конденсатора $C = 20$ мкФ (крива 1), в режимі оптимізації, що досягається шляхом стабілізації оптимального за даної ємності для схеми 1 ковзання $S = 0,08$, за синусоїдальній регульованій напрузі (крива 2) і живленні від ТРН для схеми 1 (крива 3) та для схеми 2 (крива 4). Відзначимо, що за навантаженнях $0 < M < 0,4 M_n$ ККД двигуна, що включений за схемою 2, більше, ніж ККД двигуна, включеного за схемою 1. Це пояснюється тим, що під час включення двигуна за схемою "зірка з нульовим проводом" до обмоток двигуна прикладається система напруг прямої послідовності меншою в порівнянні зі схемою "зірка" амплітуди, при цьому обидві схеми мають приблизно однаковий коефіцієнт несиметрії за однакового навантаження. На рис. 6 показано залежності кута керування тиристорами від навантаження для двох схем у разі реалізації закону стабілізації оптимального ковзання. Видно, що схема "зірка з нульовим проводом" (схема 2)

дає можливість отримати малі амплітуди напруг прямої послідовності за менших кутах відкриття тиристорів і, отже, меншому спотворенні струму вищими гармоніками, ніж схема "зірка" (схема 1). Тому, використовуючи схему 2, можна отримати малі амплітуди напруги за низьких моментів навантаження за більш низького у порівнянні зі схемою 1 вмісті вищих гармонік струму та, як наслідок, більш високому ККД.

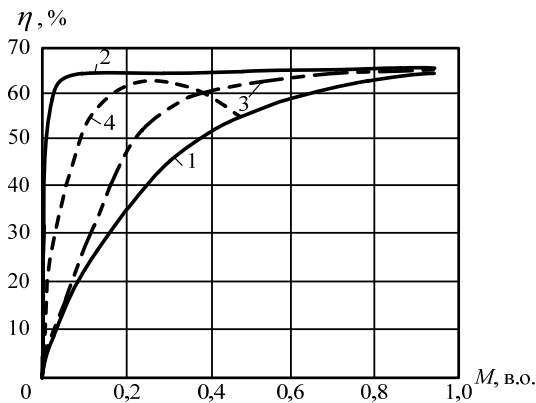


Рис. 5

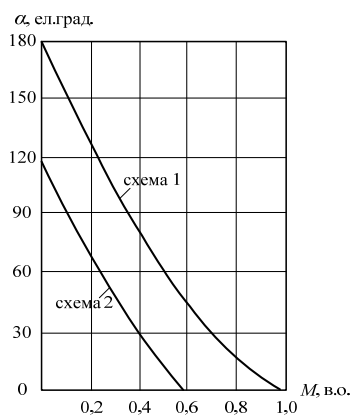


Рис. 6

Необхідно відзначити, що за малих навантажень амплітуда третьої гармоніки струму в схемі 1 досягає значення $0,6 I_1$, тоді як в схемі 2 амплітуда третьої гармоніки не перевищує значення $0,2 I_1$ у всьому діапазоні навантаження. Тут I_1 – амплітуда першої гармоніки струму.

Таким чином, якщо за змінному навантаженні в точці, що відповідає моменту $0,4 M_n$, здійснювати перемикавання обмоток двигуна зі схеми з'єднання "зірка" на схему з'єднання "зірка з нульовим проводом", то можна домогтися, по-перше, значного зменшення вмісту вищих гармонік за малих навантажень, по-друге, зменшення коефіцієнта несиметрії та, як наслідок, підвищення ККД двигуна.

Висновки.

Обґрунтовано доцільність використання комбінованої схеми включення у однофазну мережу регульованого за напругою асинхронного двигуна як виконавчого механізму гідроприводу поступального руху з дросельним регулюванням. Ця схема дає змогу збільшити енергоефективність виконавчого асинхронного двигуна за рахунок зменшення вмісту вищих гармонік та зменшення коефіцієнта несиметрії за змінних навантажень як у разі зміні ступеня відкриття регульовального клапану гідроприводу, так і зворотному ході одностороннього штоку гідроциліндру.

Роботу виконано за держбюджетною темою "Наукові засади та засоби комплексного проектного синтезу асинхронних машин енергоефективних і ресурсозберігаючих електромеханічних систем" (шифр «АСЕЛМА-К»). Державний реєстраційний номер 0117U007715. КПКВК 6541030.

1. Бугай Ю.Н., Огородніков П.І., Палішкін Н.А. Гідравліка, гідромашини і гідропривод. К.: МНТУ, 2002. 388 с.
2. Дідур В.А., Савченко О.Д., Пастушенко С.І., Мовчан С.І. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривод. Запоріжжя: Прем'єр, 2005. 461 с.
3. Попович О.М., Бібік О.В. Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насосу за застосування комплексного проектування. *Вісник НТУ ХПІ. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2018. № 5. С. 79–82.
4. Malyar V., Hamola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. 17th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering CPEE2016. Sandomierz, Poland, September 14-17, 2016. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2016.7738735>.
5. Маляр В.С., Маляр А.В. Механічні характеристики трифазних асинхронних двигунів при однофазному живленні. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 3. С. 21–24. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.3.03>.
6. Zigirkas G., Kalomiros J. Voltage control of single-phase induction motors using asymmetrical PWM and fuzzy logic. 5th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST). Thessaloniki, Greece, May 12-14, 2016. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MOCASST.2016.7495119>.
7. Eltamaly A.M., Alolah A.I., Hamouda R., Abdulghany M.Y. A novel digital implementation of AC voltage controller for speed control of induction motor. *International Journal of Power and Energy Conversion*. 2010. Vol. 2. No 1. Pp. 78–94.
8. Торощев Н.Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором. М.: Энергоатомиздат, 1988. 95 с.

9. 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: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.050>

10. Шуруб Ю.В., Цицюрський Ю.Л. Аналітична методика для визначення оптимальних параметрів та схем регульованих за напругою асинхронних двигунів у разі однофазного живлення. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 59. С. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.056>

APPLICATION OF THE COMBINED SCHEME OF SINGLE-PHASE INCLUSION OF THE INDUCTION MOTOR AS A MEANS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF HYDRAULIC DRIVE OF PROGRESSIVE MOVEMENT

Yu.V. Shurub¹, Yu.L. Tsitsyurskiy²

¹Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine, e-mail: yvshur@ukr.net

The peculiarities of the modes of operation of the hydraulic drive of translational motion with throttle speed control, in which the asynchronous motor with single-phase power supply is used as the primary actuator. A combined circuit of such an actuator with a phase-shifting capacitor is proposed, which allows to increase its energy efficiency in the forward and reverse modes of the hydraulic rod when changing the degree of opening of the hydraulic control valve by switching power circuits and using voltage regulation. References 10, figures 6, table 1.

Keywords: hydraulic drive, induction motor, phase-shifting capacitor, single-phase supply.

1. Bugaj Yu.N., Ogorodnikov P.I., Palishkin N.A. Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drive. Kyiv: MNTU, 2002. 388 p. (Ukr)

2. Didur V.A., Savchenko O.D., Pastushenko S.I., Movchan S.I. Hydraulics, agricultural water supply and hydropneumatic drive. Zaporizhzhya: Premer, 2005. 461 p. (Ukr)

3. Popovych O.M., Bibik O.V. Search and evaluation of ways to increase the energy efficiency of a monoblock pump in the application of complex design. *Visnyk NTU KhPI*. 2018. No 5. Pp. 79–82. (Ukr)

4. Malyar V., Hamola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. 17th International Conference on *Computational Problems of Electrical Engineering CPEE2016*. Sandomierz, Poland, September 14–17, 2016. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2016.7738735>.

5. Malyar V.S., Malyar A.V. Mechanical characteristics of three-phase induction motors with single-phase power supply. *Electrical engineering & electromechanics*. 2016. No 3. Pp. 21–24. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.3.03>.

6. Zigirkas G., Kalomiros J. Voltage control of single-phase induction motors using asymmetrical PWM and fuzzy logic. 5th International Conference on *Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*. Thessaloniki, Greece, May 12–14, 2016. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MOCASST.2016.7495119>.

7. Eltamaly A.M., Alolah A.I., Hamouda R., Abdulghany M.Y. A novel digital implementation of AC voltage controller for speed control of induction motor. *International Journal of Power and Energy Conversion*. 2010. Vol. 2. No 1. Pp. 78–94.

8. Toroptsev N.D. Three-phase induction motor with single-phase power supply through the capacitor. Moskva: Energoatomizdat, 1988. 95 p. (Rus)

9. 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. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 50–53. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.050>.

10. Shurub Yu.V. Analytical method for determining optimal parameters and schemes for voltage-regulated induction motors with single-phase power supply. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2021. Vyp. 59. Pp. 56–63. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.056>

Надійшла 03.05.2022
Остаточний варіант 02.06.2022