

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИМ ПРИВОДОМ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ З ЦИКЛІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Л.І. Мазуренко<sup>\*</sup>, докт. техн. наук, О.В. Бібік<sup>\*\*</sup>, докт. техн. наук, М.О. Шихненко<sup>\*\*\*</sup>, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.  
E-mail: [bibik@ied.ua](mailto:bibik@ied.ua)

*Розглянуто електромеханічну систему водопостачання багатопверхового будинку на основі вентиляльно-індукторного двигуна. Наведено імітаційну модель гідравлічної мережі та критерії оцінки ефективності квазісталих режимів насосного обладнання. Проведено дослідження експлуатаційних та енергетичних характеристик відцентрового насоса під час регулювання його частоти обертання задля визначення частот, за яких забезпечується відповідність напору та подачі насоса вимогам гідромережі. Розроблено імітаційні моделі систем керування, що забезпечують частоту обертання вентиляльно-індукторних двигунів на рівнях, які відповідають заданим витратам гідросистеми насосного обладнання, шляхом широтно-імпульсного регулювання фазної напруги або регулювання рівня обмеження фазного струму. Проведено комплексні дослідження і порівняльний аналіз способів керування вентиляльно-індукторним приводом відцентрового насоса за критеріями оцінки енергоефективності роботи під час регулювання частоти обертання та зміні кутів комутації. Виявлено, що обидва способи керування приводом насосної установки забезпечують необхідну її продуктивність та є близькими по ефективності – децю вищого значення коефіцієнта корисної дії можна досягти, використовуючи широтно-імпульсне регулювання фазної напруги вентиляльно-індукторного двигуна зі зміною кутів комутації. Бібл. 10, рис. 8.*

**Ключові слова:** вентиляльно-індукторний привод, регулювання частоти обертання, насосна установка, енергоефективність.

**Вступ.** Сучасна тенденція розвитку електроприводу полягає у широкому використанні керованих синхронних і асинхронних двигунів. При цьому зростає частка безколекторних двигунів з постійними магнітами та вентиляльно-індукторних двигунів (міжнародна назва – “*switched reluctance motor*”). Використання вентиляльно-індукторних двигунів (ВІД) дає змогу покращити енергетичні характеристики електроприводу, розширити діапазон регулювання продуктивності насосних і компресорних агрегатів та збільшити енергоефективність електромеханічних систем (ЕМС) у цілому [1-4]. При цьому ВІД технологічні, надійні, мають високі пускові та регульовальні властивості [5].

Дослідження способів керування вентиляльно-індукторним електроприводом дає змогу встановити найбільш ефективний спосіб керування задля забезпечення необхідних показників електромеханічного перетворення енергії [6]. Питання ефективного керування ВІД шляхом зміни кутів комутації з врахуванням зміни моменту опору одно- і двопоршневих компресорів розглянуто в [3]. Цей спосіб керування вентиляльно-індукторним двигуном у складі насосного агрегату гідравлічної системи з циклічним навантаженням досліджено в [2]. Однак важливою задачею системи керування двигунів насосних агрегатів є забезпечення необхідної продуктивності та енергоефективної роботи насосів шляхом регулювання частоти їхнього обертання на рівні, який визначається відповідно витратам гідромережі [7].

Це питання не було розглянуто в попередніх роботах [2, 3]. Задля забезпечення необхідної частоти обертання ВІД можуть бути використані широтно-імпульсне регулювання (ШІР) фазної напруги [5, 8, 9, 10] або регулювання рівня обмеження фазного струму [6]. При цьому для дослідження режимів роботи ВІД у складі ЕМС насосного обладнання доцільно використати імітаційну модель, яка реалізує вказані способи регулювання.

**Метою роботи** є порівняльний аналіз способів керування вентиляльно-індукторним приводом насосного обладнання, які забезпечують задану частоту обертання двигуна за рахунок широтно-імпульсного регулювання фазної напруги або регулювання рівня обмеження фазного струму, за критеріями енергоефективності як приводу та і електромеханічної системи в цілому з врахуванням циклічного навантаження.

---

© Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Шихненко М.О., 2022  
ORCID ID: <sup>\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7059-249X>; <sup>\*\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6236-6732>;  
<sup>\*\*\*</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4012-1731>

**Імітаційна модель.** В роботі розглянуто електромеханічну систему водопостачання багатоповерхового будинку, яка складається з насоса, вентиляно-індукторного двигуна, його

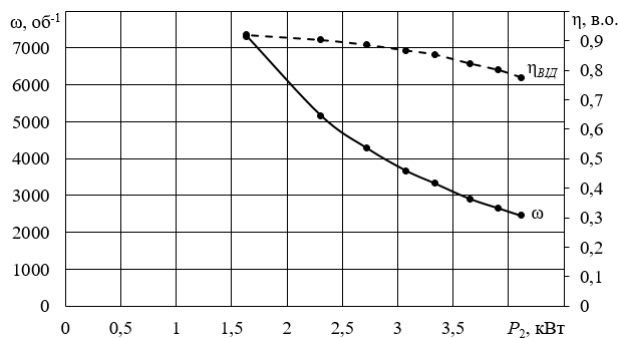


Рис. 1

якого виконано за схемою асиметричного моста з наступними номінальними даними: корисна потужність двигуна  $P_2=3$  кВт, напруга живлення  $U_d=310$  В, частота обертання 3800 об/хв, ККД 87,2 %. Розраховані механічна характеристика та залежність ККД вентиляно-індукторного двигуна від корисної потужності показані на рис. 1.

Циклічне навантаження насоса представлено добовим графіком водоспоживання [2] у вигляді узгоджених масивів витрат води  $[Q] = [2; 4; 6; 8; 10; 12; 16; 20]$  м<sup>3</sup>/год та відповідних інтервалів часу  $[T] = [4; 2; 3; 2; 2; 3; 3; 5]$  год. Математична модель гідравлічної мережі дає змогу за заданими витратами розрахувати мінімальний достатній напір насосу  $H_{opt}$ , який дорівнює мінімальному  $H_{min}$ , та визначається

$$H_{min} = R_{z1} \cdot Q^2 + \sum_{i=2}^N [H_{sti} + R_i (Q \cdot K_i)^2] + R_{zN} \left( \frac{Q}{N} \right)^2, \quad (1)$$

де  $i$  – номер поверху ( $i=1 \dots N$ );  $N$  – кількість поверхів;  $R_{z1}$  – опір трубопроводу горизонтальної ділянки (1 поверх);  $R_{zN}$  – опір трубопроводу останнього поверху;  $R_i$  – опір трубопроводу  $i$ -го поверху;  $H_{st1}=3,51$  м,  $H_{st2}=21,06$  м – статичні напори  $i$ -го поверху та результуючий;  $K_i$  – коефіцієнти, які розраховано за формулою  $K_i = (N - i + 1) \cdot N^{-1}$ .

Блок гідравліки розраховує водоспоживання, величина якого залежить від напору насоса та опорів трубопровода, за наступним виразом:

$$Q = \sqrt{\frac{H_{min} - \sum_{i=2}^N H_{sti}}{R_{z1} + \frac{R_{zN}}{N^2} + \sum_{i=2}^N [R_i \cdot K_i^2]}}. \quad (2)$$

**Методологія досліджень.** Дослідження режимів системи ВІД – відцентровий насос – циклічне навантаження проводилося згідно підходу, який викладено в [1, 2]. В основу покладено аналіз ефективності усталених режимів ЕМС з циклічним навантаженням із забезпеченням діапазону зміни продуктивності насоса згідно добового графіку водопостачання багатоповерхового будинку. За критеріїв оцінки ефективності квазісталих режимів насосного обладнання обрано: коефіцієнти корисної дії насоса  $\eta_p$ , вентиляно-індукторного двигуна  $\eta_{VID}$  та насосного агрегата  $\eta_{agr}$ .

**Результати досліджень.** Проведено дослідження експлуатаційних та енергетичних характеристик відцентрового насоса через регулювання його частоти обертання. Характеристики насоса  $H=f(Q)|_{n=const}$  і гідромережі  $H_{ec}=f(Q_{ec})$ , а також залежності ККД насоса від подачі  $\eta=f(Q)|_{n=const}$  для сталих частот обертання ВІД наведено на рис. 2 та 3 відповідно.

Як видно із рис. 2, за незмінної частоти обертання типову характеристику насоса можна розбити на дві ділянки: лінійного зростання та лінійного спадання напору. На першій ділянці (відповідає діапазону подач від 0 до 15...25 м<sup>3</sup>/год в залежності від частоти обертання) напір насоса практично незмінний (зростає від 1 в.о. за нульової подачі до 1,034 в.о. незалежно від частоти обертання). На другій ділянці спостерігається різке зниження напору насоса, яке є тим більшим, чим нижчою є частота обертання насоса.

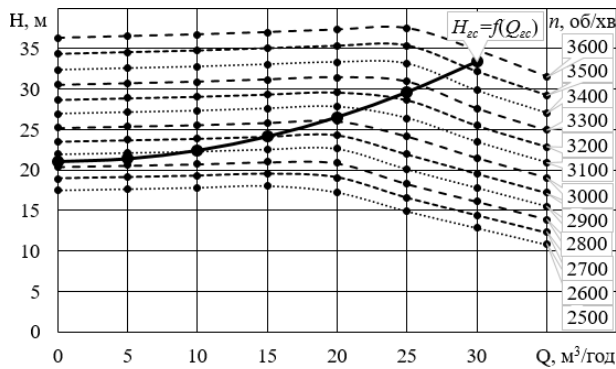


Рис. 2

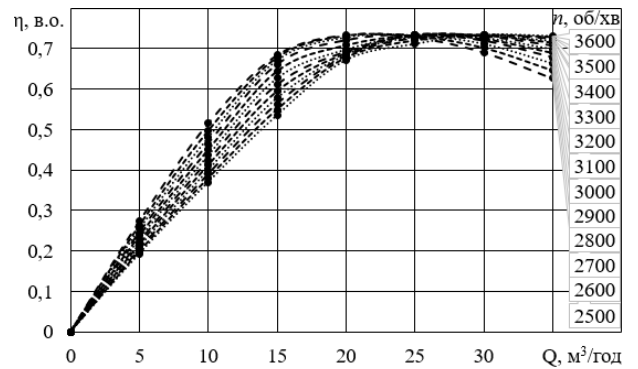


Рис. 3

З рис. 3 видно, що коефіцієнт корисної дії насоса зростає зі збільшенням подачі в діапазоні від 0 до 25 м<sup>3</sup>/год і досягає найбільших значень за подачах, близьких до номінальної величини  $Q=20\dots30$  м<sup>3</sup>/год. У разі збільшення подачі від 25 до 35 м<sup>3</sup>/год ККД дещо знижується. З енергетичних характеристик насоса очевидно, що роботу насоса можна реалізувати за критерієм максимального ККД, однак, в такому випадку його напір або не відповідатиме вимогам гідромережі, або насос вироблятиме більшу корисну потужність і, відповідно, споживатиме більше електроенергії за незмінних витрат гідромережі. Таким чином, більш доцільним критерієм енергоефективної роботи насоса є мінімум потужності, що затрачена на його роботу, за заданої витрати гідромережі.

Мінімуму гідравлічної потужності насоса за заданих витрат можна досягти у разі регулювання частоти обертання ротора його двигуна таким чином, щоб характеристика насоса співпадала з характеристикою гідросистеми. Значення необхідних частот обертання, за яких забезпечується мінімальний достатній напір насосу, можна знайти з рис. 2 в точках перетину характеристик насоса  $H=f(Q)|_{n=const}$  і гідросистеми  $H_{sc}=f(Q_{sc})$ . Таким чином величина заданої частоти обертання ВІД визначатиметься поліноміальною залежністю  $n^*=f(Q)$ , розрахованою відповідно характеристикам насоса та гідросистеми.

Зміна частоти обертання ротора ВІД може здійснюватися за рахунок впливу на величину фазної напруги. Одним із способів такого регулювання є ШІР фазної напруги. Іншим способом є комутація фази у разі перевищення її струмом заданого значення, що призводить також до зменшення середнього значення фазної напруги.

Розроблено системи керування вентильно-індукторним приводом насосного обладнання для забезпечення заданої частоти обертання за двома способами: шляхом ШІР фазної напруги; регулюванням рівня обмеження фазного струму. Імітаційні моделі цих систем за першим та другим способами керування наведено на рис. 4, а та 4, б відповідно.

Величина відхилення вимірюваної частоти обертання від розрахованої із залежності  $n^*=f(Q)$  визначає величину керуючої змінної: коефіцієнту заповнення імпульсів прямо прикладеної фазної напруги (спосіб 1) або рівня обмеження фазного струму (спосіб 2).

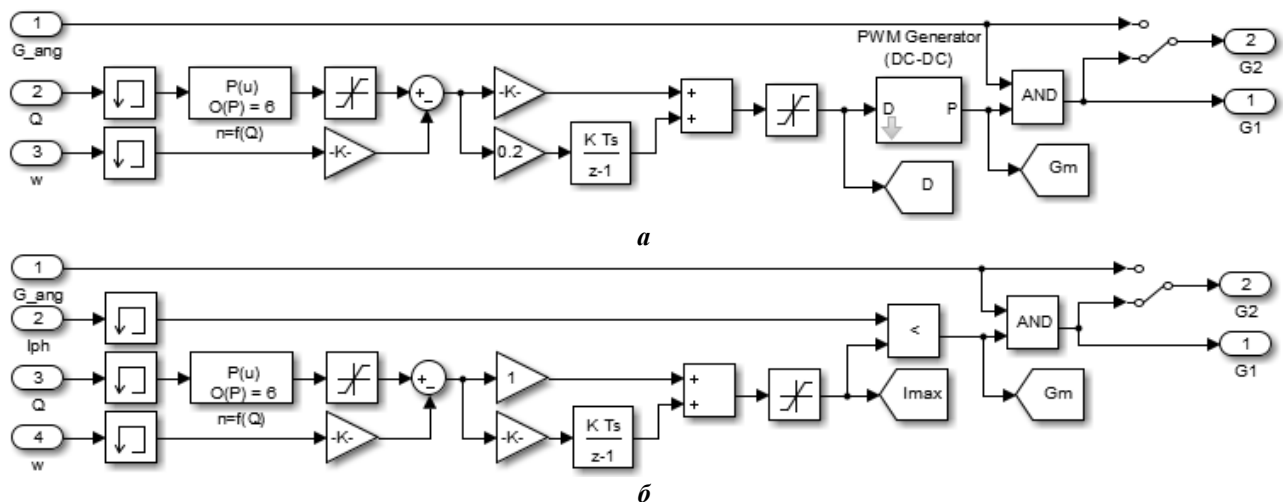


Рис. 4

Проведено дослідження впливу зсуву кута вмикання  $\theta_{вм}$  від  $39^\circ$  до  $54^\circ$  із збереженням зони комутації  $\theta_{к} = \theta_{вим} - \theta_{вм} = const$  ( $\theta_{вим}$  – кут вимикання) на ККД ВІД за двома способами забезпечення заданої частоти обертання: за широтно-імпульсного регулювання фазної напруги (рис. 5) та зміною рівня обмеження фазного струму (рис. 6). Залежності ККД наведено під час роботи на насосне навантаження за зміни витрат насоса у діапазоні від 0 до  $30 \text{ м}^3/\text{год}$  за сталих кутів вмикання  $\theta_{вм} = const$  і  $\theta_{к} = 30^\circ$ . Під час роботи ВІД із сталими кутами  $\theta_{вм} = 45^\circ$  і  $\theta_{вим} = 75^\circ$  ККД вентильно-індукторної машини (спосіб 1) знаходиться в межах  $84 \dots 85,5 \%$ . За другим способом керування (рис. 6) ККД є практично незмінним, зростаючи лише в діапазоні  $Q = 25 \dots 30 \text{ м}^3/\text{год}$ . Для кутів  $\theta_{вм} = 45^\circ$ ,  $\theta_{вим} = 75^\circ$  ККД за невеликих подачах дещо більший (близько 1%), ніж за першого способу керування.

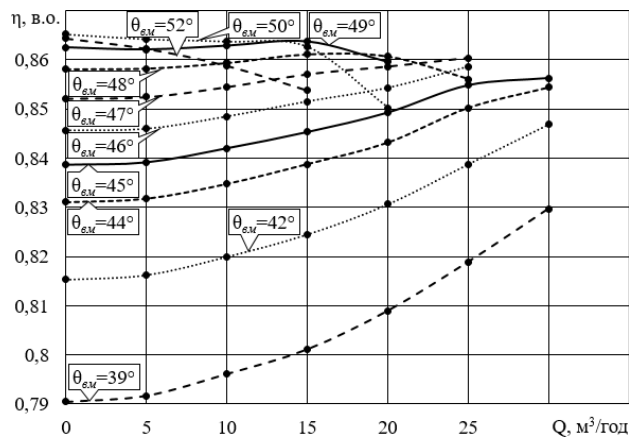


Рис. 5

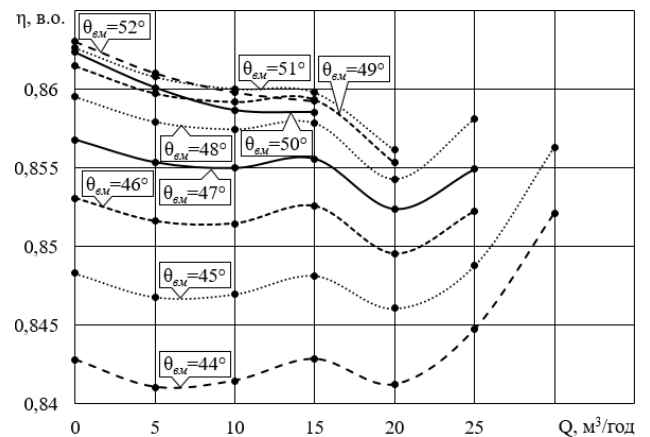


Рис. 6

Розроблено алгоритми зміни кута вмикання за сталої зони комутації для двох способів керування. Для ШПР алгоритм представлено виразами (3) і (4). Роботу ВІД під час регулювання частоти обертання за двома способами керування за зміни кутів відповідно запропонованим алгоритмам проілюстровано залежностями його ККД від витрати насоса на рис. 7

$$\theta_{вм} = \begin{cases} \text{якщо } Q \leq 13, \theta_{вм} = 50^\circ; \\ \text{якщо } 13 > Q \leq 18, \theta_{вм} = 49^\circ; \\ \text{якщо } 18 > Q \leq 23, \theta_{вм} = 48^\circ; \\ \text{якщо } 23 > Q \leq 25, \theta_{вм} = 47^\circ; \\ \text{якщо } 25 > Q \leq 29, \theta_{вм} = 45^\circ; \\ \text{якщо } Q > 29, \theta_{вм} = 44,85^\circ. \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta_{вим} = \theta_{вм} + 30^\circ. \quad (4)$$

Аналізуючи залежності, наведені на рис. 7, можна стверджувати, що обидва способи

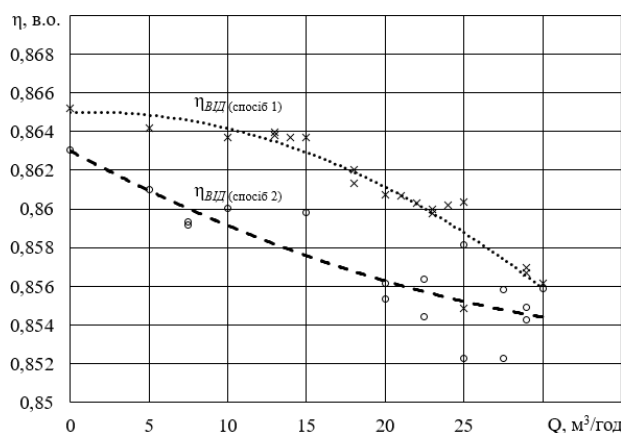


Рис. 7

регулювання частоти обертання в поєднанні зі зміною кутів комутації відповідно запропонованим алгоритмам практично ідентичні за ефективністю. Запропоновані алгоритми керування ВІД дають змогу забезпечити його ККД на рівні  $85 \dots 86 \%$ .

Результати досліджень ККД вентильно-індукторного двигуна, насоса та електромеханічної системи водопостачання багатоповерхового будинку за зміни частоти обертання ротора ВІД за рахунок ШПР фазної напруги і зміни кутів, наведені на рис. 8, свідчать, що запропонований спосіб керування забезпечує ефективну роботу системи водопостачання багатоповерхового будинку. Коефіцієнт корисної дії ВІД знаходиться не нижче  $86\%$ , ККД насоса та системи у цілому змінюються

від 0 до  $73\%$  та від 0 до  $63\%$ , відповідно, в діапазоні зміни продуктивності.

Розроблені системи та алгоритми керування вентиляльно-індукторних двигунів дають змогу підвищити енергоефективність насосних агрегатів систем водопостачання багатоповерхових будинків за циклічної зміни навантаження. Отримані результати є універсальними для систем водо-постачання багатоповерхових будинків, оскільки експлуатаційні характеристики їхніх гідромереж є подібними. Значення коефіцієнтів корисної дії складових електромеханічних систем різної потужності будуть відрізнятися, однак характер їхньої зміни буде співпадати.

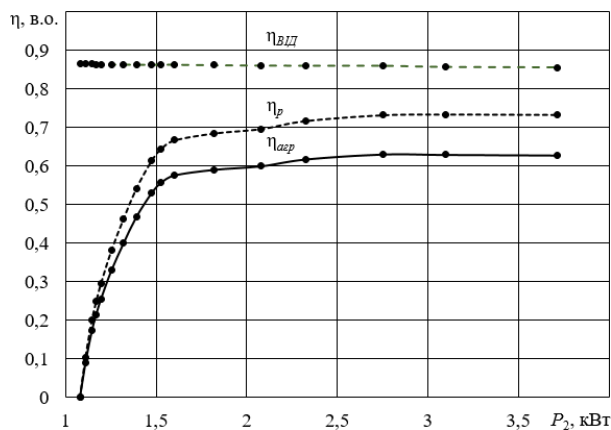


Рис. 8

кутів комутації на характер зміни коефіцієнта корисної дії ВІД у разі зміни навантаження. Визначено, що за незмінних базових кутів комутації перший спосіб керування є більш ефективним за витрат  $Q = 0 \dots 0,875 Q_{ном}$ , а другий – за  $Q = 0,875 \dots 1,5 Q_{ном}$ . Під час застосування розроблених алгоритмів зміни кутів комутації обидва способи керування забезпечують максимальні значення ККД вентиляльно-індукторного двигуна в складі ЕМС та є практично ідентичними за ефективністю.

**Висновки.** Проведено дослідження енергетичних характеристик вентиляльно-індукторних двигунів з циклічним навантаженням насосних агрегатів під час забезпечення заданої частоти обертання шляхом ШІР фазної напруги або регулюванням рівня обмеження фазного струму, що дало змогу встановити вплив способів керування та

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розроблення вдосконалених електромеханічних і електромагнітних систем електричних станцій та методів їх діагностування» (шифр «Агрегат-3»), Державний реєстраційний номер 0122U000840. КПКВК 6541030.

1. Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 38-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038>
2. Бібік О.В. Вентиляльно-індукторний привод насосної установки багатоповерхового будинку. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 45. С. 59-62.
3. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Formation of Characteristics of Operating Modes of Switched Reluctance Motors with Periodic Load. *Electrical engineering & electromechanics*. 2019. No 4. Pp. 12-16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.02>
4. Liang J., Lee D.-H., Ahn J.-W., Young-Joo An. A Novel Direct Instantaneous Pressure Control of Hydraulic Pump System with SRM Drive. 7th International Conference on Power Electronics. Daegu, Korea, October 22-26, 2007. Pp. 650-654. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPE.2007.4692468>
5. Dhumal K.R., Dhamse S.S. Solar PV Array Based Water Pumping by Using Srm Drive: A Review. International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC). Chennai, India, March 28-29, 2018. Pp. 140-146. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2018.8525158>
6. Guangxu Z., Yun Z., Sensen S., Jinwoo A. Advanced Hysteresis Current Controller of Switched Reluctance Motor for Hydraulic Pump System. International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China, August 20-23, 2011. Pp. 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2011.6073871>
7. Kim B.C., Lee D.H. Ahm J.W. Performance of SR drive for hydraulic pump. International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing, China, September 27-29, 2005. Vol. 1. Pp. 659-663. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2005.202613>
8. Lee D., Seok S., Ahn J. SR Drive for Hydraulic Pump Using a Novel Passive Boost Converter. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, CA, USA, September 20-24, 2009. Pp. 282-287. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5315988>
9. Tham P.H., Seiya I., Yasukazu S. Development of Hydraulic Pump Drive System Using Switched Reluctance Motor with Servo Function. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2020. Vol. 32. No 5. Pp. 984-993. DOI: <https://doi.org/10.20965/jrm.2020.p0984>
10. Koreboina V.B., Narasimharaju B.L., Vinod Kumar D.M. Performance Evaluation of Switched Reluctance Motor PWM Control in PV-fed Water Pump System. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016. Vol. 6. No 3. Pp. 941-950. DOI: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v6i3.4004.g6876>

## THE STUDY OF CONTROL PRINCIPLES OF THE SWITCHED RELUCTANCE PUMPING EQUIPMENT DRIVE WITH CYCLIC LOAD

L.I. Mazurenko, O.V. Bibik, M.O. Shykhnenko  
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.  
E-mail: [bibik@ied.ua](mailto:bibik@ied.ua)

*The electromechanical water supply system of a multi-storey building based on a switched reluctance motor is considered. A simulation model of the hydraulic network and criteria for evaluating the quasi-steady modes effectiveness of pumping equipment are given. A study of a centrifugal pump operational and energy characteristics has been carried out when adjusting its rotational speed to determine the frequencies at which the compliance of the pump pressure and flow with the hydraulic network requirements is ensured. Simulation models of control systems have been developed that provide the switched reluctance motor speeds at levels corresponding to specified flow rates of the hydraulic system pumping equipment, by means the phase voltage pulse-width regulation or the phase current limitation level adjustment. Comprehensive studies and comparative analysis of the switched reluctance centrifugal pump drive control principles were carried out according to the criteria for evaluating energy efficiency when regulating the rotational speed and changing the switching angles. As a result of this study, it was found that both pumping unit drive control principles provide its necessary productivity and are close in efficiency - a slightly higher efficiency can be achieved using the phase voltage pulse-width regulation of the switched reluctance motor with a changing the switching angles. References 10, figures 8.*

**Keywords:** switched reluctance drive, rotational speed control, pumping unit, energy efficiency.

1. Bibik O.V., Popovych O.M., Shevchuk S.P. Power Effective Modes Electromechanical System of Pump Installation of the Multistorey Building. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 38-45. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/teched2016.05.038>
2. Bibik O.V. Switched-Reluctance Drive of Pump Installation of the Multi-Storey Building. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. Vyp. 45. Pp. 59-62. (Ukr)
3. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Formation of Characteristics of Operating Modes of Switched Reluctance Motors with Periodic Load. *Electrical engineering & electromechanics*. 2019. No 4. Pp. 12-16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.02>
4. Liang J., Lee D.-H., Ahn J.-W., Young-Joo An. A Novel Direct Instantaneous Pressure Control of Hydraulic Pump System with SRM Drive. 7th International Conference on *Power Electronics*. Daegu, Korea, October 22-26, 2007. Pp. 650-654. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPE.2007.4692468>
5. Dhumal K.R., Dhamse S.S. Solar PV Array Based Water Pumping by Using Srm Drive: A Review. International Conference on *Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*. Chennai, India, March 28-29, 2018. Pp. 140-146. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2018.8525158>
6. Guangxu Z., Yun Z., Sensen S., Jinwoo A. Advanced Hysteresis Current Controller of Switched Reluctance Motor for Hydraulic Pump System. International Conference on *Electrical Machines and Systems*. Beijing, China, August 20-23, 2011. Pp. 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2011.6073871>
7. Kim B.C., Lee D.H. Ahm J.W. Performance of SR drive for hydraulic pump. International Conference on *Electrical Machines and Systems*. Nanjing, China, September 27-29, 2005. Vol. 1. Pp. 659-663. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2005.202613>
8. Lee D., Seok S., Ahn J. SR Drive for Hydraulic Pump Using a Novel Passive Boost Converter. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. San Jose, CA, USA, September 20-24, 2009. Pp. 282-287. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5315988>
9. Tham P.H., Seiya I., Yasukazu S. Development of Hydraulic Pump Drive System Using Switched Reluctance Motor with Servo Function. *Journal of Robotics and Mechanotronics*. 2020. Vol. 32. No 5. Pp. 984-993. DOI: <https://doi.org/10.20965/jrm.2020.p0984>
10. Koreboina V.B., Narasimharaju B.L., Vinod Kumar D.M. Performance Evaluation of Switched Reluctance Motor PWM Control in PV-fed Water Pump System. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016. Vol. 6. No 3. Pp. 941-950. DOI: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v6i3.4004.g6876>

Надійшла 29.05.2022  
Остаточний варіант 29.07.2022