

О.В. Бібік, Л.І. Мазуренко, М.О. Шихненко

ФОРМУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ З ПЕРІОДИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Мета. Метою статті є формування залежностей ККД від корисної потужності за зміни напруги живлення і кутів комутації, пульсацій частоти обертання ротора від моменту інерції приводу та механічних характеристик вентиляльно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням, розроблення рекомендацій щодо забезпечення їх ефективних і надійних робочих режимів у складі одноциліндрових поршневих компресорів. **Методика.** Для проведення досліджень використано імітаційне математичне моделювання, для розрахунку нелінійної залежності індуктивності від струму і кута повороту ротора – метод скінченних елементів. **Результати.** Запропоновано заходи по підвищенню ефективності і надійності приводів одноциліндрових поршневих компресорів та основі ВІД. **Наукова новизна.** Розроблено підходи, що забезпечують максимальні значення ККД і регламентований рівень пульсацій частоти обертання роторів ВІД одноциліндрових поршневих компресорів у робочому діапазоні регулювання частоти обертання з врахуванням періодичного навантаження. **Практичне значення.** Розроблено алгоритм зміни напруги живлення і кутів комутації ВІД одноциліндрових компресорів одинарної дії, що забезпечують максимальні значення ККД при регулюванні частоти обертання в межах діапазону 1:6. Визначено мінімальні значення моментів інерції приводу одноциліндрових компресорів з ВІД потужністю 100 Вт, що забезпечують регламентований рівень пульсацій частоти обертання ротора ВІД при її регулюванні. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: вентиляльно-індукторний двигун, періодичне навантаження, характеристики, коефіцієнт корисної дії, пульсації частоти обертання.

Цель. Целью статьи является формирование зависимостей КПД от полезной мощности при изменении напряжения питания и углов коммутации, пульсаций частоты вращения ротора от момента инерции привода и механических характеристик вентиляльно-индукторных двигателей с периодической нагрузкой, разработка рекомендаций по обеспечению их эффективных и надежных рабочих режимов в составе одноцилиндровых поршневых компрессоров. **Методика.** Для проведения исследований использовано имитационное математическое моделирование, для расчета нелинейной зависимости индуктивности от тока и угла поворота ротора – метод конечных элементов. **Результаты.** Предложены меры по повышению эффективности и надежности приводов одноцилиндровых поршневых компрессоров и основе ВИД. **Научная новизна.** Разработаны подходы, которые обеспечивают максимальные значения КПД и регламентированный уровень пульсаций частоты вращения роторов ВИД одноцилиндровых поршневых компрессоров в рабочем диапазоне регулирования частоты вращения с учетом периодической нагрузки. **Практическое значение.** Разработан алгоритм изменения напряжения питания и углов коммутации ВИД одноцилиндровых компрессоров, который обеспечивает максимальные значения КПД при регулировании частоты вращения в пределах диапазона 1:6. Определены минимальные значения моментов инерции привода одноцилиндровых компрессоров с ВИД мощностью 100 Вт, обеспечивающие регламентированный уровень пульсаций частоты вращения ротора ВИД при ее регулировании. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: вентиляльно-индукторный двигатель, периодическая нагрузка, характеристики, коэффициент полезного действия, пульсации частоты вращения.

Постановка проблеми. Особливості експлуатації компресорних установок потребують використання регульованого електроприводу, який забезпечує енергоефективні робочі режими [1-4]. Перспективними є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором і перетворювачами частоти, які здійснюють плавне регулювання частоти обертання ротора. Альтернативу їм створюють керовані синхронні двигуни з електромагнітним збудженням або із збудженням від постійних магнітів, а також вентиляльно-індукторні двигуни з реактивним ротором [5]. Використання регульованих вентиляльно-індукторних двигунів завдяки їх високим енергетичним показникам, пусковим та регульовальним властивостям забезпечує вирішення проблеми підвищення ефективності і надійності електромеханічного обладнання, що працює в умовах змінного навантаження.

Для створення конкурентоспроможного вентиляльно-індукторного приводу герметичних поршневих компресорів (ГПК), зазвичай одноциліндрових компресорів потужністю до 500 Вт, зі значною переважувальною здатністю (до 3,0) необхідно забезпечити ефективні режими їх роботи із максимальними

значеннями ККД в діапазоні регулювання частоти обертання компресорів 1:6 з допустимим рівнем пульсацій частоти обертання ротора та зменшити масо-габаритні показники і затрати на основні вузли машини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Енергетичні показники електроприводів з періодичним навантаженням оцінюють за допомогою циклового ККД, який визначається за період одного циклу зміни навантаження. Довготривалий період роботи асинхронного електроприводу з періодичним навантаженням зі значними величинами максимального і пускового моментів, в режимі недовантаження призводить до зниження енергоефективності і неоптимального використання енергоресурсів [6].

Рівень пульсацій частоти обертання ротора двигунів, традиційно асинхронних, герметичних поршневих компресорів жорстко регламентований стандартами і не може перебільшувати 20 %. Для зниження амплітуди цих пульсацій на ротор двигуна встановлюють додаткову інерційну масу – маховик [7]. Важливим кроком до підвищення надійності приводу ГПК

є зниження пульсацій частоти обертання ротора до заданого рівня при її регулюванні в необхідному діапазоні. Аналіз досліджень вентильно-індукторного приводу [8] свідчить, що у сталих режимах його ККД знижується на 4 % при зменшенні навантаження у два рази, що підтверджено результатами [9]. В цій роботі [9] наведено характеристики ВІД з комутатором із С-скиданням і коливальним поверненням енергії за зміни напруги живлення і кутів комутації при сталому навантаженні. Комутатор і його схема керування достатньо прості, що важливо для масового виробництва компресорів, насосів тощо.

Дослідження в даному напрямку потребують продовження з метою оцінки ККД і пульсацій частоти обертання ротора ВІД за зміни кутів комутації, напруги та моменту інерції привода з врахуванням періодичного навантаження. Це дозволить розробити заходи щодо регулювання частоти обертання ротора ВІД у складі компресорного обладнання та знизити затрати при розробці двигуна.

Метою роботи є формування залежностей ККД від корисної потужності за зміни напруги живлення і кутів комутації, пульсацій частоти обертання ротора від моменту інерції привода та механічних характеристик вентильно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням, розроблення рекомендацій щодо забезпечення їх ефективних і надійних робочих режимів у складі одноциліндрових поршневих компресорів.

Математична модель вентильно-індукторного привода. Об'єктом дослідження є ВІД, який розроблено на базі асинхронного двигуна 4АА56А4УЗ (номінальні потужність 120 Вт і частота обертання 3000 об/хв) з числом полюсів 6/4 і фаз $m=3$ з комутатором із С-скиданням і коливальним поверненням енергії [9]. Для дослідження режимів роботи використана математична модель [9], адекватність якої підтверджена порівнянням результатів чисельних та експериментальних досліджень. Її рівняння описують структурні елементи двигуна і враховують їх взаємний вплив.

Для фази вентильно-індукторної машини праворічне рівняння

$$\frac{d\psi_{ph}}{dt} = u_{ph} - i_{ph} \cdot R_{ph},$$

де u_{ph} , R_{ph} , i_{ph} , ψ_{ph} – напруга на виході комутатора; опір, струм і потокозчеплення фази статора відповідно.

Фазний струм визначається як

$$\frac{di_{ph}}{dt} = \frac{1}{L_{ph}} \left(\frac{d\psi_{ph}}{dt} - i_{ph} \omega \frac{\partial L_{ph}}{\partial \theta_{ph}} \right),$$

де L_{ph} – індуктивність фази статора, яка розрахована методом скінчених елементів [9] і представлена у вигляді функції струму та кута повороту ротора відносно фази статора $L_{ph} = f(\theta_{ph}, i_{ph})$; $\frac{\partial L_{ph}}{\partial \theta_{ph}}$ – часткова

похідна табличної функції L_{ph} за кутом θ_{ph} ; ω – кутова частота обертання ротора; θ_{ph} – кут повороту ротора відносно фази статора.

Електромагнітний момент утворений однією фазою ВІД

$$M_{ph} = \frac{1}{2} i_{ph}^2 \frac{\partial L_{ph}}{\partial \theta_{ph}},$$

а сумарний момент M вентильно-індукторного двигуна від дії m фаз

$$M = \sum_{k=1}^m M_{ph(k)}.$$

Диференціальне рівняння руху

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c),$$

де J – момент інерції компресора; M_c – момент навантаження.

Кут повороту ротора отримуємо з рівняння

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega.$$

Цей кут відносно фази статора

$$\theta_{ph} = \text{mod}(\theta; \frac{2\pi}{Z_R}),$$

де Z_R – число зубців ротора

Математичне моделювання ВІД виконано у середовищі MATLAB – Simulink з використанням бібліотеки SymPowerSystems. В якості вхідних параметрів математичної моделі використано кути вмикання θ_{on} і вимикання θ_{off} , напругу ланки постійного струму U_d та залежності індуктивності фази від кута повороту ротора і фазного струму.

Математична модель враховує залежність моменту навантаження одноциліндрового ГПК одинарної дії від кута повороту ротора двигуна $M_c = f(\theta)$, який прикладений у діапазоні $7\pi/9$ на періоді 2π , часова залежність якого представлена на рис. 1. Для порівняння розрахунків робочих режимів зі сталим і періодичним навантаженням використовується середнє значення $M_{c(mean)}$ останнього за період навантаження. Для рис. 1 – 0,33 Н·м.

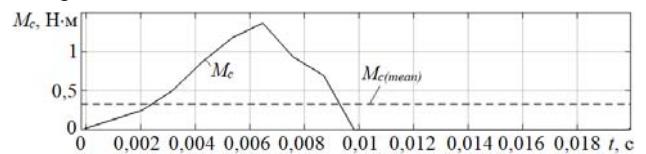


Рис. 1. Часова залежність моменту навантаження одноциліндрового компресора

Чисельний експеримент. За допомогою математичної моделі ВІД розраховано його коефіцієнти корисної дії з врахуванням втрат в міді, магнітних та механічних втрат в робочих режимах з періодичним навантаженням. Розрахунок магнітних втрат, що складаються з втрат на гістерезис та на вихрові струми, виконано на основі підходу [10]. Механічні втрати визначено з урахуванням зміни частоти обертання ротора і моменту від тертя в підшипниках [9]. Використано спосіб керування ВІД, що базується на зміні кута вмикання ($\theta_{on} = \text{var}$) у межах $\theta_{on} = 36^\circ \dots 51^\circ$ за сталого тактового кута ($\theta_k = 30^\circ$) і симетричній комутації.

Залежності ККД від корисної потужності P_2 за зміни напруги живлення та кутів комутації при сталому

і періодичному навантаженні, коли $M_{c(mean)} = 0,33$ Н·м, показані на рис. 2. Кожна залежність отримана при сталих кутах вмикання і вимикання і зміні напруги. Потужності 103 Вт відповідає частота обертання 3000 об/хв, 52 Вт – 1500 об/хв. Отримані залежності ККД з періодичним навантаженням з моментом інерції $J = 0,5 \cdot 10^{-3}$ кг·м² практично не відрізняються від ККД двигуна зі сталим навантаженням при $J = 1 \cdot 10^{-4}$ кг·м² (сталий момент дорівнює середньому значенню періодичного навантаження).

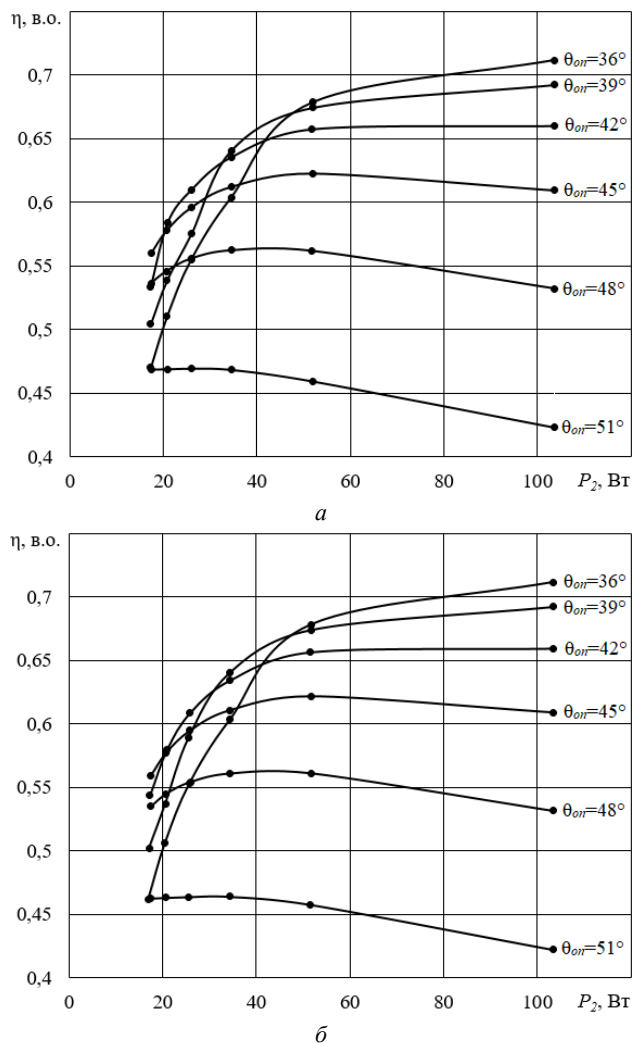


Рис. 2. Залежності ККД від корисної потужності за зміни напруги живлення для різних кутів комутації при сталому $M_c = \text{const}$ (а) і періодичному $M_c = f(\theta)$ (б) навантаженні для моментів інерції $J = 1 \cdot 10^{-4}$ кг·м² та $J = 1 \cdot 10^{-3}$ кг·м² відповідно.

Зсув зони комутації в сторону зниження кутів вмикання та вимикання призводить до підвищення ККД двигуна, однак зростання ефективності спостерігається не на всьому діапазоні навантажень. Це дозволяє сформулювати алгоритм зміни кутів комутації, який забезпечує максимальні значення ККД вентильно-індукторних двигунів одноциліндрових компресорів одинарної дії на всьому інтервалі регулювання частоти обертання ротора:

- в діапазоні 3000...1500 об/хв ВІД повинні працювати з кутами комутації $\theta_{on} = 36^\circ$, $\theta_{off} = 66^\circ$ і напругою $U_d = 133...77$ В;

- від 1500 до 1000 об/хв – за кутів $\theta_{on} = 39^\circ$, $\theta_{off} = 69^\circ$, $U_d = 185...137$ В;

- від 1000 до 500 об/хв – за $\theta_{on} = 42^\circ$, $\theta_{off} = 72^\circ$, $U_d = 149...88$ В.

Досліджено вплив моменту інерції приводу герметичного поршневого одноциліндрового компресора на пульсації частоти обертання ротора ВІД для діапазону регулювання частоти обертання 1:6 за постійних кутів комутації. Показано, що регламентований рівень пульсацій ($\delta n = 20\%$) при регулюванні частоти у діапазоні 1:3 (3000...1000 об/хв) можна забезпечити за моменту інерції приводу $5 \cdot 10^{-4}$ кг·м², у діапазоні 1:4 (3000...750 об/хв) – $1 \cdot 10^{-3}$ кг·м² (рис. 3). Збільшення моменту інерції призводить до зменшення пульсацій і розширення діапазону регулювання.

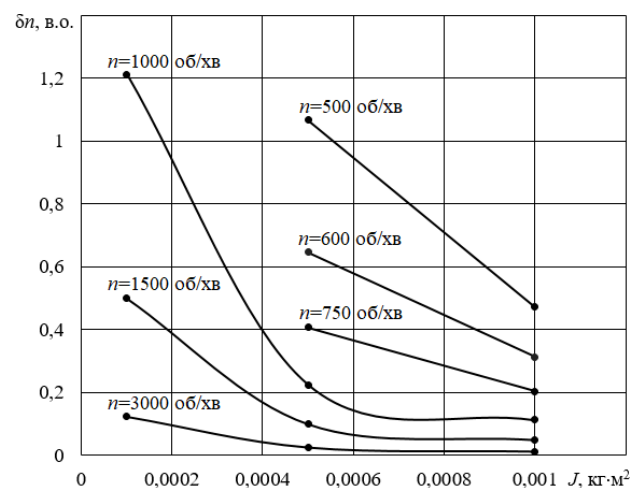


Рис. 3. Залежності пульсацій частоти обертання ротора ВІД від моменту інерції приводу одноциліндрового ГПК за сталих кутів $\theta_{on} = 42^\circ$, $\theta_{off} = 72^\circ$.

Розширення діапазону (до 1:6) за даної умови може бути реалізовано:

- для пульсуючого навантаження двоциліндрового компресора ($M_{c(mean)} = 0,33$ Н·м, момент інерції приводу $J = 1 \cdot 10^{-3}$ кг·м²), що забезпечує пульсації частоти у межах 0,3...12,8 %;
- для меншого у два рази навантаження за сталих кутів комутації за рахунок зміни напруги живлення.

На рис. 4 зображені механічні характеристики ВІД при постійних кутах комутації ($\theta_{on} = 42^\circ$, $\theta_{off} = 72^\circ$) за зміни напруги живлення у діапазоні 31...121 В, що дає можливість регулювати частоту обертання ротора у діапазоні 1:6 з періодичним навантаженням $M_{c(mean)} = 0,165$ Н·м.

Проведено дослідження впливу зменшення моменту навантаження у два рази на ККД двигуна за зміни кутів комутації (рис. 5). Показано, що при зниженні частоти обертання двигуна від 3000 до 500 об/хв. для кутів $\theta_{on} = 36^\circ$ і $\theta_{off} = 66^\circ$ та $M_{c(mean)} = 0,165$ Н·м його ККД зменшується на 1...5 % в порівнянні з $M_{c(mean)} = 0,33$ Н·м. З'ясовано, що при номінальній частоті обертання для $M_{c(mean)} = 0,165$ Н·м найбільший ККД забезпечують кути комутації $\theta_{on} = 36^\circ$, $\theta_{off} = 66^\circ$, при частотах обертання у діапазоні 750...500 об/хв – кути $\theta_{on} = 42^\circ$, $\theta_{off} = 72^\circ$, які дозволяють збільшити ККД на 2...5 % в порівнянні з кутами $\theta_{on} = 36^\circ$ і $\theta_{off} = 66^\circ$.

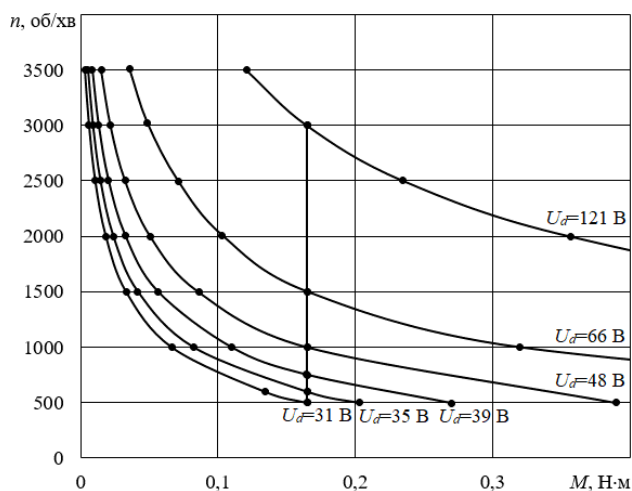


Рис. 4. Механічні характеристики ВІД за різних значень напруги живлення ($\theta_{on} = 42^\circ$, $\theta_{off} = 72^\circ$).

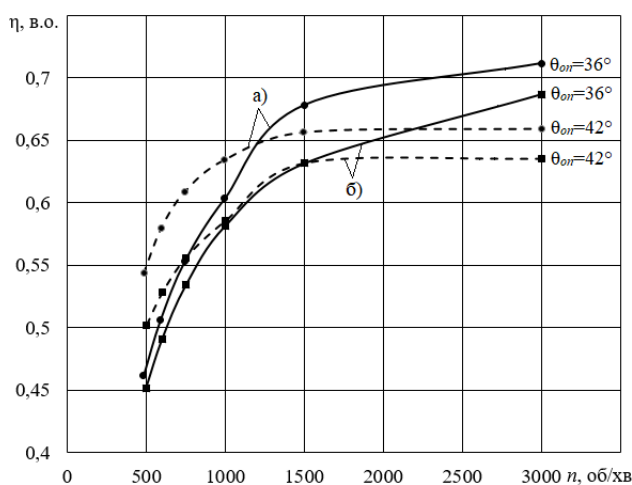


Рис. 5. Залежності ККД від частоти обертання ротора ВІД при регулюванні частоти обертання ротора зміною напруги живлення та сталих кутах:

а) $M_{c(mean)} = 0,33$ Н·м; б) $M_{c(mean)} = 0,165$ Н·м

Висновки.

1. З використанням математичної моделі досліджено робочі режими вентильно-індукторних двигунів з комутатором із С-скиданням і коливальним поверненням енергії одноциліндрових поршневих компресорів за зміни напруги живлення, кутів комутації та моменту інерції з врахуванням періодичного навантаження, що дозволило сформулювати характеристики двигунів, які забезпечують підвищення їх енергоефективності і надійності.

2. Запропоновано алгоритм зміни напруги живлення і кутів комутації ВІД, який забезпечує максимальні значення ККД за зміни частоти обертання в діапазоні 1:6.

3. Визначено значення моментів інерції ВІД герметичних поршневих компресорів, які забезпечують рекомендований рівень пульсацій частоти обертання ротора 20 % в діапазонах: 1:4 – для одноциліндрових компресорів, 1:6 – двоциліндрових.

4. Результати досліджень можуть бути використані при створенні ВІД, що працюють у складі компресорів і насосів у сферах комунального і промислового призначення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Живица В.И., Онищенко О.А., Радимов И.Н., Шевченко В.Б. Современный электропривод холодильных установок // Холодильная техника и технология. – 1999. – №64. – С. 112-116
2. Andersen H.R. Motor drives for variable speed compressors: Introduction and state of the art analysis: PhD Thesis. Aalborg University. – 1996. – vol.1. – 62 p.
3. Jakobsen A., Rasmussen B. Energy optimization of domestic refrigerators Major energy saving by use of variable speed compressors and evaporator fans // International Appliance Manufacturing. – 1998. – pp. 105-109.
4. Monasry J.F., Hirayama T., Aoki T., Shida S., Hatayama M., Okada M. Development of large capacity and high efficiency rotary compressor // 24th International Compressor Engineering Conference at Purdue, July 9-12, 2018. – paper 2576.
5. Бібік О.В. Аналіз і основні тенденції розвитку електромеханічних перетворювачів енергії для систем з періодичним навантаженням // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2016. – №43. – С. 37-43.
6. Бібік О.В. Обґрунтування підходів до проектування асинхронних двигунів зі змінним навантаженням // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2019. – №4(1329). – С. 94-98. doi: 10.20998/2409-9295.2019.4.14.
7. Морозюк Л.И., Морозюк Т.В., Ястребова Л.В. Проектирование поршневого компрессора холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: ОГАХ, 2003. – 75 с.
8. Andrada P., Blanque B., Perat J.I., Torrent M., Martinez E., Sanchez J.A. Comparative efficiency of switched reluctance and induction motor drives for slowly varying loads // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'06). – 2007.
9. Мазуренко Л.И., Бібік О.В., Білик О. А., Шихненко М. О. Моделирование режимов та регулювання частоти обертання вентильно-індукторного двигуна з перетворювачем із С-скиданням і коливальним поверненням енергії при зміні кутів комутації // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2016. – №11(1183). – С. 64-69.
10. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х. ч. Ч.1. – Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. – Л.: «Энергия», 1972. – 544 с.

REFERENCES

1. Zhivitsa V.I., Onischenko O.A., Radimov I.N., Shevchenko V.B. Modern electric drive of refrigeration units. *Refrigeration Engineering and Technology*, 1999, iss.64, pp. 112-116. (Rus).
2. Andersen H.R. *Motor drives for variable speed compressors: Introduction and state of the art analysis. PhD Thesis.* Aalborg University Publ., 1996, vol.1, 62 p.
3. Jakobsen A., Rasmussen B. Energy optimization of domestic refrigerators Major energy saving by use of variable speed compressors and evaporator fans. *International Appliance Manufacturing*, 1998, pp. 105-109.
4. Monasry J.F., Hirayama T., Aoki T., Shida S., Hatayama M., Okada M. Development of large capacity and high efficiency rotary compressor. *24th International Compressor Engineering Conference at Purdue*, July 9-12, 2018, paper 2576.
5. Bibik O.V. Analysis and main trends of electromechanical energy converters for systems with periodic load. *Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2016, no.43, pp. 37-43. (Ukr).
6. Bibik O.V. Rationale approaches to designing asynchronous motors with variable load. *Bulletin of the National Technical*

University «KhPI». Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion, 2019, no.4(1329), pp. 94-98. (Ukr). doi: 10.20998/2409-9295.2019.4.14.

7. Morozuk L.I., Morozuk T.V., Iastrebova L.V. *Proektirovanie porshnevogo kompressora holodilnykh mashin i teplovykh nasosov* [Designing a piston compressor for refrigerating machines and heat pumps]. Odessa, OGAH Publ., 2003. 75 p. (Rus).

8. Andrada P., Blanque B., Perat J.I., Torrent M., Martinez E., Sanchez J.A. Comparative efficiency of switched reluctance and induction motor drives for slowly varying loads. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'06)*, 2007.

9. Mazurenko L.I., Bibik O.V., Bilyk O.A., Shihnenko M.O. Simulation mode and speed control of switched reluctance motor using a converter with the C-dump and the oscillation return of energy at changing switching angles. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, 2016, no.11(1183), p. 64-69. (Ukr).

10. Kostenko M.P., Piotrovsky L.M. *Elektricheskie mashiny. V 2-h. ch. Ch.1. – Mashiny postoyannogo toka. Transformatory. Uchebnik dlya studentov vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Electric machines. In 2 parts. Part 1. – DC machines. Transformers. Textbook for students of higher technical educational institutions]. Leningrad, Energy Publ., 1972. 544 p. (Rus).

Надійшла (received) 11.06.2019

Бібік Олена Василівна¹, к.т.н., доц.,
Мазуренко Леонід Іванович¹, д.т.н., проф.,
Шихненко Максим Олегович¹, м.н.с.,

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
03057, Київ, пр. Перемоги, 56,
тел/phone +380 44 3662491,
e-mail: bibik@ied.org.ua; mlins@ied.org.ua

O.V. Bibik¹, L.I. Mazurenko¹, M.O. Shykhnenko¹

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

Formation of characteristics of operating modes of switched reluctance motors with periodic load.

Purpose. The purpose of the article is to create dependencies of efficiency on effective power when changing the supply voltage and switching angles, pulsation speeds of the rotor from the moment of inertia of the drive and mechanical characteristics of switched-reluctance motors with a periodic load, developing recommendations to ensure their effective and reliable operating modes in single-cylinder piston compressors. **Methodology.** To carry out research simulation mathematic modeling was used, to calculate the nonlinear inductance dependence on current and rotor angle, the finite element method. **Results.** The measures of improve the efficiency and reliability of drives single-cylinder piston compressors on the basis of the SRM has been proposed. **Originality.** Approaches that provide maximum efficiency values and a regulated level of ripple speeds of rotors SRM of single-cylinder reciprocating compressors in the operating frequency control range, with periodic load have been developed. **Practical value.** Algorithm for changing the supply voltage and switching angles of the SRM of single-cylinder compressors, which provides maximum efficiency values SRM when the rotational speed changes within the 1:6 range, has been developed. The minimum values of the moments of inertia of the drive of single-cylinder compressors, providing a regulated level of pulsations of the rotational speed of the rotor SRM with its regulation, were determined. References 10, figures 5.

Key words: switched reluctance motor, periodic load, characteristics, efficiency, rotation frequency ripples.