

УДК 621.313

**ДОСЛІДЖЕННЯ КВАЗИСТАТИЧНИХ РЕЖИМІВ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ
З ПЕРІОДИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ****О. В. Бібік, Л. І. Мазуренко, Л. О. Жуков**Інститут електродинаміки НАН України
просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03680, Україна. E-mail: mlins@ied.org.ua

Розроблено математичну модель вентильно-індукторного двигуна з урахуванням квазістатистики. Досліджено квазістатичні режими вентильно-індукторного двигуна з періодичним навантаженням однопоршневого компресора. Визначено пульсації електромагнітного моменту та ступінь нерівномірності обертання ротора. Наведено результати чисельного моделювання. Здійснено порівняльний аналіз результатів досліджень за допомогою лінійної та нелінійної математичних моделей.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун, квазістатичні режими, однопоршневий компресор, пульсації електромагнітного моменту й частоти обертання двигуна.

**ИССЛЕДОВАНИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ****Е. В. Бибик, Л. И. Мазуренко, Л. А. Жуков**Институт электродинамики НАН Украины
просп. Победы, 56, г. Киев, 03680, Украина, E-mail: mlins@ied.org.ua

Разработана математическая модель вентильно-индукторного двигателя с учетом квазистатистики. Исследованы квазистатические режимы вентильно-индукторного двигателя с периодической нагрузкой однопоршневого компрессора. Определены пульсации электромагнитного момента и степень неравномерности вращения ротора. Представлены результаты численного моделирования. Проведен сравнительный анализ результатов исследования с помощью линейной и нелинейной математических моделей.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, квазистатические режимы, однопоршневой компрессор, пульсации электромагнитного момента и частоты вращения двигателя.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Близько 30 % споживання електроенергії в побутовому секторі доводиться на холодильники. Тому в рамках Програми ООН з охорони навколишнього середовища (UNEP) Інститутом Світового Холоду поставлене завдання в найближчі 20 років знизити енергоспоживання побутових холодильних приладів на 30–50 %.

Добове споживання електроенергії визначається, насамперед, енергетичною ефективністю застосованого в холодильнику мотор-компресора. У цей час у мотор-компресорах застосовуються однофазні асинхронні двигуни (АД) з частотою обертання 2800–2900 об/хв, коефіцієнт корисної дії (ККД) яких реально перебуває на рівні 60 % [1].

Суттєво знизити енергоспоживання дозволяє застосування для мотор-компресорів регульованих електродвигунів з електронним керуванням. 2000 р. фірмою «Danfoss» (Данія) розроблено серію герметичних компресорів на базі вентильного двигуна з постійними магнітами. Їх застосування дозволяє знизити добову витрату електроенергії на 30 % у режимі зниженої частоти обертання й, крім того, реалізувати режим прискореної заморозки при підвищених обертах двигуна.

Перехід від нерегульованого електроприводу холодильних машин до регульованого дозволяє підвищити їх технічний рівень, економити енергетичні ресурси тощо. Така тенденція розвитку електроприводу стала можлива завдяки успіхам сучасної силової електроніки та мікроелектроніки. Одним з напрямів даної тенденції з'явилася поява нового типу електромеханічного перетворювача енергії – вентильно-індукторного двигуна (ВІД), який складається з реактивної індукторної машини (ІМ) і електронного блоку з мікропроцесорним керуванням. За енергетичними характеристиками він не поступаєть-

ся вентильному двигуну з постійними магнітами. У той же час конструктивно ІМ значно простіше.

Момент опору, створюваний поршневим компресором, залежить від геометричних параметрів поршневої машини, тиску на поршень. У загальному випадку залежність моменту опору є періодичною функцією від кута повороту вала.

Під час роботи ВІД у номінальному режимі з періодичним навантаженням мають місце безперервні перехідні процеси, які пов'язані також з послідовною перекомутацією фаз. Тому питання дослідження динамічних режимів ВІД з періодичним навантаженням є актуальними.

Метою роботи є дослідження закономірностей і аналіз квазістатичних режимів роботи вентильно-індукторного привода з періодичним навантаженням.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для чисельного моделювання обраний трифазний двигун ($m=3$) з числом полюсів статора $z_s=6$ і числом полюсів ротора $z_r=4$. Розміри магнітопроводу надано в табл. 1. Як матеріал магнітопроводу обрана сталь 2211.

Завдання дослідження електромеханічних процесів у пускових і квазісталих режимах роботи вимагали математичного опису ВІД системою диференціальних рівнянь електричної та механічної рівноваги.

Під час розробки математичної моделі були прийняті наступні допущення: двигун працює при симетричній комутації фаз; фази двигуна магнітозольовані; силові транзисторні ключі безінерційні; джерело живлення нескінченної потужності (конденсатор на виході випрямляча забезпечує стабільність напруги).

Таблиця 1 – Геометричні розміри ІМ

Розміри листів статора й ротора	
Зовнішній діаметр статора, D_a , мм	108
Внутрішній діаметр статора, D_i , мм	67
Ширина зубця статора, b_s , мм	20
Висота зубця статора, h_s , мм	11,5
Ярмо статора, a_s , мм	9,0
Ширина зубця ротора, b_r , мм	20
Висота зубця ротора, h_r , мм	10,7
Ярмо ротора, a_r , мм	13,5
Величина повітряного зазору, δ , мм	0,3
Довжина пакета статора l , мм	40

З урахуванням допущень математична модель ВІД може бути надана системою диференціальних рівнянь для однієї фази

$$\begin{cases} U_d = R_f i_f + \frac{d}{dt} \Psi; \\ M - M_s = J \frac{d\omega}{dt}; \\ \omega_r = \frac{d\gamma}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

де U_d – напруга на виході випрямляча; R_ϕ – опір фази статора; i_ϕ – струм фази статора; ψ – сумарне потокозчеплення фаз статора; M – сумарний електромагнітний момент трьох фаз статора; M_s – момент опору навантаження; ω_r – частота обертання ротора; γ – кут повороту ротора; J – сумарний момент інерції двигуна і рухомих мас, приведених до ротора двигуна.

Для дослідження й аналізу квазістатичних режимів ВІД зі змінним навантаженням розроблену математичну модель у системі MATLAB–Simulink доповнено блоками: інтегральних параметрів ВІД у квазістатичі, навантажень, втрат, розрахунку енергетичних показників. Параметрами квазістатичного режиму є середні значення змінних моментів, струмів, потужностей, частоти обертання за розрахунковий період.

Для проведення чисельних розрахунків як вхідні дані використано: залежності потокозчеплення фази (рис. 1) від кута повороту ротора й струму фази $\psi_f^*(i_f, \theta)$ для одного витка статора та довжиною пакета 1 м (криві 1–5 відповідають різним значенням струмів, причому перша – мінімальному струмові, а п'ята – максимальному); залежності сумарного електромагнітного моменту від кута повороту ротора й струму фази $M^*(i_f, \theta)$, які відповідають довжині пакета статора 1 м (рис. 2); струм керування I_{ker} ; напруга на виході випрямляча U_d ; опір фази статора R_f ; число витків обмотки статора W_1 , кути включення і відключення струму фази.

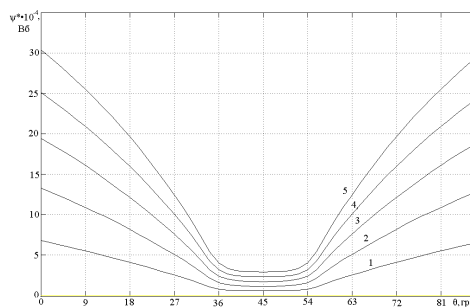


Рисунок 1 – Залежності потокозчеплення фази від кута повороту ротора й струму фази

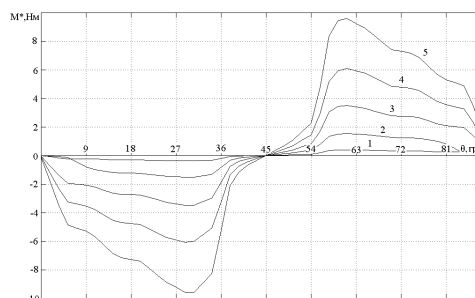


Рисунок 2 – Залежності сумарного електромагнітного моменту від кута повороту ротора й струму фази

Розрахунок залежностей $\psi_f^*(i_f, \theta)$, $M^*(i_f, \theta)$

проводився на основі чисельних досліджень магнітного поля індукторної машини методом скінчених елементів для ряду положень ротора у пакеті LCAT. Перерахування цих значень для конкретного числа витків котушки статора W_1 реалізується завданням їх кількості в інтерактивному режимі.

Результати розрахунку вихідних величин з урахуванням моменту опору у вигляді функції $M_s = k\omega_r^2$ і його середнім значенням $M_{sr} = 0,54$ Нм за допомогою розробленої моделі й узагальненої лінійної математичної моделі бібліотеки SimPowerSystems [3] з незмінними параметрами надано в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати досліджень квазістатичних режимів роботи ВІД

Параметри	Тип навантаження	
	$M_c = k\omega_r^2$	
	нелінійна модель	лінійна модель
l , м	0,04	0,04
M_{sr} , Н·м	0,535	0,54
M_{max} , Нм	0,68	0,6
M_{min} , Нм	0,38	0,45
δM , %	55	28
ω_{sr} , рад/с	312	335,3
P_2 , Вт	167	180
J , кг·м ²	0,0011	0,0011

Розрахунок квазістатичних режимів виконаний на міжкомутаційному періоді θ_k , який дорівнює 30° для $I_{ker} = 1,6$ А. Вихідними даними є: миттєві значення

струмів фаз i_{is} , сумарний електромагнітний момент, частота обертання двигуна, втрати в міді обмотки статора P_M , споживана P_1 і корисна потужності P_2 . Розраховано максимальні й мінімальні значення електромагнітного моменту (M_{max} , M_{min}) і частоти обертання ротора (ω_{max} , ω_{min}), пульсації електромагнітного моменту δM , ступінь нерівномірності обертання ротора $\delta\omega_r$.

Змодельоване періодичне навантаження однопоршневого компресора $M_c = f(\gamma)$, яке залежить від кута повороту вала γ , прикладено на періоді $\frac{7}{9}\pi$ ($\gamma_1 = \frac{2\pi}{9}$; $\gamma_2 = \pi$) і має максимальний момент опору $M_{cmax} = 1,1$ Н·м. Для періодичного моменту опору, еквівалентне значення якого дорівнює 0,29 Нм, двигун у робочому режимі розвиває корисну потужність 140 Вт при частоті обертання $\omega_r = 439$ рад/с. При цьому $\delta\omega_r = 13\%$, $\delta M = 51\%$. Залежність сумарного електромагнітного моменту вентильно-індукторного двигуна $M = f(t)$ для $M_s = k\omega_r^2$ зображено на рис. 3, залежності $M = f(t)$ та $\omega_r = f(t)$ для $M_c = f(\gamma)$ – на рис. 4, 5.

При використанні лінійної моделі ВІД отримано розрахункові значення пульсацій електромагнітного моменту – на рівні $\delta M = 28\%$. У випадку їх розрахунку за допомогою математичної моделі, що враховує нелінійні залежності параметрів, величина відносних пульсацій становить $\delta M = 55\%$.

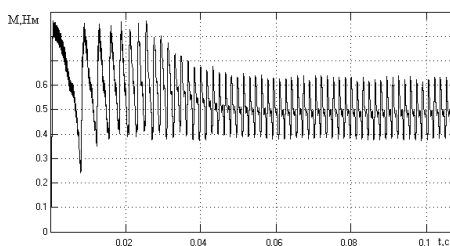


Рисунок 3 – Залежність $M = f(t)$ для $M_s = k\omega_r^2$

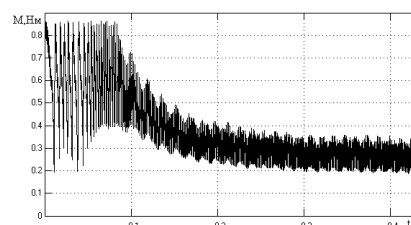


Рисунок 4 – Залежність $M = f(t)$ для $M_s = f(\gamma)$

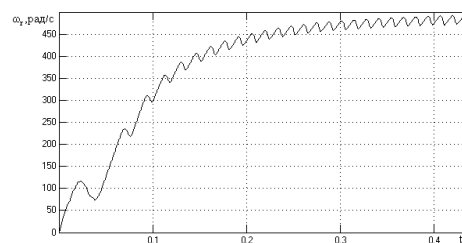


Рисунок 5 – Залежність $\omega_r = f(t)$ для $M_s = f(\gamma)$

ВИСНОВКИ. Використання математичної моделі вентильно-індукторних двигунів з урахуванням квазістатички дозволяє адекватно досліджувати, аналізувати особливості й оцінювати параметри квазістатичних режимів ВІД з періодичним навантаженням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бибик Е.В., Попович А.Н., Головань И.В. Исследования квазистатических режимов асинхронного двигателя при пульсирующей и периодической нагрузках // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника та енергоефективність». – 2006. – Ч. 2. – С. 99–102.
2. Ильинский Н.Ф., Штайнбрунн Й., Прудникова Ю.И. и др. Проектирование вентильно-индукторных машин общепромышленного назначения // Вестник МЭИ. – 2004. – № 1. – С. 37–43.
3. Черных И.В. Моделирование электромеханических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

INVESTIGATION OF KVAZISTATICS REGIMES OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS WITH PERIODICAL LOAD

O. Bibik, L. Mazurenko, L. Zhukov

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine
prosp. Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine. E-mail: mlins@ied.org.ua

Mathematic model of switched reluctance motor in account of kvazistatics has been developed. Kvazistatics regimes switched reluctance motor with periodical load of one-piston hermetic compressor were analyzed. The levels of motor speed and torque pulses are established. The results of numeric modeling are given. The comparative analysis of results of investigation with linear and non-linear mathematic models is given.

Key words: valve-inductor drive, quasistatic modes, one-piston compressor, pulsations of electromagnetic moment and frequency of drive rotation.

REFERENCES

1. Bibik E.V., Popovich A.N., Golovan I.V. Research kvazistatics modes of asynchronous motors with pulsating and periodical loads // *Physics. Thematic Issue "Power electronics and energy efficiency"*. – 2006. – Part 2. – PP. 99–102. [in Russian]
2. Ylinskyi N.F., Shtaynbrunn Y., Prudnikova Y.I. and oth. The design of switched reluctance mashines // *Bulletin of MEI*. – 2004. – № 1. – PP. 37–43. [in Russian]
3. Chernuh I.V. *Modeling of elektromechanical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink*. – М.: ДМК Press; SPb.: Piter, 2008. – 288 p. [in Russian]

Стаття надійшла 11.06.2012.
Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Шамардіною В.Н.