

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ЯВНОПОЛЮСНИХ ВЕНТИЛЬНИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ З БУФЕРАМИ ЕНЕРГІЇ

©Ткачук В.І., Аль Зубі О.Р., 2003

Запропоновано методику проектування нового виду електричних машин – вентильного реактивного двигуна з буферами енергії. Обґрунтовано та надано рекомендації з вибору незалежних параметрів проектування ВД з пасивним ротором, явнополісним статором й ємнісним нагромаджувачем енергії.

The technique of designing of a new type of electric machines – switched reluctance motor with buffers of energy is offered. The guidelines are submitted at the choice of independent parameters of designing of a SRM with a passive rotor, salient pole stator and capacitive energy store.

Постановка проблеми

До найважливіших задач теорії і практики сучасного електроприводу справедливо зараховують задачі розширення меж застосування електроприводу на базі вентильних двигунів (ВД), яким властиві такі позитивні якості, як принципова можливість виконання на широкий діапазон потужностей, частот обертання і напруг; висока надійність, великий термін працездатності і висока якість регулювання; можливість роботи в агресивних і вибухонебезпечних середовищах, при різних тисках, вологості і температурах; задовільне адаптування до сучасних електронних систем керування.

Найчастіше ВД застосовують в авіації, побуті, автоматичних системах, хімічній і автомобільній промисловостях, електротягових установках, тобто там, де застосування колекторних двигунів або затруднене, або взагалі неможливе і разом з тим необхідні високоякісні регульовальні характеристики.

Вентильний двигун – це електромеханічна система, яка складається з трьох взаємопов'язаних вузлів: електромеханічного перетворювача (ЕМП) для приведення в рух виконавчого механізму, давача положення ротора (ДПР) і електронного комутатора (ЕК).

Як ЕМП ВД найчастіше використовують індукційну машину зі збудженням від постійних магнітів (ПМ), розташованих на роторі. Наявність ПМ на обертовій частині машини ускладнює конструкцію й технологію її виготовлення, підвищує вартість. Одним з найпростіших за конструкцією, технологічним і надійним є ЕМП з явнополісним статором і

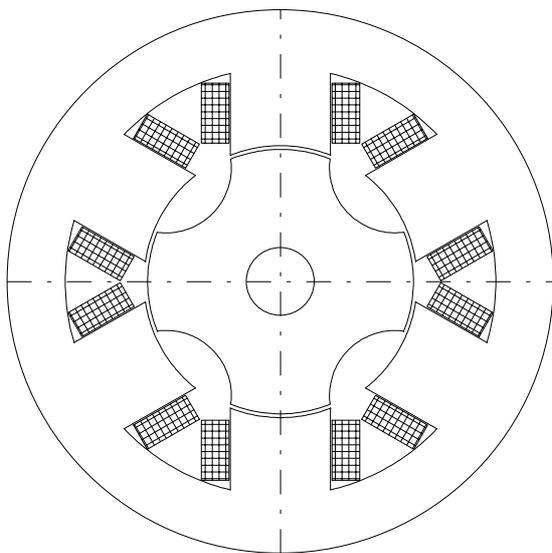


Рис. 1. Конструктивна схема ЕМП ВРД

зосередженими котушками його обмотки та зубчастим пасивним ротором. Такий ЕМП (рис. 1) є простішим, дешевшим і технологічнішим, ніж найпростіші з електричних машин – асинхронні, а ВД на їх основі за регульовальними властивостями не поступаються колекторним двигунам постійного струму. ВД з пасивним ротором називають ще вентильним реактивним двигуном (ВРД).

Аналіз останніх досліджень

Застосування відомих схем ЕК у ВД приводить до значних втрат потужності, оскільки енергія магнітного поля, яка накопичена в індуктивностях секцій статорної обмотки, перетворюється в тепло в елементах захисту силових ключів ЕК від перенапруг.

Значно покращити використання ВРД можна, якщо енергію магнітного поля при вимиканні секції накопичувати в реактивному елементі, наприклад, в конденсаторі, а потім використати її для форсованого вмикання наступної секції [1, 2]. Це забезпечує економічні показники ВРД на рівні показників ВД зі збудженням від ПМ.

На рис. 2 зображена принципова електрична схема ЕК з послідовними ємнісними накопичувачами енергії (ЄНЕ). Як показують теоретичні дослідження та експериментальні дані застосування такої схеми у ВРД підвищує коефіцієнт використання машини в 1,5–1,7 раза.

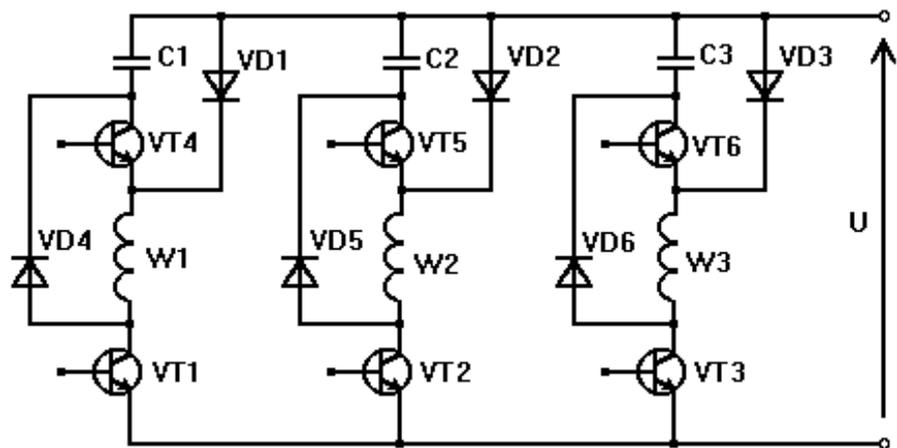


Рис. 2. Принципова електрична схема ЕК з послідовними ємнісними накопичувачами в кожній секції

Задачі досліджень

Як правило, методики проектування відомих типів електричних машин базуються на виборі величин електромагнітних навантажень (індукції в повітряному проміжку і окремих частинах магнітопроводу, лінійного навантаження, густини струму тощо), враховуючи практику проектування машин загальнопромислового призначення. Для ВД з пасивним ротором через відсутність такої практики вказані величини вимагають відповідного уточнення. Тому, використовуючи теорію електромеханічного перетворення енергії у ВРД з ЄНЕ [3], а також порівняльний аналіз електромагнітного моменту і електромагнітних навантажень вентильних реактивних двигунів з буферами енергії з такими добре вивченими, з достатнім досвідом проектування, як колекторні двигуни постійного струму [4, 5] обґрунтовано деякі рекомендації, які лягли в основу проектування ВД з пасивним ротором і явнополюсним статором.

На цей час нагромаджений деякий досвід проектування вентильних двигунів постійного струму зі збудженням від постійних магнітів. Оpubліковано низку статей та монографій [6, 7], в яких викладені теорія, принципи побудови та розрахунку таких двигунів. Однак цей досвід є малоприматним для вентильних двигунів з пасивним ротором та явнополюсним статором.

Виклад основного матеріалу

Співвідношення між кількістю зубців статора і ротора для конструкції, яка зображена на рис. 1:

$$Z_r = Z_s \cdot \frac{m \pm 1}{m}; \quad Z_s = m \cdot q; \quad q = 2, 4, 6 \dots, \quad (1)$$

де m – кількість секцій ВД. Причому, знак "-" застосовується для конструкцій з внутрішнім ротором, "+" – для зовнішнього ротора.

Записавши вирази для магнітної індукції в повітряному проміжку для положення, коли зубці ротора і статора збігаються,

$$B_\delta = \frac{I_c \cdot w_z}{K_\mu \cdot \delta} \cdot \mu_0, \quad (2)$$

і для лінійного навантаження

$$A = \frac{2 \cdot I_c \cdot w_z \cdot q}{\pi \cdot D} \cdot (\gamma^* + \theta_\delta^*), \quad (3)$$

де $\gamma^* = \frac{\gamma \cdot m}{2 \cdot \pi}$; $\theta_\delta^* = t_o \cdot \frac{m \cdot z_r}{4 \cdot \pi} \cdot \omega$; w_z – кількість витків обмотки статора на одному зубці статора; γ – інтервал комутації секції; q – кількість зубців статора на одну секцію; t_o – час вимикання секції; ω – колова частота обертання ротора, і підставивши їх у вираз для обчислення електромагнітного моменту [3], з врахуванням (2) і (3) отримаємо вирази для обчислення діаметра розточки статора

$$D = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{M \cdot (\gamma^* + \theta_\delta^*)}{(m-1) \cdot B_\delta \cdot A \cdot \pi \cdot \alpha_s \cdot K_L \cdot (1 - \cos \gamma) \cdot \lambda}}, \quad (4)$$

де $\lambda = l/D$ – відносна довжина статора.

На проектування ВД можуть бути видані різні варіанти технічного завдання (ТЗ). При цьому в усіх ТЗ вказуються: номінальна потужність на валі P_2 , номінальна швидкість обертання n , напруга живлення U та умови експлуатації.

Задавшись величиною коефіцієнта віддачі η , обчислюємо струм від джерела живлення

$$I_{джс} = \frac{P_2}{\eta \cdot U} = \frac{M \cdot n \cdot 2 \cdot \pi}{60 \cdot U \cdot \eta} \quad (5)$$

і струм секції

$$I_c = I_{джс} / \gamma^*; \quad I_c = I_{джс}; \quad I_c = I_{джс} \cdot \gamma^*;$$

для ВД з послідовним, паралельним ємнісним нагромаджувачем і паралельним нагромаджувачем зі спільним колом підживлення [1] відповідно.

Лінійне навантаження A і відносна довжина статора λ можуть бути прийняті як для синхронних або асинхронних машин.

Проведені дослідження показують, що максимальне середнє значення електромагнітного моменту буде при мінімально можливому, з врахуванням існуючої технології виготовлення, повітряному проміжку δ і оптимальному відношенні ширини зубця ротора до його крокового ділення α_r , яке теоретично дорівнює 0.42 і не залежить від розмірів. При цьому коефіцієнт полюсного перекриття статора

$$\alpha_s = \alpha_r \cdot m / (m - 1); \quad (6)$$

для класичного типу статора.

Величину θ_{δ}^* приймаємо рівною $\left(\frac{m}{2} - \gamma^*\right)/2$, враховуючи умову, що струм секції досягне значення нуля при $\theta = \pi$.

За заданих значень струму секції I_c і повітряного проміжку δ кількість витків на зубці статора визначаємо за формулою

$$w_z = B_{\delta} \cdot \delta \cdot K_{\mu} / (I_c \cdot \mu_0) \quad (7)$$

Кількість зубців статора обчислюємо за формулою

$$Z_s = \frac{A \cdot \pi \cdot D \cdot m}{2 \cdot I_c \cdot w_z \cdot (\gamma^* + \theta_{\delta}^*)}, \quad (8)$$

яку необхідно відкоректувати відповідно до умови виконання m -фазної машини, тобто $Z_s = m \cdot q$.

Ширину зубців ротора доцільно вибирати такою, що дорівнює ширині зубців статора.

Поперечний перетин провідника обмотки статора визначають, враховуючи величину струму секції і допустиму густину струму в обмотці, яку вибирають з врахуванням лінійного навантаження: $J = (AJ) / A$.

Глибина пазів статора визначається необхідним обсягом міді обмотки статора.

Глибина пазів ротора повинна бути в 16 разів більшою від довжини повітряного проміжку δ і її збільшення за межі 16.5 недоцільне, тому що не призводить до суттєвого збільшення першої гармоніки магнітної провідності.

Зубці статора з міркувань здешевлення технології виготовлення пропонуємо виконувати, як правило, з паралельними стінками (для укладання каркасних чи безкаркасних котушок обмотки статора). Форма зубців ротора може бути довільною.

Пропонована методика проектування ВД базується на традиційному виборі рекомендованих на підставі досвіду проектування значень електромагнітних навантажень B_{δ} і A .

Для ЕМП з явнополюсним статором такий досвід відсутній. Крім того, при дискретних значеннях Z_s , які диктуються умовами виконання відповідної конструктивної схеми ЕМП, значення лінійного навантаження A не може бути довільно заданим. Тому варто розглянути дещо інший варіант обчислення діаметра розточки статора.

Враховуючи вираз для обчислення середнього значення електромагнітного моменту [8]

$$M = \frac{1}{4 \cdot \mu_0} \cdot m \cdot q \cdot B_{\delta}^2 \cdot K_{\mu} \cdot \alpha_r \cdot K_L \cdot D^2 \cdot \lambda \cdot \delta \cdot (1 - \cos \gamma), \quad (9)$$

діаметр розточки статора можна обчислити як

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{M \cdot \mu_0}{m \cdot q \cdot B_{\delta}^2 \cdot K_{\mu} \cdot \alpha_r \cdot K_L \cdot \lambda \cdot \delta \cdot (1 - \cos \gamma)}}. \quad (10)$$

Отриманий вираз (10) для обчислення діаметра розточки статора є компактніший, ніж вираз (4). Крім того, він є універсальним для будь-яких конструктивних схем ЕМП.

Спираючись на результати досліджень, проведених на кафедрі "Електричні машини та апарати" Львівської політехніки, нижче надаємо рекомендації для вибору значень незалежних параметрів при проектуванні двигунів такого типу.

Кількість секцій обмотки статора m . Як уже відзначалось вище, ВД з пасивним ротором, за умови забезпечення відсутності "мертвих положень" при запуску, можна

реалізувати лише з кількістю секцій обмотки статора $m \geq 3$, причому збільшення m зменшує пульсації електромагнітного моменту, але збільшує кількість силових елементів комутатора, чутливих елементів ДПР й підвідних проводів між комутатором і електромеханічним перетворювачем. Рекомендовані значення m – від 3 до 6, подальше збільшення m не дає відчутного результату в зменшенні електромагнітного моменту, а тільки ускладнює ВД.

Кількість зубців статора на одну секцію q . Цей параметр проектувальник вибирає інтуїтивно, зваживши, що для класичної конструкції $q = 2, 4, 6, \dots$

Інтервал комутації секцій γ . Знову ж таки, через загрозу виникнення "мертвих положень" інтервал комутації не може бути меншим від $2 \cdot \pi / m$ електричних радіан; максимальна величина обмежується необхідністю забезпечити передачу енергії магнітного поля обмотки статора в нагромаджувальний конденсатор до моменту, коли електромагнітний момент може поміняти свій знак, тобто з рушійного стане гальмівним. Рекомендовані значення від 120 до 165 електричних градусів (менші значення для машин з вищою частотою обертання);

Радіальна довжина повітряного проміжку між зубцями статора і зубцями ротора δ . Цей параметр суттєво впливає на енергетичні та віброакустичні показники, визначає витрати активних матеріалів та надійність машини. Чим менший повітряний проміжок, тим менший опір магнітного кола, менша намагнічувальна сила для створення одного і того ж значення індукції у повітряному проміжку. У той же час при зменшенні δ зростають пульсації електромагнітного моменту й чутливість до нерівномірного проміжку через виникаючі сили одностороннього притягання. Крім цього, при зменшенні повітряного проміжку зростають вимоги до точності виготовлення деталей та вузлів машини, що призводить до зростання її вартості. Отже, повітряний проміжок можна правильно вибрати тільки внаслідок техніко-економічного порівняння кількох варіантів машини. Рекомендовані значення для ВД потужністю до 3000 Вт – від 0.05 до 0.5 мм.

Відносна ширина зубців ротора α_r . Проведені дослідження показують, що максимальний середній момент отримуємо при мінімально можливому повітряному проміжку і оптимальному відношенні ширини зубця ротора до його крокового ділення, яке теоретично дорівнює 0,42 і не залежить від розмірів. У [9] відзначається, що в сучасних конструкціях електромеханічних перетворювачах з пасивним ротором рекомендовані значення α_r лежать в межах від 0.38 до 0.44.

Магнітна індукція в повітряному проміжку B_δ і коефіцієнт насичення магнітопроводу K_μ взаємопов'язані між собою і не можуть виступати незалежними один від іншого параметрами. Проведені багатьма авторами дослідження [9, 10] показують, що момент, який створюється електромеханічним перетворювачем з насиченою магнітною системою може бути в два рази більшим, ніж у двигуна з лінійною залежністю індукції від напруженості. Правда, це твердження справедливе тільки для повітряних проміжків, близьких до нуля. Якщо δ не дорівнює нулю, множник для моменту менше двох. Отже, значення магнітної індукції у повітряному проміжку бажано вибирати таким, щоб коефіцієнт насичення був більшим від одиниці. Коефіцієнт насичення є функцією геометричних розмірів магнітного кола. На початку проектування, коли ще геометричні розміри невідомі, неможливо точно визначити степінь насичення за заданого значення індукції. За результатами проведених нами досліджень з марками сталей, які найчастіше

вживаються в електромашинобудівній промисловості нашої країни в табл. 1 наведено рекомендовані початкові значення B_δ і K_μ .

Таблиця 1

Рекомендовані значення B_δ і K_μ

Марка сталі	1211	1311	1411	1511	2013	2211	2311	2411	3411
K_μ	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
B_δ	1.50	1.50	1.47	1.44	1.65	1.56	1.56	1.50	1.75

Коефіцієнт амплітуди першої гармоніки індуктивності секції K_L . Цей параметр є функцією геометричних розмірів зубцевих шарів статора і ротора. Рекомендоване початкове значення $K_L = 0.42$.

Відносна аксіальна довжина осердя статора λ . Якщо в технічне завдання входять вимоги щодо обмежень за зовнішнім діаметром машини чи її аксіальної довжини, проектувальник залежно від цього приймає рішення про значення λ . Якщо ж такі вимоги не ставляться, то рекомендуємо значення λ вибирати в межах 0.25 – 0.5.

Оскільки деякі з описаних параметрів є функціями геометричних розмірів, а, значить, і діаметра розточки статора, то розрахунок діаметра можна здійснити тільки ітераційними методами. При цьому для попередньо прийнятих значень, так званих, незалежних параметрів обчислюється геометрія активної частини ЕМП, потім обчислюється перше наближення значення

$$K_L = \frac{1}{2} - \frac{L_{min} \cdot K_\mu}{2 \cdot L_{max}}, \quad (11)$$

а також інших параметрів, які входять в (10).

При цьому виникають труднощі з обчисленням B_δ і K_μ , так вони є взаємозалежні й залежні від геометричних розмірів і намагнічуючої сили, тобто, пов'язані системою нелінійних рівнянь

$$\begin{aligned} B_\delta &= f(K_\mu) \\ B_\delta \cdot K_\mu &= \frac{I \cdot w}{\delta} \cdot \mu_0 \end{aligned}, \quad (12)$$

перше з яких визначається з кривої намагнічення магнітопроводу ЕМП ВРД, а друге – з виразу (2) і які можна інтерпретувати геометрично, як це показано на рис. 3.

Нелінійна система рівнянь (12) розв'язується методом половинного ділення, геометрична інтерпретація якого показана на рис. 3.

Ітерації продовжуються до тих пір, поки різниця між значенням діаметра, отриманим на даній ітерації і значенням, отриманим на попередній ітерації не буде меншою від 1 мм. Оскільки величина діаметра заокруглюється, більша точність не потрібна.

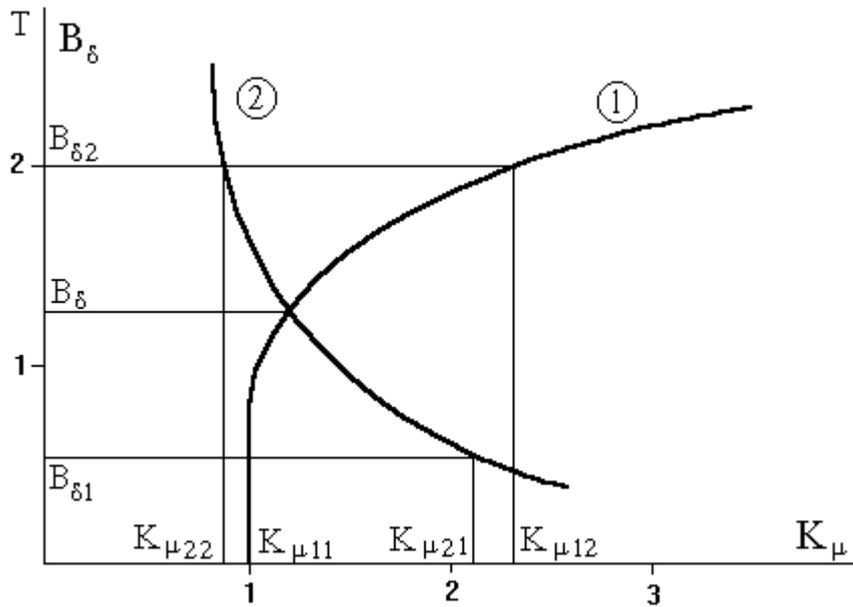


Рис. 3. Геометрична інтерпретація розв'язку нелінійної системи рівнянь (12)

Пропоновані конструкції статора передбачають застосування зосереджених котушок обмотки статора і методика їх розрахунку не відрізняється від загальноприйнятої.

У діалоговому режимі за відомим значенням діаметра D з табл. 2 вводять значення AJ .

Таблиця 2

Залежність AJ від діаметра статора

D [мм]	30	40	50	60	80	100	120	140	160
AJ	100	110	123	130	140	155	164	172	178

За формулою (13)

$$A = \frac{2 \cdot I_c \cdot w_s \cdot q}{\pi \cdot D} \cdot 1.4 \quad (13)$$

обчислюють наближене значення лінійного навантаження, а потім за формулою

$$J = AJ / A \quad (14)$$

обчислюють значення допустимої густини струму, за яким з пропонованої програмою таблиці, або з інших довідникових джерел вибирають стандартний ізольований дріт.

Після цього здійснюється розкладка дроту в шари залежно від ширини паза. Кількістю провідників в одному шарі визначається необхідна глибина паза i , в остаточному рахунку, зовнішній діаметр ЕМП.

Індукцію в повітряному проміжку B_δ залежно від марки електротехнічної сталі можна вибирати в межах $(1.55 \div 2.0)$ Т, при цьому коефіцієнт насичення K_μ буде лежати в межах $(1.45 \div 2.5)$.

Висновки

Розроблена методика проектування вентильних двигунів з пасивним ротором, явнополюсним статором та ємнісним нагромаджувачем енергії на базі теорії електро-механічного перетворення енергії в таких електромеханотронних перетворювачах дозволяє здійснювати проектні та перевіркові розрахунки.

Обґрунтовані та надані рекомендації з вибору незалежних параметрів проектування ВД з пасивним ротором, явнополюсним статором й ємнісним нагромаджувачем енергії.

З використанням наведеної методики побудована підсистема автоматизованого діалогового проектування ВРД з ємнісним нагромаджувачем, яка орієнтована на користувача-електромеханіка, який не має спеціальної підготовки в галузі програмування та обчислювальної техніки.

Дана методика була застосована при розробці вентильних двигунів для лабораторної рефрижераторної центрифуги крові ($M_n = 1.2$ Нм, $n_n = 6000$ об/хв), позиціонера індивідуальної антени супутникового телебачення ($M_n = 1.5$ Нм, $n_n = 1000$ об/хв), приводів мотор-коліс мінікомплексу "Майстер-А" ($M_n = 8$ Нм, $n_n = 700$ об/хв). Випробування та масогабаритні показники електромеханічного перетворювача свідчать про те, що дане технічне вирішення конструкції статора є вдалим.

1. Ткачук В.І., Осідач Ю.В. Транзисторні комутатори з ємнісними накопичувачами енергії // Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 1996. – № 301. – С. 115–122.
2. Ткачук В.І. Ємнісний накопичувач енергії у вентильному реактивному двигуні // Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 1997. – № 334. – С. 125 – 131.
3. Ткачук В.І. Теорія створення електромагнітного моменту у вентильному реактивному двигуні // Електромеханіка. Теорія і практика. – Львів, 1996. – С. 173–176.
4. Осідач Ю.В., Ткачук В.І. Порівняльний аналіз електромагнітного моменту колекторного і вентильного реактивного двигунів постійного струму // Електромеханіка. Теорія і практика. – Львів, 1996. – С. 140–142.
5. Осідач Ю.В., Ткачук В.І. Основи проектування вентильних реактивних двигунів // Електромеханіка. Теорія і практика. – Львів, 1996. – С. 143–145.
6. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов / В.Д. Косулин, Г.Б. Михайлов, В.В. Омельченко, В.В. Путников. – Л., 1988. – 184 с.
7. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. – М., 1975. – 128 с.
8. Ткачук В. Статичний момент електромеханічних перетворювачів з пасивними роторами // Електромеханіка. Теорія і практика. – Львів, 1996. – С. 177–180.
9. Harris M.R., Hughes A., Lawrenson P.J. Static torque production in saturated double-salient machines // Proc. IEEE 122. – 1975. – Vol 10. – P. 1121–1127.
10. Lawrenson P.J., Hodson D.P., Harris M.R. Electromagnetic forces in saturated magnetic circuit // Proc. Conference on small electrical machines. Institution of Electrical Engineers. – London, 1976. P. 89–92.