

УДК 621.313.323

О.О. Кузнецов

*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів*

## БЕЗРЕДУКТОРНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНІЗМУ НАВЕДЕННЯ ЗА ДИРЕКЦІЙНИМ КУТОМ АНТЕНИ РЛС НА ОСНОВІ ВЕНТИЛЬНИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ

*Обґрунтовано використання безредукторного електропривода на основі вентильних реактивних двигунів у механізмі наведення антени РЛС артилерійської розвідки. Спроектовано вентильний реактивний двигун механізму наведення за дирекційним кутом РЛС автоматизованого радіолокаційного комплексу АРК-ІМ. Обґрунтовано доцільність використання спроектованого двигуна у вказаному механізмі наведення.*

**Ключові слова:** механізм наведення антени, безредукторний електропривод, вентильний реактивний двигун.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Радіолокаційні станції (РЛС) середньої та великої дальності, які застосовуються на системах і комплексах артилерійської розвідки, є фізично й морально застарілими і не дозволяють вповні виконувати завдання артилерійської розвідки. Тому актуальним є завдання їх модернізації на основі нових досягнень науки і техніки.

Зокрема, з точки зору електромеханіки, найслабшим місцем механізмів наведення (МН) антен є редуктор. Наявність люфтів та пружних деформацій, а також неточність виконання елементів редуктора призводять до втрати частини підведеної потужності, причому величина цієї частки залежить від кількості складових елементів та зниження точності позиціонування – однієї з основних характеристик будь-якої системи наведення.

Для МН перспективним є застосування прямого привода – безредукторних електроприводів (БЕП), у яких двигун безпосередньо з'єднаний із робочим органом [1], що відповідає загальним тенденціям розвитку подібних систем. Це дозволяє забезпечити підвищення ККД та точності переміщення антени, а відсутність тертя у складових елементах приводить до забезпечення точності протягом всього строку служби та спрощення технічного обслуговування.

Розробками радіолокаційних, оптичних систем, а також систем наведення гармат та інших на основі БЕП для військового застосування займається чимало зарубіжних виробників, зокрема, Aerotech, Indra, Thales, Doosan.

Однією з особливостей застосування БЕП є неможливість використання двигунів загальнопромислового виконання. У них застосовуються моментні двигуни, які характеризуються високими значеннями моменту при низьких швидкостях обертання.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Відомі різні типи моментних двигунів, опис багатьох з них наведено у [2] та [3]. Загалом, будь-який тип електродвигуна можна спроектувати як моментний, однак найбільш перспективним для БЕП механізму наведення антени РЛС є використання вентильних реактивних двигунів (ВРД).

В порівнянні з іншими типами двигунів у ВРД можна виділити наступні переваги [4–6], особливо важливі для їх військового застосування:

простота, технологічність та надійність конструкції (на роторі відсутні обмотки);

мінімальне технічне обслуговування (що важливо у польових умовах);

підвищена стійкість до відмови окремих елементів (кожна фаза статора працює незалежно від інших, магнітні зв'язки між ними відсутні).

Виробники ВРД позиціонують як одне з основних їх застосувань низькошвидкісні високомоментні системи, наприклад, таким є електропривод МН антени РЛС «Буревісник-1», що розроблений НВП «Одесмонтажспецпроект» [7].

**Метою роботи** є перевірити можливість використання ВРД для побудови БЕП механізму наведення РЛС артилерійської розвідки.

### Виклад основного матеріалу

**Вибір об'єкта дослідження.** Для виконання цієї перевірки у роботі об'єктом дослідження вибрано електропривод МН РЛС за дирекційним кутом автоматизованого радіолокаційного комплексу АРК-ІМ. Основою електропривода є трифазний асинхронний двигун ДАТ1000-8, який має такі основні технічні характеристики:

напруга живлення –  $U_n = 220$  В;

частота напруги живлення –  $f_n = 400$  Гц;

номінальна потужність –  $P_n = 1$  кВт;

номінальний струм –  $I_n = 4,7$  А;  
 частота обертання –  $n_n = 7650$  об/хв;  
 кількість пар полюсів –  $p = 3$ ;  
 маса –  $m = 7$  кг.

Перевіримо можливість заміни існуючої системи електропривода МН РЛС за дирекційним кутом АРК-1М системою БЕП на основі ВРД.

**Вибір методу проектування.** Аналіз відомих методик та алгоритмів проектування ВРД наведено у [8] та [9]. Усі вони передбачають довільне прийняття деяких величин та коефіцієнтів, тому при одних і тих самих вихідних даних можна отримати різні кінцеві результати. У [9] підходи до проектування ВРД розділено на три групи:

а) енергетичний (виходить із розгляду балансу електричної, магнітної та механічної енергії на циклі комутації однієї фази ВРД);

б) польовий (передбачає послідовні розрахунки магнітного поля в активних частинах двигуна);

в) підхід на основі розрахунку перехідного процесу на циклі комутації однієї фази.

Найкращими є методики, що базуються на комбінації цих підходів. Так енергетичний підхід у силу значних прийнятих допусків доцільно використовувати для попереднього визначення основних розмірів машини; польовий дає можливість забезпечити високу точність, але разом із тим вимагає використання спеціалізованих програмних пакетів (ELCUT, FEMM та ін.).

Оскільки метою роботи є перевірити принципову можливість побудови БЕП механізму наведення РЛС на основі ВРД, достатньо у першому наближенні визначити основні розміри та параметри машини. Тому вибрано методику проектування, що базується на спрощеному моделюванні перехідного процесу на циклі комутації однієї фази, описану в [9].

#### Алгоритм проектування:

1. За вихідними даними та прийнятими співвідношеннями зубцевої зони розраховуємо геометрію статора.

2. Задаємося величиною повітряного проміжку.

3. Розраховуємо геометрію ротора.

4. Визначаємо інтервали циклу комутації.

5. Оцінюємо можливий діапазон амплітудних значень струму від прямокутного до трикутного закону його зміни.

6. Задаємо число витків котушки  $W_k$  та уточнюємо довжину машини і розміри зубцевої зони, щоб індукція в зубці статора не перевищувала допустиму, а потужність на валу відповідала номінальній та коефіцієнт заповнення паза міддю не виходив за рекомендовані межі.

7. Розраховуємо активний опір фази та спад напруги  $\Delta U_R$  і коректуємо значення напруги на фазі обмотки  $U_{dL}$ .

8. Остаточо визначаємо електричні, магнітні та енергетичні параметри ВРД.

В процесі розрахунку існує необхідність змінювати попередньо вибрані значення для виконання ряду умов та уточнення параметрів, тобто розрахунок передбачає циклічність. Тому розрахунок було автоматизовано з використанням математичного пакету Mathcad.

**Вихідні дані для розрахунку** формуємо, виходячи з даних, наведених у [10]:

номінальна потужність на валу –  $P_n = 1$  кВт (дорівнює потужності двигуна ДАТ1000-8);

номінальна напруга –  $U_d = 220$  В;

номінальна частота обертання –  $n_n = 10$  об/хв;

кількість фаз –  $m = 6$  (чим більше  $m$ , тим менші пульсації моменту, але згідно з [5], при  $m > 6$  значне ускладнення схеми не дає ефекту у покращенні характеристик);

кількість пар полюсів за першою гармонікою поля  $p_1 = 3$  (підібрано у процесі проектування);

зовнішній діаметр статора –  $D_a = 650$  мм (передбачається розміщення магнітопроводу ВРД у корпусі антени на місці розміщення редуктора);

мінімальний внутрішній діаметр ротора (дорівнює діаметру отвору в існуючій системі)  $D_{Rmin} = 250$  мм.

Нижче наведено процес проектування ВРД для БЕП МН антени РЛС, опускаючи ітерації розрахунку.

#### Визначення основних розмірів зубцевої зони

Кількість зубців статора

$$Z_s = 2p_1mq_1 = 2 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 1 = 36, \quad (1)$$

де  $q_1$  – кількість пазів на полюс і фази для першої гармоніки поля (для ВРД з котушковою обмоткою  $q_1 = 1$ ).

Кількість зубців ротора

$$Z_r = \left( \frac{Z_s}{p_1} - 2 \right) p_1 = \left( \frac{36}{3} - 2 \right) \cdot 3 = 30. \quad (2)$$

Зубцеві поділки статора і ротора (рис. 1):

$$t_{zs} = \frac{2\pi}{Z_s} = \frac{2\pi}{36} = 0,175 \text{ рад}, \quad (3)$$

$$t_{zr} = \frac{2\pi}{Z_r} = \frac{2\pi}{30} = 0,209 \text{ рад}, \quad (4)$$

або відповідно  $10,032^\circ$  та  $11,981^\circ$ .

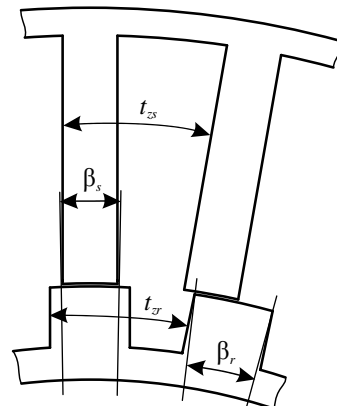


Рис. 1. Кутові розміри зубцевої зони статора і ротора

Кутові значення ширини зубців статора і ротора:

$$\beta_s = 0,45t_{zs} = 0,45 \cdot 0,175 = 0,079 \text{ рад}, \quad (5)$$

$$\beta_r = 0,45t_{zr} = 0,45 \cdot 0,209 = 0,094 \text{ рад}, \quad (6)$$

або відповідно  $4,529^\circ$  та  $5,389^\circ$ .

#### Визначення геометрії статора ВРД

Згідно з рекомендаціями [9], відношення висоти ярма до ширини зубця статора  $k_{has} = 0,5 \dots 1,0$ , відношення висоти зубця статора до його ширини  $k_{hzs} = 0,5 \dots 6,0$ . При цьому  $k_{has}$  з умов повітряного охолодження вибираємо щонайменшим  $k_{has} = 0,5$ . Коефіцієнт  $k_{hzs}$  підбираємо з умов, описаних вище у п. 6 алгоритму. Приймаємо  $k_{hzs} = 4,5$ .

Діаметр розточка статора (рис. 2)

$$D_i = \frac{D_a}{1 + 2(k_{has} + k_{hzs}) \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right)} = \frac{650}{1 + 2(0,5 + 4,5) \sin\left(\frac{0,079}{2}\right)} = 466,753 \text{ мм}. \quad (7)$$

Ширина зубця статора

$$b_{zs} = D_i \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) = 466,753 \sin\left(\frac{0,079}{2}\right) = 18,325 \text{ мм}. \quad (8)$$

Висота ярма статора

$$h_{as} = k_{has} b_{zs} = 0,5 \cdot 18,325 = 9,162 \text{ мм}. \quad (9)$$

Висота зубця статора

$$h_{zs} = k_{hzs} b_{zs} = 4,5 \cdot 18,325 = 82,461 \text{ мм}. \quad (10)$$

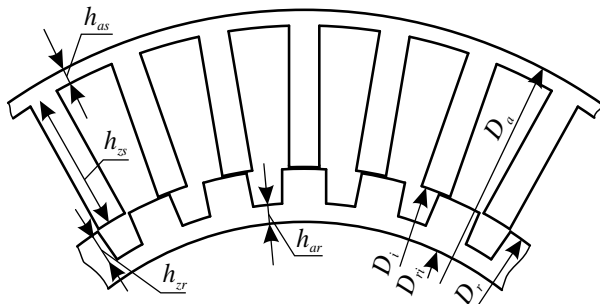


Рис. 2. Основні геометричні розміри магнітопроводу ВРД

**Вибір величини повітряного проміжку** проводиться з умови забезпечення щонайменшої його величини, для забезпечення якої немає необхідності у використанні спеціальних технологій. Приймаємо  $\delta = 1$  мм.

#### Визначення геометрії ротора ВРД

Зовнішній діаметр ротора

$$D_r = D_i - 2\delta = 466,753 - 2 \cdot 1 = 464,753 \text{ мм}. \quad (11)$$

Зубцева поділлка ротора (геометричні розміри):

$$t_{zrh} = \frac{\pi D_r}{Z_r} = \frac{\pi \cdot 464,753}{30} = 48,669 \text{ мм}. \quad (12)$$

Ширина зубця ротора

$$b_{zr} = D_r \sin\left(\frac{\beta_r}{2}\right) = 464,753 \sin\left(\frac{0,094}{2}\right) = 21,893 \text{ мм}. \quad (13)$$

Межі, у яких повинні знаходитись висота зубця ротора і висота ярма ротора, визначаються як:

$$h_{zr} = (20 \dots 30) \delta = (20 \dots 30) \cdot 1 = 20 \dots 30 \text{ мм} \quad (14)$$

$$h_{ar} = (0,5 \dots 1,5) b_{zr} = (0,5 \dots 1,5) \cdot 21,893 = 10,964 \dots 32,839 \text{ мм}. \quad (15)$$

Після перевірки виконання умов п. 6 алгоритму приймаємо  $h_{zr} = 20$  мм і  $h_{ar} = 11$  мм. Ці значення підбрано експериментально після проходження декількох ітерацій розрахунку.

Максимальна ширина паза ротора

$$b_{nr \max} = D_r \sin\left(\frac{t_{zr} - \beta_r}{2}\right) = 464,753 \sin\left(\frac{0,209 - 0,094}{2}\right) = 26,753 \text{ мм}. \quad (16)$$

Мінімальна ширина паза статора

$$b_{ns \min} = D_i \sin\left(\frac{t_{zs} - \beta_s}{2}\right) = 466,753 \sin\left(\frac{0,175 - 0,079}{2}\right) = 22,298 \text{ мм}. \quad (17)$$

Однією з величин, що характеризує енергетичні властивості ВРД, є коефіцієнт  $K_\lambda$ , який дорівнює відношенню максимальної та мінімальної провідності повітряного проміжку

$$K_\lambda = \frac{\Lambda_{\delta \max}}{\Lambda_{\delta \min}}. \quad (18)$$

При проектуванні намагаємося забезпечити щонайбільше значення цього коефіцієнта. Для цього необхідно, щоб ширина зубців статора і ротора була меншою ширини протилежних пазів:

$$b_{nr \max} > b_{zs} \text{ і } b_{ns \min} > b_{zr}. \quad (19)$$

У нашому випадку  $26,753 \text{ мм} > 18,325 \text{ мм}$  і  $22,298 \text{ мм} > 21,893 \text{ мм}$ , тобто умова виконується.

Внутрішній діаметр ротора

$$D_{ri} = D_r - 2(h_{zr} + h_{ar}) = 464,753 - 2(20 + 11) = 402,753 \text{ мм}. \quad (20)$$

З умови забезпечення можливості розміщення хвилеводів у внутрішньому отворі двигуна перевіряємо забезпечення умови

$$D_{ri} > D_{ri \min}. \quad (21)$$

Для нашого випадку  $402,753 \text{ мм} > 250 \text{ мм}$ .

Також розраховуємо інші геометричні параметри, які необхідні для подальших розрахунків: площу перетину паза статора

$$S_{ns} = \frac{\pi(D_i + h_{zs})h_{zs}}{Z_s} - b_{zs}h_{zs} = \frac{\pi(466,753 + 82,461)82,461}{36} - 18,325 \cdot 82,461 = 2,441 \cdot 10^3 \text{ мм} \quad (22)$$

та максимальну площу котушки

$$S_{\kappa \max} = \frac{S_{ns}}{2} = \frac{2,441 \cdot 10^3}{2} = 1,221 \cdot 10^3 \text{ мм} \quad (23)$$

**Характерні інтервали циклу комутації** визначаємо у кутових одиницях вимірювання та у часових інтервалах.

Максимальний інтервал наростання струму при мінімальній провідності

$$\gamma_{\text{вклmax}} = 0,5(t_{zr} - \beta_s - \beta_r) = 0,5(0,209 - 0,079 - 0,094) = 0,018 \text{ рад} \quad (24)$$

Кутова швидкість обертання ротора, необхідна для переходу з кутових одиниць вимірювання до часових інтервалів

$$\omega_r = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 10}{60} = 1,047 \text{ рад/с} \quad (25)$$

Час наростання струму при мінімальній провідності

$$t_{\text{вклmax}} = \frac{\gamma_{\text{вклmax}}}{\omega_r} 10^3 = \frac{0,018}{1,047} 10^3 = 17,5 \text{ мс} \quad (26)$$

Мінімальний кут, на який необхідно повернути ротор до узгодженого положення певної фази, якщо в даний момент повністю узгоджена сусідня з нею фаза

$$\gamma_{\min} = t_{zr} - t_{zs} = 0,209 - 0,175 = 0,035 \text{ рад} \quad (27)$$

Інтервал роботи фази при  $m > 3$  для несиметричної комутації визначаємо як

$$\gamma_{\text{роб}} = \beta_s = 0,079 \text{ рад} \quad (28)$$

Час роботи фази

$$t_{\text{роб}} = \frac{\gamma_{\text{роб}}}{\omega_r} 10^3 = \frac{0,079}{1,047} 10^3 = 33,333 \text{ мс} \quad (29)$$

Кут перекриття зубців при повороті ротора з повністю розузгодженого положення на кут  $\gamma_{\text{роб}}$

$$\beta_{srm} = \gamma_{\text{роб}} - \gamma_{\text{вклmax}} = 0,079 - 0,018 = 0,06 \text{ рад} \quad (30)$$

Ширина перекриття зубців статора і ротора

$$b_{srm} = 0,5 \beta_{srm} (D_i - \delta) = 0,5 \cdot 0,06 (466,753 - 1) = 14,022 \text{ мм} \quad (31)$$

**Коефіцієнти магнітних провідностей**, необхідні для обчислення коефіцієнта  $K_\lambda$ , який характеризує енергетичні властивості двигуна. Точне значення магнітних провідностей можна визначити числовим

розрахунком магнітного поля у перерізі ВРД, однак на даному етапі достатню точність дає використання аналітичних формул [9].

Коефіцієнт магнітної провідності зони перекриття зубців при повороті ротора з повністю розузгодженого положення на кут роботи фази  $\gamma_{\text{роб}}$

$$\lambda_{srm} = \frac{b_{srm}}{\delta} + \frac{2}{\pi} \ln \left( \frac{b_{zs} - b_{srm}}{\delta} \right) + \frac{2}{\pi} \ln \left( \frac{b_{zr} - b_{srm}}{\delta} \right) + 0,964 = \frac{14,022}{1} + \frac{2}{\pi} \ln \left( \frac{18,325 - 14,022}{1} \right) + \frac{2}{\pi} \ln \left( \frac{21,893 - 14,022}{1} \right) + 0,964 = 17,229 \quad (32)$$

Коефіцієнт максимальної магнітної провідності повітряного проміжку

$$\lambda_{\max} = \frac{b_{zs}}{\delta} + \frac{2}{\pi} \ln \left( \frac{b_{zr} - b_{zs}}{2\delta} \right) + \frac{2}{\pi} \ln \left( \frac{2h_{zr}}{b_{zr} - b_{zs}} \right) + 0,964 = \frac{18,325}{1} + \frac{2}{\pi} \ln \left( \frac{21,893 - 18,325}{2 \cdot 1} \right) + \frac{2}{\pi} \ln \left( \frac{2 \cdot 20}{21,893 - 18,325} \right) + 0,964 = 21,564 \quad (33)$$

Коефіцієнт мінімальної магнітної провідності повітряного проміжку

$$\lambda_{\min} = \frac{b_{zs}}{h_{zr}} + \frac{4}{3} \left( \frac{h_{zr} + b_{zr}}{t_{zrh} - b_{zr} - b_{zs}} \right) = \frac{18,325}{20} + \frac{4}{3} \left( \frac{20 + 21,893}{48,669 - 21,893 - 18,325} \right) = 7,526 \quad (34)$$

Коефіцієнт відношення провідностей

$$K_\lambda = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = \frac{21,564}{7,526} = 2,865 \quad (35)$$

**Визначення параметрів обмотки і струмів ВРД.**

Приймаємо кількість паралельних гілок  $a = 1$ . Приймаємо кількість елементарних провідників в ефективному  $a_{\text{ел}} = 1$ .

Кількість котушок у фази

$$n_\kappa = \frac{Z_s}{m} = \frac{36}{6} = 6 \quad (36)$$

Кількість послідовно з'єднаних котушок у вітті

$$n_{\kappa\phi} = \frac{n_\kappa}{a} = \frac{6}{1} = 6 \quad (37)$$

Попередньо приймаємо приблизні значення ККД двигуна  $\eta = 0,7$ . Спад напруги у вентилі комутатора приймаємо рівним  $U_\phi = 1 \text{ В}$ .

Діюче значення струму на виході інвертора

$$I_d = \frac{P_n}{\eta(U_d - 2U_\phi)} = \frac{1000}{0,7(220 - 2 \cdot 1)} = 6,553 \text{ А} \quad (38)$$

де  $U_d$  – напруга живлення, наведена в завданні на проектування, що надалі буде уточнена.

Відповідно до наведених у [9] формул, що пов'язують струм  $I_d$  та амплітудне значення струму котушки  $I_{km}$  в залежності від виду комутації та форми струму на циклі комутації, при одиночній комутації і прямокутній формі струму

$$I_{kmpr} = \frac{I_d}{a} = \frac{6,553}{1} = 6,553 \text{ А.} \quad (39)$$

Попереднє діюче значення струму котушки

$$I_k = \frac{I_{kmpr}}{\sqrt{m}} = \frac{6,553}{\sqrt{6}} = 2,657 \text{ А.} \quad (40)$$

При одиночній комутації і трикутній формі струму

$$I_{kmpr} = I_k \cdot 2,4\sqrt{m} = 2,654 \cdot 2,4\sqrt{6} = 15,727 \text{ А.} \quad (41)$$

Амплітудні значення струму для цих двох крайніх випадків, мінімального при прямокутній формі струму і максимального при трикутній формі струму, дають межі діапазону струму, в якому повинно виявитися розрахункове значення струму  $I_{km}$ .

**Вибір кількості витків та довжини осердя**, як вже було зазначено вище, є ітераційним процесом. Попередні значення цих величин було прийнято довільно, а їх уточнення відбувалось при перевірці виконання умов, описаних у п. 6 алгоритму.

Для зменшення обсягу статті тут і далі наводяться лише остаточні значення. Так остаточні величини прийнятих значень розрахункової довжини осердя та кількості витків:

$$l_\delta = 155 \text{ мм та } W_k = 246. \quad (42)$$

**Струми у фазах.** Спадок напруги на активному опорі фази попередньо приймається рівним нулю, після уточнення цього значення, що буде зроблено нижче, розрахунок необхідно повторити з уточненим значенням. Після завершення розрахунку це значення становить  $\Delta U_R = 17,6 \text{ В}$ . Напруга на індуктивності фази обмотки

$$U_{dL} = U_d - \Delta U_R = 220 - 17,6 = 202,4 \text{ В.} \quad (43)$$

Максимальне значення струму в котушці

$$I_{km} = \frac{U_{dL} I_{вкл\max}}{n_{кв} \mu_0 l_\delta W_k^2 \lambda_{\min}} = \frac{202,4 \cdot 17,5}{6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 246^2 \cdot 7,526} = 6,655 \text{ А,} \quad (44)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнітна стала.

Це значення лежить в діапазоні від  $I_{kmpr}$  до  $I_{kmpr}$  (від 6,553 А до 15,727 А), тобто умова виконується.

Максимальне значення магнітного потоку

$$\Phi_{\max} = \frac{U_{dL} I_{роб}}{n_{кв} W_k} = \frac{202,4 \cdot 33,333}{6 \cdot 246} = 4,571 \text{ Вб.} \quad (45)$$

$$I_k = \sqrt{\frac{1}{m\gamma_{\min}} \left[ \int_0^{\gamma_1} \left( \frac{I_{km}\theta}{\gamma_1} \right)^2 d\theta + \int_{\gamma_1}^{\gamma_{роб}} \left( \frac{U_{dL}\theta}{\omega_r n_{кв} L(\theta)} \right)^2 d\theta + \int_0^{\gamma_{роб}} \left( I_{квідкл} - \frac{I_{квідкл}\theta}{\gamma_{роб}} \right)^2 d\theta \right]} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{6 \cdot 0,035} \left[ \int_0^{0,018} \left( \frac{2,717 \cdot \theta}{0,018} \right)^2 d\theta + \int_{0,018}^{0,079} \left( \frac{202,4 \cdot \theta}{1,047 \cdot 6 \cdot (0,05 + 2,107 \cdot \theta)} \right)^2 d\theta + \int_0^{0,079} \left( 5,537 - \frac{5,537}{0,079} \theta \right)^2 d\theta \right]} = 5,833 \text{ А.} \quad (50)$$

Амплітудне значення індукції в зубці статора

$$B_{zs} = \frac{\Phi_{\max} 10^3}{b_{zs} l_\delta k_c} = \frac{2,107 \cdot 10^3}{8,734 \cdot 150 \cdot 0,95} = 1,693 \text{ Тл,} \quad (46)$$

де  $k_c = 0,95$  – коефіцієнт заповнення осердя сталлю, відповідно до [11]. Це значення лежить в діапазоні 1,6...1,7 Тл, що важливо з точки зору використання сталі і величини втрат в ній.

Струм котушки при її відключенні в момент перекриття зубців

$$I_{квідкл} = \frac{\Phi_{\max}}{\mu_0 l_\delta W_k \lambda_{srn}} = \frac{4,571}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 155 \cdot 246 \cdot 17,229} = 5,537 \text{ А.} \quad (47)$$

Для визначення діючого значення струму котушки залежність струму на ділянках циклу комутації апроксимується.

На інтервалі від початку включення фази при  $\gamma = 0$  до початку перекриття зубців при  $\gamma_1 = \gamma_{вкл\max}$  струм лінійно зростає до величини  $I_{km}$ . На інтервалі від  $\gamma_1$  до  $\gamma_{роб}$  струм змінюється як  $i = \Psi/L$  відповідно до зміни потокозчеплення і індуктивності від  $I_{km}$  до  $I_{квідкл}$ . Індуктивність фази на цьому проміжку описується виразом

$$L(\theta) = L_1 + L_2\theta, \quad (48)$$

де параметри апроксимації кривої провідності

$$L_{k\min} = \mu_0 l_\delta W_k^2 \lambda_{\min} 10^{-3} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 155 \cdot 246^2 \cdot 7,526 \cdot 10^{-3} = 0,089 \text{ Гн;}$$

$$L_1 = L_{k\min} \left( 1 - \frac{K_\lambda - 1}{\beta_s} \gamma_{вкл\max} \right) = 0,089 \left( 1 - \frac{2,865 - 1}{0,079} \cdot 0,018 \right) = 0,05 \text{ Гн;}$$

$$L_2 = L_{k\min} \frac{K_\lambda - 1}{\beta_s} = 0,089 \frac{2,865 - 1}{0,079} = 2,107 \text{ Гн/рад.}$$

Відповідно, вираз (48) – індуктивність котушки на інтервалі від  $\gamma_1$  до  $\gamma_{роб}$  приймає вигляд

$$L(\theta) = 0,05 + 2,107 \cdot \theta \text{ Гн.} \quad (49)$$

На інтервалі дії від'ємної напруги струм зменшується від  $I_{квідкл}$  до нуля, причому характер зміни струму залежить від частоти обертання та співвідношень  $\Psi$  і  $L$ . Спрощено приймаємо, що на цьому інтервалі струм зменшується лінійно.

З врахуванням прийнятих залежностей діюче значення струму котушки знаходимо [9] як:

Номинальний струм фази

$$I_{\phi} = I_k a = 5,833 \cdot 1 = 5,833 \text{ А.} \quad (51)$$

**Момент і потужність ВРД.** Для визначення величини обертового моменту у [9] використовується формула

$$M = \frac{1}{2} F_{\delta}^2 \frac{\partial \Lambda_{\delta}}{\partial \theta} \quad (52)$$

та апроксимація кривої струму на циклі комутації, описана при визначенні діючого значення струму котушки.

Характерні кути, що використовуються при визначенні величини моменту:

$$\begin{aligned} M_{сер} &= \frac{P_1 L_2}{\gamma_{\min}} \left( \int_{\gamma_1}^{\gamma_{роб}} \left( \frac{U_{dL} \theta}{\omega_r n_{кв} (L_1 + L_2 \theta)} \right)^2 d\theta + \int_0^{\gamma_2} \left( I_{квідкл} - \frac{I_{квідкл}}{\gamma_{роб}} \theta \right)^2 d\theta - \int_{\gamma_2}^{\gamma_{роб}} \left( I_{квідкл} - \frac{I_{квідкл}}{\gamma_{роб}} \theta \right)^2 d\theta \right) = \\ &= \frac{3 \cdot 2,107}{0,035} \left( \int_{0,018}^{0,079} \left( \frac{202,4 \cdot \theta}{1,047 \cdot 6 \cdot (0,05 + 2,107 \cdot \theta)} \right)^2 d\theta + \int_0^{0,018} \left( 5,537 - \frac{5,537}{0,079} \theta \right)^2 d\theta - \int_{0,018}^{0,079} \left( 5,537 - \frac{5,537}{0,079} \theta \right)^2 d\theta \right) = \\ &= 1,11 \cdot 10^3 \text{ Н·м.} \end{aligned} \quad (54)$$

Максимальний струм у котушці

$$I_{к\max} = I_{км} = 6,655 \text{ А.} \quad (55)$$

Потужність ВРД

$$P = \omega_r M_{сер} = 1,047 \cdot 1,11 \cdot 10^3 = 1,163 \cdot 10^3 \text{ Вт.} \quad (56)$$

Отримане значення потужності ВРД задовольняє вимогам проектного завдання.

**Коефіцієнт заповнення паза.** Для визначення діючого значення густини струму можна використовувати рекомендації [10]. Приймаємо діюче значення густини струму в котушці

$$j_k = 3 \text{ А/мм}^2.$$

Визначаємо площу перерізу міді котушки

$$S_{МК} = \frac{I_k W_k}{j_k} = \frac{5,833 \cdot 246}{3} = 478,286 \text{ мм}^2, \quad (57)$$

площу перерізу дроту

$$S_{\partial p} = \frac{S_{МК}}{W_k a_{ел}} = \frac{478,286}{246 \cdot 1} = 1,944 \text{ мм}^2 \quad (58)$$

та його діаметр

$$d_{\partial p} = \sqrt{\frac{4 S_{\partial p}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,944}{\pi}} = 1,573 \text{ мм.} \quad (59)$$

Вибираємо діаметр дроту зі стандартного ряду діаметрів  $d_{\partial p} = 1,6$  мм. Відповідно, визначаємо скореговані значення площі перерізу дроту

$$S_{\partial p} = \frac{\pi d_{\partial p}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,6^2}{4} = 2,011 \text{ мм}^2 \quad (60)$$

та площі перерізу міді котушки

$$S_{МК} = S_{\partial p} W_k a = 2,011 \cdot 246 \cdot 1 = 494,612 \text{ мм}^2. \quad (61)$$

$$\gamma_2 = \gamma_{вкл\max} + \beta_S - \gamma_{роб} = 0,018 + 0,079 - 0,079 = 0,018 \text{ рад,}$$

$$\gamma_3 = \gamma_2 + \beta_R - \beta_S = 0,018 + 0,094 - 0,079 = 0,034. \quad (53)$$

На інтервалі від  $\gamma = 0$  до моменту  $\gamma_1 = \gamma_{вкл\max}$  електромагнітний момент рівний нулю, оскільки індуктивність постійна. На інтервалі від  $\gamma_1$  до  $\gamma_{роб}$  він зменшується до величини  $M_{відкл}$ , починаючи з максимального значення  $M_{\max}$ . На наступному інтервалі до досягнення кута  $\gamma_2$  момент зменшується до  $M_{H\max}$ , на інтервалі з постійною максимальною індуктивністю він набуває нульового значення, а на інтервалі спадної індуктивності момент набуває від'ємного значення і має гальмівний характер  $M_{зальм}$ . З врахуванням цього середній момент [9]:

Коефіцієнт заповнення паза міддю

$$k_{зм} = \frac{S_{МК}}{S_{к\max}} = \frac{494,612}{1,221 \cdot 10^3} = 0,405. \quad (62)$$

Коефіцієнт  $k_{зм}$  повинен лежати в діапазоні  $0,35 \div 0,45$ . Умова виконується.

Наведений вище розрахунок є результатом ітераційного процесу, в якому здійснюється перевірка величин максимального струму котушки  $I_{км}$ , індукції  $B_{zs}$ , потужності  $P$  і коефіцієнта заповнення паза міддю  $k_{зм}$ . Вище також описано діапазони, в межах яких повинні лежати вказані величини.

Значеннями і коефіцієнтами, які приймалися довільно, є загальна конфігурація машини, яка визначає кількість зубців статора і ротора; коефіцієнти, що визначають висоту ярма та зубців статора ( $k_{нас}$  і  $k_{hcs}$ ) і ротора ( $k_{нар}$  і  $k_{hcr}$ ); величина повітряного проміжку  $\delta$ ; кількість витків  $W_k$ ; розрахункову довжину осердя  $l_{\delta}$ .

У [5, 6, 9, 11] наведено деякі рекомендації із вибору цих параметрів, однак, як було вказано вище, вони не дають однозначності. Після декількох ітерацій отримуємо варіант двигуна, що влаштовує нас за всіма контрольованими величинами.

**Врахування активного опору фази.** Середня довжина витка лобової частини котушки

$$\begin{aligned} L_{лсер} &= \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi(D_i + h_{zs})}{Z_s} - \frac{S_{к\max}}{h_{zs}} \right) = \frac{\pi}{2} \cdot \\ &\cdot \left( \frac{\pi(466,753 + 82,461)}{36} - \frac{1,221 \cdot 10^3}{82,461} \right) = 52,035 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (63)$$

Середня довжина витка котушки

$$L_{всеп} = 2 (l_{\delta} + L_{лсеп}) = 2 (155 + 52,035) = 414,069 \text{ мм.} \quad (64)$$

Активний опір котушки обмотки статора при температурі 20 °С

$$R_{к20} = \rho_{20} \frac{L_{всеп} W_k^2}{S_{к\max} k_{зм}} 10^{-3} = 0,0175 \frac{414,069 \cdot 246^2}{1,221 \cdot 10^3 \cdot 0,405} 10^{-3} = 0,889 \text{ Ом,} \quad (65)$$

де  $\rho_{20} = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  – питомий опір міді при температурі 20 °С.

Активний опір котушки при температурі  $t_{обм} = 75 \text{ °С}$

$$R_k = R_{к20} (1 + 0,0039 (t_{обм} - 20)) = 0,889 (1 + 0,0039 (75 - 20)) = 1,079 \text{ Ом.} \quad (66)$$

Спадок напруги на активному опорі фази

$$\Delta U_R = n_{кв} R_k I_{км} = 6 \cdot 1,079 \cdot 2,717 = 17,596 \text{ В.} \quad (67)$$

Уточнене значення напруги живлення

$$U_d = U_{дЛ} + \Delta U_R = 202,4 + 17,596 = 219,996 \text{ В.} \quad (68)$$

Це значення відповідає з деякою похибкою значенню, наведеному у вихідних даних. Воно було отримане після декількох ітерацій, після підставлення одержаного значення  $\Delta U_R$  у (43).

**Вибір сталі осердь.** Для традиційних ВРД частота пульсації магнітного потоку статора і частота перемагнічування ротора вища, ніж для машин загальнопромислового виконання, тому при проектуванні магнітної системи необхідно передбачати використання спеціальної високочастотної сталі [9]. У моментних ВРД ці частоти є низькими в силу низьких швидкостей обертання і немає необхідності у використанні спеціальних марок сталі.

Зокрема, частота струму у фазі

$$f_s = \frac{n}{60} Z_r = \frac{10}{60} 30 = 5 \text{ Гц,} \quad (69)$$

частота обертання поля

$$n_1 = \frac{60 f_c}{p_1} = \frac{60 \cdot 5}{3} = 100 \text{ об/хв,} \quad (70)$$

частота перемагнічування ротора

$$f_r = \frac{n + n_1}{60} p_1 = \frac{10 + 100}{60} 3 = 5,5 \text{ Гц.} \quad (71)$$

Тому для осердь статора і ротора вибираємо ізотропну холоднокатну сталь марки 2312 з товщиною листів 0,5 мм, що у [11] рекомендується використовувати при проектуванні синхронних двигунів. Її параметри: щільність  $\gamma_{Fe} = 7750 \text{ кг/м}^3$ , питомі втрати  $\rho_{num} = 1,05 \text{ Вт/кг}$ .

**Розрахунок маси активних матеріалів.** Маса міді

$$m_{Cu} = \gamma_{Cu} S_{к\max} k_{зм} L_{всеп} Z_s 10^{-9} = 8900 \cdot 1,221 \cdot 10^3 \cdot 0,405 \cdot 414,069 \cdot 36 \cdot 10^{-9} = 8,246 \text{ кг,} \quad (72)$$

де  $\gamma_{Cu} = 8900 \text{ кг/м}^3$  – щільність міді.

Маса сталі:

а) зубців статора

$$m_{zs} = \gamma_{Fe} h_{zs} b_{zs} Z_s l_{\delta} 0,95 \cdot 10^{-9} = 7750 \cdot 82,461 \cdot 18,325 \cdot 36 \cdot 155 \cdot 0,95 \cdot 10^{-9} = 62,079 \text{ кг;} \quad (73)$$

б) ярма статора

$$m_{as} = \gamma_{Fe} \pi (D_a - h_{as}) h_{as} l_{\delta} 0,95 \cdot 10^{-9} = 7750 \cdot \pi \cdot (650 - 9,162) \cdot 9,162 \cdot 155 \cdot 0,95 \cdot 10^{-9} = 21,05 \text{ кг;} \quad (74)$$

в) зубців ротора

$$m_{zr} = \gamma_{Fe} h_{zr} b_{zr} z_r l_{\delta} 0,95 \cdot 10^{-9} = 7750 \cdot 20 \cdot 21,893 \cdot 30 \cdot 155 \cdot 0,95 \cdot 10^{-9} = 14,99 \text{ кг;} \quad (75)$$

г) ярма ротора

$$m_{ar} = \gamma_{Fe} \pi (D_{ri} + h_{ar}) h_{ar} l_{\delta} 0,95 \cdot 10^{-9} = 7750 \cdot \pi \cdot (402,753 + 11) \cdot 11 \cdot 155 \cdot 0,95 \cdot 10^{-9} = 16,317 \text{ кг.} \quad (76)$$

Маса сталі статора

$$m_s = m_{zs} + m_{as} = 62,079 + 21,05 = 83,129 \text{ кг.} \quad (77)$$

Маса сталі ротора

$$m_r = m_{zr} + m_{ar} = 14,99 + 16,317 = 31,107 \text{ кг.} \quad (78)$$

Маса сталі

$$m_{Fe} = m_s + m_r = 83,129 + 31,107 = 114,437 \text{ кг.} \quad (79)$$

Сумарна маса активних частин

$$m_{акм} = m_{Cu} + m_{Fe} = 8,246 + 114,437 = 122,683 \text{ кг.} \quad (80)$$

**Втрати та ККД** Оскільки ВРД представляє собою мехатронний модуль, втрати у ньому складаються із втрат у вентиляльному перетворювачі і власне втрат у двигуні. Спрощено розглядатимемо лише втрати у двигуні.

Електричні втрати в обмотках ВРД без врахування втрат у з'єднувальних провідниках

$$P_{ел} = I_{км}^2 R_k Z_s = 2,717^2 \cdot 1,079 \cdot 36 = 286,848 \text{ Вт.} \quad (81)$$

Розрахунок магнітних втрат ускладнюється, зважаючи на несинусоїдний характер зміни магнітної індукції. Разом з тим достатню на етапі ескізного проектування точність дають описані в [11] методи розрахунку втрат, які застосовуються для традиційних типів електричних машин. При цьому особливості ВРД враховуються уточненням коефіцієнтів, що входять у ці формули [9].

Визначаємо індукцію в сталевих ділянках магнітопроводу:

а) в ярмі статора

$$B_{as} = B_{zs} \frac{b_{zs}}{2h_{as}} = 1,694 \frac{18,325}{2 \cdot 9,162} = 1,694 \text{ Тл;} \quad (82)$$

б) в зубці ротора

$$B_{zr} = B_{zs} \frac{b_{zs}}{b_{zr}} = 1,694 \frac{18,325}{21,893} = 1,418 \text{ Тл;} \quad (83)$$

в) в ярмі ротора

$$B_{ar} = B_{zs} \frac{b_{zs}}{2h_{ar}} = 1,694 \frac{18,325}{2 \cdot 11} = 1,411 \text{ Тл.} \quad (84)$$

Втрати в сталі статора

$$P_{cs} = \frac{P_{num}}{B_n^2} \left( \frac{f_s}{f_n} \right)^{1,3} (k_{da} B_{as}^2 m_{as} + k_{dz} B_{zs}^2 m_{zs}) =$$

$$= \frac{1,75}{1,5^2} \left( \frac{5}{50} \right)^{1,3} (1,8 \cdot 1,694^2 \cdot 21,05 + 2 \cdot 1,694^2 \cdot 62,079) =$$

$$= 18,127 \text{ Вт}, \quad (85)$$

де  $k_{da} = 1,8$  і  $k_{dz} = 2$  – коефіцієнти, що враховують збільшення втрат в сталі ярма і зубців ВРД внаслідок технологічних факторів;  $B_n$  і  $f_n$  – індукція і частота при визначенні втрат.

Втрати в сталі ротора

$$P_{cr} = \frac{P_{num}}{B_n^2} \left( \frac{f_s}{f_n} \right)^{1,3} (k_{da} B_{ar}^2 m_{ar} + k_{dz} B_{zr}^2 m_{zr}) =$$

$$= \frac{1,75}{1,5^2} \left( \frac{5}{50} \right)^{1,3} (1,8 \cdot 1,411^2 \cdot 16,317 + 2 \cdot 1,418^2 \cdot 14,99) =$$

$$= 4,629 \text{ Вт}. \quad (86)$$

Втрати в сталі

$$P_c = P_{cs} + P_{cr} = 18,127 + 4,629 = 22,756 \text{ Вт}. \quad (87)$$

Механічними втрати в рамках попереднього процесу розрахунку нехтуємо.

Сумарні втрати в ВРД

$$P_{\Sigma} = P_{el} + P_c = 286,848 + 22,756 = 309,604 \text{ Вт}. \quad (88)$$

Коефіцієнт корисної дії ВРД

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_{\Sigma}} = \frac{1000}{1000 + 309,604} = 0,79. \quad (89)$$

Струм на вході інвертора (остаточно)

$$I_d = \frac{P_n}{\eta(U_d - 2U_{\theta})} = \frac{1000}{0,79(220 - 2 \cdot 1)} = 6,249 \text{ А}. \quad (90)$$

**Побудова характеристик на циклі комутації ВРД.** Виділимо значення, необхідні для побудови залежностей електричних величин та моменту на циклі комутації фази:

максимальне значення потокозчеплення

$$\Psi_{\max} = W_{\kappa} \Phi_{\max} = 246 \cdot 4,571 = 1,124 \cdot 10^3 \text{ мВб};$$

максимальне значення моменту

$$M_{\max} = p_1 L_2 I_{\kappa \max}^2 = 3 \cdot 2,107 \cdot 6,655^2 = 279,945 \text{ Н·м};$$

значення моменту при  $\gamma = \gamma_{роб}$

$$M_{відкл} = p_1 L_2 I_{квідкл}^2 = 3 \cdot 2,107 \cdot 5,537 = 193,785 \text{ Н·м};$$

значення, до якого зменшується момент при зміні кута від  $\gamma_{роб}$  до  $\gamma_2$

$$M_{H \max} = p_1 L_2 \left( I_{квідкл} - \frac{I_{квідкл}}{\gamma_{роб}} \gamma_2 \right)^2 = 3 \cdot 2,107 \cdot$$

$$\cdot \left( 5,537 - \frac{5,537}{0,079} 0,018 \right)^2 = 113,902 \text{ Н·м};$$

максимальне значення моменту при його гальмівному характері

$$M_{гальм \max} = p_1 L_2 \left( I_{квідкл} - \frac{I_{квідкл}}{\gamma_{роб}} \gamma_3 \right)^2 = 3 \cdot 2,107 \cdot$$

$$\cdot \left( 5,537 - \frac{5,537}{0,079} 0,034 \right)^2 = 62,226 \text{ Н·м}.$$

Графіки основних величин на циклі комутації фази наведено на рис. 3 (у тому вигляді, в якому вони використовувались при проектуванні – у лінійному наближенні).

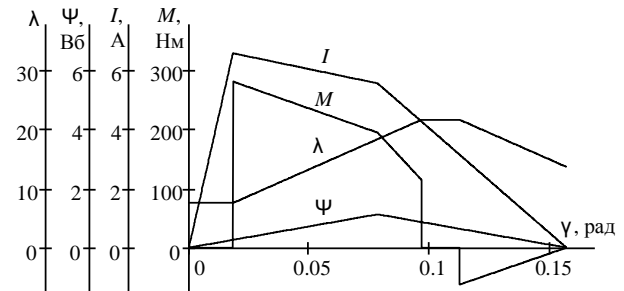


Рис. 3. Характеристики на циклі комутації ВРД

**Перспективи подальших досліджень.** У роботі не розкритими залишились питання дослідження динаміки БЕП на основі ВРД. Для відповіді на це питання необхідною є розробка математичної моделі ВРД та БЕП загалом, що вимагає більш точного визначення розмірів та параметрів машини. Також необхідним є визначення структури та параметрів системи керування, що дасть можливість забезпечити необхідну точність наведення, оскільки до точності у вказаній системі висуваються досить жорсткі вимоги.

## Висновки

Використання ВРД для побудови БЕП МН антени РЛС артилерійської розвідки дає можливість забезпечити просту та надійну конструкцію, що вимагає мінімального технічного обслуговування і, в силу того, що кожна фаза двигуна фактично представляє собою окремий модуль, забезпечує високу стійкість до відмови окремих елементів. Такий підхід є перспективним та відповідає сучасним підходам для побудови систем наведення антен.

Для перевірки даного твердження у роботі спроектовано ВРД для МН за дирекційним кутом РЛС автоматизованого радіолокаційного комплексу АРК-1М. Вибрано методику проектування, що базується на спрощеному моделюванні перехідного процесу на циклі комутації однієї фази. Ця методика дає змогу без задіяння великих обчислювальних потужностей оцінити можливість у визначеному конструктивно об'ємі (який займають двигун і редуктор в існуючій системі) забезпечити розміщення моментного ВРД необхідної потужності.



Основні показники спроектованого ВРД:  
 номінальна потужність – 1 кВт;  
 напруга живлення – 220 В;  
 кількість фаз – 6;  
 кількість зубців статора/ротора – 36/30;  
 частота обертання – 10 об/хв;  
 ККД – 79%;  
 густина струму в котушці – 3 А/мм<sup>2</sup>;  
 зовнішній діаметр статора – 650 мм;  
 діаметр розточки статора – 466,8 мм;  
 довжина осердя – 155 мм;  
 повітряний проміжок – 1 мм.

### Список літератури

1. Кузнєцов О.О. Перспективи використання прямого привода при модернізації механізму наведення антени станції наземної артилерійської розвідки / О.О. Кузнєцов // Військово-технічний збірник. – Випуск № 2(11). – Львів: АСВ, 2014. – С. 27 – 31.
2. Афанасьев А.Ю. Моментный электропривод / А.Ю. Афанасьев. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1997. – 250 с.
3. Свечарник Д.В. Электромашины непосредственного привода: Безредукторный электропривод / Д.В. Свечарник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
4. Miller T. J. E. Brushless Permanent-Magnet and Switched Reluctance Motor Drives / T. J. E. Miller. – Clarendon Press Oxford, 1989. – 207 p.
5. Ткачук В. Електромеханотроніка: Підручник. / В. Ткачук. – Львів: Видавництво НУ «ЛП», 2006. – 440 с.
6. Вентильные индукторно-реактивные двигатели / Ю.А. Голлацев. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электронприбор», 2003. – 148 с.
7. Вентильный реактивный электродвигатель привода антенны радиолокационной станции / Радимов И.Н., Рышиа В.В., Порайко А.С. [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. – 2003. – № 11. – С. 120 – 125.
8. Галушко В.Н. Моделирование вентильно-индукторных двигателей / В.Н. Галушко, Т.В. Алферова, С.И. Бахур, А.А. Алферов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2014. – № 3. – С. 45 – 55.
9. Проектирование вентильных индукторных двигателей: методическое пособие. / В.Г. Фисенко, А.Н. Попов. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 56 с.
10. Изделие 1РЛ239. Техническое описание, ч. I. – 156 с.
11. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / Под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.

**Рецензент:** д.т.н., проф. Я.С. Паранчук, Національний університет «Львівська політехніка», Львів.

### Безредукторный электропривод механизма наведения по дирекционному углу антенны РЛС на основе вентильных реактивных двигателей

А.А. Кузнєцов

Обосновано использование безредукторного электропривода на основе вентильных реактивных двигателей в механизме наведения антенны РЛС артиллерийской разведки. Спроектирован вентильный реактивный двигатель механизма наведения по дирекционному углу РЛС автоматизированного радиолокационного комплекса АРК-1М. Обосновано целесообразность использования спроектированного двигателя в указанном механизме наведения.

**Ключевые слова:** механизм наведения антенны, безредукторный электропривод, вентильный реактивный двигатель.

### Gearless Electric Drive based on Switched Reluctance Motor for Grid Azimuth Radar Antenna Guidance Mechanism

O. Kuznyetsov

In present paper, the idea of using a gearless electric drive based on switched reluctance motor in artillery surveillance radar antenna guidance system has been proofed. A switched reluctance motor for grid azimuth guidance system of automated radar radiolocating complex ARK-1M has been designed. The validity of using the designed motor for specified guidance system has been proofed.

Chosen design technique based on a simplified simulation of transient switching cycle in one phase. This technique allows without involvement of large computing power to assess the possibility of structurally defined volume (which is occupied by the engine and gearbox in the current system) to provide accommodation switched reluctance motor torque required power.

The use of switched reluctance motor for building gearless electric mechanisms aiming antenna radio locating station Artillery Intelligence enables to provide a simple and robust design that requires minimal maintenance and due to the fact that each phase of the engine actually is a separate module, provides high resistance to failure of individual elements.

**Key words:** antenna guidance mechanism, gearless electric drive, switched reluctance motor.