

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-129-136>

\УДК 629.423.3, 621.8.038

## ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Чигирик Н.Д., Сумцов А.Л., Вихопень І.Р., Силенко А.В.

## REDUCING THE ENERGY CONSUMPTION OF TRACTION ROLLING STOCK IN OPERATION

Chygyryk N.D., Sumtsov A.L., Vykhopen I.R., Silenko A.V.

*Економічна доступність нових сучасних матеріалів з високими рівнем споживчих характеристик, дає змогу розглядати варіанти застосування нових способів зі зменшення енергоспоживання тяговим електрорухомим складом. У статті пропонується використання електромагнітного розвантаження для зниження механічних втрат в підшипникових щитах асинхронних електродвигунів приводу вентиляторів охолодження та компресорів. Джерелом саможивлення пристрою являється аксіальний трифазний генератор на неодимових постійних магнітах. Приведені результати попереднього проектування електромагнітної системи пристрою і опрацювання способу його інтегрування у вже існуючу конструкцію устаткування охолодження і нагнітання тягового електрорухомого складу.*

**Ключові слова:** тяговий електрорухомий склад, електромагніт, пристрої розвантаження, енергоспоживання.

**Вступ.** Не зважаючи на всю привабливість експлуатації електрорухомого тягового складу, витрати потужності на допоміжні потреби залишаються значними. Для охолодження тягових двигунів, випрямних і перетворюючих пристроїв, роботу компресорів і кліматичних установок використовується 7-15 % [1] витрати на тягу, а в окремих випадках ця величина досягає 25-30% [2]. Тоді як, мінімально необхідна витрата енергії для цих цілей оцінюється у розмірі 0,5-3,0 %. Впровадженням низки заходів, таких як заміна вентиляторів на відцентрово-гвинтові, поліпшення аеродинамічних характеристик повітропроводів, застосування алюмінієвих охолоджувачів з оребренням, систем автоматичного регулювання продуктивності мотор-вентиляторів відносно температури тягових двигунів прагнуть до досягнення цих показників. У [3] результаті застосування перетворювачів ПСВ 50/16 для регулювання частоти оборотів двигунів мотор-вентиляторів в залежності від навантаження тягових двигунів — зниження

витрат енергії на допоміжні потреби склало 3-4 %.

Приведені вище заходи все ж охоплюють незначну частину експлуатованого парку локомотивів, їх можна розцінювати як поступове вдосконалення нових конструкцій, нових способів і технологій, які будуть корисними для проектування і створення нових зразків тягового рухомого складу, в тому числі і високошвидкісного рухомого складу.

**Постановка проблеми.** Для охолодження тягових двигунів, електроапаратів, елементів електричних схем і забезпечення відповідних кліматичних умов в конструкції вагонів високошвидкісних потягів встановлюється ряд вентиляторів з приводом від електродвигунів. До того ж для потягів, призначених для роботи в зимових умовах в конструкції системи вентиляції, кондиціонування повітря у вагонах, охолодження електроустаткування локомотивів, у каналах забору повітря із зовні, розміщують сепаратори, що відділяють сніг від повітря і перешкоджають його проникненню в салони вагонів, облаштування кондиціонування і охолодження [4].

Усі ці конструктивні рішення підвищують затрати енергії на живлення допоміжних потреб.

Ще більшими витратним супроводжується процес забезпечення охолодження тягових двигунів і електроустаткування на тяговому електрорухомому складі, що експлуатується на магістралях України. Основним робочим компонентом систем охолодження є вал, що обертається, з різними навісними елементами (в нашому випадку вентиляторні колеса, елементи ротора електродвигунів), що називається ротором, який застосовується практично в усіх областях техніки, тому наукові дослідження, присвячені створенню нових або удосконаленню існуючих роторних машин, є актуальними як з початку їх створення, так і на

сучасному етапі їх розвитку так і у перспективі.[5] Багатий історичний досвід в конструюванні і розрахунку роторів [6] загострює увагу на шляхах зниження механічних втрат, наприклад, за рахунок оптимізації конструкції їх опор, на базі сучасних матеріалів і технологій. Найраціональнішим рішенням при конструюванні роторних машин є створення машин з жорстким ротором, що обертається в пружних опорах [7,8]. Такими сучасними опорами, позбавленими багатьох недоліків, властивих традиційним підшипникам, є новий тип опор валів і роторів — магнітні підшипники (МП) [9-11].

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Особливість даного типу підшипників ґрунтується на використанні принципу магнітної левітації феро-магнітних тіл (зокрема, роторів) в магнітному або електромагнітному полях, що створюються зовнішніми джерелами [5]. Магнітні підшипники є варіантом пружно-демпферних опор, а їх особливістю є використання магнітного поля для реалізації стійкої левітації роторів.

Сьогодні на підставі аналізу наукових монографій, статей в журналах і збірках, а також доповідей міжнародних конференцій і симпозіумів можна виділити декілька актуальних тем дослідження в області магнітних підшипників [5]:

- активні магнітні підшипники;
- пасивні магнітні підшипники (чи МППМ);
- надпровідникові магнітні підшипники;
- мікропідшипники;
- магнітопроводи з обмотками (виконуючі елементи СУ);

— нові технології управління і моніторингу систем з МП;

— питання промислового впровадження МП, безпеки і надійності;

— моделювання і ідентифікація математичних моделей, що описують процеси в МП; накопичення інформації про особливості експлуатації систем МП і їх статистичний аналіз;

— впровадження в конструкцію МП різних елементів і матеріалів;

— самонесучі безвальні електродвигуни;

— розвиток технологій самозондування із застосуванням МП для контролю вібрацій і діагностики несправностей в режимі реального часу.

**Мета статті.** Метою проведених попередніх розрахунків і конструкторських розробок є обґрунтування можливості зниження механічних втрат у підшипникових опорах охолоджувального, кліматичного і компресорного устаткування тягового електрорухомого складу, що понизить його сумарну витрату на живлення допоміжних потреб.

**Результати досліджень.** Для досягнення поставленої мети розраховані параметри магнітопроводів електромагнітного підшипника і генератора на постійних магнітах пропонованого пристрою електромагнітного розвантаження (ПЕМР), вибра-

ні матеріали і пропрацьоване вписування ПЕМР в існуючі конструкції рухомого складу електро-тяги.

В якості об'єкту для проведення дослідження і конструкторських опрацювань взято устаткування електровозу ВЛ80С. На кожній секції електровоза встановлені чотири мотор-вентилятори, що приводяться в обертання трифазними асинхронними електродвигунами АЭ- 92-4 (потужність 40кВт, частота обертання ротора 1405 об/хв., фазний струм 90А, маса 390 кг). Компресори КТ-6ЭЛ (по одному на секцію) приводяться в роботу такими ж електродвигунами.

Особливістю відцентрових вентиляторів ЦВ-19 № 6,5 є використання обох кінців валу електродвигуна для приводу двох протилежних по напрямку обертання вентиляторів (рис.1).

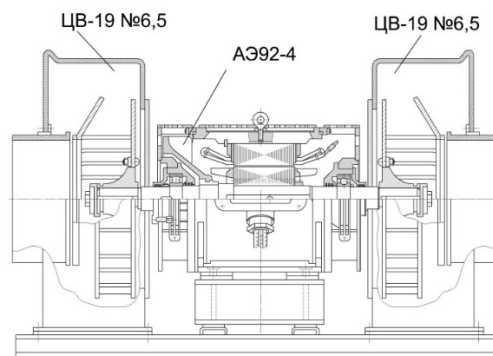


Рис. 1. Блок вентиляторів ЦВ-19 №6,5

Чотири вентилятори ЦВ- 19 №6,5 охолоджують випрямляючі установки ВУК-4000Т, блоки гальмівних резисторів, згладжуючих реакторів і теплообмінники тягових трансформаторів.

Два вентилятори ЦВ- 19 №7,6, кожен з яких приводиться в рух асинхронним двигуном АЭ- 92-4, охолоджують тягові електродвигуни у візках.

Режим роботи електродвигунів хоч і регулюється у залежності від рівню навантаження тягових двигунів, проте витрати на забезпечення повітрям залишаються значними.

Потужність витрачається на подолання опору повітряним потокам, обертання конструкційних елементів вентиляторів і подолання тертя в підшипникових опорах.

Для скорочення витрат потужності в підшипникових опорах розглянемо можливість застосування в системах вентиляторів пристроїв електромагнітного розвантаження (ПЕМР).

ПЕМР є електромагнітом, що забезпечує розвантаження підшипника кочення, обмотка якого отримує електроживлення від вбудованого електрогенератора. Електромагніт і електрогенератор об'єднані електрично і конструктивно в один функціональний пристрій.[12]

При обертанні ротора відбувається самозбудження електрогенератора, і електромагніт ство-

рює в певному напрямі силу, прикладену до ротора, тим самим, розвантажуючи підшипник кочення. При необхідності частина статора ПЕМР заливається компаундом і стає суцільним диском, що не має електричних виводів.

Зазвичай для центрування роторів машин застосовують електромагнітні підшипники (ЕМП) двох видів :

— радіальні електромагнітні підшипники (РМП), кожен з яких забезпечує центрування по двох взаємно перпендикулярних поперечних осях;

— осьовий електромагнітний підшипник (ОМП), який обмежує переміщення ротора в осьовому напрямку.

У зв'язку з тим, що в нашому випадку розвантажувальний пристрій доповнює штатні підшипники асинхронного двигуна, проведемо розрахунок тільки радіального електромагнітного підшипника.

Конструктивно магнітна система РМП складається з нерухомого пакету статора з котушками збудження і ротора, що обертається, та який притягує статор. Котушки збудження розташовані на зубцях статорів, повернутих до ротора [13].

Найбільш поширеним по розподілу навантаження між зонами в РМП (у машинах з горизонтальним розташуванням валу) є випадок, коли зусилля, що вздовж вертикальної осі, наприклад, сила ваги ротора, що діє на опору, розподілена між двома верхніми зонами РМП, осі яких спрямовані під кутом 45° до вертикальної осі. В цьому випадку кожна з двох верхніх навантажених зон РМП сприймає частину навантаження. Для режиму максимального навантаження це співвідношення має наступний вигляд

$$F_{3M} = 0,707F_M, \tag{1}$$

де  $F_{3M}$  — навантаження, що сприймається робочою зоною РМП, Н;

$F_M$  — вантажопідйомність опори — навантаження, яке повинне компенсувати ЕМП (для випадку з блоком вентиляторів (рис.1), — це маса ротора асинхронного двигуна і двох коліс вентилятора насаджених на нього, приймаємо 2000 Н. Кожну пару зубців робочої зони РМП, по яких протікає однаковий робочий магнітний потік, можна розглядати як автономну двополосну магнітну систему, в якій кожен зубець створює тягове зусилля  $F_Z$ . Максимальне значення цього зусилля  $F_{3M}$  пов'язане з вантажопідйомністю опори  $F_M$  співвідношенням наступного виду

$$F_{3M} = 0,707F_M / Z_3k_p, \tag{2}$$

де  $Z_3$  — кількість зубців у робочій зоні (для 8-миполосного ЕМП  $Z_3=2$ );

$k_p$  — коефіцієнт, що враховує розподіл зубців в зоні. Для  $Z=8$   $k_p = 0,924$  [2].

З урахуванням співвідношення (2) вираз (1) для необхідної площі зубця РМП матиме такий вигляд

$$S_Z = 0,707F_M / F_{1P}Z_3k_p, \tag{3}$$

де  $F_{1P}$  — розрахункова величина питомої тягової зусилля

$$F_{1P} = F_{1M} / k_B^2, \tag{4}$$

де  $F_{1M}$  — питомий тягове зусилля. При використанні в якості матеріалу магнітопроводу РМП тонколистової електротехнічної сталі з індукцією насичення  $B_M = 1,6$  Тл і з урахуванням ефекту «розпушення» магнітного потоку в зазорі між

статором і ротором  $F_{1M} = 80$  Н/см<sup>2</sup>;

$k_B^2$  — коефіцієнт індукції. Для магнітопроводів з паралельними стінками, через насичення в основанні зубця, слід приймати  $k_B = 1,1$ . Визначимо основні розміри елементів магнітопроводу РМП, які відповідають необхідній площі зубця.

Діаметр розточування РМП, см

$$D_{S1} = \sqrt{0,9 \frac{F_M}{F_{1P}k_Sk_Pk_L}}, \tag{5}$$

де  $k_S$  — співвідношення між площею, зайнятою зубцями, і загальною площею магнітопроводу. Для невеликих машин у яких зазвичай використовують жорсткі котушки збудження, намотані на шаблон і потім встановлені на зубці,  $k_S = 0,6$ ;

$k_L$  — коефіцієнт довжини. Ставлення внутрішнього діаметру пакету статора  $D_{S1}$  (діаметр розточування) до довжини пакету  $L_{S1}$ . Ці розміри, головним чином, визначають всі інші розміри магнітопроводу РМП: розміри зубців, пазів, зовнішній діаметр і ін.

$$k_L = L_{S1} / D_{S1} \tag{6}$$

З практики застосування РМП для не великих машин приймемо  $k_L = 0,4$ , тоді внутрішній діаметр розточення магнітопроводу складе 110 мм.

Для вибору величини проміжку  $\delta_0$  скористаємося даними, що характеризують існуючу на практиці зміну проміжку  $\delta_0$  від діаметру розточування  $D_{S1}$  для найбільш поширених типів машин з ЕМП [2]. Методом інтерполяції вибираємо  $\delta = 0,54$  мм.

Визначимо розміри котушок збудження, які потрібні для створення робочого магнітного потоку. Початковим параметром для цього є допустима щільність струму  $i_C$  в проводах котушок, яка зазвичай обмежена граничними робочими температурами і інтенсивністю охолодження РМП. У першому наближенні для котушок з класом ізоляції Н і при охолодженні ЕМП повітряним потоком зі швидкістю близько 0,2 м/с можна прийняти для номінального режиму розрахункову величину  $i_{CP} = 3$  А/мм<sup>2</sup>.

Намагнічуюча сила котушки АW при вибраному проміжку  $\delta_0$  у першому наближенні можна визначити із співвідношення, ампер-витків

$$AW = 8 \cdot 10^2 B_{OH} \delta_0 k_H, \quad (7)$$

де  $B_{OH}$  — індукція у проміжку при номінальному навантаженні, Тл. Приймаємо 1,1Тл;

$k_H = 1,25$  — коефіцієнт магнітопроводу.

Площа поперечного перерізу котушки збудження, мм<sup>2</sup>

$$S_C = AW / i_{CP} k_C, \quad (8)$$

де  $k_C$  — коефіцієнт заповнення котушки міддю, який залежить від типу проводу і ізоляції котушки і, в першому наближенні, може бути прийнятий 0,6.

Кількість витків в котушці W, витків

$$W = AW / I_H, \quad (9)$$

де  $I_H$  — заданий номінальний струм у котушці,  $I_H = 3A$

Площа перерізу провідника котушки, мм<sup>2</sup>

$$q_P = S_C \frac{k_C}{W}, \quad (10)$$

По отриманому значенню  $q_P$  і з урахуванням умов роботи вибираємо тип обмотувального проводу (ПЭТ- 155 зовніш. діаметр 1,2 мм) і стандартні значення обмотувального проводу котушки, а також визначений мінімально допустимий радіус його вигину  $R_C$ .

Ширина зубця у розточці по дузі

$$b_{Z0} = \pi D_{S1} \frac{k_S}{Z} \quad (11)$$

Для забезпечення вільного встановлення котушок на зубці поміж котушками сусідніх зубців передбачений проміжок  $b_{KL}$ .

Ширина зубця з урахуванням проміжку складе 24 мм.

Довжина зубця вздовж повздовжньої осі статора з (6) — 44 мм.

Висоту котушки  $h_C$ , виходячи з отриманої площі поперечного перерізу  $S_C$ , визначено у 22 мм з співвідношення  $h_C = S_C / b_C$ , при ширині котушки (173 витки проводу ПЭТ-155, зовніш.  $\varnothing 1,2$  мм<sup>2</sup>)  $b_C = 15$  мм.

Для встановлення котушки на зубець так, щоб вона не торкалася ротора і була надійно закріплена на зубці за допомогою клину, висота зубця  $h_Z$  повинна бути обрана більше, ніж висота котушки  $h_C$ , на величину виступу  $h_B$

$$h_Z = h_C + h_B, \quad (12)$$

$$h_B = h_K + h_P, \quad (13)$$

де  $h_K$  — висота клину з урахуванням ізоляційних прокладок;

$h_P$  — висота буртика, на який опирається клин.

Приймаємо  $h_B = 3$  мм, тоді висота зубця  $h_Z = 29$  мм

Висоту спинки  $h_S$  у магнітопроводі РМП приймаємо рівну ширині зубця в основі, тбто  $h_S = b_{Z1} = 24$  мм.

Тоді зовнішній діаметр статора складе

$$D_{S2} = D_{S1} + 2(h_C + h_S), \quad (14)$$

де  $h_Z$  — висота зубця;

$h_S$  — висота спинки.

$D_{S2} = 216$  мм. Повздовжній розмір статора  $L_S = 66$  мм

Граничне значення внутрішнього діаметра пакета ротора  $D_{R2}$  визначається з умови рівності

площ зубця і поперечного перерізу спинки пакета ротора

$$D_{R2} \leq D_{S1} - 2(\delta_0 + b_{z1}) \quad (15)$$

Довжину пакету ротора  $L_{R2}$  вибираємо більше довжини пакета статора, щоб перекрити можливі неточності і температурні деформації валу ротора по довжині

$$L_{R2} \geq L_{S1} + 4\delta_0 \quad (16)$$

У [14] при розгляді восьми-полюсного ЕМП формують завдання оптимізації його геометрії таким чином. Задається об'єм, займаний пакетом стали, тобто задається зовнішній діаметр  $D$  і довжина пакету  $l$ . Також задається проміжок  $\delta$  і допустима щільність струму  $j_{max}$ . Вимагається знайти діаметр цапфи  $d$  і ширину полюса  $t$ , при яких тягове зусилля було б максимальним, а індукція у проміжку при цьому була б рівна  $B_{max}$ .

Індукцію в проміжку знаходять із закону Ампера для магнітного ланцюга, по якому МДС, що створювана котушками обох полюсів, дорівнює сумі падінь магнітної напруги в двох повітряних проміжках і в сталі. Магнітний ланцюг не насичений, тому для простоти магнітним опором сталі нехтують.

Завдання оптимізації геометрії підшипника математично зводиться тепер до завдання на умовний екстремум: вимагається знайти максимум функції  $F(d, t)$  за додаткової умови  $B(d, t) = B_{max}$ , яку можна записати у вигляді рівняння

$$F(d, t) = \left[ \frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t \right] \left[ \frac{\pi d}{2} - t \right] - \frac{B_{max}}{C_B} = 0 \quad (17)$$

де  $C_B$  — константа, що визначається відношенням

$$C_B = \frac{\mu_0 k_{Cu} j_{max}}{2\delta}$$

В зазначеному виразі  $\mu_0$  — магнітна постійна,  $k_{Cu}$  — коефіцієнт заповнення площі пазу міддю, орієнтовно  $k_{Cu} = 0,3 - 0,5$ .

Метод рішення такої задачі добре відомий. Формують функцію  $\Phi(d, t) = F(d, t) + \lambda \phi(d, t)$ , де  $\lambda$  — множник Лагранжа. Три невідомих величини  $d$ ,  $t$  і  $\lambda$  знаходять з сумісного рішення рівняння (15) з двох рівнянь

$$\frac{\partial \Phi(d, t)}{\partial d} = 0; \frac{\partial \Phi(d, t)}{\partial t} = 0 \quad (18)$$

Рішення задачі дається співвідношенням

$$t = 0,2D - 0,993 \sqrt{\frac{B_{max}}{C_B}} \quad (19)$$

$$d = 0,5D + 0,273t \quad (20)$$

$$C_B \geq \frac{B_{max}}{D^2 / 64} \quad (21)$$

Видно, що в оптимальному підшипнику внутрішній діаметр  $d$  має бути трохи більше половини зовнішнього діаметру  $D$ . Ширина полюса  $t$  залежно від співвідношення між вибраними значеннями параметрів  $B_{max}$ ,  $j_{max}$  і  $\delta$  може мінятися в певних межах. Зазвичай ці параметри вибирають так, щоб полюс займав приблизно половину полюсного ділення, рівного  $\pi d / 8$ .

Необхідне значення здатності  $F_{max}$ , що несе, може бути досягнуте відповідним вибором довжини пакету сталі  $l$ .

Подовжній розмір статора  $l_C = l + 2t_0$ , где  $t_0 = (\pi d / 8 - t) / 2$  - довжина лобової частини обмотки.

За результатами розрахунку і оптимізації магнітна система восьмиполюсного радіального підшипника вантажопідйомністю 200 кг приведена на рис.2.

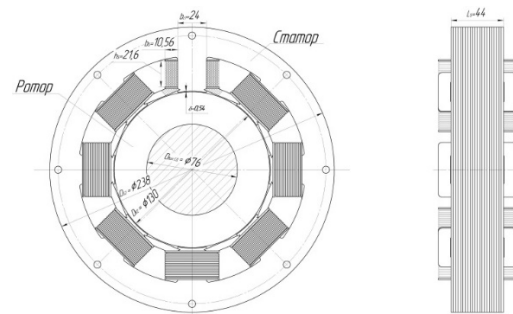


Рис. 2. Розрахункова магнітна система РМП для блоку вентиляторів ЦВ-19 №6,5

Вище розрахована і спроектована перша частина пристрою електромагнітного розвантажувача (ПЕМР) — радіального електромагнітного підшипника (РЕМП). При нормальному режимі роботи РЕМП струм споживання складає 12А, опір обмотки котушки — 0,73 Ом, сумарний опір системи — 0,365 Ом, відповідно напруга — 4,38 В.

Необхідно розрахувати другу частину ПЕМР — генератор, конструкція якого складається з нерухомого статора і ротора, фіксованого на осі кріплення колеса вентилятора.

Критеріями вибору генератора є мінімальні габаритні розміри, максимальна простота його конструкції.

Таким вимогам відповідає трифазний генератор, статор якого є набором котушок збудження,

розташованих на діелектричній основі, нерухомо закріпленим в корпусі ПЕМР. В якості ротора — плоский металевий диск з вмонтованими постійними магнітами.

Основний показник генератора — це напруга, знаючи яку можна розрахувати усі інші параметри, такі як струм і потужність генератора в цілому.

Напруга котушок генератора залежить від кількості витків в котушках, від магнітної індукції магнітів, і від швидкості, з якою міняється магнітне поле.

Для розрахунку напруги генератора скористаємося формулою

$$E = B \cdot V \cdot L, \quad (22)$$

де  $E$  — напруга генератора, В;

$B$  — магнітна індукція магнітів, Тл;

$V$  — швидкість руху магнітів, м/с;

$L$  — активна довжина провідника, м.

Значення величини магнітної індукції неодимових магнітів  $B$  складає в середньому біля 1,25Тл, з урахуванням розсіювання в проміжку, приймаємо найгірший варіант  $B = 0,8$ Тл. Для ротора прийняті неодимові магніти прямокутної форми 50х6х5. Ротор і статор генератора відповідає габаритам розрахованого РЕМП, приведений на рис.3.

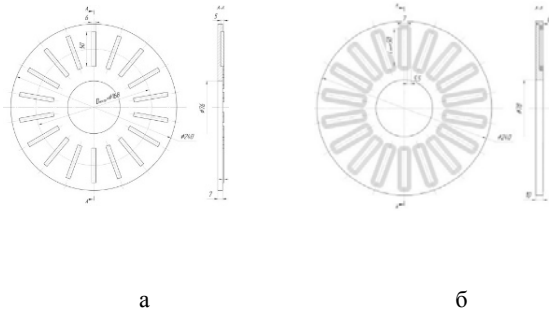


Рис. 3. Ротор і статор генератора ПЕМР:  
а – ротор; б – статор

Швидкість руху магнітів  $V$  розрахуємо згідно діаметру середини довжини магнітів — 0,168 м при мінімальній частоті обертання валу електродвигуна 500 об/хв. За формулою

$$v = \omega R, \quad (23)$$

де  $v$  — лінійна швидкість магнітів, м/с;

$\omega$  — кутова швидкість, рад/с;

$R$  — радіус кола.

Активна довжина провідника  $L$  — це та довжина мідного проводу, яка потрапляє під дію магніту, оскільки саме тільки та ділянка проводу виробляє електричний струм, який потрапляє під магнітне поле магнітів. Для дискових аксіальних генераторів довжина активного провідника дорівнює довжині магнітів, тобто 50мм (0,050 м). Для фази генератора (6 котушок по 75 витків в кожній) загальна довжина активного провідника складе 22,5 м.

Таким чином, напруга фази генератора при 500 об/хв складе 79В.

Напруга генератора росте лінійно залежно від обертів, означає що при 1000 об/хв буде 158В, а при 1500 об/хв — 237В.

Якщо з'єднати фази зіркою, то можна напругу підвищити в 1,7 разу.

Фактично за рахунок не повного перекриття магнітами котушок, біля 30% активної зони не бере участь у виробленні напруги, отже, розрахункову напругу слід зменшити на 30% що складе  $E = 55,3$ В при 500 об/хв.

У генераторі що складається з 18 котушок всього  $18 \cdot 75 = 1350$  витків, це по 450 витків у фази. Довжина одного витка в середньому приблизно 0,135 м, це означає що сумарна довжина проводу фази  $0,135 \cdot 450 = 60,75$ м. Опір одного метра мідного проводу перерізом  $0,7 \text{ мм}^2$  дорівнює 0,0469 Ом. Опір фази  $60,75 \cdot 0,0469 = 2,85$ Ом. При з'єднанні фаз трикутником струм генератора складе 27,72А.

Необхідно врахувати опір проводу, що йде від генератора до ЕМП, опір діодного мосту, на якому падає до 1В напруги, опір самого ЕМП, зміна опору генератора під час роботи, що може скласти до 50% втрат від потужності, і у результаті струм може виявитися менше за розрахунковий. І оскільки важко врахувати усі втрати доцільно зменшити розрахункове значення на 30%, що складе струм 19,4 А. При необхідності можна з'єднати фази зіркою, збільшивши струм в 1,7, до 32,98 А.

Розрахунковий струм споживання ЕМП складає 15А в нормальному режимі роботи, отже, спроектований аксіальний трифазний генератор на постійних магнітах забезпечить роботу проєктованого пристрою електромагнітного розвантаження для блоку вентиляторів ЦВ-19 №6,5.

Для регулювання струму споживання на корпусі ПЕМР передбачений блок управління. Конструктивне ПЕМР опрацьовано на рівні ескізного проєкту і представлено на рис.4.

Збільшення габаритних розмірів у порівнянні з існуючою конструкцією блоку вентиляторів склало 72 мм по посадочних місцях з кожного боку асинхронного електродвигуна.

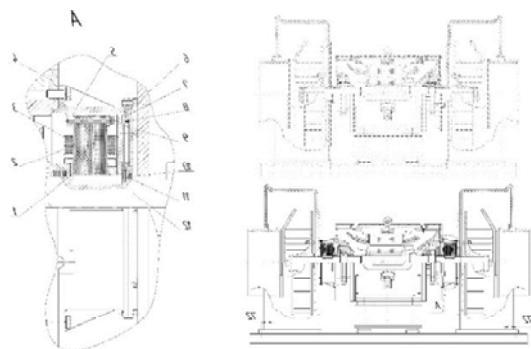


Рис. 4. Розміщення ПЕМР в блоці вентиляторів ЦВ-19 №6,5:

- 1 – залізо магнітопроводу ротора ЕМП;
- 2 – залізо магнітопроводу статора ЕМП;
- 3 – котушки збудження статора ЕМП;
- 4 – корпус асинхронного ЕД; 5 – корпус ПЕМР;
- 6 – диск ротора аксиального генератора ПЕМР;
- 7 – диск статора генератора ПЕМР;
- 8 – котушки збудження статора генератора;
- 9 – неодимові магніти ротора; 10 – ущільнення;
- 11 – втулка; 12 – вал електродвигуна

**Висновок.** Таким чином модернізація енергоємного устаткування тягового електрорухомого складу шляхом вбудовування пристроїв електромагнітного розвантаження дозволить:

— зменшити величину динамічних і статичних навантажень на механічні опори, що відповідно зменшить знос і збільшить довговічність підшипників;

— понизить механічні втрати в підшипникових вузлах, тим самим значно скоротить втрати потужності на допоміжні потреби;

— за рахунок зниження навантажень в підшипниках скоротиться витрата дорогого мастила, а також технологічних операцій з її контролю і зміни.

В подальшому для перевірки вантажопідйомності і впливу роботи пристрою розвантаження на підшипники кочення потрібно провести випробування в лабораторних умовах шляхом порівняння їх шумо-вібраційних параметрів в різних умовах роботи, що моделюють роботу блоків вентиляторів локомотиву.

#### Література

1. Сибикин Ю. Д., Чулков Л. З., Кухаренко И. Г. Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Москва - Берлин: Директ-Медиа, 2018. 74 с.
2. Расход электроэнергии на собственные нужды. URL: <http://www.poezdvl.com/ekonomia-elektroenergii-na-podvizhnom-sostave/raskhod-elektroenergii-na-sobstvennyye-nuzhdy.html> (дата обращения: 04.10.2019).
3. Варченко Е. В., Чумак В. В., Оливсон В. М. Модернизация системы вентиляции электровозов переменного тока ВЛ80. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Наука и прогресс транспорта.* Днепр, 2008. №22. С. 10-12.

4. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие / И.П. Киселев и др.; под ред И.П. Киселева, Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. Т.2. 372 с.
5. Мартыненко Г.Ю. История, актуальные проблемы, методы и средства анализа явлений роторной динамики с учетом традиционных и магнитных подшипников. *Вісник НТУ «ХП».* Харьков, 2014. № 58 (1100). С. 77-131.
6. Мартыненко Г.Ю. Магнитные подшипники как упруго-демпферные опоры роторов с управлением жесткости. *Вісник НТУ «ХП»* : зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХП», 2008. № 47. С. 111-124.
7. Кельзон А.С., Журавлев Ю.Н., Январев Н.В. Расчет и конструирование роторных машин. Ленинград: Машиностроение, 1977. 288 с.
8. Кельзон А.С., Циманский Ю.П., Яковлев В.И. Динамика роторов в упругих опорах. Москва: Наука, 1982. 280 с.
9. Schweitzer G., Bleuler H., Traxler A. Active magnetic bearings. Zurich: ETH, 1994. 244 p.
10. Maslen E.H. Magnetic Bearings. Virginia: University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering Charlottesville, 2000. 231 p.
11. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. Санкт Петербург : Политехника, 2003. 206 с.
12. Конструкторская проработка ряда радиальных и радиально-осевых комбинированных подшипников с электромагнитной разгрузкой / Я. З. Гузельбаев и др. *Вестник Казанского технологического университета.* Казань, 2013. №6. С. 151-153.
13. Верещагин В.П., Рогоза А.В., Савинова Т.Н. Методика проектирования электромагнитных подшипников. *Вопросы электромеханики.* 2009. Т.113. С. 3-12.
14. Щеклеина И.Л., Угольников А.Е., Горелова А.В. Расчет радиального активного магнитного подшипника. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2017. № 5. С. 220-229.

#### References

1. Sibikin YU. D., CHulkov L. Z., Kuha-renko I. G. Racional'noe ispol'zovanie toplivno-energeticheskikh resursov. Moskva - Berlin : Direkt-Media , 2018. 74 p.
2. Raskhod elektroenergii na sobstvennyye nuzhdy. URL: <http://www.poezdvl.com/ekonomia-elektroenergii-na-podvizhnom-sostave/raskhod-elektroenergii-na-sobstvennyye-nuzhdy.html> (date of the application: 04.10.2019).
3. Varchenko E. V., CHumak V. V., Olivson V. M. Mo-dernizaciya sistemy ventiljacii elektrovozov perezmen'nogo toka VL80. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. Nauka i progress transporta. Dnepr, 2008. №22. P. 10-12.
4. Vysokoskorostnoj zheleznodorozhnyj transport. Obshchij kurs : ucheb. posobie / I.P. Kiselev i dr. ; pod red I.P. Kiseleva, Moskva: FGBOU «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2014. T.2. 372 p.
5. Martynenko G.YU. Istoriya, aktual'nye problemy, metody i sredstva analiza yavlenij rotornoj dinamiki s uchetom tradicionnyh i magnitnyh podshp-nikov.

- Visnik NTU «HPI». Har'kov, 2014. № 58 (1100). P. 77-131.
6. Martynenko G.Yu. Magnitnye podshipniki kak uprugodempfernye opory rotorov s upravlyae moy zhestkost'yu. *Visnyk NTU «KhPI» : zb. nauk. prac'*. Kharkiv, NTU «KhPI», 2008. № 47. P.111–124.
  7. Kel'zon A.S., Zhuravlev Yu.N., Yanvarev N.V. Raschet i konstruirovaniye rotornykh mashin. Leningrad: Mashinostroeniye, 1977. 288 p.
  8. Kel'zon A.S., Cimanskij Yu.P., Yakovlev V.I. Dinamika rotorov v uprugih oporah. Moscow: Nauka, 1982. 280 p.
  9. Schweitzer G., Bleuler H., Traxler A. Active magnetic bearings. Zurich: ETH, 1994. 244 p.
  10. Maslen E.H. Magnetic Bearings. Virginia: University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering Charlottesville, 2000. 231 p.
  11. Zhuravlev, Yu.N. Aktivnye magnitnye podshipniki: Teoriya, raschet, primeneniye. St. Petersburg : Politehnika, 2003. 206 p.
  12. Konstruktorskaya prarabotka ryada radial'nyh i radial'no-osevyh kombinirovannykh podshipnikov s elektromagnitnoy razgruzkoj / YA. Z. Guzel'baev i dr. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universi-teta. Kazan', 2013. №6. P. 151-153.
  13. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V., Savinova T.N. Metodi-ka proektirovaniya elektromagnitnykh podshipnikov. Voprosy elektromekhaniki. 2009. T.113. P. 3-12.
  14. Shchekleina I.L., Ugol'nikov A.E., Gorelova A.V. Raschet radial'nogo aktivnogo magnitnogo pod-shipnika. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2017. № 5. S. 220–229.

**Чигирик Н.Д., Сумцов А.Л., Вихопень І.Р., Силенко А.В. Снижение энергозатрат тягового подвижного состава в эксплуатации.**

*Экономическая доступность новых современных материалов с высокими уровнем потребительских характеристик, позволяет рассматривать варианты применения новых способов по уменьшению энергопотребления тяговым электроподвижным составом. В статье предлагается использование электромагнитной разгрузки для снижения механических потерь в подшипниковых щитах асинхронных электродвигателей привода вентиляторов охлаждения и компрессоров. Источником самопитания устройства является осевой трехфазный генератор на никодимовых постоянных магнитах. Приведены результаты предварительного проектирования электромагнитной системы устройства и обработки способа его интеграции в уже существующую конструкцию оборудования охлаждения и нагнетания тягового ого состава.*

**Ключевые слова:** тяговый электроподвижной состав, электромагнит, устройства разгрузки, энергопотребление.

**Chygyryk N.D., Sumtsov A.L., Vykhopen I.R., Silenko A.V. Reduction the energy consumption of traction rolling stock in operation.**

*The cooling of traction electric motors, rectifiers and converters, the operation of compressors and air conditioning systems uses 7-15% of the total cost of traction, and in some cases this value reaches 25-30%. Whereas, the estimated minimum required energy consumption for these purposes is estimated at 0.5-3.0%.*

*In order to achieve a calculated level of 0.5-3.0% of electric power to meet own needs, the article presents the calculated parameters of the magnetic circuits of an electromagnetic bearing and a permanent magnet generator that are components of the proposed electromagnetic discharge device. The materials were selected and the incorporation of the electromagnetic unloading device into the existing structures of the traction electric rolling stock was worked out.*

*As an object for the study, the equipment of the VL80S electric locomotive was taken. Four fans cool the rectifier units, brake resistor blocks, smoothing reactors, and traction transformer heat exchangers. Two fans each of which is driven by an induction motor - cool the traction motors in the carts.*

*The mode of operation the electric motors, although regulated depending on the load level of the traction motors, however, the costs of providing air remain significant. Power is spent on overcoming resistance to air currents, rotating the structural elements of fans and overcoming friction in bearing bearings. To reduce them, is proposed to use the electromagnetic discharge devices in fan systems.*

*The device of electromagnetic unloading is an electromagnet, provides unloading of the rolling bearing, the winding of which receives power from the built-in generator. An electromagnet and an electric generator are combined electrically and structurally into one functional device.*

*When the rotor rotates, the self-excitation of the generator occurs, and the electromagnet creates a force in a certain direction applied to the rotor, thereby unloading the rolling bearing.*

*Thus, the modernization of energy-intensive equipment of traction electric rolling stock by embedding electromagnetic discharge devices will allow:*

*- reduce the magnitude of dynamic and static loads on mechanical bearings, respectively, reduce wear and increase the durability of bearings;*

*- reduce mechanical losses in bearing assemblies, thereby significantly reducing power losses for auxiliary needs;*

*- due to lower loads in the bearings, the consumption of expensive oil will be reduced, as well as the technological operations for its control.*

**Key words:** electric traction rolling stock, electromagnet, unloading devices, energy consumption.

**Чигирик Н.Д.** — к.т.н., доцент кафедры Эксплуатация та ремонт рухомого складу, Українського державного університету залізничного транспорту, e-mail: natalia65@ukr.net

**Сумцов А.Л.** — к.т.н., старший викладач кафедри Експлуатация та ремонт рухомого складу, Українського державного університету залізничного транспорту, e-mail: sal-hiit@i.ua.

**Вихопень І.Р.** — аспірант кафедри Експлуатация та ремонт рухомого складу, Українського державного університету залізничного транспорту, e-mail: crownwick@bigmir.net.

**Силенко А.В.** — студент магістрант кафедри Експлуатация та ремонт рухомого складу, Українського державного університету залізничного транспорту, e-mail:

Стаття подана 11.10.2019.