

ДО ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА БАГАТОСИСТЕМНОМУ ЕЛЕКТРОРУХОМОМУ СКЛАДІ ЗАЛІЗНИЦЬ

У статті порушені питання доцільності використання тягових двигунів постійного струму на багатосистемному електрорухомому складі залізниць.

В статье затронуты вопросы целесообразности использования тяговых двигателей постоянного тока на многосистемном электроподвижном составе железных дорог.

Issues of expediency of using the DC traction engines on multi-system electric railway rolling stock are considered in the paper.

Вступ. У теперішній час в багатьох країнах, у тому числі в Україні та інших країнах колишнього СРСР, найбільш перспективним видом тягового двигуна, у тому числі для високошвидкісного електрорухомого складу (ЕРС), вважається асинхронний двигун.

Роботи по застосуванню в якості тягових двигунів асинхронних машин – асинхронних тягових двигунів (АТД) почалися у 70-х роках 20 сторіччя [1, 2].

Не перераховуючи переваги АТД в порівнянні з машинами постійного струму, які загальновідомі і не є метою досліджень у даній роботі, відмітимо недоліки електроприводу з АТД, які особливо гостро можуть проявитись при застосуванні АТД в багатосистемних електровозах, для яких габарити, вага обладнання – це особливо гостра проблема, в порівнянні з односистемним електровозом (електропоїздом). Під багатосистемним мається на увазі ЕРС, який зможе працювати при різних рівнях напруги у контактній мережі як при постійному, так і змінному струмах.

До таких недоліків можна віднести складність схеми тягового перетворювача і системи керування, відносно низький коефіцієнт потужності двигуна, особливо при низькій частоті обертання, який приводить до значних переважень по струму перетворювача та силового електрообладнання.

Тому можна припустити, що при розробці багатосистемного ЕРС є сенс розглянути варіанти, альтернативні для АТД. Однією з таких альтернатив є тяговий електропривод (ТЕД) з вентильними (синхронними) тяговими двигунами (ВТД).

До переваг ВТД можна віднести наступне:

- добрі регульовальні характеристики;
- менш складний тяговий перетворювач;

- можливість роботи з коефіцієнтом потужності, що дорівнює одиниці.

Крім того, у ВТД значно простіше реалізувати режим рекуперативного гальмування. Але досвід розробки ВТД показує, що вентильні синхронні двигуни мають більші, ніж асинхронні двигуни, витрати активних матеріалів на одиницю потужності при однаковій потужності двигунів.

Застосування ВТД на багатосистемному ЕРС – це окрема проблема, яка не входить до даної роботи.

Аналіз літературних джерел. На тяговому рухомому складі залізниць України застосовують в основному колекторні машини постійного або пульсуючого струму з електромагнітним збудженням. Питанням, пов'язаним з їх використанням на ЕРС, присвячені роботи [1...6].

Мета роботи. Дослідити питання ефективності застосування у теперішній час й близькому майбутньому двигунів постійного струму (ДПС) на багатосистемних електровозах (електропоїздах).

Матеріал і результати дослідження.

Нові магнітні матеріали дозволили приступити до робіт по створенню потужних тягових двигунів, які збуджуються постійними магнітами. Перші теоретичні дослідження показали значні переваги такого тягового приводу в порівнянні з АТД [7, 8]:

- двигун на постійних магнітах може мати набагато більшу (45 і більше) кількість пар полюсів, ніж трифазний асинхронний. Це забезпечує настільки великий момент обертання, що стає можливим використання такого двигуна без редуктора, тобто реалізується безредукторний тяговий привод;

- оскільки двигун вже має магнітне поле збудження, то він має підвищений коефіцієнт корисної дії;

- двигун на постійних магнітах забезпечує підвищені потужність й обертальний момент при меншій масі та об'ємі, ніж ДПС, АТД та ВТД традиційного виконання.

Разом з тим, технологія виготовлення таких двигунів значно складніша, ніж двигунів з електромагнітним збудженням. Вона вимагає значних витрат на підготовку виробництва та високої культури праці. Такі двигуни мають у більшості випадків нерозбірну конструкцію магнітної системи.

У машині на постійних магнітах поле збудження відключити неможливо, тому в її середину можуть попасти магнітні частки, наприклад, металевий пи́л від гальмівних колодок.

У результаті старіння матеріалу поле постійних магнітів може слабнути, в результаті чого зменшується обертальний момент. У зв'язку з цим потрібно обирати такий магнітний матеріал, який на протязі терміна служби двигуна залишається стабільним.

Існує ще цілий ряд особливостей двигуна з постійними магнітами.

Враховуючи вищенаведене, а також те, що тягові двигуни з постійними магнітами знаходяться ще на початковій стадії розробок, вони не можуть розглядатися як альтернатива для тягових двигунів багатосистемного ЕРС у теперішній час й у близькій перспективі.

У віддаленому майбутньому, можливо, тягові двигуни з постійними магнітами знайдуть широке застосування.

Порівняємо, з точки зору особливостей використання, колекторні двигуни постійного струму послідовного та паралельного збудження [9]:

- на важких елементах профілю колії (круті підйоми) двигуни паралельного збудження працюють з більшим струмом, ніж двигуни послідовного збудження;

- для ведення поїздів однакової ваги двигуни паралельного збудження повинні мати більшу номінальну потужність, ніж двигун послідовного збудження;

- деяке зниження швидкості двигунів послідовного збудження на важких елементах профілю колії компенсується більш високою швидкістю руху на легких елементах профілю колії. При однакових потужностях двигунів на реальних достатньо довгих ділянках з різким профілем колії загальний час ходу по ділянці електровозу з двигунами послідовного збу-

дження менше часу руху електровозу з двигунами паралельного збудження;

- дуже важливо те, що двигуни послідовного збудження в експлуатації забезпечують краще використання потужності при більш рівномірному їх навантаженні; для виконання однакової поїзної роботи потрібна номінальна потужність двигунів з послідовним збудженням менша, ніж з паралельним;

- при однакових різких змінах напруги на затискачах двигунів, відповідні кидки струмів при послідовному збудженні менші, ніж при паралельному;

- при однаковому розходженні швидкісних характеристик $v = f(I)$ двигуни послідовного збудження мають менше розходження у струмах і тому забезпечують краще використання потужності електровоза, по умовах нагрівання двигунів або зчеплення коліс з рейками.

З точки зору вимог до електрообладнання багатосистемних електровозів важливо, що усі вказані функції регулювання струму в залежності від профілю колії, краще використання потужності, менші кидки струму при різкій зміні напруги на затискачах тощо є природними для двигунів послідовного збудження. Тому не потрібне додаткове обладнання для виконання цих функцій.

Двигуни послідовного збудження більш надійно забезпечують механічну та електричну стійкість [3].

Двигуни послідовного збудження програють двигунам паралельного збудження у стійкості проти розносного боксування. Цей недолік усувається у значній мірі застосуванням різних пристроїв для автоматичного зниження сили тяги двигунів та подачі піску при боксуванні.

Відмітимо, ще такий недолік ДПС, будь-якої системи збудження, як обмежена по умовах струмозйому та механічній міцності колектора, частота обертання та ряд інших відомих недоліків ДПС виключають можливість їх застосування для швидкісного ЕРС (зі швидкістю більше 250 км/год). Оскільки максимальна колова швидкість колектора v_{kmax} при максимальній частоті обертання n_{max} не повинна перевищувати 50...55 м/с для забезпечення стійкості комутації по механічних умовах [10].

Діаметр колектора D_k у більшості сучасних двигунів постійного струму близький до 400 мм. При цьому:

$$n'_{max} = \frac{v_{kmax}}{\pi D_k} \cdot 60 = \frac{55 \cdot 60}{\pi \cdot 0.4} \approx 2630 \text{ об/хв.},$$

$$n_{\max}^* = \frac{v_{k\max}}{\pi D_k} \cdot 60 = \frac{50 \cdot 60}{\pi \cdot 0.4} \approx 2388 \text{ об/хв.}$$

У середньому: $n_{\max} = \frac{n_{\max}^* + n_{\max}}{2} \approx 2500$ об/хв.

Можна сказати, що обмежена по умовах струмозйому та механічній міцності колектора частота обертання дорівнює 2500 об/хв..

Для тягових двигунів електровозів характерно відношення максимальної частоти обертання до номінальної 2...2.6 [9]. Тобто орієнтовна номінальна частота обертання тягових двигунів при номінальній швидкості дорівнює: $n_{\text{ном}} = 950...1250$ об/хв. В залежності від реальних значень діаметра бандажів коліс та передатного відношення тягової передачі швидкість локомотива при вказаних значеннях n_{\max} в середньому складає 250 км/год.

Таким чином, для багатосистемних ЕРС із швидкістю орієнтовно 200 км/год порівняння комплектів тягового приводу з АТД та ДПС з точки зору раціональних габаритів, ваги та рівня надійності є доцільним.

Тягові двигуни постійного струму незалежного збудження не знайшли широкого застосування для контакторно-реостатних електровозів за наступних причин. По-перше, при зміні профілю колії у випадку застосування таких двигунів різко змінювалась би потрібна потужність при незмінній швидкості руху електровозу, що потребує частих переключень у силових колах. По-друге, при незалежному збудженні має місце значна нерівномірність у струмах, які споживаються якорями тягових двигунів. І, на кінець, виникає непроста задача по захисту тягових двигунів від колових вогнів, так як буде відсутнє швидше зменшення е.р.с., яке має місце при послідовному збудженні, що сприяє припиненню колового вогню.

Але при використанні напівпровідникової техніки, особливо на сучасній елементній базі, труднощі по розподілу струмів та захисту можуть бути успішно вирішені, і тому незалежне збудження може бути ефективно застосовано для підвищення тягових властивостей електровозів.

Підводячи висновок, можна відмітити, що найбільший інтерес для багатосистемного ЕРС серед ДПС з різними способами збудження являє двигун послідовного збудження, з точки зору спрощення системи керування тяговим приводом, завдяки його природним властивостям зміни швидкості у широких межах при змі-

ні навантаження. При цьому мається на увазі, що швидкість ЕРС не перевищує 200...250 км/год. При більших швидкостях ЕРС застосування ДПС виключається. Найімовірніше у близькій перспективі при більших швидкостях застосування асинхронних або синхронних (вентильних) двигунів.

Тягова потужність двигуна (потужність на обіді колеса P_T) визначається швидкістю руху v_k та потрібною силою тяги F_k [10]: $P_T = 0.278 F_k v_k$.

Розрахункова потужність тягового двигуна $P_{\text{ном}}$ дорівнює: $P_{\text{ном}} = \frac{P_T}{\eta_3} = \frac{0.278 F_k v_k}{\eta_3}$,

де: η_3 - ККД зубчатої передачі між валом двигуна та віссю колісної пари.

Наприклад, для електровозів при навантаженні від колісної пари на рейки 25 тс сила тяги звичайно дорівнює 59...61 кН. Цьому значенню відповідає потужність тягового двигуна 900...1000 кВт (при $\eta_3 = 0.975$) при розрахунковій швидкості [10].

У теперішній час є можливість створити колекторні тягові двигуни пульсуючого струму потужністю до 1200 кВт [10], 1300 кВт [3].

При розрахунку перетворювальної установки потрібно враховувати експлуатаційний коефіцієнт перевантаження $K_{\text{пз}} = \frac{P_6}{P_T}$, де P_6 - най-

більша потужність, яка розвивається двигуном на протязі однієї хвилини; P_T - годинна потужність двигуна. Звичайно $K_{\text{пз}} = 1.5...1.8$ [9, 10]. Основні показники тягових двигунів з [3, 10, 12] представлені у табл. 1.

У регульованих електроприводах швидкість та момент найчастіше змінюються напівпровідниковим перетворювачем енергії, ввімкненим між двигуном та живильною мережею. З наявності цього перетворювача та зміни швидкості руху ЕРС визначаються особливості режиму роботи тягового двигуна:

- наявність пульсацій у вихідному струмі статичних перетворювачів;
- можливість прикладання до обмоток двигунів напруг, амплітуда яких перевищують номінальні рівні;
- збільшені темпи зміни струму та напруг під час комутації вентилів перетворювача;
- зміна втрат (у сталі та обумовлених струмом намагнічування), незмінних у нерегульованих електроприводах, зі зміною швидкості

(внаслідок регулювання напруги, струму збудження);

- часті перехідні та пуско-гальмівні режими;
- можливість збільшення швидкості понад номінальну через зменшення струму збудження;
- відсутність безпосереднього впливу на двигун з боку мережі.

Таблиця 1

Основні показники тягових двигунів

Тип двигуна та країна виробник	Рік початку випуску	Потужність $P_{ном}$, кВт	Маса двигуна m_d , кг	Питома маса $\frac{m_d}{P_{ном}}$, кг/кВт
Електровози постійного струму				
НБ-406Б (СРСР)	1954	470	5150	10.9
ТЛ-2К (СРСР)	1967	575	4750	8.25
НБ-407Б (СРСР)	1972	720	4675	6.48
НБ-508 (СРСР)	1980	800	4600	5.75
Т-750ФС (Італія)	1975	1125	5000	4.4
АЛ-4846 (ЧССР)	1981	618	5000	8.1
ЭД141У1 (Україна)	1996	728	4750	6.52
СТК-730 (Україна)	2007	730	4750	6.5
ДТК-800	2007	800	3900	4.87
Електровози змінного струму				
НБ-412М (СРСР)	1958	620	5000	7.4
НБ-412К (СРСР)	1963	666	4600	6.8
НБ-418К (СРСР)	1966	740	4075	5.5
НБ-507 (СРСР)	1979	900	4500	5
СТК-520 (Україна)	2007	520	4600	8.85
НБ-511 (Росія)	1982	580	4600	7.93
СВ-317 (ФРН)	1959	720	3750	5.21
АЛ-4442 (ЧССР)	1968	820	2959	3.6
LjH-108-3 (Швеція)	1976	1000	2873	2.87

У сучасних системах керування частотою обертання двигунів постійного струму застосовують схеми на керованих напівпровідникових приладах, які забезпечують керування частотою обертання у широких межах.

Потужність двигунів за останні 50 років зросла більше ніж удвічі. Тому можна сказати, що двигуни потужністю 1300 кВт – це машини граничного виконання, тобто машини, подальше завантаження яких (струмове, магнітне і механічне) у близькій перспективі обмежене фізичними властивостями активних, ізолюючих і конструктивних матеріалів. При дослідженні проблеми створення перетворювальної установки та іншого електрообладнання багатосистемного електровоза можна орієнтуватись на значення номінальної потужності двигуна 1300 кВт, та значення експлуатаційного коефіцієнта перевантаження 1.8.

Для електровозу змінного струму напругу на тягових двигунах доцільно вибирати як деяке раціональне значення із умов проектування не тільки тягових двигунів, а й перетворювальної установки, а також електричного обладнання в цілому. Як правило, це 750...1200 В. Для електровозів постійного струму напруга на затискачах тягового двигуна, як правило, дорівнює половині напруги контактної мережі.

Тягові двигуни практично безперервно працюють в граничних режимах, викликаних коливаннями напруги у контактній мережі та змінами струмів, що споживаються, причому останні варіюють від 0.25 до 2.0 від $I_{ном}$. Зміна напруг у контактних мережах постійного та змінного струмів становить відповідно 2200...4000 В та 19...29 кВ. Ізоляція обмоток двигуна відносно корпусу повинна витримувати випробну напругу $U_{випр} = (2,25U + 2000)$ В, де для двигунів, що отримують живлення від контактної мережі постійного струму, U дорівнює номінальній напрузі на шинах тягової підстанції, а для двигунів, що живляться від контактної мережі через установку трансформатор-випрямляч, величина U дорівнює напрузі неробочого ходу на виході установки при номінальній напрузі на первинній обмотці трансформатора.

Безумовно, що дуже важливо постійно підвищувати надійність двигунів. Одним з ефективних шляхів вирішення цієї задачі є застосування класу ізоляції не менше Н замість класу F, який застосовується у більшості випадків у теперішній час. Ізоляція класу Н при інших рі-

вних умовах буде служити довше, ніж ізоляція класу F, у 1.5...2 рази [11].

Загальні висновки.

1. При швидкостях багатосистемних електровозів до 250 км/год не виключається застосування колекторних двигунів постійного струму. Для кінцевого вирішення питання по вибору виду двигунів (постійного струму або асинхронні) потрібно проаналізувати параметри та порівняти показники системи напівпровідниковий перетворювач-двигун, та іншого обладнання, як при двигунах постійного, так і при асинхронних.

2. Сучасний розвиток напівпровідникової техніки дозволяє забезпечити автоматичне плавне регулювання напруги на тягових двигунах постійного струму незалежного збудження. Тобто доцільно розглянути застосування для багатосистемних електровозів таких двигунів, і при цьому за рахунок використання відповідної системи керування установки перетворювач-двигун забезпечити використання позитивних, з точки зору тяги, якостей як двигунів послідовного, так і незалежного збудження. При цьому оцінити складність схеми, габарити та вагу напівпровідникового перетворювача при використанні ДПС послідовного та незалежного збудження.

3. При розробці теоретичних питань по створенню установки перетворювач-двигун для багатосистемних електровозів потрібно враховувати доцільність максимального використання одного того ж обладнання при різних видах двигунів (ДПС, АТД, ВТД).

4. Потрібно дослідити параметри та показники системи перетворювач-двигун при регулюванні напруг на двигунах по вторинному, або по первинному боках тягового трансформатора, а також комбінований варіант з метою вибору раціонального варіанту для багатосистемного електровозу, з урахуванням властивостей сучасної напівпровідникової елементної бази.

5. Реальним інтервалом потужностей для одного двигуна постійного струму можна вважати 900...1200 кВт. При теоретичних дослідженнях НП при ДПС цей інтервал доцільно прийняти 900...1800 кВт.

6. Напівпровідниковий перетворювач та двигун повинні проектуватися єдиною системою.

7. Для збільшення надійності у двигунах електровозів рекомендується застосовувати ізоляцію класу H, а не F (що найчастіше застосовується у теперішній час).

8. Для розширення діапазону робочих швидкостей система НП-Д (напівпровідниковий перетворювач-двигун) повинна забезпечити при ДПС максимальне можливе використання, як

способу регулювання швидкості, зменшення напруги на затискачах, так й ослаблення поля.

9. Схема НП повинна надійно забезпечити можливе перевантаження по струму у 2...3 рази в порівнянні з номінальним тривалим режимом роботи двигуна (в основному під час пуску електровозу).

10. Конструктивно систему НП-Д доцільно виконувати у вигляді модулів (на один або два модуля), передбачивши при цьому максимальну уніфікацію елементів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины: Учебн. для вузов ж.-д. трансп. / Д. Д. Захарченко, Н. А. Романов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
2. Калинин В. К. Электровозы и электропоезда. – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.
3. Безрученко В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу: Навч. посіб. / В. М. Безрученко, В. К. Марченко, В. В. Чумак. – Д.: Вид-во Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
4. Рубчинский З. М. Устройство и работа электропоезда / З. М. Рубчинский, С. К. Соколов. – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.
5. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
6. Раков В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза 1956-1965. - М.: Транспорт, 1966. – 248 с.
7. Концепция перспективного тягового привода. // Железные дороги мира, 1996, № 6 (G. Kratz et al. // Elektrische Bahnen, 1998, № 11. – S. 333-337).
8. Тяговый привод с возбуждением от постоянных магнитов // Железные дороги мира, 2004, № 9 (Т. Klokow et al. // Elektrische Bahnen, 2003, № 3. – S. 107-112).
9. Захарченко Д. Д. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электрические машины и трансформаторы. Учебн. для вузов ж.-д. трансп. / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. – М.: Транспорт, 1968. – 296 с.
10. Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987. – 534 с.
11. Отчет по НИР «Увеличение межремонтного пробега тягового двигателя ЭД-118А после выполнения капитального ремонта в объеме КР2 с восстановлением резерва». – Д.: НПП «Укртранскад», 2007. – 67 с.
12. Отчет по НИР «Экспертиза технической документации электровоза ДЭ1» (НИР № 8 СНЦ-284/96-505.96-ЦТех от 20.06.96 по заказу Укрзалізниці). – Д.: ДИИТ, 1996. – 58 с.

Надійшла до редколегії 30.01.08.