

В. І. Носков¹, В. С. Блиндюк², М. В. Мезенцев¹, Г. В. Гейко¹

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

² Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТРАНСМІСІЇ ТА ЇЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ КОЛІСНОЇ МАШИНИ

Анотація. Предметом статті є дослідження трансмісій і систем управління спеціальних колісних машин та їх порівняльний аналіз. Проведена робота показала, що основним типом трансмісії, яка застосовується в колісних машинах спеціального призначення є гідромеханічна трансмісія, яка має ряд переваг. Але, в той же час, їй притаманні певні недоліки. Останнім часом намітилася тенденція переходу до електромеханічної трансмісії, яка перевершує гідромеханічну по економічності, регульовальним властивостям і компоновальною гнучкістю. З'являється можливість в кожному колесі мати тяговий електродвигун (мотор-колесо). Виконано порівняння різних виконань електромеханічної трансмісії. З урахуванням наявних напрацювань і досвідом експлуатації асинхронних тягових двигунів на рухомому складі, зроблено висновок про його найбільш реальну застосовність в трансмісіях колісної машини. Для колісної машини спеціального призначення пропонується використання електромеханічної трансмісії з асинхронними тяговими двигунами, мікропроцесорною системою управління та накопичувачем енергії.

Ключові слова: електромеханічна трансмісія, система управління трансмісії, накопичувач енергії.

Вступ

Сучасні спеціальні колісні машини (СКМ) повинні надійно працювати при різних дорожніх та кліматичних умовах і володіти високими параметрами маневреності та економічності. При цьому вчені та конструктори постійно вирішують науково-технічні задачі, які спрямовані на підвищення тактико-технічних характеристик СКМ. Рішення даних задач можливе за рахунок якісного поліпшення конструкції енергетичної установки і конструкції трансмісії. Слід зазначити, що, як правило, в даний час на всіх СКМ застосовується дизельний двигун, який найбільш задовольняє за сукупністю ряду вимог, тому останнім часом модернізацію СКМ виробляють за рахунок розробки трансмісій з найкращими параметрами. Таким чином, науково-технічні задачі дослідження та вдосконалення конструкцій трансмісій для СКМ є актуальними і в даний час.

Аналіз літератури. Трансмісія сучасної СКМ являє собою сукупність вузлів, які пов'язують колінчастий вал двигуна з ведучими колесами машини для передачі потужності, що виробляється двигуном, і розподілу її між провідними колесами. В першу чергу вона повинна забезпечувати високі тягово-швидкісні та паливо-економічні характеристики, високий коефіцієнт корисної дії (ККД), мінімальні габаритні розміри і вагу, високу надійність в експлуатації, малий обсяг обслуговування та ремонтпридатність [1]. У зв'язку з цим вченими і конструкторами розроблено, досліджено та впроваджено велику різноманітність конструкцій трансмісій. При цьому, для забезпечення підвищеної прохідності та маневреності на СКМ впроваджують тільки ті конструкції трансмісій, які роздають потік потужності на всі колеса. Також частина типів трансмісій не підходять через потужність дизельного двигуна, що застосовується на СКМ [2, 3].

Основним типом трансмісії, яка застосовується на колісних машинах спеціального призначення, є гідромеханічна (ГМТ). Останнім часом намітилася

тенденція переходу до електромеханічної трансмісії (ЕМТ). Вибір типу трансмісії та її системи управління (СУ) розглядається як рішення багатofакторної задачі, яка враховує призначення машини, умови експлуатації, необхідні тягові та гальмові характеристики, показники надійності, витрату палива та ряд інших чинників.

ГМТ являє собою єдиний агрегат, який складається з узгоджувальної передачі, гідротрансформатора, коробки передач з фрикційними муфтами, гідродинамічного гальма-уповільнювача та вузлів гідравлічної системи. Структурна схема ГМТ для чотирьохколісної машини з приводом на два колеса наведена на рис. 1 [4].



Рис. 1. Структурна схема гідромеханічної трансмісії з приводом на два колеса

ГМТ, у порівнянні з ЕМТ, має меншу металомісткість, виключає споживання кольорових металів, що входять до складу тягових генераторів і електродвигунів. У той же час, необхідність забезпечення високих тягових властивостей машини вимагає установку з гідротрансформатором додаткової коробки передач. Система управління перемиканням та блокуванням гідротрансформатора включає в

себе виконавчі та регулюючі механізми гідросистеми та електронний блок управління, який взаємопов'язаний з електронним блоком управління двигуна (дизеля).

При збільшенні навантаження на машину різко знижується ККД гідротрансформатора, тому діапазон економічного регулювання моменту у гідротрансформаторі виявляється значно нижче необхідного. ККД механічної частини трансмісії визначається як

$$\eta_m = \eta_{гмт} + \eta_{пм}, \quad (1)$$

де $\eta_{гмт}$ – ККД ГМТ, $\eta_{пм}$ – ККД провідного моста;

$$\eta_{пм} = \eta_o \eta_k; \quad (2)$$

η_o – ККД головної передачі, η_k – ККД колісної передачі.

При заблокованому гідротрансформаторі ККД ГМТ підвищується на 10-12%. ГМТ у порівнянні з ЕМТ має більш низький ресурс до капітального ремонту, що веде до зростання загальних витрат в період експлуатації, пов'язаний з організацією технічного обслуговування та ремонтом вузлів.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу особливостей трансмісій, що застосовуються на СКМ, а також пропозиція нового рішення для розробників трансмісій, яка дозволить покращити характеристики СКМ вітчизняного виробництва.

Основна частина

ЕМТ є самостійним напрямком у розвитку трансмісій для колісних машин. Можливі кілька варіантів виконання схем ЕМТ: з генератором постійного струму та тяговими двигунами (ТД) постійного струму, з генератором змінного струму, випрямлячем та ТД постійного струму, з генератором змінного струму та ТД змінного струму.

Генератор постійного струму може бути використаний досить компактно при використанні сверхмагнітів, однак, цьому варіанту виконання генератора властиві наступні недоліки:

- у своєму складі сверхмагніти мають рідкоземельні елементи (самарій, кобальт та ін.), точка Кюрі у яких може лежати в робочому діапазоні низьких температур, тобто можлива втрата магнітних властивостей і генератор не виконуватиме свої функції. Крім того, сверхмагніти виконуються на основі металокераміки та нестійкі до ударів і вібрацій, присутній також ефект «магнітного старіння» та зміни магнітних властивостей від 1% до 10% в рік. Тому при створенні ЕМТ перевага віддається генераторам змінного струму, які більш надійні в експлуатації та прості в обслуговуванні.

СУ ЕМТ повинна забезпечувати повне використання потужності дизеля в усьому інтервалі швидкостей руху машини при різних навантаженнях (рис. 2) [5]. З цією метою СУ дизеля та ЕМТ мають спільний регулятор (механічний або електронний). Найбільшому ККД відповідає область режимів роботи, обмежена кривою 1, криві 2, 3 та інші є лініями поступового зменшення ККД. Реалізація деякої часткової ефективної потужності P_e можлива при різних кутових швидкостях,

наприклад при n_1 та n_2 за рахунок відповідної зміни подачі палива. Внаслідок того, що точка A лежить на лінії більшого значення ККД, робота дизеля при кутовій швидкості n_2 більш економічна.

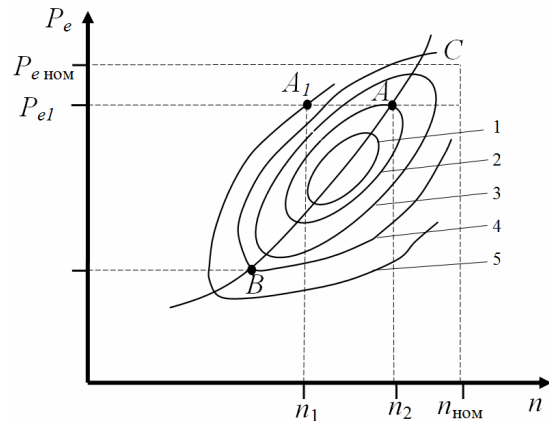


Рис. 2. Залежність потужності дизеля (P_e) від кутової швидкості (n) при постійних значеннях ККД

Точки A , B та інші, в яких горизонтальні лінії є дотичними до ліній 1-5, відповідають режимам найбільшої економічності, тому що зміна кутової швидкості в обидві сторони від кожної точки призводить до зниження ККД. Тому лінія AB , яка з'єднує ці точки, є лінією найбільш економічних режимів роботи дизеля. Також ЕМТ повинна відповідати таким вимогам: забезпечувати максимальне тягове зусилля при русанні з місця та розгоні, забезпечувати максимальну швидкість машини.

Тягова характеристика машини для максимальної потужності дизеля показана на рис. 3 [4].

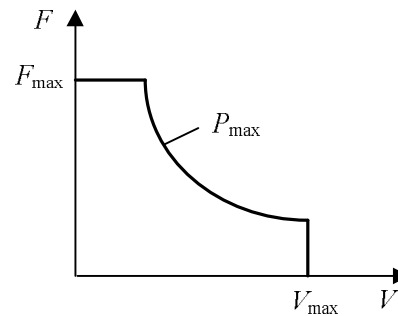


Рис. 3. Тягова характеристика колісної машини (F_{max} , P_{max} , V_{max} – максимальні значення тяги, потужності та швидкості відповідно)

Основними перевагами ЕМТ у порівнянні з ГМТ є: плавність ходу і відсутність ривків машини при перемиканні передач, електричне гальмування з мінімальним зносом деталей, простота в обслуговуванні та можливість діагностування комплектуючих виробів в процесі експлуатації, екологічна чистота, не потрібні спеціальні сховища для відпрацювань [6, 7].

ЕМТ дозволяє забезпечувати роботу машини за схемою «електричного диференціала», в якій виконується примусова рівність струмів (I) та моментів (M) ТД, що покращує керованість машини в режимі поворотів, зменшує знос шин і підвищує ресурс ТД.

Для системи ЕМТ з двома обмотореними колесами з ТД постійного струму ця задача вирішується шляхом їх послідовного з'єднання (рис. 4) [4], де

$$M_1 \equiv M_2 \equiv \Phi \cdot I, \quad (3)$$

де $\Phi \equiv I \cdot \omega$, Φ – магнітний потік ТД, ω – кількість витків обмотки збудження, I – струм ТД.

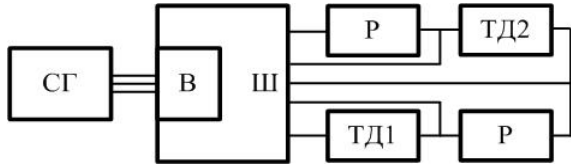


Рис. 4. Структурна схема ЕМТ постійного струму: СГ – синхронний генератор, В – випрямляч, Ш – шафа з електроапаратами та системою управління, Р – гальмові резистори, ТД – тягові двигуни постійного струму

Для машини з більшим числом обмоторених коліс ці питання повинні вирішуватися спеціальною СУ ЕМТ. ЕМТ на змінному струмі представляє можливість використання безколекторних ТД, вибір найкращого варіанту досить складне завдання. До числа найбільш відомих, що застосовуються, варіантів ТД можна віднести: асинхронний, синхронний, індукторний, вентильний. Кожен з них має свої переваги та недоліки [6]. Одними з перспективних є вентильні двигуни, які мають хороші тягові характеристики, високий ККД і прийнятні масо-габаритні показники. Система збудження виконується з використанням сильних магнітів, магнітопровід ротора і статора – з шихтованої електротехнічної сталі. Живлення ТД здійснюється від випрямленої напруги генератора через автономні інвертори струму, можливе застосування рідинного охолодження. Використання постійних магнітів підвищує показники ТД, проте знижує їх надійність в експлуатації.

Індукторний (вентильно-індукторний ТД) має просту конструкцію, а значить і високу надійність [8]. В той же час створює проблеми із забезпеченням тягової характеристики в зоні малих швидкостей і реалізацією електричного гальма.

Синхронний двигун вирішує ці проблеми, але має в своєму складі ковзний контакт, який збільшує габарити й масу ТД. З урахуванням наявних напрацювань та досвідом експлуатації асинхронних ТД на рухомому складі [4, 7], можна зробити висновок про його найбільш реальну застосовність в ЕМТ спеціальної колісної машини. ЕМТ включає синхронний генератор, асинхронні ТД з короткозамкненим ротором, випрямляч, автономний інвертор напруги та мікропроцесорну систему управління. Схема забезпечує пуск двигуна від синхронного генератора ЕМТ: зі схеми виключається привід стартер-генератора, який складається з гідромуфти і фрикційної муфти, а також сам стартер-генератор. На рис. 5 показано: СГ – синхронний генератор, АП1-АП8 – автономні інвертори напруги, ТД1-ТД8 – тягові асинхронні двигуни, НЕ – накопичувач енергії, СУ ЕМТ – мікропроцесорна система управління ЕМТ, U_r, f_r – напруга та частота напруги СГ, U_d, I_d – випрямлена напруга та струм, $U_1 \dots U_8, f_1 \dots f_8$ – напруги та частоти живлення ТД.

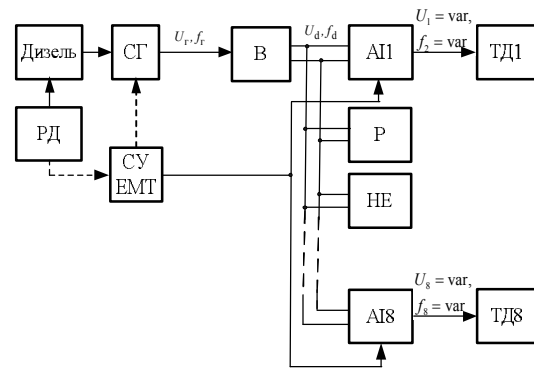


Рис. 5. Електромеханічна трансмісія змінного струму

Електричні машини: генератор та ТД можуть бути виконані з рідинним охолодженням. ТД розміщується безпосередньо в колесі машини (мотор-колесо). Попереднє опрацювання ЕМТ для спеціальної машини з потужністю двигуна близько 600 к.с. показало, що маса ЕМТ буде менше на 250 кг в порівнянні з ГМТ, що дає можливість без збільшення ваги машини ввести в схему трансмісії накопичувач енергії (НЕ). НЕ може працювати як додаткове джерело та дозволить використовувати повторно енергію гальмування. Як приклад наведено дані електрохімічного конденсатора, зовнішній вигляд якого приведено на рис. 6: напруга $U = 45$ В, ємність $C = 400$ Ф, $P_{max} = 48$ кВт, маса $G = 40$ кг, температурний діапазон роботи $-500^{\circ}\text{C} \dots +600^{\circ}\text{C}$, термін служби – більше 15 років без обслуговування.

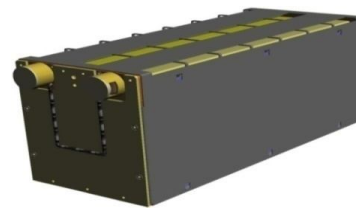


Рис. 6. Зовнішній вигляд конденсаторного модуля

ЕМТ спеціальної колісної машини повинна відповідати жорстким вимогам управління моментом як в статичних так і в динамічних режимах. У зв'язку з цим, найбільш прийнятним типом СУ є система прямого управління моментом по типу DTC [9, 10].

Структура системи прямого управління моментом ТД наведена на рис. 7.

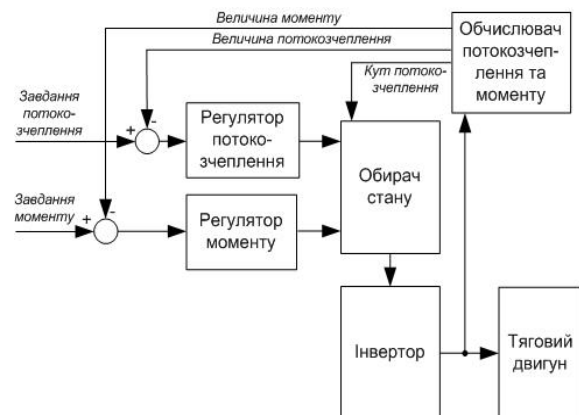


Рис. 7. Структура системи прямого управління моментом

Цифрова реалізація системи управління ЕМТ колісної машини спеціального призначення потребує від обчислювача високої продуктивності. Більшість СУ приводами провідних західних фірм виконуються на процесорах цифрового оброблення сигналів (DigitalSignalProcessor, DSP). На ринку є спеціалізовані мікропроцесори DSP, наприклад ADMC300 фірми AnalogDevices, TMS320C(F)240 фірми TexasInstruments, 180196MC фірми Intel, MC68HC908MR24 фірми Motorola [11, 12].

Використання наведених мікропроцесорних засобів управління забезпечить реалізацію алгоритмів практично будь-якої складності у реальному масштабі часу, що дозволить реалізувати задані технічні характеристики машини. Очікуваний ККД ЕМТ, який виконано по схемі на рис. 5 – не нижче 0,8.

Висновки

У роботі наведено аналіз різних типів трансмісій для спеціальних колісних машин. Основним типом трансмісій є гідромеханічна, яка представляє собою єдиний агрегат, який включає погоджувальну передачу, гідротрансформатор, коробку передач, гідродинамічне гальмо та вузли гідравлічної системи.

Гідромеханічна трансмісія забезпечує необхідні вимоги руху машини, має меншу металоемність, відсутність кольорових металів. У той же час, ГМТ має ряд недоліків, таких як низький ККД при включеному гідротрансформаторі та складності при її компонуванні в обсязі машини. Останнім часом намітилася тенденція переходу до ЕМТ. Вибір типу ЕМТ є багатofакторною задачею, рішення якої залежить від призначення машини, умов експлуатації, надійності, економічності та ряду інших чинників. Порівнювалися різні варіанти виконання ЕМТ. З урахуванням наявних напрацювань та досвідом експлуатації асинхронних ТД на рухомому складі, найбільш реальною видається ЕМТ змінного струму з тяговим синхронним генератором, випрямлячем, інвертором напруги, асинхронними ТД з короткозамкненим ротором та мікропроцесорною СУ прямого керування моментом. ТД можуть бути вбудовані в колесо; ЕМТ виконується з рідинним охолодженням, дозволяє здійснювати пуск дизеля від генератора (зі схеми виключається стартер з системою приводу). Зниження маси встановленого обладнання дає можливість застосування НЕ для можливого використання вторинної енергії гальмування. ККД ЕМТ складе не менше 0,8.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Многоцелевые гусеничные и колесные машины: Конструкция: Под ред. Г.И. Гладова. – М.: Транспорт, 2001. – 272 с.
2. Проектирование полноприводных колесных машин: В 2 т. Т. 1. Учебн. для вузов / [Б.А. Афанасьев, Н.Ф. Бочаров, Л.Ф. Жеглов и др.]; под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 488 с.
3. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / [Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Карпенко В.А. и др.]; под ред. А.Н. Туренко. – Харьков: ХГАДТУ(ХАДИ), 2001. – 642 с.
4. Мариев П.Л. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Кулешов, И.В. Зырянов. – СПб.: Наука, 2004. – 429 с.
5. Степанов А.Д. Передачи мощности тепловозов / А.Д. Степанов, В.А. Васильев, Б.Г. Кузнецов, А.Я. Лемберг, И.Ф. Семичастанов. – М. – Машиностроение. – 1967. – 476 с.
6. Применение электромеханических трансмиссий для машин класса бронетранспортеров / А.В. Поторока, Е.И. Решетило, Г.П. Гращенков, В.В. Литовец. – Механіка та машинобудування. – 2012. – № 2. – С. 152 – 158.
7. Синчук О.Н. Теоретические аспекты построения структуры системы мониторинга состояния электрических приводов тяговых электротехнических комплексов / О.Н. Синчук, В.Ю. Захаров, Л.В. Сменова // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36, (1009). – С. 142-145.
8. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентиляционно-индукторными двигателями: Автореферат диссертации / М.М. Лашкевич. – Москва, 2013. – 20 с.
9. Басов Г.Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу. Ч. 1. / Г.Г. Басов, С.І. Яцько. – Харків: Апекс+, 2005. – 248 с.
10. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. Х.: Основа, 2004 – 210 с.
11. Микропроцессорные системы автоматического управления гидродинамическими трансмиссиями легкобронированных колесных военных машин / С.В. Стривовский // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2012. – №4. – С. 80 – 87.
12. Перспективы применения гидромеханической трансмиссии с микропроцессорной системой управления на военных машинах / Е.Е. Александров, С.В. Стривовский // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С. 92 – 98.

Received (надійшла) 01.03.2020

Accepted for publication (прийнята до друку) 22.04.2020

To the issue of electrical transmission selection and its control system for a special wheel machine

V. Noskov, V. Blyndiuk, M. Mezentsev, H. Heiko

Abstract. The subject of the article is the study of transmissions and control systems of special wheeled vehicles and a comparative analysis of them. The work showed that the main type of transmission, which is used in wheeled special vehicles, is a hydromechanical transmission, which has several advantages. But, at the same time, it has certain disadvantages. Recently, there has been a trend towards a transition to electromechanical transmission, which is superior to hydromechanical transmission in terms of efficiency, adjusting properties and layout flexibility. There is an opportunity in each wheel to have a traction motor (motor-wheel). Comparison of various versions of the electromechanical transmission completed. Taking into account the existing developments and experience in operating asynchronous traction motors on rolling stock, it is concluded that it is most practicable in transmissions of a wheeled vehicle. For a special purpose wheeled vehicle, the use of an electromechanical transmission with asynchronous traction motors, a microprocessor control system and an energy storage device is proposed.

Keywords: electromechanical transmission, transmission control system, energy storage.