

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ШВИДКІСНИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

**Рибка В.Ю., магістрант, Шаповал І.А., д.т.н., доц.**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу*

**Вступ.** Протягом останнього десятиліття електромобілі почали впевнено заявляти про себе на ринку автомобілів, відвойовуючи продажі в сегментах міських автомобілів (GM EV-1, Nissan Leaf, Smart Fortwo ED, Chevrolet Bolt Renault Zoe), а згодом і в преміум-сегменті (Tesla Roadster, BMW 530e, Tesla Model S). Причиною тому стала поява акумуляторів із достатньою щільністю енергії, щоб забезпечувати запас ходу понад 150 км на одному циклі зарядки, а також зниження власної вартості акумуляторів, що дозволило знизити власну вартість електромобіля до співставного рівня із автомобілями з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ). Проте, на цьому прогрес не зупинився, і поки одні виробники шукають технології для ще більшого підвищення ємності своїх батарей, інші зосереджуються на розробці ефективних систем заряджання і тягового приводу своїх автомобілів для зменшення загальної витрати енергії і використання електромобілів також у концепції Smart Grid.

**Мета роботи** – виконати аналіз існуючих тягових електроприводів, які застосовуються в дорожніх автомобілях, виявити їх переваги та недоліки, а також шляхи можливого розвитку тягових електроприводів автомобілів у майбутньому.

**Матеріали дослідження.** Повернення електромобілів на автомобільний ринок зумовлено не стільки екологічними наступами на автомобільну промисловість, скільки унікальними споживацькими характеристиками, які недоступні для автомобілів з ДВЗ. Для прикладу, спосіб розміщення елементів тягової батареї під пасажирським салоном дозволяє не тільки підвищити механічну жорсткість кузова, покращивши пасивну безпеку автомобіля, знизити вертикальну координату центру мас, що надає кращої керованості за рахунок зменшення моментів повздовжнього й поперечного кренів кузова, а й звільнити суттєвий об'єм, власне, салону і багажного відділення, що в свою чергу наділяє дорожні автомобілі нетиповими властивостями, зокрема, в Tesla Model S може розміщуватись до 7 пасажирів [1], в той час, як інші автомобілі цього класу мають максимум 5 місць. Також електричний привод дозволяє розміщення на задній осі, не забираючи місця салону, що деякими виробниками використовується як можливість звільнити передню вісь від шарнірів рівних кутових швидкостей, забезпечивши більший поворот коліс, що підвищує маневреність авто в міських умовах [2].

Базова концепція електричного автомобіля передбачає тягову установку із одного електродвигуна, та редуктора, вихідний вал якого з'єднано із колесами через диференціал (рис. 1).

Таку компоновку свого часу отримали AC Propulsion tzero, GM EV1, Tesla Roadster, Tesla Model S, Nissan Leaf, Renault Fluence ZE, Renault ZOE тощо.

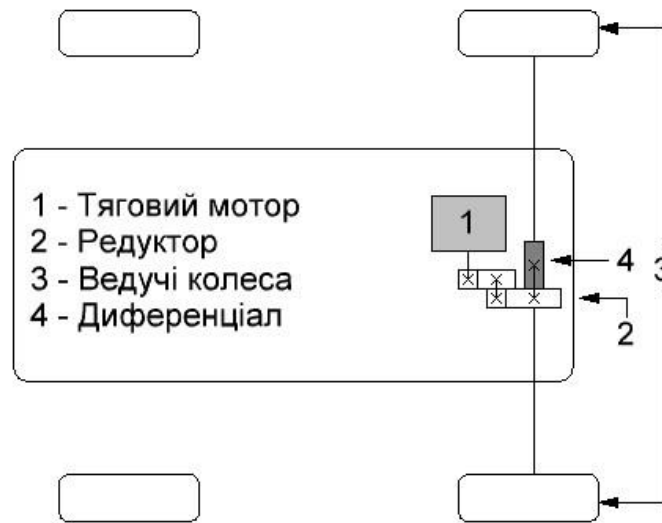


Рисунок 1 – Механічна система типового дорожнього електромобіля

До переваг цієї конструкції відносяться:

- простота конструкції;
- низька вартість, завдяки наявності лише одного двигуна, одного перетворювача, одного редуктора і одного диференціала.
- простота керування приводом – параметри розраховуються лише для одного двигуна залежно від завдання з педалі газу чи круїз-контроля без необхідності в синхронізації кількох приводів.
- низька невіднесена маса.

До недоліків цієї системи відносяться:

- необхідні диференціал, півосі та шарніри рівних кутових швидкостей;
- система негнучка – необхідність пошуку компромісу між максимальною швидкістю та тяговим моментом
- низька ефективність – один потужний мотор, як правило, має значний момент інерції та загальні електричні втрати, ніж два менших;
- потребує місця в кузові авто.

Серед перелічених недоліків варто виділити негнучкість системи. Саме цей недолік зумовив низьку максимальну швидкість AC Propulsion tzero в 140 км/год та GM EV1 в 130 км/год порівняно із бензиновими аналогами. Nissan Leaf, хоч і міг розігнатись до 150 км/год, проте на фоні попередніх двох суттєво програвав у динаміці, хоча не останню роль при порівнянні відіграє потужність приводів.

З теорії електричних машин відомо, що найвищу ефективність електромотори мають лише в обмеженому діапазоні частот обертання ротора. Для прикладу розглянемо дані, що надані для двигуна EMRAX 208 (рис. 2) [3]. На

рис. 2 представлена мапа ефективності двигуна, на осях якої зображено залежність тягового моменту «Peak torque» та «Continuous torque» в Н·м від частоти обертання ротора «Motor speed» в об/хв двигуна EMRAX 208, на якій обведено зони коефіцієнта корисної дії (ККД) вказаного мотора. Зі згаданого вище рисунка видно, що найвищої ефективності, 96%, двигун досягає при номінальному моменті навантаження в діапазоні 1500-3500 об/хв, а при досягненні пікових навантажень, при малих та близьких до максимальних частотах обертання, коефіцієнт корисної дії двигуна знижується до 86%. Ця мапа демонструє те, що для отримання бажаної ефективності електродвигун потребує оптимізації передавального відношення на низьких та високих швидкостях.

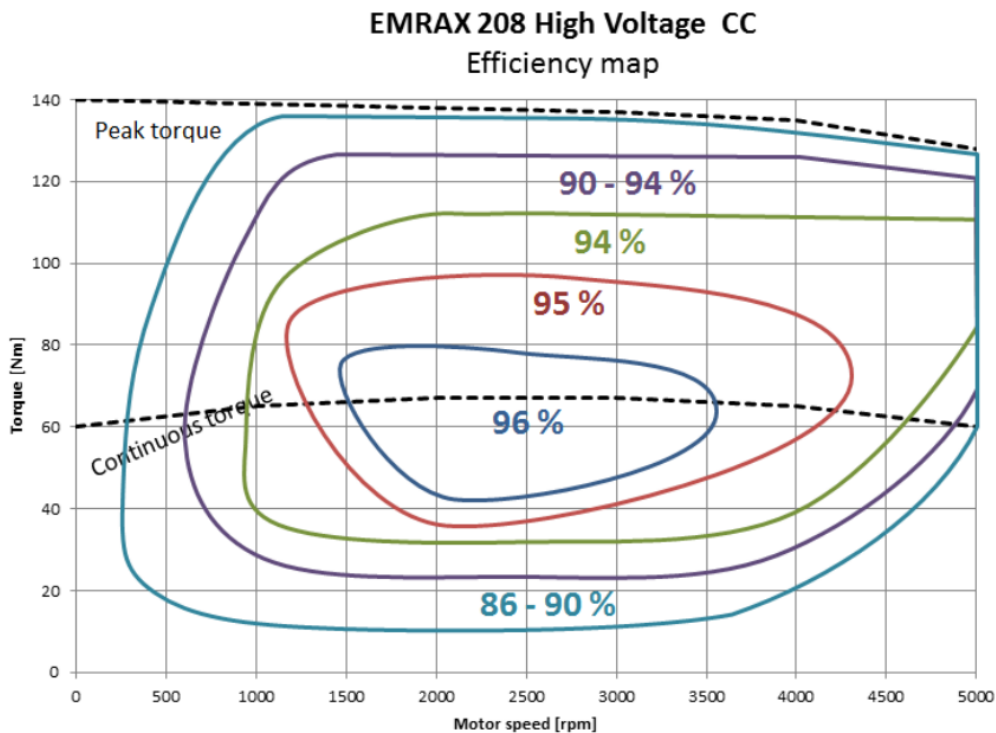


Рисунок 2 – Мапа ефективності мотора EMRAX 208

Заради усунення недоліку низької ефективності, та векторного стернування авто в поворотах в нижчих лігах автоспорту, таких як Formula Student Electric, використовується система із індивідуальним приводом коліс як для задньопривідних, так і для повнопривідних тягових систем (рис. 3)

При даній компоновці двигуни можуть розміщуватись як в кузові, так і кріпитись безпосередньо до поворотного кулака. Перевагами даної системи є:

- низька інерційність системи, так як мотори меншої потужності, ніж в одномоторній компоновці, і, як правило, з суттєво меншим моментом інерції ротора;

- краща енергоефективність при повному приводі за рахунок можливості відключення моторів задля оптимізації навантаження, а також ширші можливості рекуперативного гальмування;
- векторне стернування (в англійській літературі Torque Vectoring), що допомагає проходити повороти на вищих швидкостях;
- компактність механічної частини електроприводу.



Рисунок 3 – Механічна система електроавтомобіля із індивідуальним приводом коліс

Серед недоліків такого типу приводів є:

- висока вартість, що зумовлено наявністю кількох моторів, відповідно, кількох інверторів, кількох редукторів, а також загальної системи керування;
- складність алгоритмів керування ЕП та їх синхронізації;
- великі невіднеснені маси, у разі розміщення моторів на поворотних кулаках автомобіля.

Восени 2019 року компанія Porsche представила новий автомобіль Porsche Taycan, в якому вперше реалізовано 2-ступінчасту коробку передач для використання із тяговим мотором задньої осі. На офіційному сайті [4] виробник описує, що використання такого типу трансмісії (рис. 4) обумовлено кращими динамічними характеристиками, порівняно із традиційними безступінчастими системами приводів.

Очевидними перевагами такої системи є краща оптимізація навантаження на привід задньої осі та вища ефективність, проте це ускладнення системи, як механічної, так і системи керування.

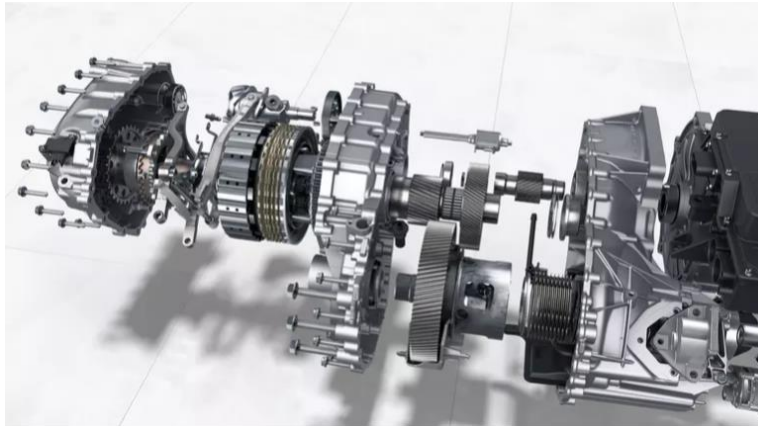


Рисунок 4 – Зображення 2-ступінчатої коробки передач автомобіля Porsche Taycan Turbo S

В 2013 році компанією Tesla Motors було запатентовано метод керування 2-моторним електроприводом із приводом на спільний диференціал [5].

Суть методу полягає в тому, що 2 мотори із різними тяговими характеристиками (рис. 5) механічно з'єднані зі спільним диференціалом, проте забезпечують різні механічні властивості. На рис. 5 ліворуч зображена зовнішня швидкісна характеристика моментів тягових двигунів 01 та 03, а також їх сума 05, де графіки моменту відповідно 701, 703 та 705, праворуч – зовнішня швидкісна характеристика потужності тягових двигунів 01, 03 та їх сума 05, і відповідні графіки 801, 803 та 805.

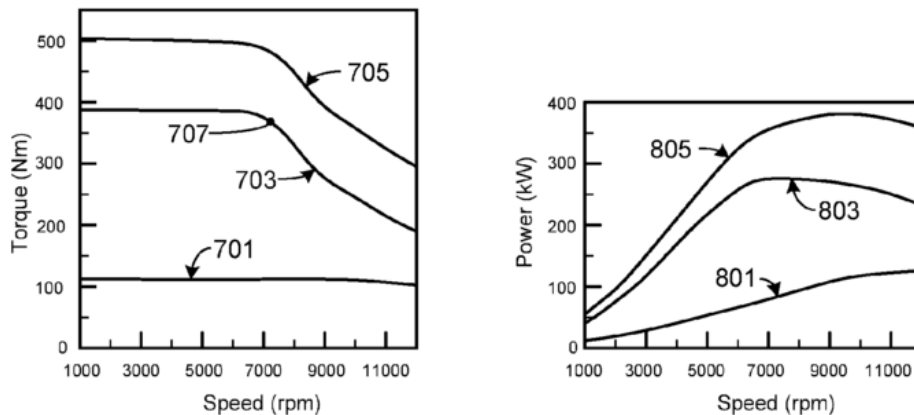


Рисунок 5 – Характеристики 2-моторного приводу

Мотор 01 має графік моменту 701 який майже незмінний на всьому діапазоні швидкостей, та відповідний графік потужності 801. Мотор 03 має графік моменту 703 з 2-зонним керуванням, та відповідний графік потужності 803. Сумарна продуктивність установки демонструється графіком моменту 705 та графіком потужності 805. Схема установки представлена на рис. 6, де позначено: 600 – система тягового приводу, 601 та 603 – тягові мотори 01 та 03 відповідно, 605 – вал

між диференціалом та колесом, 607 – трансмісія із диференціалом, 609 – праве ведуче колесо, 611 – ліве ведуче колесо, 613 – система зберігання та керування енергією, де «ESS» це «energy storage system» – система зберігання енергії (батарея та системи її керування), «Power Control Module» - модуль керування потужністю живлення двигунів.

Об'єднавши приводи таким чином, є можливість керування моментами, двигунів ефективно розподіляючи потоки потужності залежно від вибраної швидкості руху, динаміки прискорення, чи динаміки гальмування. Така система має забезпечувати вищу ефективність, порівняно із одномоторною, як на відносно малих швидкостях міського руху, так і на високих швидкостях автострад. До недоліків такої системи відносяться вища складність як механіки, так і алгоритмів керування, і, відповідно, результуюча вартість системи.

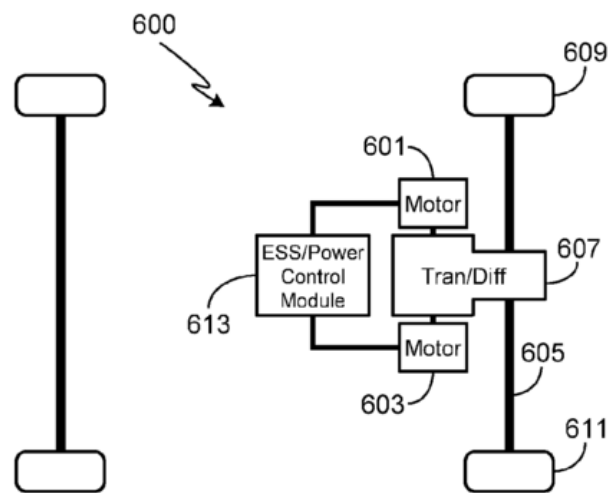


Рисунок 6 – Схема двомоторного приводу

Логічним продовженням є об'єднання ідей використання коробки передач та двомоторного ЕП. З одного боку, малопотужний основний тяговий приєднаний до диференціала за допомогою планетарної передачі зможе забезпечувати максимальну ефективність при русі із малими швидкостями та в усталених режимах, так як одна планетарна передача забезпечує до 3 різних співвідношень, а з іншого боку високопотужний мотор допоможе забезпечити неймовірну динаміку до максимальних швидкостей руху. Негативною стороною такої системи є суттєве ускладнення як механічної системи приводу, так і алгоритмів керування.

Щодо, власне, типів двигунів, то автомобільна промисловість, почавши із асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором в GM EV1 та AC Propulsion tzero поступово перейшла до використання синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів, завдяки вищій щільності моменту на одиницю маси, а також відсутністю проблем із охолодженням ротора, що були присутні в асинхронних двигунах.

**Висновки.** Серед розглянутих типів механічних систем все ще можна спостерігати пошук оптимальної, так як основну увагу в автомобілебудуванні наразі приділяють збільшенню ємності тягових батарей, аніж ефективності чи продуктивності всієї системи загалом. Пояснити це можна тим фактом, що виробники намагаються забезпечити не лише автомобільний ринок транспортними засобами, а й розвиток ринку відновлюваних джерел енергії, в якому електромобіль виступає не лише як споживач, а й як акумулятор електроенергії, заради вирівнювання її споживання.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що подальший розвиток тягових електроприводів можливий за такими напрямками:

- одномоторні приводи із багатоступінчастими коробками передач;
- багатомоторні приводи із спільним диференціалом;
- багатомоторні приводи із багатоступінчастими коробками передач;
- індивідуальний привід коліс;
- індивідуальний привід із багатоступінчастими коробками передач.

Основними критеріями для порівняння цих систем будуть графіки питомого споживання енергії від швидкості руху, допустимі діапазони швидкостей, тягові характеристики приводів та їх вартість.

#### Перелік посилань

1. Half a year living with a Tesla Model S: the long-term verdict [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.carmagazine.co.uk/car-reviews/long-term-tests/tesla/tesla-model-s-long-term-test-review/>
2. Honda e Prototype review: first test of Honda's little electric car [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.topgear.com/car-reviews/e-prototype/first-drive>
3. User's Manual for Advanced Axial Flux Synchronous Motors and Generators [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/01/emrax\\_208\\_technical\\_data\\_4.5.pdf](https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/01/emrax_208_technical_data_4.5.pdf)
4. Taycan Models [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.porsche.com/international/models/taycan/taycan-models/taycan-turbo-s/>
5. Method of Operating a Dual Motor Drive and Control System for an Electric Vehicle [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.patentsencyclopedia.com/app/20130241445>