

ТЯГОВИЙ АСИНХРОННИЙ ДВИГУН З ПРИМУСОВИМ ПОВІТРЯНО-ВОДЯНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ ДЛЯ ПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Гайденко Ю.А., к.т.н., доцент, Чернушенко П.І., магістрант
КПІ імені Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

Вступ. Питання проектування систем електроприводу електромобілів стає все більш актуальним за умов стрімкого розвитку ринку електромобілів, спричиненого комплексом зовнішніх чинників, у тому числі й розвитком у суміжних сферах техніки.

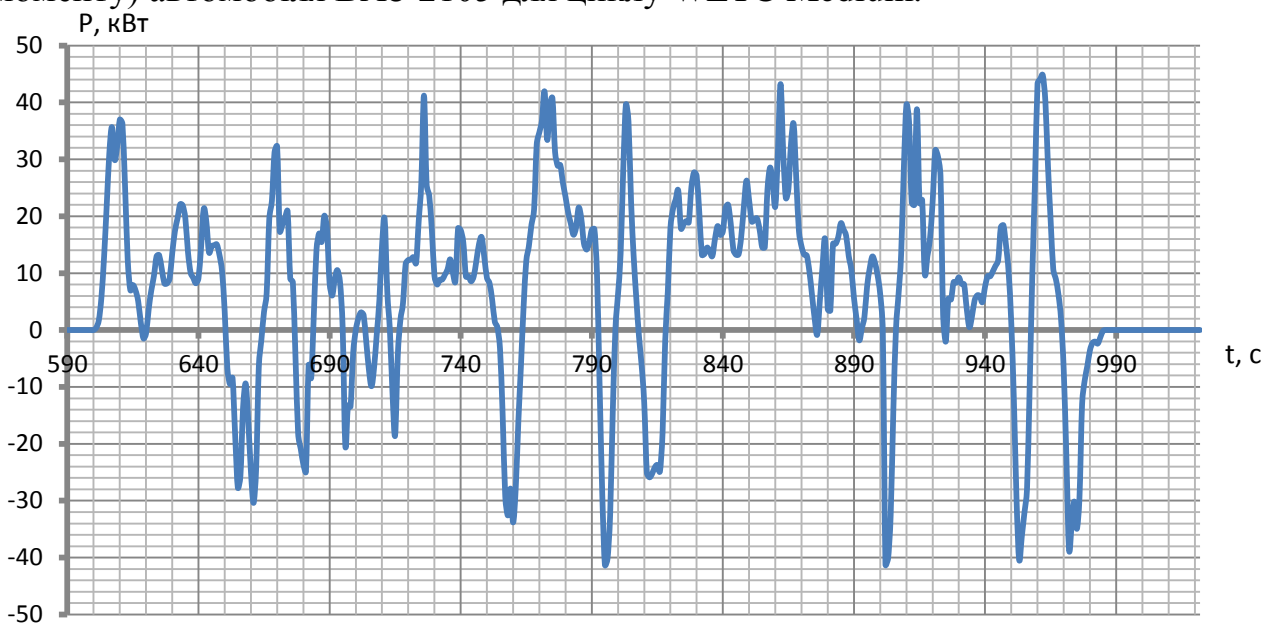
Сьогодні світові автоконцерни та приватні науково-дослідні компанії витрачають значні ресурси на розробку енергоефективних, високопотужних та малогабаритних тягових електродвигунів, що будуть відповідати вимогам експлуатації в електротранспорті. Незважаючи на те, що це відносно новий напрям в електромеханіці, на даний час вже розроблено досить багато нових принципових конструкцій таких двигунів, способів та методів її реалізації. Та навіть попри це все ще існує проблема браку досвіду розробки подібних електричних машин. Тому, дослідження особливостей проектування тягових електродвигунів з підвищеними електромагнітними навантаженнями є актуальним та перспективним напрямком досліджень.

Мета роботи – оцінка можливості виконання тягового асинхронного двигуна (ТАД) з підвищеними електромагнітними навантаженнями та питомою потужністю, дослідження особливостей проектування двигунів, що працюють на підвищеній частоті, аналіз ефективності системи примусового охолодження, зокрема рідинного.

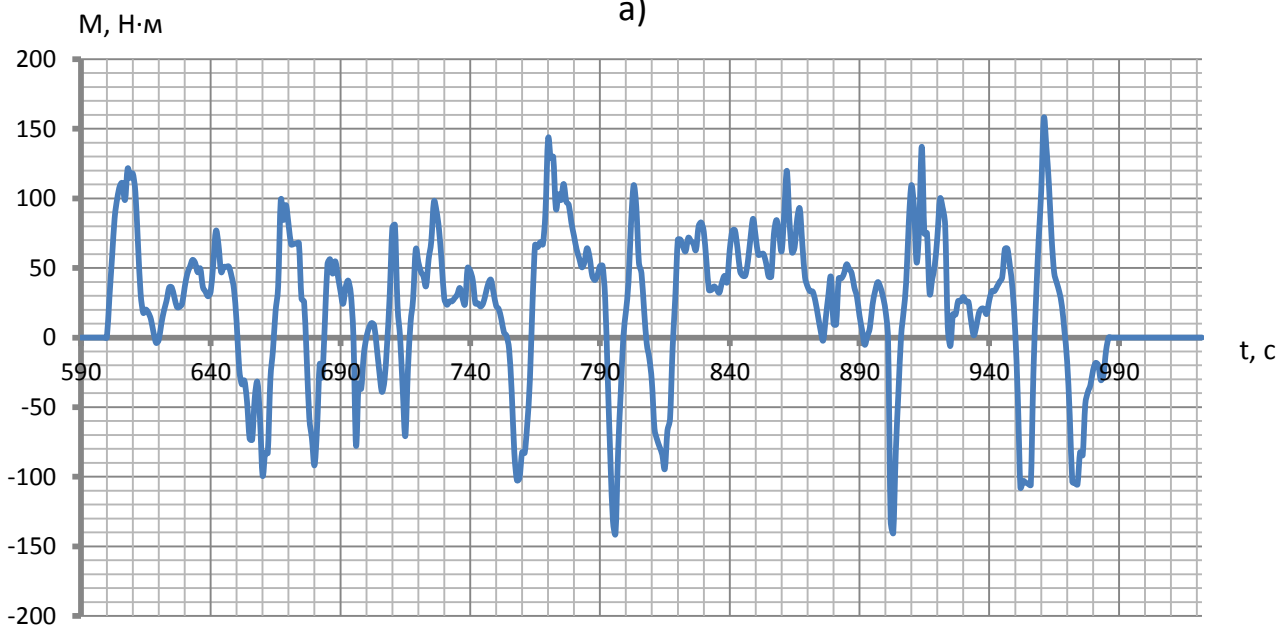
Об'єкт та методи дослідження. За даними [1] найбільш доцільними для використання в якості тягового приводу електромобіля є асинхронний двигун та синхронний двигун з постійними магнітами. Однак у двигуні з постійними магнітами є небезпека послаблення магнітного потоку від температурних та електромагнітних перевантажень, а вартість постійних магнітів з потрібною залишковою індукцією є високою, і загальна вартість такого двигуна є більш, ніж у 1,5 рази більшою за вартість асинхронного двигуна тієї ж потужності. Тому у якості об'єкта проектування обрано асинхронний двигун з наступними даними:

Номінальна потужність, кВт	50
Максимальна короткочасна потужність, кВт	75
Номінальна напруга, В	320-400
Номінальна синхронна частота обертання, об/хв	4500
ККД	>89
Коефіцієнт навантаження	>0.85
Максимальний короткочасний момент, Н·м	205
Ступінь захисту	IP 55
Система охолодження	Примусова повітряно-водяна

Тягового асинхронного двигуна з такими даними достатньо для приводу легкового автомобіля, такого як, наприклад, ВАЗ-2105, інформація по якому є у відкритому доступі. Окрім типу автомобіля, дуже важливим для правильного вибору необхідної потужності ТАД є врахування циклу руху автомобіля, тобто залежності швидкості руху автомобіля від часу. Таких циклів є декілька [2]. Кожен з них розрахований під певну географію та специфіку руху, містить різні максимальні швидкості, динаміку, часи зупинок. Для України найбільш прийнятним є цикл WLTC (Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycle). Він складається з чотирьох підциклів: Low, Medium, High, Extra High, кожен з яких включає в себе різну максимальну швидкість, динаміку та часи зупинок [2]. На рис. 1 представлені часові тягові характеристики (залежності потужності і моменту) автомобіля ВАЗ-2105 для циклу WLTC Medium.



a)



б)

Рисунок 1 – Часові залежності потужності (а) та моменту (б) для циклу WLTC Medium.

Як видно, з рисунку обраної потужності 50 кВт і максимального моменту 205 Нм цілком достатньо для автомобіля ВАЗ-2105.

Разом з тим, однією з найважливіших вимог при проектуванні електроприводу для автомобіля є компактне виконання електродвигуна. Мінімізація об'єму, що займає двигун та збільшення питомої потужності сприяє зменшенню маси автомобіля, покращенню динаміки руху та зниження собівартості активних матеріалів. В той же час таке виконання здебільшого вимагає доповнення двигуна примусовим охолодженням.

Проаналізувавши конструкції двигунів, що застосовуються у сучасних електромобілях, було сформовано наступні вимоги до габаритів електродвигуна:

- зовнішній діаметр корпусу – не більше 250 мм;
- довжина двигуна з підшипниковими щитами – не більше 250 мм;
- матеріал короткозамкненої обмотки ротора – мідь;
- кількість пар полюсів – 3.

Проектування проводилось за методикою [3], а дослідження електромагнітних і теплових характеристик – методами теорії поля [4]. В роботі було застосоване сертифіковане програмне забезпечення: SolidWorks і Comsol Multiphysics. Конструкція спроектованого ТАД показана на рис. 2.

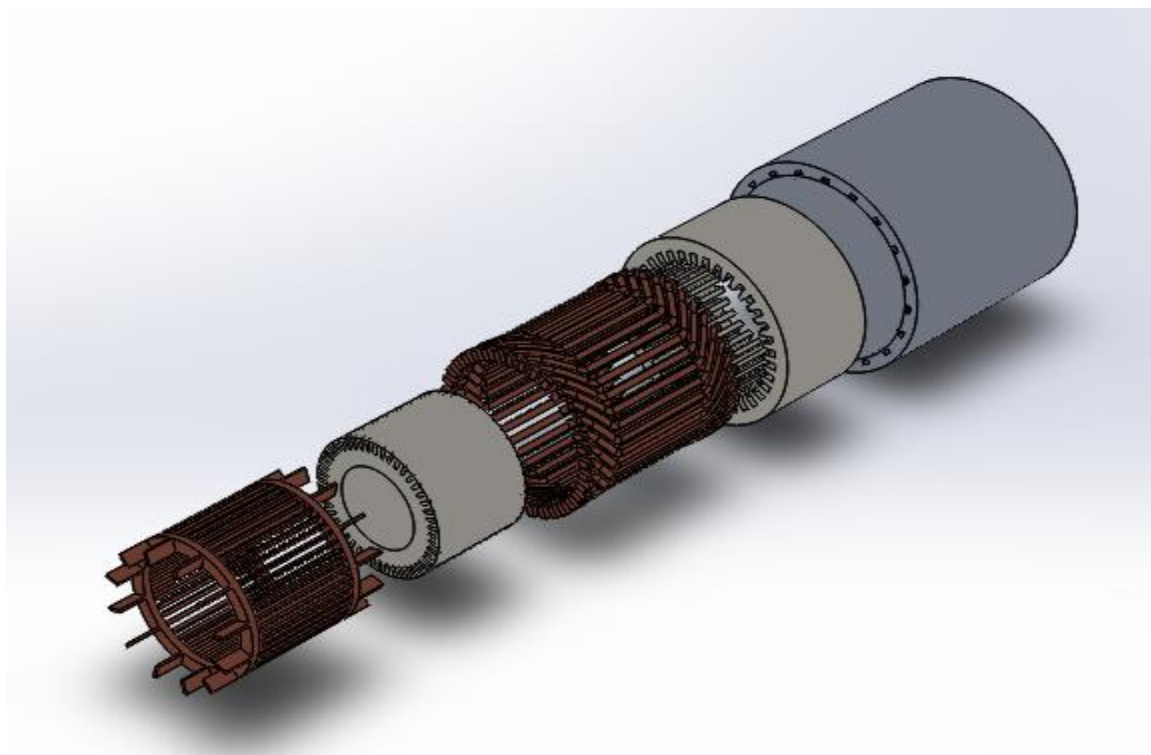


Рисунок 2 – Тривимірний ескіз ТАД з рознесеними видом

Результати та обговорення. Після проведення відповідних проектних розрахунків в пакеті Comsol Multiphysics був визначений розподіл електромагнітного поля в активній зоні ТАД (рис. 3).

Як видно з рис. 3, індукція в зубцях статора та ярмі була збільшена на 5-10% від рекомендованих для класичних асинхронних двигунів значень. Таке

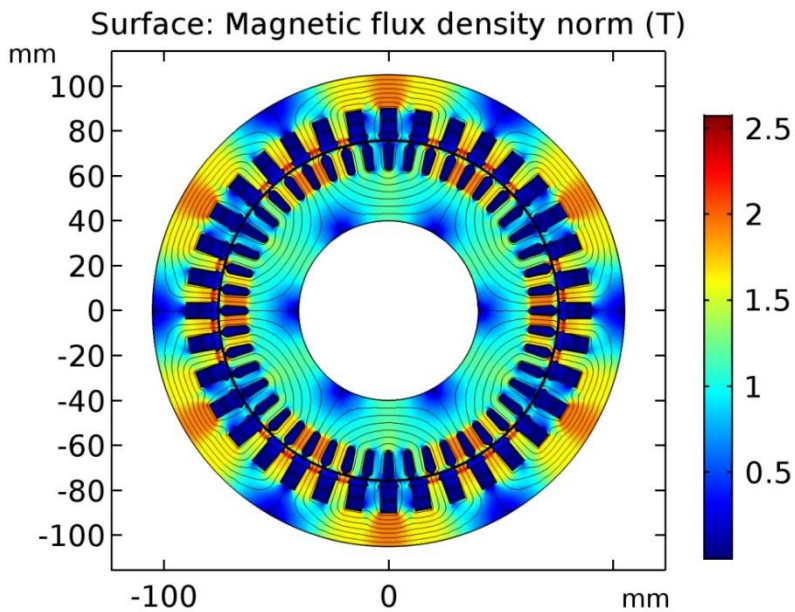


Рисунок 3 – Розподіл магнітного поля в ТАД

рішення безумовно вплинуло на магнітні втрати в двигуні та коефіцієнт навантаження, проте дозволило зменшити габарити двигуна та збільшити площу пазу під обмотку для зменшення густини струму в провідниках статора.

Для електричних машин, що працюють на підвищеній частоті рекомендовано обирати сталь з меншою товщиною листа та збільшеним вмістом кремнію для

зменшення втрат на гістерезис та вихрові струми. Проте, зі зменшенням електропровідності сталі зменшується і коефіцієнт теплопровідності, що негативно відображається на тепловому стані машини. В даному проекті була обрана сталь марки 2013 з товщиною листів 0,5 мм (ГОСТ 21427.2-83). Не дивлячись на підвищені втрати в сталі, таке рішення дозволить зберегти коефіцієнт навантаження та намагнічуючий струм в допустимих межах.

Незважаючи на підвищені втрати ККД спроектованого ТАД є достатньо високим – 0,926, а коефіцієнт навантаження – 0,844, що відповідає поставленим вимогам.

Для теплового аналізу ТАД буда розроблена спеціальна тривимірна модель (рис. 2). Вона включає в себе такі елементи конструкції: біляча клітка з 12 ребрами охолодження, магнітопровід ротора та статора, обмотки статора, а також алюмінієвого корпусу з 24 каналами для охолоджуючої рідини.

Оскільки існує необхідність враховувати не тільки розподіл тепла у твердих тілах, а й потік охолоджуючої рідини, то модель виконана мультифізичною. Для розрахунку швидкості охолоджувальної рідини використовується ламінарна модель гідродинаміки, а для потоку повітря у повітряному проміжку використовується турбулентна модель $k-\xi$, яка є досить точною при розрахунках турбулентних потоків з нерівномірними обтіканнями.

Розподіл температурного поля двигуна при номінальному навантаженні зображено на рис. 4. Як бачимо, передня та задня частина нагріваються нерівномірно через різницю температур охолоджуючого середовища та умов охолодження. При номінальному навантаженні температура найбільш гарячої точки в **пазовій** частині обмотки статора склала 84 °С, що менше аніж допустима для класу ізоляції Н (145 °С). Отже, система охолодження двигуна має значний запас по перегріву.

При перевантаженні $P_2 = 1,5P_{2ном}$ температура найбільш нагрітої частини склала 144 °С, отже двигун може витримувати тривалі перевантаження.

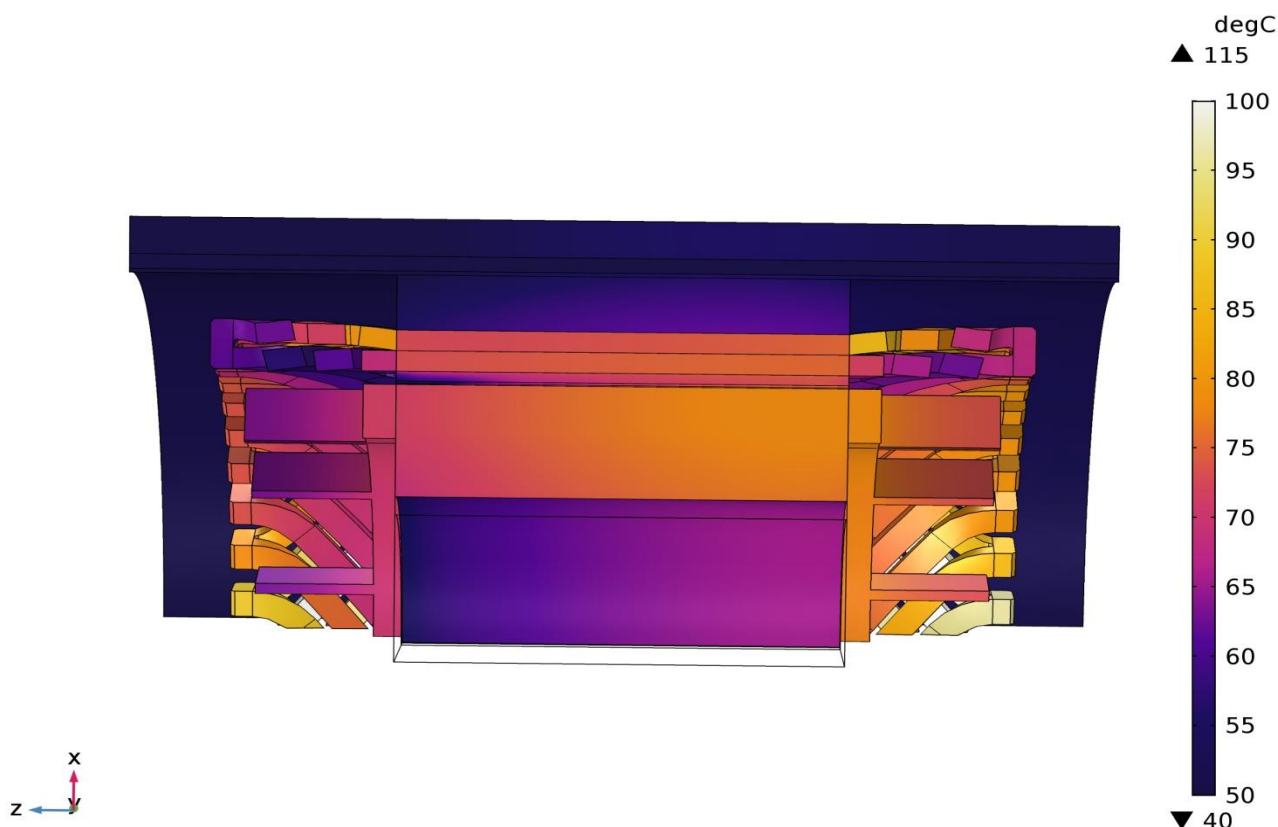


Рисунок 4 – Розподіл температурного поля в двигуні при номінальному навантаженні

Висновки: 1) при проектуванні тягових асинхронних двигунів потрібно коригувати рекомендації загальноприйнятих методик проектування в частині допустимих навантажень та вибору матеріалів; 2) при аналізі теплового стану ТАД доцільно використовувати надзвичайно точні тривимірні мультифізичні математичні моделі. Так, в роботі, за допомогою такої моделі була оцінена комбінована повітряно-водяна незалежна система охолодження; 3) Розроблений двигун може постійно працювати в задовільному тепловому режимі навіть при перевантаженні у 1,5 рази.

Перелік посилань

1. Dave Fulton, Remy International. Construction and Functional Differences. SAE 2011 Powertrain Electric Motors Symposium – Shanghai.
2. Economic Commission for Europe. Inland Transport Committee. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations. 162nd session/ Proposal for a new global technical regulation on the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP). Geneva, 11-14 March 2014.
3. Копылов. И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.
4. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. Посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с.