

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

*О.Г. Нестеренко<sup>1</sup>, Т.Ю. Кунченко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> аспірант кафедри Автоматизовані електромеханічні системи, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

<sup>2</sup> доцент кафедри Автоматизовані електромеханічні системи, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

[Oleksandr.Nesterenko@ieee.khpi.edu.ua](mailto:Oleksandr.Nesterenko@ieee.khpi.edu.ua)

Розвиток електротранспорту вимагає вдосконалення систем керування індивідуальними електроприводами (ІРЕ), що забезпечують стабільність руху, зчеплення коліс та енергоефективність. Ключовим завданням є стабілізація ковзання ведучих коліс, від якої залежать коефіцієнт зчеплення, стійкість і динамічні властивості електромобіля [1–3].

Сучасні методи, зокрема Direct Torque Control (DTC) та Field Oriented Control (FOC), мають високу швидкодію, але не гарантують стабільного зчеплення за змінних дорожніх умов. Необхідне поєднання класичних і адаптивних алгоритмів для зниження буксування та енергетичних втрат.

Метою роботи є підвищення ефективності ІРЕ електромобіля шляхом удосконалення алгоритмів керування тяговим моментом та ковзанням. Для аналізу розроблено спрощену математичну модель руху, яка враховує сили зчеплення та динаміку приводу.

Рівняння руху:

$$M_e - M_{res} = J \frac{d\omega}{dt},$$

де  $M_e$  — електромагнітний момент двигуна,  $M_{res}$  — момент опору,  $J$  — момент інерції. Ковзання визначається як

$$\lambda = \frac{r\omega - v}{r\omega},$$

де  $r$  — радіус колеса,  $v$  — лінійна швидкість.

Оптимальна робоча зона  $\lambda_{opt} = 0,15-0,19$  відповідає максимуму коефіцієнта зчеплення  $\varphi-\lambda$ . Алгоритми стабілізації базуються на прямому керуванні моментом (DTC) [3] із додаванням  $\lambda$ -контролю та оцінки максимально передаваного моменту (Maximum Transmissible Torque Estimation, MTTE) [4].

Об'єкт дослідження – ІРЕ на синхронному двигуні з постійними магнітами типу YASA-400. Паспортні дані використано для параметризації моделі (табл. 1).

Таблиця 1 – Технічні параметри електромашини YASA-400

Параметр	Позначення	Значення
Максимальний крутний момент	$M_{max}$	360 Н·м
Номинальний крутний момент	$M_{nom}$	250 Н·м
Максимальна потужність	$P_{max}$	150 кВт
Макс. частота обертання	$n$	7500 об/хв
Маса електромашини	$m$	24 кг

Моделювання проведено у MATLAB/Simulink із використанням бібліотеки Simscare Electrical [9]. Структура моделі включала підсистеми інвертора, датчиків струму та швидкості, а також блок оцінювання коефіцієнта зчеплення. DTC-схема реалізована на рівні електромагнітного моменту [3], а MTTE-блок оцінює граничне зчеплення  $\varphi_{\max}$  залежно від коефіцієнта тертя дорожнього покриття  $\mu$  [4].

Отримані результати показали, що поєднання DTC + MTTE +  $\lambda$ -контролю забезпечує стабільне утримання ковзання в оптимальній зоні  $\varphi$ - $\lambda$  при різних значеннях  $\mu = 0,9 \rightarrow 0,3$  [2]. У порівнянні з класичним PID-регулюванням амплітуда пульсацій моменту зменшилась на  $\approx 22\%$ , а час стабілізації — на  $\approx 18\%$ . Електропривід зберігає плавність тяги без зриву зчеплення навіть у перехідних режимах.

Додатково встановлено, що при зниженні коефіцієнта тертя система автоматично зменшує момент до  $0,7$ – $0,8 M_{\max}$ , запобігаючи пробуксовуванню коліс. Підвищення частоти оновлення алгоритму до  $10$  кГц зменшує пульсації ще на  $4$ – $5\%$ , що підтверджує доцільність реалізації на швидкодіючих DSP-контролерах [8].

Розроблена модель достовірно відтворює динаміку приводу під дією змінного коефіцієнта зчеплення і може бути використана для верифікації адаптивних алгоритмів контролю тяги або як навчальний приклад у курсі «Автоматизовані електромеханічні системи» [7].

Наукова новизна полягає у поєднанні прямого керування моментом (DTC) з оцінюванням максимально передаваного моменту (MTTE) та  $\lambda$ -контролем у єдиній структурі IPE, що дозволяє автоматично підтримувати робочу точку  $\varphi$ - $\lambda$  без ручного налаштування параметрів [4, 6].

Практична цінність полягає в можливості реалізації алгоритму на промислових мікроконтролерах TI C2000 та STM32 без збільшення обчислювальних витрат і без ускладнення схеми керування [5].

Висновки:

1. Розроблено математичну модель IPE електромобіля з урахуванням ковзання ведучих коліс і змінного коефіцієнта тертя.
2. Поєднання DTC, MTTE та  $\lambda$ -контролю забезпечує стабільне утримання робочої точки  $\varphi$ - $\lambda$ , зменшуючи пульсації моменту й втрати енергії.
3. Модель придатна для проектування адаптивних систем тягового керування електромобілями з IPE та для перевірки алгоритмів у MATLAB/Simulink.
4. Подальші дослідження передбачають експериментальну перевірку алгоритму на стендовому електроприводі й створення мультиприводної версії системи для багатівісних платформ.

#### Список літератури

1. Bosch R. *Automotive Handbook*. – 10th Ed. – John Wiley & Sons, 2018.
2. Sun L. et al. *Slip Ratio Estimation and Traction Control for EVs with In-Wheel Motors*. – IEEE Trans. Vehicular Technology, 2021.
3. Fodorean D. *Control Strategies for Permanent Magnet Synchronous Drives*. – Springer, 2019.
4. *IEEE Access. Maximum Transmissible Torque Estimation for EV Traction Control*. – 2021.
5. YASA Motors. *YASA-400 Product Sheet*. – Rev. 3, 2015.
6. *SAE Technical Paper Series. Torque Vectoring in EV Powertrains*. – 2021.
7. MDPI Energies. *Modeling of Traction Control for Electric Drive Vehicles under Variable Adhesion Conditions*. – 2020.
8. Chen H. et al. *Direct Torque Control of PMSM Drives with Low Torque Ripple*. – IEEE Trans. Power Electronics, 2018.