

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СУЧАСНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Ходак С. С.<sup>1</sup>, Серікова І. О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Проведений аналіз існуючих методів, що дозволяють істотно підвищити ефективність використання тягового двигуна електромобіля. Проаналізовані можливі методи визначення положення ротору в момент пуску двигуна. Обґрунтоване застосування векторного керування енергетичними параметрами тягового двигуна електромобіля. Проаналізована робота системи визначення параметрів двигуна.*

***Ключові слова:** векторне керування; частотний перетворювач; електродвигун; динамічні удари навантаження; скалярний метод; зворотній зв'язок; магнітне поле.*

### Вступ

Однією з основних вимог до транспорту на електричній тязі є найбільш ефективне використання енергії, що запасена в тяговій акумуляторній батареї. Від кількості використання енергії з батарей, залежить відстань, яку пройде транспортний засіб на одній зарядці. Нарощувати ємність батарей недоцільно, тому що, це призводить до суттєвого подорожчання електротранспорту [1, 2].

Основною задачею є перетворення електричної енергії з постійного струму акумуляторної батареї (АКБ) в трифазну систему живлення електродвигуна, яка покладена на частотний перетворювач.

### Аналіз публікацій

Існують різні методи частотного керування, що дозволяють розв'язати різні завдання при регулюванні швидкості та зміні моменту електродвигуна електромобіля, серед яких два основних методи – векторний і скалярний. Кожний з них має свої характерні риси, на яких слід зупинитися більш докладно.

### Мета та постановка задачі

Використання частотного перетворювача спрямоване на розв'язок важливих завдань. Вони полягають у здійсненні керування моментом і швидкістю електродвигуна. Дані вимоги вказують на необхідність обмеження струму двигуна, а також момент припустимими значеннями. Це виконується в процесах пуску, гальмування, а також при змінах навантаження електромобіля.

Робити це потрібно для того, щоб мінімізу-

вати динамічні удари навантаження в механізмі перетворювача частоти. При цьому відзначаються переваги у роботі та необхідність в регулюванні моменту двигуна, що виконується безупинно. Також виконання таких дій потрібно, коли необхідно точно підтримувати зусилля на робочому механізмі.

### Перший метод керування – скалярний

Особливістю скалярного керування полягає в його поширеності. Крім цього, частотні перетворювачі зі скалярним методом керування використовуються там, де важливо підтримувати певний технологічний параметр. Зміна амплітуди, а також частоти напруги живлення, виступає в якості основного принципу, на якому ґрунтується даний метод. При цьому використовується закон  $U/f$ . Найбільший діапазон для регулювання швидкості становить 1:10 [3].

Додаткові особливості скалярного методу полягають у властивій йому легкості при реалізації. Існує також і недолік, що полягає в тому, що немає можливості точно регулювати швидкість обертання валу електродвигуна. Ще одна особливість – на валу двигуна частотний перетворювач зі скалярним керуванням не дає можливості контролювати момент [4].

### Другий метод - векторний

Другий метод, що використовується за допомогою частотних перетворювачів в керуванні електротяговим пристроєм електромобіля – це векторний метод керування синхронними й асинхронними двигунами, при якому формуються не тільки гармонійні струми (напруги) фаз, але й забезпечується керування магнітним потоком ротора, а саме, моментом

на валу електродвигуна. Векторне керування застосовується у випадку, коли в процесі експлуатації навантаження може мінятися на одній і тій же частоті, тобто немає чіткої залежності між моментом навантаження й швидкістю обертання, а також у випадках, коли необхідно одержати розширений діапазон регулювання частоти при номінальних моментах [5-12].

Системи векторного керування розділяються на два класи – це бездатчикові та зі зворотним зв'язком. Область застосування дозволяє визначити використання певного методу. Застосування бездатчикових систем можливе, коли швидкість обертів тягового двигуна електромобіля змінюється не більше чим 1:100, а точність підтримки швидкості становить не більше чим  $\pm 0,5\%$ . При аналогічних показниках, що становлять 1:1000 і  $\pm 0,01\%$  відповідно прийнято використовувати системи зі зворотним зв'язком [13].

Перевагами векторного методу керування є швидкість реакції щодо зміни навантаження, а в області малих частот обертання двигуна характеризується плавністю, відсутністю ривків. Увага залучає забезпечення на валу за умови нульової швидкості номінального моменту, якщо є датчик швидкості. Регулювання швидкості виконується при досягненні високої точності. Усі ці переваги стають

важливими на практиці використання електромобілів [14].

### Відмінності за об'єктом контролю

Якщо в скалярних перетворювачах частоти об'єктом контролю й керування є тільки магнітне поле статора, то у векторних моделях об'єктом контролю й керування є й магнітне поле статора і ротора, а точніше - їхня взаємодія з метою оптимізації моменту обертання на різних швидкостях. Що стосується методів контролю й керування, то коли застосовується скалярний метод керування - використовується вихідна частота й струм частотного перетворювача, а у випадку з векторним керуванням - вихідна частота, струм і його фаза.

Векторні моделі точніше в роботі, але при цьому потрібна наявність більш точних вимірів [15-18].

### Вибір перетворювача

Якщо необхідно вибрати частотний перетворювач, у першу чергу, необхідно дивитися на область застосування привода електромобіля, і, виходячи з умов його експлуатації, визначитися з вибором методу керування в частотному перетворювачі тягового електроприводу (рис. 1).

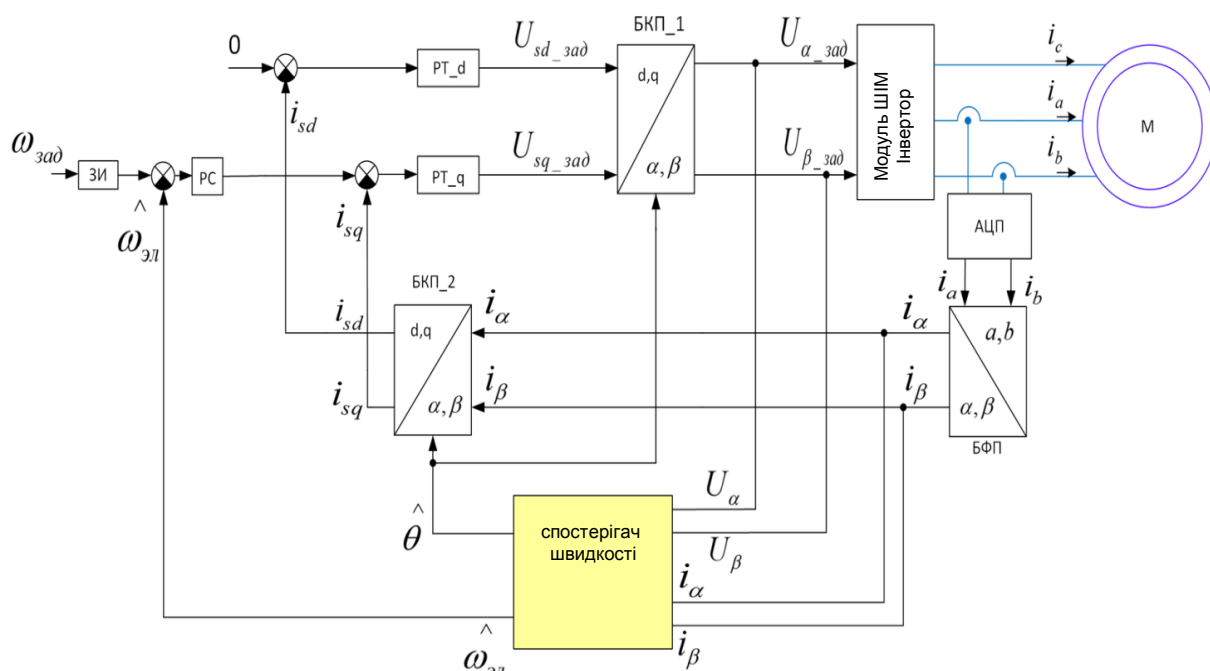


Рис. 1. Регулювач по швидкості

### Непрямі вимірники положення

Ці спостерігачі застосовуються в бездатчи-

кових приводах. Для виміру положення ротора вони використовують магнітну неоднорідність властивостей двигуна. Наприклад,

несиметричність обмоток або неоднорідність магнітної проникності.

Останнім часом поширюється використання спостерігачів, які використовують метод високочастотної інжекції. Метод зводиться до генерації силовим інвертором високочастотного тестуючого сигналу й пошуку по реакції на цей сигнал реального положення ротора. Швидкість ротора при цьому оцінюється як диференціал положення.

### Класифікація спостерігачів

На рисунку 2 показана спрощена класифікація спостерігачів стану.

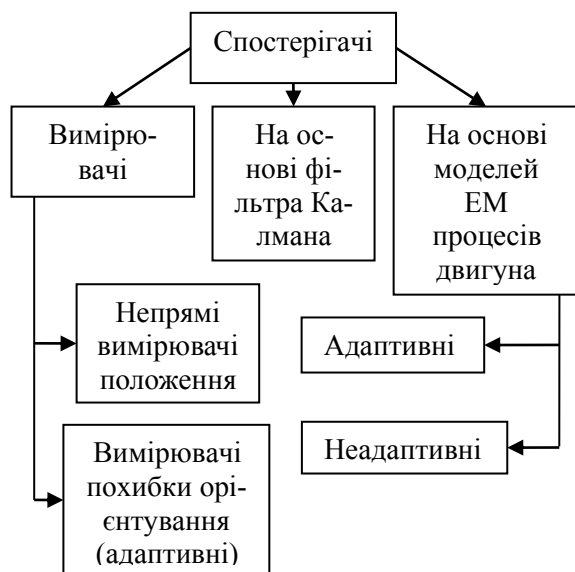


Рис. 2. Класифікація спостерігачів

З одного боку, векторний метод керування синхронними й асинхронними двигунами досить складний і характеризується додатковими втратами й підвищеним рівнем шуму. З іншого боку, його точність сильно залежить від властивостей конкретного двигуна. Застосування цього методу необхідно розглядати індивідуально.

### Вимірники помилки орієнтування

Ці спостерігачі застосовуються в бездатчикових приводах. Вони визначають положення обертової системи координат, використовуючи внутрішні сигнали системи керування, які залежать від помилки її орієнтування. Їх можна назвати адаптивними, тому що вони зводять помилку орієнтування до нуля. За положенням обертової системи координат оцінюється швидкість ротора.

### Неадаптивні спостерігачі на основі моделей двигуна

Ці спостерігачі застосовуються в асинхронних приводах з датчиками швидкості або положення. Користуючись формулами моделі електромагнітних процесів двигуна, вони по відомих величинах обчислюють оцінки необхідних для регулювання невідомих величин.

### Адаптивні спостерігачі на основі моделі двигуна

Дані спостерігачі можуть застосовуватися як у датчикових, так і в бездатчикових приводах. В їх основу закладені моделі електромагнітних процесів, що відбуваються в двигуні. Ці спостерігачі будуються як слідкуючі системи й, крім моделі, містять регулятор, що адаптує модель до реальних процесів, які відбуваються у двигуні або приводі. У закордонній літературі вони називаються MRAS – спостерігачами (Motor Referanse Adaptive System), або по-російському - «наблюдатели с эталонной моделью». У даній публікації розглянуто кілька таких систем.

### Спостерігачі на основі фільтра Калмана

Спостерігачі на основі фільтра Калмана застосовуються в бездатчикових приводах. Цей спостерігач являє собою цифровий фільтр, алгоритміка якого будується з урахуванням законів математичної статистики. Він дозволяє відновлювати невідомий параметр, мінімізуючи при цьому вплив перешкод виміру відомих величин.

Спостерігачі на основі фільтра Калмана характеризуються складністю обчислювального алгоритму й теоретично повинні дозволяти одержувати високу точність спостереження. Реальна ж точність цього спостерігача залежить від точності відомих параметрів двигуна й привода. На практиці ці параметри точно невідомі й можуть змінюватися в процесі роботи. Це обмежує точність і область використання, здавалося б, ідеального спостерігача.

### Неадаптивний спостерігач

Неадаптивний спостерігач потоку дозволяє при знанні кута, струмів і параметрів схеми заміщення двигуна визначити амплітуду й кут вектора потоку ротора. Опір ротора, необхідний для розрахунків у цих моделях, у процесі роботи двигуна може досить сильно змінюватися залежно від температури, що суттєво впливає на точність обчислення потоку ротора [19].

Точність оцінки потоку можливо підвищити за допомогою адаптивного спостерігача опору ротора. Для оцінки опору ротора пропонується використання структури спостерігача, яка використовувалася для оцінки швидкості. Якщо швидкість відома, то адаптацію моделі в даному спостерігачі можна виконувати за іншим невідомим параметром, наприклад, за опором ротору [20].

### Висновки

Використання векторного керування в частотних перетворювачах тягового електроприводу дозволяє суттєво підвищити ефективність використання енергії батареї електромобілю, що дає можливість подовжити пробіг на одному заряді.

Розглянуті принципи побудови модулів перетворювачів для живлення обмоток електродвигуна електромобілю.

Розглянуті варіанти векторного керування та види спостерігачів.

Проаналізовані способи, що дозволяють визначити положення ротору.

З'ясовано, що датчики положення ротору мають залежність від зовнішніх факторів та температури.

### Література

- Щетина В. А., Морговский Ю. Я. Центр Б. И., Богомазов В. А., Электромобиль: техника и экономика. Ленинград, 1987. 253 с.
- Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. Москва, 1989. 184 с.
- Новиков Г. В. Частотное управление асинхронными электродвигателями. Москва, 2016. 498 с.
- Кочетков В.П., Бражников А.В., Дубровский Л.Л. Теория электропривода. Красноярск, 1991. 140 с.
- Бражников А.В. Підвищення рівномірності обертання ротора парно-фазного частотно-керуваного електродвигуна. *Збірник наукових праць "Підвищення ефективності роботи гірського встаткування при освоєнні родовищ корисних копалин"*. Красноярськ, 1995. Видавництво ГАЦМиЗ. 39-56 с.
- Функціональні можливості перетворювача частоти. Харків, 2018. URL: <https://owen.ua/ua/pryvudna-tehnika/funkcionalni-mozhlyvosti-pchv> (дата звернення: 13.12.2018).
- Обґрунтування і вибір перетворювача частоти і додаткового устаткування, 2016. URL: <http://um.co.ua/1/1-3/1-31432.html> (дата звернення: 13.12.2018).
- Вибір перетворювача частоти для частотного електроприводу, 2018. URL: <http://ni.biz.ua/13-3/10506.html> (дата звернення: 13.12.2018).
- Частотний перетворювач, вибір, векторні та скалярні перетворювачі частоти. 2010. URL: <http://megasite.in.ua/48703-chastotnij-peretvoryuvach-vibir-vektorni-ta-skalyarni-peretvoryuvachi-chastoti.html> (дата звернення: 13.12.2018).
- Типи управління двигунами (скалярний). 2016. URL: <http://jak.magey.com.ua/articles/tipi-upravlinnja-dvigunami-skaljarnij.html> (дата звернення: 13.12.2018).
- Вибір частотних перетворювачів для Ефективного управління електроприводом. 2010. URL: <http://ukrarticles.pp.ua/prom/5539-vybor-chastotnogo-preobrazovatelya-dlya-yeffektivnogo-upravleniya-yelektroprivodom.html> (дата звернення: 13.12.2018).
- Як вибрати перетворювач частоти (частотний привід) відео. 2016. URL: <http://jak.bono.odessa.ua/articles/jak-vibrati-peretvorjuvach-chastoti-chastotnij.php> (дата звернення: 13.12.2018).
- Murray A. Sensorless Motor Control Simplifies Washer Drives. *Power Electronics Technology*. 2006. 14-21 p.
- Векторний і скалярний управління асинхронним двигуном (відео), 2016. URL: <http://dovidkam.com/remont/elektrika/vektornij-i-skalyarnij-upravlinnya-asinxronnim-dvigunom-video.html> (дата звернення: 13.12.2018).
- Конденсаторні електродвигуни. Асинхронні конденсаторні двигуни. 2018. URL: <https://electricj.ru/uk/condenser-electric-motors-asynchronous-condenser-motors/> (дата звернення: 13.12.2018).
- Однофазний конденсаторний двигун. конденсаторний двигун. 2018. URL: <https://zgbox.ru/uk/singlephase-capacitor-motor-condenser-motor/> (дата звернення: 13.12.2018).
- Конденсаторний двигун. Конденсаторні двигуни - пристрій, принцип дії, застосування. 2018. URL: <https://electrician-i.ru/uk/motors/condenser-motor-condenser-motors-device-principle-of-operation-application/> (дата звернення: 13.12.2018).
- Конденсаторний двигун принцип роботи. Асинхронні конденсаторні двигуни. 2018. URL: <https://electricaire.ru/condenser-motor-principle-of-operation-asynchronous-condenser-motors.html> (дата звернення: 13.12.2018).
- Напруга і потужності асинхронного двигуна. Пусковий струм електродвигуна. Режими, в яких працюють електродвигуни. 2018. URL: <https://electrician.ru/voltage-and-power-of-the-induction-motor-starting-current-of-the-motor/> (дата звернення: 13.12.2018).
- Швидкість передачі інформації і смуга пропускання лінії зв'язку. 2016. URL: <http://um.co.ua/8/8-2/8-23094.html> (дата звернення: 13.12.2018).

## References

1. Shchetyna V. A., Morhovskyy YU. YA. Tsenter B. Y., Bohomazov V. A., Élektromobil': tekhnika y ékonomyka. Lenynhrad, [Shchetyna VA, Morgovskyy Yu. Ya. Center B.I., Bogomazov VA, Electromobile: technology and economics. Leningrad] 1987. 253 [in Russian].
2. Kenyo T., Nahamory S. Dvyhately posto-yannoho toka s postoyannymy mahnytamy. [DC motors with permanent magnets] Moskva, 1989. 184 [in Russian].
3. Novykov H. V. Chastotnoe upravlenye asynkhronnykh élektrodvyhatelnykh mashyn. [Frequency control of asynchronous electric motors] Moskva, 2016. 498 [in Russian].
4. Kochetkov V.P., Brazhnykov A.V., Dubrovskyy I.L. Teoryya élektropryvoda. [Теория электропривода] Krasnoyarsk, 1991. 140 [in Russian].
5. Brazhnykov A.V. Pidvyshchennya rivnomirnosti obertannya rotora parno -faznoho chastotno-kerovanoho elektrodvyhuna. Zbirnyk naukovykh prats' "Pidvyshchennya efektyvnosti roboty hirs'koho vstatkuvannya pry osvoyenni rodovyshch korysnykh kopalyn" [Increase in the rotation evenness of the rotor of a pair-phase frequency controlled electric motor. Collection of scientific works "Increasing the efficiency of the mountain equipment during mining of mineral deposits"]. Krasnoyars'k, 1995. Vydavnytstvo HATSMYz. 39-56 [in Ukrainian].
6. Funktsional'ni mozhlyvosti peretvoryuvacha chastoty. [Functional capabilities of the frequency converter] Kharkiv, 2018. Retrived from: URL: <https://owen.ua/ua/pryvidna-tehnika/funkcionalni-mozhlyvosti-pchv> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
7. Obruntuвання i vybir peretvoryuvacha chastoty i dodatkovoho ustatkuvannya, [Justification and choice of frequency converter and additional equipment] 2016. Retrived from: URL: <http://um.co.ua/1/1-3/1-31432.html> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
8. Vybir peretvoryuvacha chastoty dlya chastotnoho elektropyvodu, [Choosing a frequency converter for a frequency electric drive] 2018. Retrived from: URL: <http://ni.biz.ua/13-3/10506.html> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
9. Chastotnyy peretvoryuvach, vybir, vek-torni ta skalyarni peretvoryuvachi chastoty. [Frequency converter, selection, vector and scalar frequency converters] 2010. Retrived from: URL: <http://megasite.in.ua/48703-chastotnijj-peretvoryuvach-vibir-vektorni-ta-skalyarni-peretvoryuvachi-chastoti.html> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
10. Typy upravlinnya dvyhunamy [Types of engine management] (skalyar-nyy. 2016. Retrived from: URL: <http://jak.magey.com.ua/articles/tipi-upravlinnja-dvigunami-skaljarnij.html> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
11. Vybir chastotnykh peretvoryuvachiv dlya Efektivnoho upravlinnya elektropyvodom. [Selection of frequency converters for Effective control of the electric drive] 2010. Retrived from: URL: <http://ukrarticles.pp.ua/prom/5539-vybor-chastotnogo-preobrazovatelya-dlya-yeffektivnogo-upravleniya-yelektropryvodom.html> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
12. Yak vybraty peretvoryuvach chastoty (chastotnyy pryvid) video [How to choose a frequency converter (frequency drive) video]. 2016. Retrived from: URL: <http://jak.bono.odessa.ua/articles/jak-vibrati-peretvorjuvach-chastoti-chastotnij.php> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
13. Murray A. Sensorless Motor Control Simplifies Washer Drives. Power Electronics Technology. 2006. 14-21 p.
14. Vektorny i skalyarnyy upravlinnya asynkhronnym dvyhunom (video), [Vector and scalar control asynchronous engine] 2016. Retrived from: URL: <http://dovidkam.com/remont/elektrika/vektornij-i-skalyarnij-upravlinnya-asinxronnim-dvigunom-video.html> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
15. Kondensatorni elektrodvyhuny. Asynkhronni kondensatorni dvyhuny. [Condenser motors. Asynchronous condenser motors] 2018. Retrived from: URL: <https://electricj.ru/uk/condenser-electric-motors-asynchronous-condenser-motors/> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
16. Odnofaznyy kondensatornyy dvyhun. kondensatornyy dvyhun. [Single-phase condenser motor. condenser engine] 2018. Retrived from: URL: <https://zgbox.ru/uk/singlephase-capacitor-motor-condenser-motor/> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
17. Kondensatornyy dvyhun. Kondensatorni dvyhuny - prystryi, pryntsyyp diyi, zastosuvannya. [Condenser motor. Condenser motors - device, principle of operation, application] 2018. Retrived from: URL: <https://electrician-i.ru/uk/motors/condenser-motor-condenser-motors-device-principle-of-operation-application/> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
18. Kondensatornyy dvyhun pryntsyyp roboty. Asynkhronni kondensatorni dvyhuny. [Condenser Engine is the principle of operation. Asynchronous condenser motors] 2018. Retrived from: URL: <https://electricaire.ru/condenser-motor-principle-of-operation-asynchronous-condenser-motors.html> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].
19. Napruha i potuzhnosti asynkhronnoho dvyhuna. Puskovy strum elektrodvyhuna. Rezhymy, v yakykh pratsyuyut' elektrodvyhuny. [Voltage and power of the asynchronous motor. Starting current of the electric motor. The modes in which the electric motors operate] 2018. URL: <https://electrician.ru/voltage-and-power-of-the-induction-motor-starting-current-of-the-motor/> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].

20. Shvydkist' peredachi informatsiyi i smuha propuskannya liniyi zv'yazku. [The speed of the transfer of information and the bandwidth of the transmission line] 2016. URL: <http://um.co.ua/8/8-2/8-23094.html> (accessed: 13.12.2018) [in Ukrainian].

**Ходак Сергій Сергійович**<sup>1</sup>, студент, +380934516875, sergey.hodak3@gmail.com,

**Серікова Ірина Олексіївна**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. автомобільної електроніки, +380671085237, irinaserikova\_ae\_khadi@ukr.net

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

### Ways to improve the efficiency of electric control of modern electromobile

**Abstract. Problem.** The most important factors here are environmental and economic ones. For large cities these two factors are closely connected and form the requirements for modern vehicles. **Goal.** They consist in realizing the control of the torque and speed of the electric motor. These requirements indicate the need to limit the current of the engine, as well as the moment of admissible values. At the same time there is an overload in the work and the need for constant regulation of the torque of the engine. It is also necessary to carry out such measures when it is necessary to accurately support the efforts on the working mechanism. **Methodology.** When performing the work, an analytical method was used. **Results.** The use of vector control in the frequency converters of the traction electric drive allows to significantly improve the efficiency of using the battery of the electric vehicle, which makes it possible to extend the mileage on one charge. The principles of building modules of converters for power supply of windings of an electric motor to an electric vehicle are considered. The options of vector control and types of observers are considered. The methods of determining the position of the rotor are analyzed. It was found that the position sensors of the rotor depend on external factors and temperature. **Originality.** Highlights the most important components of the drive and their requirements. The efficiency of using the vector

control method of the traction motor is shown. **Practical value.** The importance of precision control of the traction motor on the efficiency of the electric drive system in general is shown. One of the most critical elements of the motor control system are rotor position sensors and current sensors in the phases of the windings.

**Key words:** vector control; frequency converter; electric motor; dynamical shock load; scalar method; sound links; magnetic field; magnetic non-uniform.

**Khodak Sergey Sergeevich**<sup>1</sup>, student, +380934516875, sergey.hodak3@gmail.com,

**Sierikova Irina Alekseevna**<sup>1</sup>, Ph.D., associate professor. Automobile electronics, +3806 71085237, irinaserikova\_ae\_khadi@ukr.net.

<sup>1</sup>Harkov National Automobile and Road University, 61002, Ukraine, Kharkov, str. Yaroslav Mudruy, 25.

### Пути повышения эффективности управления электроприводом современного электромобиля

**Аннотация.** Проведен анализ существующих методов, позволяющих существенно повысить эффективность использования тягового двигателя электромобиля. Проанализированы возможные методы определения положения ротора в момент пуска двигателя. Обосновано применение векторного управления энергетическими параметрами тягового двигателя электромобиля. Проанализирована работа системы определения параметров двигателя.

**Ключевые слова:** векторное управление; частотный преобразователь; электродвигатель; динамические ударные нагрузки; скалярное метод; обратная связь; магнитное поле.

**Ходак Сергей Сергеевич**<sup>1</sup>, студент, +380934516875, sergey.hodak3@gmail.com,

**Серикова Ирина Алексеевна**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. автомобильной электроники, +380671085237, irinaserikova\_ae\_khadi@ukr.net

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.