

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Воробйов Богдан Віталійович

УДК 621.33

ДИСЕРТАЦІЯ

**Дослідження асинхронного електропривода електромобіля у режимах
рекуперації та буксування**

141 – Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка

Подається на здобуття наукового ступеня PhD доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Б.В. Воробйов

Науковий керівник Пшеничников Дмитро Олексійович, кандидат технічних
наук, доцент.

*Звертаюся до
вас з
імпровізацією
приміром
дисертації
завдячую
Віталью
проф. Заньковичу
28.04.21р*

Харків

2021
РАДА

Код 02071180



АНОТАЦІЯ

Воробйов Б.В. Дослідження асинхронного електропривода електромобіля у режимах рекуперації та буксування. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня PhD доктора філософії за спеціальністю 141 «Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка». – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», МОН України, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню асинхронного електроприводу електромобіля у різних режимах роботи, виявленню особливостей поведінки електроприводу з урахуванням основних типів навантаження та механічних частин, визначення способу ідентифікації буксування та його запобігання засобами електроприводу. Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії в асинхронному електроприводі у різних режимах руху електромобіля. Предметом дослідження є дослідження електропривода у режимах рекуперації та буксування, визначення ознак переходу електромобіля у режим буксування та підвищення безпеки руху засобами електропривода.

Проведений аналіз літератури свідчить про безумовне збільшення світового виробництва електромобілів в найближчому майбутньому. Україна повинна своєчасно відреагувати на дану тенденцію підготовкою відповідних фахівців, проведенням наукових досліджень, мати власні актуальні напрацювання і дослідження.

Обрана найбільш актуальна структура електроприводу електромобіля. Вид функціональної схеми визначається характером перетворення енергії в процесі руху електромобіля. Джерелом енергії є батарея акумуляторів, що забезпечує на виході постійну напругу. Перетворення постійної напруги в змінну, необхідне для живлення асинхронного двигуна, забезпечується силовим електронним перетворювачем – трифазним автономним інвертором напруги.

Інвертор напруги виконує функції регулювання як частоти, так і значення напруги з векторним керуванням, а саме DTC. Керування інвертором здійснюється мікропроцесорним блоком, що здійснює ввімкнення і вимкнення ключів автономного інвертора за алгоритмом ШІМ. Перетворення електричної енергії в механічну здійснюється асинхронним двигуном, на валу якого формується механічний момент. Підвищення моменту на валах коліс з відповідним зниженням швидкості досягається за допомогою механічної коробки перемикачів передач.

Виходячи зі стандартного міського циклу руху транспорту, були побудовані діаграми і зроблений вибір потужності двигуна. Був проведений аналіз енергетичних характеристик електроприводу зі встановленою коробкою передач та без неї. Зіставляючи отримані співвідношення для двигуна без застосування коробки перемикачів передач видно, що потужності в сталому режимі рівні, проте в динамічних режимах роботи необхідна потужність, що приблизно в 1,5 рази перевищує потужність двигуна при використанні КПП. Отже, використання КПП виправдано і доцільно, так як необхідна потужність двигуна в динамічних режимах значно нижче, а також немає необхідності в значних конструкційних змінах при переобладнанні автомобіля в електромобіль.

Побудовано математичну модель електромеханічної системи електроприводу. По ній побудована комп'ютерна модель в пакеті Matlab, і була складена на елементах бібліотеки SimPowerSystems.

До складу моделі входять такі основні елементи:

- система електроживлення;
- інвертор (IGBT-Inverter);
- асинхронний двигун;
- система керування;
- блок формування моменту навантаження;
- трансмісія;

- блок моніторингу вимірюваних величин;
- блок ініціалізації параметрів.

Проведено комп'ютерне моделювання електроприводу в різних режимах роботи. Особливу увагу приділено режимам пробуксовування, коли одне з коліс частково або повністю втрачає зчеплення з дорожнім покриттям. Отримані графіки показують неузгодженість швидкостей двох коліс, яка має місце при наїзді на ділянку дорожнього покриття зі зниженим коефіцієнтом зчеплення, а також перехідні процеси при наїзді двома колесами на ділянку зі зниженим коефіцієнтом зчеплення.

Спираючись на отримані залежності, було запропоновано метод розпізнавання переходу електромобіля у режим буксування з використанням неузгодженості швидкостей. Підбрано найбільш відповідні коефіцієнти неузгодженості і на їх основі побудована структура регулятора з нечіткою логікою. Запропоновано функціональну схему для визначення і запобігання переходу в режим буксування.

Наукова новизна роботи полягає в наступному.

- Удосконалено та перевірено методику розробки ЕП ЕМБ, яка може бути використана при розробці нових електромобілів і переобладнанні серійних автомобілів в електромобілі;
- Вперше розроблено та досліджено загальну математичну модель електромобіля з асинхронним електроприводом, що включає до себе розгорнуту модель системи живлення, електромеханічної частини з системою прямого керування моментом з урахуванням рекуперації та модель механічної частини електромобіля з можливістю моделювання режиму буксування;
- Синтезована система розпізнавання та запобігання буксування коліс шляхом з використанням нечіткої логіки засобами електроприводу з використанням

вперше запропонованого способу раннього розпізнавання переходу електромобіля в режим буксування.

Ключові слова: асинхронний електропривод, електромобіль, система керування, буксування, математичне моделювання, перетворювач частоти, інвертор, рекуперативне гальмування, енергозбереження.

Список публікацій здобувача

1. В.Б. Клепиков, А.В. Семиков, Е.В. Сақун, А.В. Ротару, Б.В. Воробьёв // Моделирование динамических процессов электромеханической системы электромобиля при буксовании колес. // Modern problems of power engineering and ways of solving them. – 2019 – № 3 (91). – С. 34–42. ISSN 1512-0120
2. В.В. Vorobiov // Energy efficient asynchronous electric drive of an electromobile. // Bulletin of the NTU “KhPI”. Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. – 2020 № 4(1358), С. 52-56. ISSN 2079-8024
3. В.В. Vorobiov, D.O. Pshenichnykov // Modeling of the operation of an asynchronous electric drive of an electric vehicle in slip modes. // 25th IEEE international conference on problems of automated electric drive. Theory and practice. – 2020 – №1 (25)., IEEE Operations Center 445 Hoes Lane Piscataway, USA – p. 49–55. ISBN 978-1-7281-9935-1
4. Д.А. Пшеничников, Б.В. Воробьёв // Модель преобразователя асинхронного электропривода электромобиля в режиме рекуперативного торможения. // Bulletin of the NTU “KhPI”. Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. – 2020 № 9(1334), С. 67-72. ISSN 2079-8024. doi: 10.20998/2079-8084.2019.9.13
5. Д.А. Пшеничников, Б.В. Воробьёв // Стенд асинхронного электропривода электромобля. // Bulletin of the NTU “KhPI”. Series: Problems of automated

electrodrive. Theory and practice. – 2017 № 27(1249), С. 449-454. ISSN 2079-8024. doi: 10.20998/2079-8084.2019.9.13

Тези до науових конференцій

XXI-XXV Міжнародна науково-практична конференція MicroCAD (м. Харків 2017-2021), семінар Наукової Ради «Наукові основи електроенергетики – Динаміка нелінійних електромеханічних систем » (I-II 2017, I-II 2018, III-IV 2018, I-II 2019, III IV 2019, III IV 2020, I II 2021).

ANNOTATION

Vorobiev B.V. The research of an asynchronous electric drive of an electric vehicle in recuperation and slipping modes. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the PHD degree in specialty 141 "Electrical Engineering, Power Engineering and Electromechanics". - National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2021.

The dissertation work is devoted to the study of an asynchronous electric drive of an electric vehicle in various operating modes, identifying the features of the behavior of an electric drive, taking into account the main types of loads and mechanical parts, determining a method for identifying slipping and preventing it by means of an electric drive. The object of the research is the processes of energy conversion in an asynchronous electric drive in various modes of electric vehicle movement. The subject of the research is the study of an electric drive in the recuperation and slipping modes, determining the signs of the transition of an electric vehicle to the slipping mode and increasing the safety of movement by means of an electric drive.

The analysis of the literature indicates an unconditional increase in the global production of electric vehicles in the near future. Ukraine should promptly respond to this trend by training relevant specialists, conducting scientific research, and have its own topical developments and research.

The most relevant structure of the electric drive of the electric vehicle has been selected. The type of functional diagram is determined by the nature of energy conversion during the movement of an electric vehicle. The source of energy is a battery of accumulators, which provides a constant voltage at the output. Conversion of direct voltage to alternating voltage required to power an asynchronous motor is provided by a power electronic converter - a three-phase autonomous voltage inverter. The voltage inverter has the function of regulating both the frequency and

the voltage value with vector control, namely the DTC. The inverter is controlled by a microprocessor unit, turns on and off the keys of the autonomous inverter according to the PWM algorithm. The conversion of electrical energy into mechanical energy is carried out by an asynchronous motor, on the shaft of which a mechanical moment is formed. The increase in torque on the wheel shafts with a corresponding decrease in speed is achieved using a mechanical gearbox. Based on the standard urban traffic cycle, diagrams were built and the choice of engine power was made. An analysis was made of the energy characteristics of the electric drive with and without an installed gearbox. Comparing the obtained ratios for the engine without the use of a gearbox, it can be seen that the power in the steady state is the level, however, in dynamic modes of operation, the power is required about 1.5 times the engine power when using the gearbox. Thus, the use of a gearbox is justified and advisable, since the required engine power in dynamic modes is much lower, and there is no need for significant structural changes when converting a car into an electric vehicle.

ural changes when converting a car into an electric vehicle.

A mathematical model of the electromechanical system of the electric drive has been built. Based on it, a computer model was built in the Matlab package, and was compiled on the elements of the SimPowerSystems library.

The model includes the following main elements:

- power supply system;
- inverter (IGBT-Inverter)
- asynchronous motor;
- control system;
- block of the formation of the load torque;
- transmission;
- unit for monitoring measured values;
- block of initialization of parameters.

Computer simulation of the electric drive in various operating modes has been

carried out. Particular attention is paid to slip modes, when one of the wheels partially or completely loses grip on the road surface. The resulting graphs show the inconsistency of the speeds of the two wheels, which occurs when hitting a section of the road surface with a reduced coefficient of adhesion, as well as transient processes when two wheels hit a section with a reduced coefficient of adhesion.

Based on the obtained dependencies, a method was proposed for recognizing the transition of an electric vehicle to skidding mode using the ineffectiveness of speeds. The most appropriate inconsistency coefficients are selected and on their basis the structure of the controller with fuzzy logic is constructed. A functional diagram is proposed for determining and preventing the transition to the slip mode.

The scientific novelty of the work is as follows.

- Improved and tested the methodology for the development of EV, which can be used in the development of new electric vehicles and conversion of serial cars into electric vehicles;

- For the first time, a general mathematical model of an electric vehicle with an asynchronous electric drive was developed and investigated, it includes a detailed model of the power supply system, an electromechanical part with a direct torque control system taking into account recuperation and a model of the mechanical part of an electric vehicle with the ability to simulate the slip mode;

- A synthesized system for recognizing and preventing wheel slip by using fuzzy logic by means of an electric drive using the first proposed method for early recognition of the transition of an electric vehicle to slip mode.

Key words: asynchronous electric drive, electric vehicle, keruvannya system, skidding, mathematical model, frequency conversion, inverter, recuperative galmuvannya, energy saving.

List of applicant publications

1.V.B. Klepikov, A.V. Semikov, E.V. Sakun, A.V. Rotaru, B.V. Vorobiev //

Modeling of dynamic processes of the electromechanical system of an electric vehicle during wheel slip. // Modern problems of power engineering and ways of solving them. - 2019 - No. 3 (91). - S. 34–42. ISSN 1512-0120

2. B.V. Vorobiov // Energy efficient asynchronous electric drive of an electromobile. // Bulletin of the NTU “KhPI”. Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. - 2020 No. 4 (1358), pp. 52-56. ISSN 2079-8024

3. B.V. Vorobiov, D.O. Pshenichnykov // Modeling of the operation of an asynchronous electric drive of an electric vehicle in slip modes. // 25th IEEE international conference on problems of automated electric drive. Theory and practice. – 2020 – №1 (25)., IEEE Operations Center 445 Hoes Lane Piscataway, USA – p. 49–55. ISBN 978-1-7281-9935-1

4. D.A. Pshenichnikov, B.V. Vorobiov // Model of the converter of the asynchronous electric drive of an electric vehicle in the regenerative braking mode. // Bulletin of the NTU “KhPI”. Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. - 2020 No. 9 (1334), C. 67-72. ISSN 2079-8024. doi: 10.20998 / 2079-8084.2019.9.13

5. D.A. Pshenichnikov, B.V. Vorobiev // Stand for an asynchronous electric drive of an electric vehicle. // Bulletin of the NTU “KhPI”. Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. - 2017 No. 27 (1249), pp. 449-454. ISSN 2079-8024. doi: 10.20998 / 2079-8084.2019.9.13

Abstracts for scientific conferences

XXI-XXV International scientific-practical conference MicroCAD (Kharkiv 2017-2021), seminar of the Scientific Council "Scientific bases of electric power - Dynamics of nonlinear electromechanical systems" (I-II 2017, I-II 2018, III-IV 2018, I-II 2019, III IV 2019, III IV 2020, I II 2021).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	13
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕБУДУВАННЯ ТА СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ	19
1.1 Сучасний стан електромобілебудування	19
1.2 Огляд існуючих антибуксувальних систем	24
Висновки до розділу 1	28
РОЗДІЛ 2 ФУНКЦІОНАЛЬНА ТА ПРИНЦИПОВА СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	29
2.1 Розробка функціональної схеми електропривода електромобіля	29
2.1.1 Вибір типу електроприводу	32
2.1.2 Вибір, розрахунок і перевірка електродвигуна	34
2.2 Вибір системи живлення	50
2.2.1 Огляд типів акумуляторів	50
2.2.2 Синтез блоку електроживлення	54
2.3 Розробка принципової схеми електропривода електромобіля	55
Висновки до розділу 2	56
РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ ТА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	57
3.1 Модель системи електроживлення	57
3.2 Модель силового перетворювача та асинхронного двигуна	60
3.3 Модель системи векторного керування	66
3.4 Модель механічної частини (з КПП) та загальна модель	67

Висновки до розділу 3	76
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА У РЕЖИМАХ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ	78
4.1 Реалізація рекуперативних режимів та розрахунок енергії гальмування	78
4.2 Моделювання перехідних процесів у режимі рекуперативного гальмування	84
Висновки до розділу 4	91
РОЗДІЛ 5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА У РЕЖИМАХ БУКСУВАННЯ	92
5.1 Моделювання перехідних процесів у режимі буксування	92
5.2 Визначення параметрів для ранньої ідентифікації буксування	99
Висновки до розділу 5	100
РОЗДІЛ 6 СИНТЕЗ СИСТЕМИ ЗАПОБІГАННЯ БУКСУВАННЯ	102
6.1 Алгоритм запобігання буксування та функціональна схема системи	102
6.2 Обґрунтування структури фаззі-регулятора	104
6.3 Розробка алгоритму нечіткого виводу	116
6.4 Комп'ютерне моделювання ЕП ЕМБ з системою запобігання буксування	123
Висновки до розділу 6	130
ВИСНОВКИ	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	135