

Розробка енергоефективної електромеханічної системи електробусу на основі адаптивного векторно-керованого асинхронного електроприводу з акумуляторно-суперконденсаторним живленням

Разработка энергоэффективной электромеханической системы электробуса на основе адаптивного векторно-управляемого асинхронного электропривода с аккумуляторно-суперконденсаторным питанием

Development of efficient electrobus electromechanical system based on adaptive vector-controlled induction motor drive with accumulator-ultracapacitor power source

- 1. Номер державної реєстрації теми: 0117U004284**
- 2. Науковий керівник – д.т.н., проф. Пересада С. М., Пересада С. М., Peresada Sergei.**

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.)

Розроблено дослідний зразок електромеханічної системи електробусу з тяговим векторно-керованим асинхронним електроприводом потужністю 100 кВт, який забезпечує адаптивне енергоефективне векторне керування координатами тягового асинхронного двигуна електричного транспортного засобу, а також функції автоматизації, які є стандартними для електроприводів транспортних засобів. Розроблено гібридне джерело живлення малої потужності, яке складається з акумуляторного блоку, швидкого накопичувача енергії на базі суперконденсаторів, силових DC-DC перетворювачів, керуючого контролера з реалізованими алгоритмами для раціонального керування процесами енергообміну між електроприводом і ГДЖ, сенсорної та інтерфейсної підсистем. Розроблено та реалізовано на практиці нові методи та алгоритми векторного керування тяговими АД, які забезпечують відпрацювання моменту (кутової швидкості) з максимізацією співвідношення момент/струм, адаптацію до варіацій активних опорів статора і ротора, завдяки чому зменшуються активні втрати в АД і відповідно підвищується ККД системи. Розроблено та досліджено експериментально нові методи керування DC-DC перетворювачами гібридного джерела живлення. Розроблено програмне забезпечення яке реалізує: алгоритми адаптивного енергоефективного керування асинхронними двигунами на цифровому сигнальному процесорі; телеметрію електромеханічної системи з використанням панельного комп'ютера водія; керування DC-DC перетворювачами. Розроблено та виготовлено експериментальну установку з тестовим асинхронним двигуном потужністю 50 кВт і навантажувальним агрегатом на основі двигуна постійного струму, яка дозволяє проводити повномасштабні експериментальні дослідження в режимах, наближених до існуючих в реальних транспортних засобах.

(рос.)

Разработан опытный образец электромеханической системы электробуса с тяговым векторно-управляемым асинхронным электроприводом мощностью 100 кВт, который обеспечивает адаптивное энергоэффективное векторное управление координатами тягового асинхронного двигателя электрического транспортного средства, а также функции автоматизации, стандартные для электроприводов транспортных средств. Разработан гибридный источник питания малой мощности, который состоит из аккумуляторного блока, быстродействующего накопителя энергии на основе суперконденсаторов, силовых DC-DC преобразователей, управляющего контроллера с реализованными алгоритмами для рационального управления процессами энергообмена между электроприводом и гибридным источником питания. Разработаны и реализованы на практике новые методы и алгоритмы векторного управления тяговыми асинхронными двигателями, которые обеспечивают отработку момента (угловой скорости) с максимизацией соотношения момент-ток, адаптацию к активным сопротивлениям статора и ротора, благодаря чему уменьшаются активные потери в двигателе и соответственно повышается КПД системы. Разработаны и исследованы экспериментально новые алгоритмы управления DC-DC преобразователями гибридных источников питания. Разработано программное обеспечение, которое реализует: алгоритмы

адаптивного енергоефективного управління асинхронними двигателями на цифровому сигнальному процесорі; телеметрію електромеханічної системи з використанням панельного комп'ютера водія; управління DC-DC перетворювачами. Розроблена і виготовлена експериментальна установка з асинхронним двигателем потужністю 50 кВт і нагрузочним агрегатом на основі двигателя постійного струму, яка дозволяє проводити повномасштабні експериментальні дослідження в режимах, близьких до реальних транспортних засобів.

(англ.)

An experimental electrical drive for electric buses and trams is developed and experimentally tested. Developed power converter for induction motor based electrical drive provides 100 kW of output power. Flux-torque (speed) control algorithms for induction motor are developed, implemented and experimentally verified. Developed nonlinear controller take into consideration motor's magnetizing curve provides asymptotic flux-torque (speed) tracking, torque per Ampere maximization (MTA) as well adaptation to stator and rotor resistances. Both MTA and adaptation properties of the developed controller improves efficiency of the electromechanical system and increase range of battery powered electrical vehicles. Low power hybrid energy storage system (HESS), based on accumulators and supercapacitors is developed and assembled. New control algorithms for DC-DC converters are developed and experimentally verified. Experimental HESS provides possibility to development and experimental investigations of control algorithms for DC-DC converters, energy flow optimization, accumulators and supercapacitors charge/discharge. Auxiliary modules for integration of developed electrical drive in to electrobus structure are also developed. Experimental rig with 50 kW induction motor and DC loading machine in developed and manufactured. Experimental rig provides possibility to perform experimental investigations on new control algorithms in all operation modes, which are close to real electrical vehicles conditions.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.

1. Двоканальний регульований електропривод: пат. 124134 Україна, № у 201709525; заявл. 29.09.2017; опубл. 26.03.18, Бюл. № 6. Теряєв В. І.

2. Спосіб регулювання координат генератора та двигуна в режимі електричного гальмування: пат. 126104 Україна, № у201712078; заявл. 08.12.2017; опубл. 11.06.2017, Бюл. № 11. Теряєв В. І.

3. Пат. 116158 Україна, МПК (2016.01) Н01Р 1/18, Н01Р 1/207. Керована надвисокочастотна система на основі тонкого діелектричного резонатора / Д. Д. Татарчук, В. І. Молчанов, Ю. М. Поплавко, Ю. В. Діденко, А. С. Франчук; заявник і власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № у 2016 11812; заявл. 22.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. – 4 с.

4. Система стабілізації положення та активного віброзахисту об'єкта у просторі на основі електромагнітного підвісу: пат. 120636 Україна, у 2017 05289 від 30.05.2017 р. Теряєв В. І.

5. Двоканальна система високоточного керування положенням об'єкту у просторі та його активного віброзахисту на основі електромагнітного підвісу: пат. 121576 Україна, номер у 2017 06061 від 16.06.2017 р. Теряєв В. І.

6. Безлюфтовий двоканальний слідкуючий електропривод: пат. 122234 Україна, номер у 2017 07611 від 18.07.2017 р. Теряєв В. І.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Науково технічний рівень виконаної роботи відповідає світовому рівню та перевищує його за окремими показниками. Існуючі системи векторного керування тяговими асинхронними двигунами, в тому числі такі, що випускаються серійно, є чутливими до параметричних збурень математичної моделі двигуна. Нові методи адаптивного керування електромеханічним перетворенням енергії в тяговому асинхронному електроприводі, розроблені авторами проекту, на відміну від існуючих, вперше вирішують задачу відпрацювання заданих траєкторій моменту з максимізацією співвідношення момент/струм у всьому діапазоні зміни моменту, адаптацію до змін опорів статора і ротора АД, одночасно забезпечуючи завдяки цьому комфортність руху і підвищені енергетичні характеристики електробусу, більш ефективно використання заряду

батареї (більший пробіг на одному заряді). При цьому максимізація момент/струм досягається як в статиці, так і в перехідних режимах з середнім рівнем динаміки. Показники якості керування синтезованих в роботі систем адаптивного енергоефективного керування перевищують існуючі показники в загально визначених стандартних системах векторного керування та не поступаються показникам аналогічних продуктів світових виробників. Завдяки адаптації, розроблені та реалізовані на практиці методи керування вирішують проблему чутливості систем векторного керування до параметричних збурень. Конфігурація накопичувачів енергії та силової електроніки, яка використана для розробки експериментального зразка гібридного джерела живлення відповідає дослідженням провідних світових наукових шкіл, спрямованих на розробку перспективних моделей електричних транспортних засобів з покращеними динамічними та енергетичними характеристиками. Високий рівень отриманих результатів підтверджено публікаціями у високо рейтингових журналах спільноти IEEE та доповідями на провідних закордонних конференціях.

6. Економічна привабливість для просування на ринок.

Термін впровадження розробки складає близько 6 місяців.

7. Потенційні користувачі.

Міністерство інфраструктури України, Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України, науково-дослідні, проектно-конструкторські інститути та організації, фірми виробники електроприводів, експлуатуючі організації (при розробці нових та модернізації існуючих електричних транспортних засобів). Консорціум «Електроавтобус України», (м. Луцьк), ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод», (м. Запоріжжя), ПАТ «Автомобільна компанія «Богдан моторс», (м. Луцьк), корпорація «Електрон», (м. Львів).

8. Стан готовності розробки.

Розроблено, виготовлено та протестовано дослідний зразок електромеханічної системи (ЕМС) електробусу потужністю 100 кВт. Дослідний зразок підготовлено до встановлення на електробус.

9. Існуючі результати впровадження.

У відповідності з меморандумом про співробітництво між консорціумом «Електробус України» і КПІ ім. Ігоря Сікорського, розроблений дослідний зразок тягового електроприводу підготовлено до встановлення на електричний транспортний засіб, який створюється консорціумом «Електробус України» для проведення експлуатаційних випробувань та подальшого впровадження. Алгоритми векторного керування моментом асинхронних двигунів впроваджено при виконанні госпрозрахункового договору з ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод», (м. Запоріжжя) при створенні тягової електромеханічної системи трамвайного вагону.

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, факультет електроенерготехніки та автоматики, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, 044-204-83-56, sergei.peresada@gmail.com.

11. Фото розробки.



Рис. 1. Дослідний зразок перетворювача без корпусу в процесі налаштування



Рис. 2. Силова частина перетворювача



Рис. 3. Дослідний зразок перетворювача на тестуванні в лабораторії



Рис. 4. Панельний комп'ютер водія

12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання.

Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Монографія / Загірняк М.В., Клепиков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М., Садовой О.В., Шаповал І.А. – Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2018. – 310 с. ISBN 978-966-02-8403-6.

Кандидатські дисертації

1. Оборонов Т. Ю., «Моделі і засоби діагностування енергетичного і технічного стану синхронного електроприводу насосних установок», 2017 р.
2. Пугач А. «Разработка штучної шкіри для вивчення фізичних та соціальних взаємодій на людиноподібному роботі», 2017 р.
3. Лупина Б. І. «Мікромеханічні терморезисторні перетворювачі», 2017 р.

Статті у виданнях, що входять до бази Scopus (основні)

1. S. Bozhko, S. Dymko, S. Kovbasa and S. M. Peresada, "Maximum Torque-per-Amp Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 181-193, Jan.-Feb. 2017.

2. S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, N. Zhelinskyi Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: Theory and experiments // *Technical Electrodynamics*, 2017. – №2. – P. 48-56.

3. S. Peresada, S. Kovbasa, D. Pushnitsyn, Y. Zaichenko Two Nonlinear Controllers for Voltage Source AC-DC Converter // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – 2017. – С. 1-5.

4. S. Peresada, S. Kovbasa, M. Zhelinskyi, A. Duchenko Speed Sensorless Direct Field Oriented Control of Induction Generator // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – 2017. – С. 1-5.

5. S. Peresada, Y. Zaichenko, S. Kovbasa and Y. Nikonenko Three-Phase Current Harmonics Estimation for Shunt Active Power Filters // 2017 IEEE conference Modern electrical and energy systems" (MEES 2017), paper #71.

6. S. Peresada, S. Kovbasa, S. Dymko and S. Bozhko Maximum Torque-per-Amp Tracking Control of Saturated Induction Motors // 2017 IEEE conference Modern electrical and energy systems" (MEES 2017), paper #70.

7. Tolochko O., Sopiha M. Heat Loss Minimization Field Control of Motionless Induction Motors in Pause of Intermittent Duty // 2017 IEEE First Ukraine Conference on electrical and computer engineering (UkrCon). – p.p. 442-447.

8. Tolochko O. Analysis of Observed-Based Control Systems with Unmeasured Disturbance // 2017 IEEE First Ukraine Conference on electrical and computer engineering (UkrCon). – p.p. 1006-1010.

9. M. Pushkar, N. Krasnoshapka, M. Pechenik, V. Bovkunovych Method of Approximation the Magnetizing Inductance Curves of Self-Excited Induction Generators // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017, May 29 – June 2, 2017 Kyiv, Ukraine, P.395–399.

10. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A. Vector Control for Double-Inverter-Fed Wound-Rotor Induction Machine // Proceedings of the IEEE 38th

International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 2018. – Kyiv (Ukraine). – 24-26 April 2018. – P. 552–557.

11. Bozhko S., Kovbasa S., Nikonenko Y., Peresada S. Direct vector control of induction motors based on rotor resistance-invariant rotor flux observer // Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Electrical System for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference (ESARS-IETEC) 2018, Nov. 7 – 9, Nottingham, United Kingdom.

12. Peresada S., Kovbasa S., Nikonenko Y., Bozhko S. Concept of experimental research for electrical vehicle electromechanical systems with hybrid energy storages // Technical Electrodynamics. –2018. №5. –pp. 57-60.

13. Peresada S., Zaichenko Y., Kovbasa S., Reshetnik V. Adaptive Current Control for Shunt Active Power Filters // Proceedings of the IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Apr. 24 – 26, Kyiv, -2018, pp. 598 – 604.

14. Peresada S., Zaichenko Y., Pushnitsyn D., Reshetnik V. Adaptive Current Control for Shunt Active Power Filters Under Resistance and Inductance Uncertainty // Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Intelligent energy and power systems (IEPS), 2018.

15. Peresada, S., Kovbasa, S., Zaichenko, Y., & Reshetnyk, V. Selective compensation of three-phase current harmonics. // Technical Electrodynamics. –2018. №4. –pp. 102-105.

16. Peresada, S.M., Mykhalskyi, V.M., Zaichenko, Y.M., Kovbasa, S.M. Selective and adaptive harmonics estimation for three-phase shunt active power filters // Technical Electrodynamics, –2018. –№2, pp. 29-38.

17. Shapoval I.A., Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y. Selective Compensation of Current Harmonics in Grid-Connected Doubly-Fed Induction Generator based Wind Energy System // Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent and Power Systems (IEPS) 2018. – Kkarkiv (Ukraine). – 10-14 September 2018.

18. Толочко О.І., Бовкунович В.С., Бурмельов О.О. Обмеження струму і напруги статора в системі тризонного регулювання швидкості двигуна з постійними магнітами при використанні оптимальних стратегій керування // ПСЕ Технічна електродинаміка, 2018, №5. – С. 61-64.

19. Толочко О.І., Рижков О.М. Синтез та аналіз системи модального керування крановим механізмом поступального руху з врахуванням роботи підіймального механізму // ПСЕ Технічна електродинаміка, 2018, №4. – С. 131-134.

20. Михальський В.М., Соколев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Моделювання системи генерування електроенергії на базі машини подвійного живлення з функціями активної фільтрації та компенсації реактивної потужності. Технічна електродинаміка. 2018. №5. С.52–56.

21. Tatarchuk D. D. Thin Dielectric Resonators in Microwaves / D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, V. I. Molchanov, A. S. Franchuk, Y. M. Poplavko // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017): Proc. of Int. Sci. Conf. (May 29 – June 2, 2017, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2017. – PP. 45 – 50.

22. Tatarchuk D. D. Low Thickness Dielectric Resonators / D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, V. I. Molchanov, Y. M. Poplavko // The Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017): Proc. of Int. Sci. Conf. (September 11 – 15, 2017, Odessa, Ukraine). – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. – PP. 258 – 262.

13. Ключові слова. Електромобіль, електробус, електричний транспорт, тяговий електропривод, асинхронний двигун, векторне керування.