

Методи робастного адаптивного керування електромеханічними системами з підвищеними динамічними та енергетичними показниками

Методы робастного адаптивного управления электромеханическими системами с повышенными динамическими и энергетическими показателями

Robust adaptive control of electromechanical systems with improved dynamic performances and energy efficiency

1. Номер державної реєстрації: 0115U000381

2. Науковий керівник - д.т.н., професор Пересада Сергій Михайлович, Пересада Сергей Михайлович, Peresada Sergei, к.т.н., доц. Ковбаса Сергій Миколайович, Ковбаса Сергей Николаевич, Kovbasa Serhii.

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.)

Розвинуто і узагальнено теорію аналізу та синтезу адаптивних електромеханічних систем з векторно-керованими електромеханічними перетворювачами змінного струму, використання якої дозволяє синтезувати системи автоматичного керування з властивостями робастності до зміни параметрів електромеханічних об'єктів, завдяки чому досягається підвищення їх динамічних та енергетичних показників. Розроблено методи робастного адаптивного оцінювання невимірюваних координат та ідентифікації невідомих параметрів електромеханічних перетворювачів. Розроблено метод адаптивного керування паралельним активним фільтром, що є розповсюдженням запропонованої теорії на клас напівпровідникових перетворювачів з автономними інверторами напруги, які працюють на трифазну мережу живлення. Електромеханічні системи, які синтезовані з використанням розроблених методів, мають стабільні показники (на номінальному рівні) якості керування та енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії при варіаціях найбільш критичних параметрів електромеханічних перетворювачів. В системах з векторно-керованими АД, це дозволяє приблизно *вдвічі* знизити активні втрати в найбільш критичних режимах. Завдяки розробленому керуванню з оптимізацією втрат в АД вперше забезпечується відпрацювання заданих траєкторій моменту з одночасною мінімізацією активних втрат в усталених режимах, що підвищує ККД при малих навантаженнях.

(рос.)

Развита и обобщена теория анализа и синтеза адаптивных электромеханических систем с векторно-управляемыми электромеханическими преобразователями переменного тока, использование которой позволяет синтезировать системы автоматического управления со свойствами робастности к изменению параметров электромеханических объектов, благодаря чему достигается повышение их динамических и энергетических характеристик. Разработаны методы робастного адаптивного оценивания неизмеряемых координат и идентификации неизвестных параметров электромеханических преобразователей. Разработан метод адаптивного управления паралельным активным фильтром, что является распространением предложенной теории на класс полупроводниковых преобразователей с автономными инверторами напряжения, которые работают на трехфазную питающую сеть. Электромеханические системы, которые синтезированы с использованием разработанных методов, имеют стабильные показатели (на номинальном уровне) качества управления и энергетической эффективности процесса электромеханического преобразования энергии при вариациях наиболее критических параметров электромеханических преобразователей. В системах с векторно-управляемыми асинхронными двигателями, это позволяет примерно вдвое снизить активные потери в наиболее критических режимах работы. Благодаря разработанному управлению с

минимизацией потерь в асинхронном двигателе впервые обеспечивается асимптотическая отработка заданных траекторий изменения момента при одновременной минимизации активных потерь в установившихся режимах работы, что повышает коэффициент полезного действия при малых нагрузках.

(англ.)

The theory of analysis and synthesis of adaptive electromechanical systems with vector-controlled electrical motors is developed and generalized. Proposed theory allows synthesizing automatic control systems with the properties of robustness to electrical motor parameters variations, thereby improving their dynamic performances and efficiency. Methods for robust adaptive estimation of immeasurable coordinates and identification of unknown parameters of electromechanical converters are developed. A method for adaptive control of a parallel active filter is developed, which is the extension of the proposed theory application to a class of semiconductor converters with voltage source inverters that connected to three-phase supply network. Electromechanical systems that are synthesized using the developed methods have stable dynamic performances (at the nominal level) and energy efficiency of the electromechanical energy conversion process under parameters variation conditions. In systems with vector-controlled induction motors, this allows to reduce (up to two times) the active losses in the most critical modes of operation. Developed control method with loss minimization in the induction motor provides high performance asymptotic torque trajectory tracking with simultaneous active loss minimization in the steady-state operating modes, which increases the system efficiency at low loads.

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

(заявка на патент, патент, свідоцтво на авторське право).

Чотири заявки на патент:

1. Заявка на патент України (корисна модель) «Система стабілізації положення та активного віброзахисту об'єкту у просторі на основі електромагнітного підвісу», номер у 2017 05289 від 30.05.2017 р.

2. Заявка на патент України (корисна модель) «Двоканальна система високоточного керування положенням об'єкту у просторі та його активного віброзахисту на основі електромагнітного підвісу», номер у 2017 06061 від 16.06.2017 р.

3. Заявка на патент України (корисна модель) «Безлюфтовий двоканальний слідкуючий електропривод», номер у 2017 07611 від 18.07.2017 р.

4. Заявка на патент України (корисна модель) «Двоканальний регульований електропривод», номер у 2017 09525 від 29.09.2017 р.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Науково технічний рівень виконаної роботи відповідає світовому рівню та перевищує його за окремими показниками. На основі дослідження наукових результатів, що опубліковані починаючи з 1990 року у провідних виданнях Американського Інституту Інженерів-Електриків (ІЕЕЕ), Міжнародної Федерації Автоматичного Керування (ІFАС), праць міжнародних конференцій, а також монографій, встановлено, що полеорієнтоване векторне керування є основним методом в сучасних ЕМС з двигунами змінного струму, як при вимірюванні механічних координат, так і в бездавачевих системах. При цьому існуючі електроприводи мають характеристики, що задовольняють вимоги значної кількості технологічних застосувань, але є чутливими до параметричних збурень, особливо при бездавачевому використанні. Існуючі підходи до адаптивного керування в електромеханічних системах з двигунами змінного струму знаходять обмежене застосування внаслідок їх складності та чутливості до параметрів, що не ідентифікуються.

Високий рівень отриманих результатів підтверджено публікаціями у високо рейтингових журналах спільноти ІЕЕЕ та доповідями на провідних закордонних конференціях.

6. Економічна привабливість для просування на ринок (*вартість реалізації проекту, терміни впровадження та окупності, показники*). Потенційний обсяг реалізації на ринку України складає орієнтовно 500 млн. грн. Економічний ефект від впровадження розробок для економіки України досягається за рахунок імпортозаміщення, створення нових робочих місць для виробництва електромеханічних систем різного технологічного призначення, економії електроенергії за рахунок підвищення коефіцієнта корисної дії електромеханічних систем.

7. Потенційні користувачі (*галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації*). машинобудівні та електротехнічні підприємства, проектні організації які здійснюють розробку та випуск обладнання різного технологічного призначення, зокрема ПАТ «Плутон», м. Запоріжжя, Державне НВП «Електронмаш», ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод», ТОВ «Татра-Юг», ПАТ Концерн Електрон, та інші.

8. Стан готовності розробки (*лабораторний або промисловий зразок, технічна документація, бізнес-план, готова до впровадження*).

Результати розробки реалізовано у лабораторних зразках асинхронного електроприводу потужністю до 200 кВт та досліджено експериментально на двигунах малої потужності.

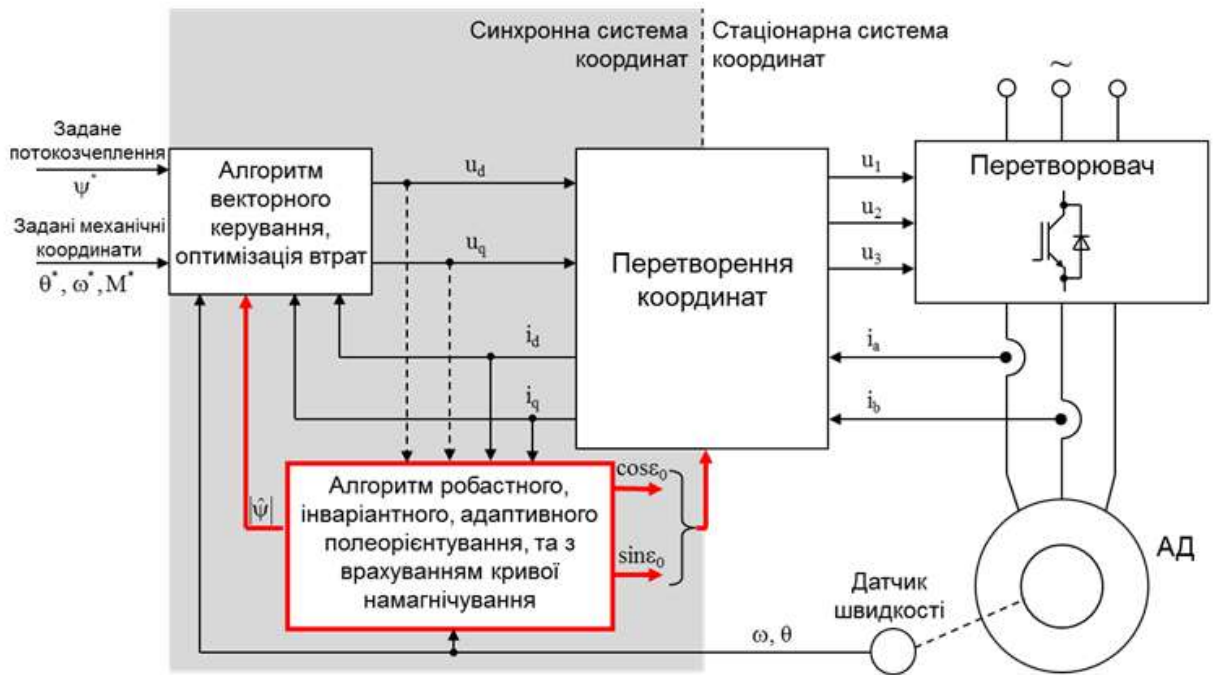
9. Існуючі результати впровадження.

В науково-дослідній лабораторії «Векторно-керовані електромеханічні системи змінного струму» (кімната 408-20) зібрані експериментальні установки та зразки електромеханічних систем змінного струму, в яких реалізовано результати теоретичних досліджень. Планується впровадження результатів роботи при виконанні договору на розробку системи керування тяговим електроприводом трамвайного вагону з ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод»

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу КПІ імені Ігоря Сікорського, тел. 406-83-56, e-mail: sergei.peresada@gmail.com, www.epa.kpi.ua.

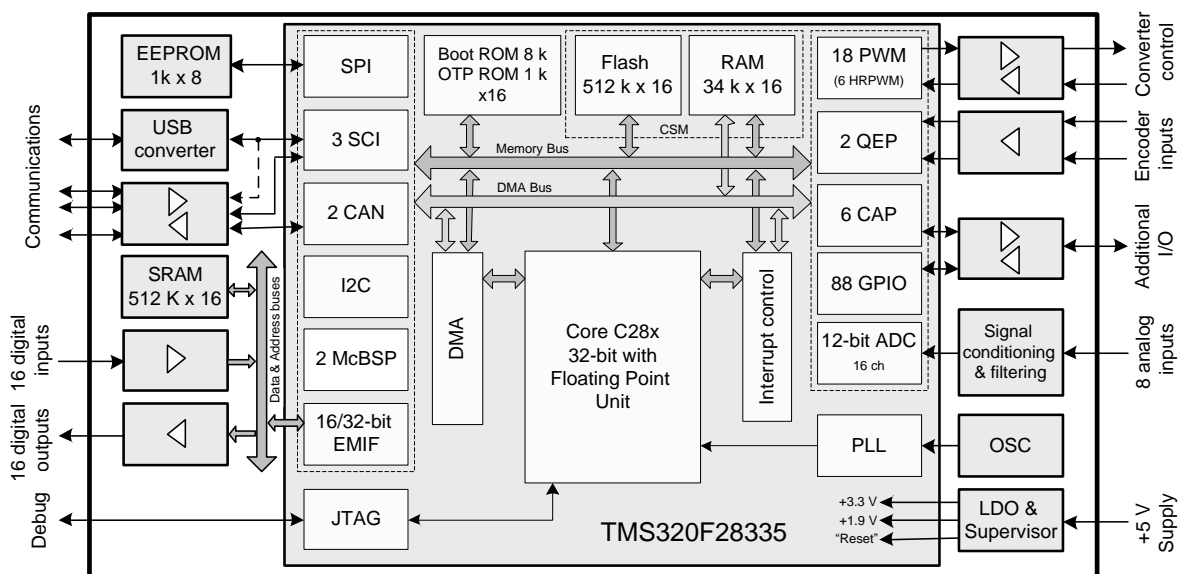
11. Фото розробки.



Типова структура системи векторного керування

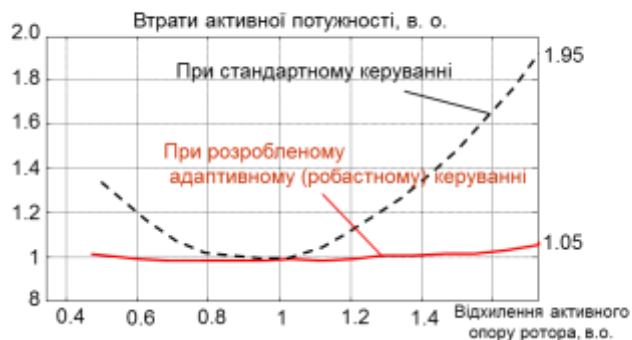


Зовнішній вигляд керуючого контролера на основі цифрового сигнального процесора TMS320F28335



Функціональна схема керуючого контролера на основі цифрового сигнального процесора TMS320F28335

Підвищені показники енергетичної ефективності

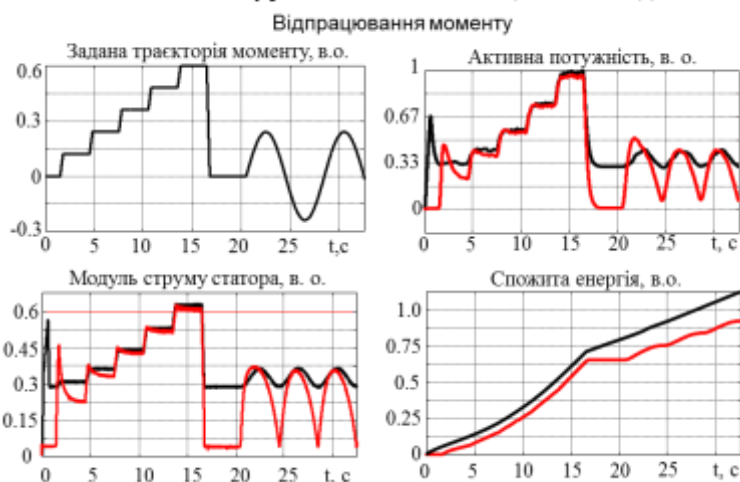


Варіації параметрів асинхронного двигуна, що змінюються при його роботі внаслідок нагріву, при стандартних алгоритмах векторного керування призводять до суттєвого зростання втрат активної потужності.

Розроблені алгоритми робастного адаптивного керування дозволяють уникнути цього явища, тим самим забезпечуючи підвищені показники енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії.

Зменшення втрат активної потужності за рахунок застосування робастного адаптивного керування

Керування з максимізацією співвідношення момент-струм (МТРА)



Відпрацювання заданих траєкторій механічних координат відбувається при менших струмах статора у порівнянні із традиційними способами керування. Відповідно зменшуються втрати активної потужності, та підвищується максимальний момент на валу двигуна при обмеженнях вихідного струму перетворювача.

— Традиційне керування
— МТРА керування

Зменшення втрат активної потужності за рахунок застосування енергетично ефективних методів керування

12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання (вагомі монографії, підручники, посібники, наукові статті, дисертації, інші публікації).

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. Пересада С.М. Адаптивное к вариациям активного сопротивления ротора векторное управление асинхронным двигателем на основе нелинейного принципа разделения / С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, В.Н. Трандафилов, В.С. Бовкунович // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – №1. – С. 43–50.
3. МТРА Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results / S. Bozhko, S. Dymko, S. Kovbasa, S. Peresada // *Proceedings on 2015 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS): Paper SS2.1.5*. – Aachen, Germany, 2015. – 6p.
4. С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, С. С. Димко, В. О. Благодір. Порівняльний аналіз енергетичної ефективності алгоритмів прямого векторного керування моментом асинхронних двигунів з максимізацією співвідношення момент-струм // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – №4. – с. 36 – 40.
5. . М. Пересада, С. М. Ковбаса. Общетеоретическое решение задачи векторного управления асинхронными двигателями без измерения механических координат // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – №1. – с. 26 – 33.

6. S. Peresada, S. Kovbasa, S. Dymko, S. Bozhko Dynamic Output Feedback Linearizing Control of Saturated Induction Motors with Torque per Ampere Ratio Maximization // in Proc. IEEE Int. Conf. on Intel. Energy and Power Systems, IEPS-2016, 07 - 09 Jun., Kyiv, 2016, pp. 181-186.
7. Peresada, V. Blagodir, M. Zhelinskyi Output Feedback Control of Stand-Alone Doubly-Fed Induction Generator // in Proc. IEEE Int. Conf. on Intel. Energy and Power Systems, IEPS-2016, 07 - 09 Jun., Kyiv, 2016, pp. 162-167.
8. S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, N. Pechenik, N. Zhelinskyi Indirect Field Oriented Output Feedback Linearized Control of Induction Generator // in Proc. IEEE Int. Conf. on Intel. Energy and Power Systems, IEPS-2016, 07 - 09 Jun., Kyiv, 2016, pp. 187-191.
9. S. Bozhko, S. Peresada, S. Kovbasa, M. Zhelinskyi Robust Indirect Field Oriented Control of Induction Generator // in Proc. IEEE Int. Conf. on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference, ESARS-IETEC-2016, 02 - 04 Nov., Toulouse, France, 2016, 6 p.
10. S. Peresada, V. Blagodir, M. Zhelinskyi Output Feedback Control of Stand-Alone Doubly-Fed Induction Generator // Proceedings of 2016 IEEE 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2016. – P. 1–6.
11. С. М. Пересада, В. О. Благодір Керування машиною подвійного живлення в режимах збудження та синхронізації // Технічна електродинаміка. – 2016. –№ 3. –С. 45–47.
12. Пересада, С. М., and В. О. Благодір. "Керування машиною подвійного живлення у режимах збудження та синхронізації." *Технічна електродинаміка* №3. –2016. –С. 45-47.
13. **Ключові слова до розробки:** Асинхронний двигун, векторне керування, адаптивне робастне керування, енергетична ефективність, асинхронний генератор.