

**Основи теорії адаптивних електромеханічних систем автоматичного керування з векторно-керованими електродвигунами змінного струму в умовах неповної інформації. Основы теории адаптивных электромеханических систем автоматического управления с векторно-управляемыми электродвигателями переменного тока в условиях неполной информации.**

**Fundamentals of adaptive electromechanical control systems based on vector-controlled AC motors under incomplete information.**

1. **Номер державної реєстрації теми - 0109U001826**
2. **Науковий керівник - д.т.н., проф. Пересада С.М., Пересада С.М., Sergei Peresada.**
3. **Суть розробки, основні результати.**  
(укр.)

Розвинуто теорію стійкості багатовимірних нелінійних систем з метою розробки нових методів синтезу керувань, які забезпечують декомпозицію вихідної структури на зв'язані підсистеми, структурні властивості яких гарантують композитній системі локальну експоненціальну стійкість, квазірозв'язання процесів у підсистемах і асимптотичну лінеаризацію однієї з них. Створено нову концепцію керування класом електромеханічних систем з формуванням результуючої декомпозиції "електромагнітна – оцінювання кутової швидкості – механічна" підсистеми, яка є загальнотеоретичною основою для розв'язання основних задач керування координатами системи в умовах неповної інформації про вектор стану. Розроблено метод векторного керування в електромеханічних системах з асинхронними двигунами в умовах неповної інформації з адаптивним оцінюванням змінної у часі кутової швидкості та асимптотичним відпрацюванням заданих траєкторій координат системи. Вперше розроблено методи синтезу алгоритмів ідентифікації, адаптивного спостереження і прямого адаптивного керування за частково вимірюваним вектором стану, які дозволяють отримати локально визначені вирішення для класу нелінійних об'єктів адаптації, що мають невідомі додатні коефіцієнти при похибках оцінювання, а також у випадку нелінійної параметризації невідомих параметрів. Продемонстровано результати застосування розроблених теоретичних положень для електродвигунів змінного струму та турбомеханізмів.

(рос.)

Развита теория устойчивости многомерных нелинейных систем с целью разработки новых методов синтеза управлений, обеспечивающих декомпозицию исходной структуры на связанные подсистемы, структурные свойства которых гарантируют композитной системе локальную экспоненциальную устойчивость, квазиразвязку процессов в подсистемах и асимптотическую линеаризацию одной из них. Создана новая концепция управления классом электромеханических систем с формированием результирующей декомпозиции "электромагнитная – оценивание угловой скорости – механическая" подсистемы, которая является общетеоретической основой для решения основных задач управления координатами системы в условиях неполной информации о векторе состояния. Разработан метод векторного управления в электромеханических системах с асинхронными двигателями в условиях неполной информации с адаптивным оцениванием переменной во времени угловой скорости и асимптотической отработкой заданных траекторий координат системы. Впервые разработаны методы синтеза алгоритмов идентификации, адаптивного наблюдения и прямого адаптивного управления за частично измеряемым вектором состояния, которые позволяют получить локально определенные решения для класса нелинейных объектов адаптации, имеющих неизвестные положительные коэффициенты при ошибках оценивания, а также в случае нелинейной параметризации неизвестных параметров. Продемонстрированы результаты применения разработанных теоретических положений для электродвигателей переменного тока и турбомеханизмов.

(англ.)

The theory of stability of multivariable nonlinear systems is extended allowing development of new design methods of control. The methods provide decomposition of the original system into the interconnected subsystems with the structural properties ensuring the local exponential stability of the composite system and quasi-independence of the subsystems' processes along with the asymptotic linearization of one of them. The new control concept of a class of electromechanical systems is created with the formation of the resulting decomposition with the electromagnetic, angular velocity estimation's, and mechanical subsystems. The concept is a general theoretical basis for solving the basics control problems of the system's coordinates under the condition of incomplete information about the state vector. The method of vector control of electromechanical systems with induction motors under the condition of the incomplete information with the adaptive estimation of the time variable angular velocity and with the asymptotic fulfillment of the referred trajectories of the system coordinates is developed. The design methods of identification algorithms, adaptive observation and direct adaptive control based on partially measured state vector allowing locally defined solutions for a class of nonlinear adaptation plants with positive unknown coefficients of the estimation errors as well as for the nonlinear parameterization of the unknown parameters have been obtained for the first time. The results of application of the developed theoretical approaches for alternating current motors and centrifugal fans and pumps are shown.

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

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Прикладні результати, отримані на основі розроблених теоретичних основ, для електромеханічних бездавачевих систем з асинхронними двигунами перевищують світові аналоги за діапазоном керування та рівнем динамічної похибки.

#### **6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Застосування прикладних результатів, які отримані на основі розроблених теоретичних основ дозволяють:

- підвищити на 10 – 15% енергетичну ефективність електромеханічних систем, що побудовані на основі частотно-керованих асинхронних двигунів;
- отримати діапазон керування швидкості 1:100 при номінальному моменті навантаження;
- отримати динамічні характеристики бездавачевих систем на рівні систем з датчиками швидкості;
- розширити сферу використання бездавачевих ЕМСАК;
- замінити імпорتنу продукцію виробами вітчизняних виробників, що потенційно може дати економію коштів на рівні близько 25-30% від вартості продукції, що, з врахуванням сучасних потреб ринку, в грошовому еквіваленті складе сотні мільйонів гривень;
- підвищити на 10 % енергетичну ефективність та зменшити капітальні затрати на модернізацію нерегульованих електроприводів насосних установок.

#### **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).**

Розроблені методи бездавачевого (в умовах неповної інформації) керування можуть застосовуватись на підприємствах та в організаціях різних галузей промисловості: машинобудуванні, металургійному і гірничому комплексах, авіа і суднобудуванні, теплоенергетиці, на транспорті і в комунальному господарстві, де замкнене керування координатами необхідне за технологією або доцільне з точки зору енергозбереження, а вимоги щодо точності та діапазону керування не є критичними. Потенційними користувачами розробок виступають: Львівський автобусний завод, Луцький автомобільний завод, Київпастрас, Підприємство ЕПРО (м. Санкт Петербург), Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства, м. Київ.

#### **8. Стан готовності розробки.**

Розроблено та виготовлено макети асинхронних електроприводів з бездавачевим керуванням, відпрацьовано відповідні технології і розроблено технологічні рекомендації

щодо ефективного застосування експериментального обладнання. Можлива розробка дослідно-промислових зразків асинхронних електроприводів з бездавачевим керуванням, які можуть бути впроваджені у промислове виробництво.

#### **9. Існуючі результати впровадження.**

Деякі результати роботи впроваджено в дослідному зразку тягового електроприводу потужністю 200 кВт для перспективних моделей тролейбусів та трамвайних вагонів. Дослідний зразок пройшов стендові випробування, у 2010 р. прийнятий міжвідомчою комісією міністерства житлово-комунального господарства, та рекомендований до проведення експлуатаційних випробувань з метою подальшого серійного випуску. За матеріалами роботи у 2009 р. захищено кандидатську дисертацію на тему “Електромеханічні системи автоматизації багатоагрегатних насосних установок при енерго- та ресурсоощадливому керуванні”. У 2012 р. очікується захист ще двох кандидатських дисертацій на теми “Векторне керування асинхронними двигунами з властивостями робастності та адаптації до змін активного опору ротора” та “Екстремальні енергоефективні електромеханічні системи автоматизації багатоагрегатних насосних установок”.

#### **10. Назва організації, телефон, E-mail**

НТУУ“КПІ”, факультет електроенерготехніки та автоматики, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електропривода, тел. (044)406-83-56, **e-mail:** [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

#### **11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки**

1. Пересада С.М., Дымко С.С. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток // Электромеханические и энергосберегающие системы. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011 (15) – с. 16-20.
2. Пересада С.М., Дымко С.С. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток: теория и результаты тестирования // Электротехнические и компьютерные системы – 2011 – №03(79) – с. 28-31.
3. Пересада С.М., Бовкунович В.С. Робастность алгоритмов косвенного векторного управления асинхронными двигателями к вариациям активного сопротивления ротора // ISSN 2074-2630 Наукові праці Донецького національного технічного університету №11. –Донецьк, ДонНТУ, 2011. с. 296–300.
4. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Онанко А. Ю. Обобщенный алгоритм частотного управления асинхронными двигателями. Часть 1: синтез на основе второго метода Ляпунова // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 (14). –С. 13 – 16.
5. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Онанко А. Ю. Обобщенный алгоритм частотного управления асинхронными двигателями. Часть 2: результаты тестирования. // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 (14). –С. 17 – 21.
6. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Онанко А. Ю. Семейство алгоритмов отработки момента- потока асинхронного двигателя при косвенной ориентации по вектору потокосцепления статора // Электротехнические и компьютерные системы №03 (79). – 2011. –С. 25 – 27.
7. Пересада С.М., Коноплянский М.А. Алгоритм одновременной идентификации активных сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя // Электротехнические и компьютерные системы №03 (79). –2011. –С. 270 – 271.
8. Островерхов М.Я., Бурик М.П. Система векторного керування асинхронним двигуном на основі концепції зворотної задачі динаміки // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2011. – Вип. 116. – С. 129-130
9. Островерхов Н.Я., Бурик Н.П. Управление координатами электроприводов на основании концепции обратных задач динамики при минимизации локальных

- функціоналов миттєвих значень енергій/ Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. – № 1. – С. 41-49.
10. Островерхов М.Я., Яремов О.І. Пряме векторне керування швидкістю лінійного асинхронного двигуна на основі концепції зворотних задач динаміки/ Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011 (15). – С. 26-30.
  11. Островерхов М.Я., Пижов В.М., Бурик М.П. Підпорядкована система керування координатами електропривода на основі концепції зворотних задач динаміки/ Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011 (15). – С. 21-25.
  12. Островерхов М.Я., Бурик М.П. Дослідження стійкості систем керування, розроблених на основі концепції зворотних задач динаміки/ Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка, 2011. – № 03 (79). – С. 17-18.
  13. M.Pechenik, O.Kiselychnyk, S.Buryan, D.Petukhova, “Sensorless control of water supply pump based on neural network estimation,” ISSN 2221-3805 Electrotechnic and Computer Systems, N. 03 (79), 2011. pp.462-466.
  14. Приймак Б.І., Гаркович Н.В. Дослідження точності нейромережного оптимізатора втрат потужності в асинхронному електроприводі // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2011. – № 3 (30)
  15. Бур'ян С.О. Двоканальна екстремальна електромеханічна система автоматичного керування паралельно з'єднаними насосами водопостачання // Інформаційний збірник Промелектро. «Промислова електроніка та електротехніка». Випуск №4-5 2011 р. с. 10-16.
  16. O.I.Kiselichnik & M.Bodson, Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter/ ISSN 1068-3712, Russian Electrical Engineering, 2011, Vol. 82, No. 2, pp. 69–75. Allerton Press, Inc., USA, 2011.
  17. Киселичник О. И., Бодсон М. Бездатчиковое управление центробежным насосом водоснабжения с приводным асинхронным электродвигателем на базе расширенного фильтра Калмана// Электротехника. - 2011. - N 2. - С. 9-16.
  18. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В.С. Экспериментальное тестирование адаптивного к вариациям активного сопротивления роторной цепи наблюдателя потокосцепления асинхронного двигателя // Праці Інституту електродинаміки НАН України, –2010, –№25, с. 68 – 71.
  19. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В.С. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя // Технічна електродинаміка, 2010. –№1, –С. 60–66.
  20. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В.С. Сравнительное экспериментальное тестирование алгоритмов косвенного векторного управления моментом асинхронного двигателя // Технічна електродинаміка, –2010, –№2, –С. 33–40.
  21. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В.С. Адаптивный наблюдатель Матсусе: новый синтез, гарантирующий асимптотичность оценивания вектора потокосцепления и активного сопротивления ротора асинхронного двигателя // Технічна електродинаміка, 2010 №3, с. 28–32.
  22. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Малько М.П. Робастный алгоритм идентификации параметров асинхронного двигателя при неподвижном роторе // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського. –2010. –№ 1, –С. 121 – 125.
  23. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Димко С. С. Indirect field-oriented torque control of induction motors with maximum torque per ampere ratio // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського. –2010. –№ 2, –С. 33-36
  24. В.М. Михальский, С.М. Пересада, В.Н. Соболев, В.В. Чопик, И.А. Шаповал /Пульсации электромагнитного момента асинхронного двигателя при управлении от

- автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. – Тематичний випуск. – 2010. – Ч.1. – С.5-11.
25. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Глушков В. А., Бовкунович В.С., Повышение эффективности векторно-управляемых электроприводов за счет робастификации и адаптации к вариациям активного сопротивления ротора // Промелектро. –Киев. –2010. –№5 –С. 49-55.
  26. Пересада С. М., Дымко С. С., Ковбаса С. М. Обобщенное решение задачи косвенного векторного управления моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток в статике // Вестник Национального технического университета "ХПИ". –2010. –Вып. 28. –С. 39–42.
  27. Пересада С. М., Ковбаса С. М. Робастифицированное векторное бездатчиковое управление угловой скоростью асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя пониженного порядка // Вестник Национального технического университета "ХПИ". –2010. –Вып. 28. –С. 110–114.
  28. Пересада С. М., Алисов А. С. Теоретическое и экспериментальное сравнение алгоритмов векторного управления асинхронным двигателем без измерения статорных токов. // Вестник Национального технического университета "ХПИ". –2010. –Вып. 28. –С. 141–143.
  29. Бовкунович В.С. Сравнительное экспериментальное тестирование частотного и векторного алгоритмов управления моментом асинхронного двигателя для электромеханических систем пассажирского электротранспорта //ПРАЦІ Інституту електродинаміки НАН України №25, 2010. с. 77 – 81.
  30. Kiselychnyk O., Pushkar M., Ostroverkhov M. Concept of inverse dynamics problems for cascade speed control of direct current motors with field weakening // Transactions of Kremenchuk State University. Kremenchuk: KSU, N3/2010 (62), part 1, 2010. pp.11-14.
  31. Popovich M., Kiselychnyk O., Buryan S. Extremal electromechanical control system of water supply pumps connected in series // Transactions of Kremenchuk State University. Kremenchuk: KSU, N3/2010 (62), part 2, 2010. pp.37-41.
  32. Pechenik M., Kiselychnyk O., Buryan S. Experimental research of interactive energy saving controller of water supply pump based on flow rate measurement // Transactions of Kharkiv National Technical University, N28, 2010. pp.272-274.
  33. Островерхов М.Я., Сигаев О.Л., Бурик М.П. Система непрямого векторного керування асинхронним двигуном на основі концепції зворотної задачі динаміки/ Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.- Кременчук: КДПУ, 2010. - Випуск 3/2010 (62). - С.29-32.
  34. Островерхов М.Я., Бурик М.П. Дослідження системи векторного керування асинхронним двигуном на основі концепції зворотної задачі динаміки// Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика – Харків: НТУ «ХПИ», 2010, №28,–С. 83–84.
  35. Бур'ян С.О., Гришук Т.В. Двоканальна екстремальна електромеханічна система автоматичного керування насосною установкою // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика – Харків: НТУ «ХПИ», 2010, №28, с. 176-179.
  36. Приймак Б.І., Благодір В.О. Модель асинхронного двигуна із врахуванням втрат у залізі при орієнтуванні координат за потікозчепленням статора // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика – Харків: НТУ «ХПИ», 2010, №28, с. 144-145.

37. Приймак Б.І., Благодір В.О. Розширені математичні моделі асинхронного двигуна при орієнтуванні координат за головним потокозчепленням // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – № 3 (27). – С. 58-61.
38. Kiselychnyk O., Bodson M., Werner H. Interactive Energy Saving Control of Water Supply Pump Based on Pressure Measurement / Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State Polytechnic University. Kremenchuk: KSPU, N3/2009 (56), part 1, 2009. pp.166-171.
39. Kiselychnyk O., Bodson M., Werner H. Overview of Energy Efficient Control Solutions for Water Supply Systems / Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State Polytechnic University. Kremenchuk: KSPU, N3/2009 (56), part 1, 2009. pp.40-45.
40. Kiselychnyk O., Buryan S., Bodson M., Werner H. Improved interactive energy saving control algorithms of water supply pump based on head measurement / “Problems of automated electrical drive. Theory and practice” Scientific and technical journal “Electroinform”, Lviv, 2009. pp.349-354.
41. Островерхов М.Я., Сигаєв О.Л., Бурик М.П. Універсальна система векторного керування швидкістю асинхронного двигуна на основі концепції зворотних задач динаміки при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій руху // Вісн. Кременчуцького державного політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип. 3/2009 (56), Ч. 2. – С. 31-34.
42. Островерхов М.Я., Бурик М.П. Система автоматичного керування положенням штаби з векторно-керованими двигунами та властивостями природної адаптації // Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» н.-т. журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» - Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 124-125.
43. Пересада С.М., Ковбаса С.М., Бовкунович В.С. Сравнительное тестирование алгоритмов векторного и частотного управления моментом асинхронного двигателя в электромеханических системах пассажирского электротранспорта // Вісн. Кременчуцького державного політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2009. Вип. 4/2009, Ч. 1. – С. 13 – 16.
44. Пересада С. М., Король С.В., Болотников А.Ю. Синтез алгоритма векторного управления моментом и реактивной мощностью машины двойного питания // Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» н.-т. журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» - Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 40 – 43.
45. Пересада С.М., Король С.В., Болотников А.Ю. Аналитическое исследование алгоритмов управления моментом и реактивной мощностью статора машины двойного питания // Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» н.-т. журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» - Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 76 – 79.
46. Пересада С.М., Ковбаса С.М., Бовкунович В.С. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя: теория и экспериментальное тестирование // Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» н.-т. журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» - Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 69 – 73.
47. Пересада С.М., Шаповал І.А., Михальський В.М., Соболев В.М., Чехет Е.М. Керування кутовою швидкістю машини подвійного живлення з матричним перетворювачем // Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» н.-т. журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» - Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 111 – 114.
48. Попович М.Г., Приймак Б.І., Бур'ян С.О. Електромеханічна система автоматизації насосної установки з оцінюванням продуктивності за допомогою нейронної мережі // Вісн. Кременчуцького державного політехн. ун-ту ім. М.Остроградського. Вип. 3/2009 (56). Ч. 2. – 2009. – С. 57-59.
49. Приймак Б.І., Савченко С.В. Дослідження електроприводу з модифікованим регулятором положення щодо компенсування моменту навантаження // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2009. – № 1 (22). – С. 30-32.

50. Приймак Б.І., Благодір В.О. Модель асинхронного двигуна в зорієнтованих за головним потокозчепленням координатах при врахуванні втрат у залізі // Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» н.-т. журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» - Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 99-100.