

Кременчуцький національний університет  
імені Михайла Остроградського

Інститут електромеханіки, енергозбереження  
і систем управління



ПРОБЛЕМИ  
ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ  
В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ  
СИСТЕМАХ  
НАУКА, ОСВІТА І ПРАКТИКА



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Кременчуцький національний університет  
імені Михайла Остроградського**

**Інститут електромеханіки, енергозбереження  
і систем управління**

**ПРОБЛЕМИ  
ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ  
В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ  
СИСТЕМАХ.  
НАУКА, ОСВІТА І ПРАКТИКА**

**№ 1/2014 (2)**

**Кременчук – 2014**

**Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014 (2). – 380 с.**

**ISSN 2221–5160**

До збірника увійшли матеріали доповідей, поданих на XV Міжнародну науково-технічну конференцію «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика», яка організована та проведена Інститутом електромеханіки, енергозбереження і систем управління Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

Наукове видання містить результати досліджень і розробок провідних наукових шкіл України та зарубіжжя у наступних галузях знань: електромеханічні системи та автоматизація; енергетика та електропостачання промислових підприємств; енергетичний менеджмент; енергоресурсозбереження; електричні машини і апарати; проблеми аварійності та діагностика в електромеханічних системах та електричних машинах; моделювання та методи оптимізації; інновації в освіті та виробництві, проблематика вищої школи.

Затверджено науково-технічною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (протокол № 6 від 24.04.2014 р.)

**Програмний комітет конференції:**

Загірняк М.В., д.т.н., проф., ректор Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського – голова;

Родькін Д.Й., д.т.н., проф.; Чорний О.П., д.т.н., проф. – заступники голови.

**Члени програмного комітету:**

Бешта О.С., д.т.н., проф.; Грабко В.В., д.т.н., проф.; Качан Ю.Г., д.т.н., проф.; Клепиков В.Б., д.т.н., проф.; Кондратенко І.П., д.т.н., проф.; Кузьмін В.В., д.т.н., проф.; Кутін В.М., д.т.н., проф.; Кухарчук В.В., д.т.н., проф.; Мазуренко Л.І., д.т.н., проф.; Нізімов В.Б., д.т.н., проф.; Ращепкін А.П., д.т.н., проф.; Садовой О.В., д.т.н., проф.; Сивокобиленко В.Ф., д.т.н., проф.; Сінолиций А.П., д.т.н., проф.; Сінчук О.М., д.т.н., проф.; Сенько В.І., д.т.н., проф.; Толочко О.І., д.т.н., проф.; Чермалих В.М., д.т.н., проф.; Юрченко М.М., д.т.н., проф.; Юрченко О.М., д.т.н., проф.

**Головний редактор:**

Загірняк М.В., ректор Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, член-кор. Національної академії педагогічних наук України, д.т.н., проф.

**Заступники головного редактора:**

Родькін Д.Й., д.т.н., проф.; Чорний О.П., д.т.н., проф.

Технічні редактори: асист. Алексєєва Ю.О.; інж. Гордієнко Н.О.; к.т.н., ст. викл. Ромашихін Ю.В., e-mail: [ieesu@kdu.edu.ua](mailto:ieesu@kdu.edu.ua)

Відповідальний за випуск – Чорний О.П., д.т.н., проф., e-mail: [ieesu@kdu.edu.ua](mailto:ieesu@kdu.edu.ua)

© Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2014 р.

© Інститут електромеханіки, енергозбереження і систем управління, 2014 р.

**ISSN 2221–5190**

---

Адреса редакції: вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук Полтавської обл., Україна, 39600.  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, ІЕЕСУ, к. 2302  
Телефон: +3805366 31147. E-mail: [ieesu@kdu.edu.ua](mailto:ieesu@kdu.edu.ua)

---

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE**

**Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University**

**Institute of Electromechanics, Energy Saving  
and Control Systems**

**PROBLEMS OF ENERGY  
AND RESOURCE SAVING  
IN ELECTRICAL SYSTEMS.  
SCIENCE, EDUCATION AND  
PRACTICE**

**№ 1/2014 (2)**

**Kremenchuk – 2014**

**ISSN 2221-5190**

Materials of reports, presented on XV to the International scientific and technical conference of «Problems of energy and resource saving in electrical systems. Science, education and practice. Bulletin.», which is organized and conducted Institute of electromechanics, energy-savings and control system of the Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy National University.

Scientific bulletin presents the results of research and development of scientific schools of Ukraine and abroad in the following topics: electromechanical systems and automation, power engineering and manufactures energy supply; energy management; energy and recourses saving; electrical machinery and apparatus; accident problems and diagnostics of electromechanical systems and electric machinery; simulation and optimization methods; innovations in education and production, problems of high school.

It is ratified scientific and technical advice of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University (protocol № 6 from 24.04.2014.)

**Program Committee:**

Prof. M.V. Zagirnyak, rector of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University – chair;  
Prof. O.P. Chorny, Prof. D.Y. Rodkin – vice chairs.

**Members:**

Prof. O.S. Beshta, Prof. V.M. Chermalyh, Prof. V.V. Grabko, Prof. U.H. Kachan, Prof. V.B. Klepikov, Prof. Kondratenko I.P., Prof. V.V. Kukharchuk, Prof. V.M. Kutin, Prof. V.V. Kuzmin, Prof. L.I. Mazurenko, Prof. A.P. Raschepkin, Prof. A.V. Prahovnik, Prof. O.V. Sadovoy, Prof. O.M. Sinchuk, Prof. V.F. Sivokobylenko, Prof. A.P. Sinolytsyi, Prof. V.I. Senko, Prof. O.I. Tolochko, Prof. M.M. Yurchenko, Prof. O.M. Yurchenko.

**Editor-in-chief:**

M. Zagirnyak, Rector of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Corresponding Member of National Academy of Pedagogic Sciences of Ukraine, Doctor of Sciences (Engineering), Professor.

**Deputy editors:**

O. Chorny, Doctor of Sciences (Engineering), Professor; D. Rodkin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor.

Technical editors: Yu. Alekseeva, assistant; N. Gordienko, engineer; Iu. Romashykhin, PhD (Tech.);  
e-mail: [ieesu@kdu.edu.ua](mailto:ieesu@kdu.edu.ua)

Commissioning editor: O. Chorny, Doctor of Sciences (Engineering), Professor;  
e-mail: [ieesu@kdu.edu.ua](mailto:ieesu@kdu.edu.ua)

© Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

© Institute of Electromechanics, Energy Saving and Control Systems, 2014

**ISSN 2221-5190**

## ЗМІСТ

УЧАСНИКАМ КОНФЕРЕНЦІЇ «ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ. НАУКА, ОСВІТА І ПРАКТИКА» .....	21
<b>ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ</b>	
РОБАСТНОСТЬ АЛГОРИТМОВ КОСВЕННОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ОРИЕНТАЦИЕЙ ПО ВЕКТОРУ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ СТАТОРА: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ <i>С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, А. Ю. Онанко, А. Б. Воронко</i> .....	23
ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА, АДАПТИВНЕ ДО ВАРІАЦІЙ АКТИВНИХ ОПОРІВ СТАТОРА І РОТОРА: РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕСТУВАННЯ <i>С. М. Пересада, М. А. Коноплінський, С. М. Ковбаса</i> .....	26
ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕЗДАТЧИКОВОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ ПРИ РОБОТІ НА НИЗЬКИХ ЧАСТОТАХ ОБЕРТІВ <i>І. А. Козакевич</i> .....	29
ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С АНИЗОТРОПИЙНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ПРИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОМ СИНТЕЗЕ <i>Б. И. Кузнецов, Т. Б. Никитина, М. О. Татарченко, В. В. Хоменко</i> .....	32
ЭФФЕКТИВНЫЕ МОДУЛЯЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОМЕНТОМ <i>Б. Ю. Васильев</i> .....	35
АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ВИБРОГАСИТЕЛЕМ <i>А. А. Черно, А. П. Гуров</i> .....	38
НАДАВАННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ ДРОБОВОГО ПОРЯДКУ ПЕРЕДАВАЛЬНИМИ ФУНКЦІЯМИ ЦІЛОГО ПОРЯДКУ <i>Я. Ю. Марущак, Б. Л. Копчак</i> .....	41
НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОВЫМИ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ <i>В. К. Тытюк</i> .....	44
ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ КООРДИНАТАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ІЗ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ НА ОСНОВІ МІНІМІЗАЦІЇ ЛОКАЛЬНИХ ФУНКЦІОНАЛІВ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ ЕНЕРГІЙ <i>М. Я. Островерхов</i> .....	47
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ <i>А. В. Чермалых, И. Я. Майданский, О. Б. Доценко, Ю. И. Затирка</i> .....	49
СИНТЕЗ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ПРОЦЕССА РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДУГОЙ С ПОМОЩЬЮ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ <i>Ю. А. Ермолаев, Г. В. Савеленко</i> .....	53
ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА <i>А. А. Шийка</i> .....	56
MAXIMUM POWER EXTRACTION FROM SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS <i>O. Kiselychnyk, J. Wang, M. Bodson, M. Pushkar</i> .....	59

## TABLE OF CONTENT

10 CONFERENCE PARTICIPANT OF «PROBLEMS OF ENERGY AND RESOURCE SAVING IN ELECTRICAL SYSTEMS. SCIENCE, EDUCATION AND PRACTICE».....	21
---	----

### *ELECTROMECHANICAL SYSTEMS AND AUTOMATION*

ROBUSTNESS OF INDUCTION MOTOR INDIRECT STATOR FIELD ORIENTED VECTOR CONTROL ALGORITHMS: THEORETICAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION <i>S. Peresada, S. Kovbasa, A. Onanko, A. Voronko</i> .....	23
ADAPTIVE TORQUE CONTROL OF INDUCTION MOTORS WITH UNCERTAIN STATOR AND ROTOR RESISTANCES: RESULTS OF EXPERIMENTAL TESTING <i>S. Peresada, M. Konoplynskiy, S. Kovbasa</i> .....	26
RESEARCH OF ADAPTIVE SYSTEMS FOR SENSORLESS CONTROL OF INDUCTION MOTORS AT A LOW SPEED <i>I. Kozakevich</i> .....	29
EFFICIENCY OF MULTIMASS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH ANISOTROPIC REGULATORS AT MULTICRITERION SYNTHESIS <i>B. Kuznetsov, T. Nikitina, M. Tatarchenko, V. Khomenko</i> .....	32
THE EFFECTIVE MODULATION ALGORITHMS IN INDUCTION ELECTRIC DRIVES WITH DIRECT TORQUE CONTROL <i>B. Vasiliev</i> .....	35
AUTOMATIC CONTROL OF A RESONANT VIBRATION DEVICE WITH ELECTROMAGNETIC DYNAMIC VIBRATION ABSORBER <i>A. Chernov, A. Gurov</i> .....	38
PRESENTATION OF FRACTIONAL ORDER TRANSFER FUNCTIONS BY INTEGER ORDER TRANSFER FUNCTIONS <i>I. Marushchak, B. Kopchak</i> .....	41
SEVERAL PROBLEMS IN CONTROL THEORY FOR STARTING MODE OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS <i>V. Titjuk</i> .....	44
OPTIMIZATION OF COORDINATE CONTROL LAWS FOR ELECTRIC DRIVE WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR BASED ON THE MINIMIZATION LOCAL FUNCTIONALS OF INSTANT ENERGY VALUES <i>M. Ostroverkhov</i> .....	47
MODELING OF TECHNOLOGICAL MODES OF PUMPING SYSTEMS WITH FREQUENCY CONTROL ELECTRIC DRIVE <i>A. Cermalykh, I. Maidanskyi, O. Dotsenko, Y. Zatirka</i> .....	49
SYNTHESIS SYSTEM OF REGULATION POSITION ELECTRODE TOOL DIMENSIONAL PROCESSING OF ARC OF BY MEANS MODAL MANAGEMENT <i>Yu. Yermolayev, G. Savelenko</i> .....	53
TORQUE-MAXIMIZING OPTIMAL CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVE <i>A. Shiyka</i> .....	56
MAXIMUM POWER EXTRACTION FROM SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS <i>O. Kiselychnyk, J. Wang, M. Bodson, M. Pushkar</i> .....	59

УДК 621.77

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С АНИЗОТРОПИЙНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ПРИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОМ СИНТЕЗЕ**

**Б. И. Кузнецов, Т. Б. Никитина, М. О. Татарченко, В. В. Хоменко**

Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины  
ул. Индустриальная, 19, г. Харьков, 61106, Украина. E-mail: bikuznetsov@mail.ru

Сформулирована задача многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем и показана возможность ее решения на основе концепции функционально множественной принадлежности вектора состояния, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах. Обоснован и разработан метод выбора матриц, с помощью которых формируется вектор цели стохастического робастного управления путем решения задачи нелинейного программирования. Минимизация анизотропийной нормы стохастической системы позволяет получить минимальную чувствительность синтезированной системы к изменению параметров моделей объектов управления и внешних воздействий. Результаты экспериментальных исследований двухмассовой электромеханической системы показали, что применение синтезированных анизотропийных регуляторов по сравнению с типовыми регуляторами позволило сократить время первого согласования в пять раз, повысить плавность движения на низких скоростях в 1,7 раза, уменьшить дисперсию ошибки обработки случайного задающего воздействия в четыре раза.

**Ключевые слова:** многомассовая электромеханическая система, анизотропийный регулятор.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** К многомассовым электромеханическим системам управления предъявляются разнообразные требования при их работе в различных режимах и при различных внешних воздействиях: ступенчатых, линейно-изменяющихся, гармонических, случайных и т.д. [1, 2]. В последнее время интенсивно развивается теория стохастического робастного управления [3–5]. Системы стохастического робастного управления имеют существенно меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления и внешних воздействий по сравнению с оптимальными системами. Однако проблема синтеза стохастических робастных систем, удовлетворяющих предъявляемым техническим требованиям, в настоящее время не решена.

Целью данной работы является разработка метода многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем и сравнение показателей качества систем с синтезированными анизотропийными регуляторами и с типовыми регуляторами при работе системы в различных режимах.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Рассмотрим исходную дискретную систему, имеющую  $n$ -мерный вектор состояния  $x$ ,  $m$ -мерный вектор входа  $\omega$  и  $p$ -мерный вектор цели  $z$ , заданную в пространстве состояний матрицами  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , так что

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + B\omega_k; \\ z_k &= Cx_k + D\omega_k. \end{aligned} \quad (1)$$

Средняя анизотропия этой системы равна

$$\bar{A}(G) = -\frac{1}{2} \ln \det \left( \frac{m \Sigma}{\text{Trace}(LPL^T + \Sigma)} \right), \quad (2)$$

где матрица  $P \in R^{n \times n}$  есть грамиан управляемости  $G$ , удовлетворяющий уравнению Ляпунова, а матрицы  $L$  и  $\Sigma$  соответствуют решению  $R$  уравнения Риккати [2].

Рассмотрим синтез анизотропийного регулятора, минимизирующего анизотропийную норму системы в форме пространства состояний. Этот регулятор формирует управляющее воздействие на вход системы по ее измеряемому выходу и представляет собой динамический блок типа компенсатора, объединяющий робастный наблюдатель и робастный регулятор. Решение задачи синтеза анизотропийных регуляторов во временной области, с помощью которых минимизируется средняя анизотропия системы (2), сводится к вычислению трех алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и уравнения специального вида для вычисления уровня анизотропии входного сигнала [5]. Эти системы уравнений численно решаются с помощью метода гомотопий, включающего векторизацию матриц и итерации по методу Ньютона.

Оптимальный анизотропийный регулятор полного порядка является оптимальным оценителем оптимального закона управления в задаче с полной информацией о векторе состояния системы для случая наихудшего входа. Принцип разделения в смешанной задаче робастного управления не означает независимости уравнений Риккати. В отличие от классических  $H_2$ - и  $H_\infty$ -оптимизации, задача синтеза оценителя и задача синтеза оптимального статического регулятора в виде обратной связи не могут быть решены независимо друг от друга. Такой обобщенный принцип разделения позволяет дать интерпретацию полученным результатам с точки зрения теории дифференциальных игр. Управление системой в присутствии внешних возмущений рассматривается как дифференциальная игра между двумя игроками – природой и регулятором. Оптимальная стратегия первого игрока – регулятора состоит в получении оптимального управления, а оптимальная стратегия второго игрока – природы – состоит в получении «наихудшего» возмущения в виде параметрической неопределенности объекта



управления. При этом каждый из игроков осведомлен об оптимальной стратегии своего оппонента.

Второй игрок реализует свою оптимальную стратегию следующим образом: для генерации «наихудшего» возмущения природа снимает копию системы и организует собственную обратную связь без памяти, которая позволяет ей получать информацию о внутреннем состоянии замкнутой системы, образованным внутренним состоянием системы и внутренним состоянием регулятора. Первый игрок – регулятор – ведёт себя аналогичным образом. Пытается предугадать оптимальную стратегию второго игрока, он оценивает «наихудший» вход, исходя из той информации, которую получает, наблюдая за выходом системы. Предполагая, что на вход поступил «наихудший» сигнал, регулятор организует динамическую обратную связь по выходу, обеспечивающую максимальный коэффициент подавления этого возмущения.

Исходная система, замкнутая синтезированным анизотропийным регулятором, обладает определенными динамическими характеристиками, которые определяются вектором цели. Возможность решения задачи многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем путем соответствующего выбора вектора цели показана на основе концепции функционально множественной принадлежности вектора состояния, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах.

Введем вектор искомых параметров  $\chi = \{C, D\}$ , компонентами которого являются элементы матриц  $C$  и  $D$  исходной системы (1), с помощью которых формируется вектор цели  $z$  стохастического робастного управления (2). Зададим начальное значение вектора  $\chi$ , синтезируем анизотропийный регулятор и определим следующие показатели качества замкнутой системы в различных режимах: время отработки заданного угла рассогласования, время разгона до номинальной скорости и время торможения до полной остановки, ошибку отработки гармонического сигнала заданной амплитуды и частоты, ошибку стабилизации случайного изменения момента нагрузки, максимальную скорость наведения, минимальную скорость наведения, неплывность наведения при минимальной скорости, переменные состояния и управления, которые требуется ограничивать. Пронормируем эти частные критерии  $y_i$ , чтобы они находились в диапазоне  $0 \leq y_i \leq 1$ . Приближение нормированного значения  $i$ -го частного критерия к единице соответствует напряженной ситуации, а если величина нормированного значения частного критерия приближается к нулю, то это соответствует спокойной ситуации. Для решения этой задачи многокритериальной оптимизации воспользуемся нелинейной схемой компромиссов [2]

$$\chi^* = \arg \min_z \sum_{i=1}^j \alpha_i [1 - y_i(\chi)]^{-1}, \quad (3)$$

где  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты, характеризующие важность частных критериев.

При многокритериальном синтезе в системе управления кроме локальных критериев необходимо учитывать ограничения на переменные состояния и управления, заданные в форме неравенств. Обычно бывает ситуация, когда исходная точка по некоторым ограничениям является недопустимой. В частности, это касается заданных значений времени первого согласования, перерегулирования, точности отработки и компенсации случайных внешних воздействий и многих других показателей качества, предъявляемых к системе. Более того, некоторые локальные критерии в результате многокритериального синтеза могут быть вообще не выполнены. Однако ряд критериев, таких, как величины управляющих воздействий и переменных состояния, являются допустимыми. Поэтому в нелинейной схеме компромиссов (3) используется комбинация метода штрафных функций с внутренней точкой для локальных критериев и ограничений, являющихся допустимыми, и метода с внешней точкой для локальных критериев и ограничений, являющихся недопустимыми, так что целевая функция в (3) примет следующий вид:

$$f(\chi, r, \lambda) = \sum_{i=1}^j \alpha_i [1 - y_i(\chi)]^{-1} + s(r)L(z) + p(\lambda)T(\chi), \quad (4)$$

где  $s(r)$  и  $p(\lambda)$  – весовые функции, учитывающие

влияние функции штрафа  $L(\chi, r) = r^2 \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(\chi)}$  для метода внутренней точки и функции штрафа

$T(\chi) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2r} \{\min[0, g_i(\chi(r))]\}^2$  для метода внешней

точки. Для получения оптимального решения и выполнения ограничений необходимо, чтобы  $r \rightarrow 0$ , а  $\lambda \rightarrow \infty$ .

Для решения задачи нелинейного программирования с ограничениями (4) использованы стохастические мультиагентные алгоритмы на основе оптимизации роиом частиц [6, 7], позволяющие при поиске глобального оптимума многоэкстремальной целевой функции исключить «блуждания» по дну оврага целевой функции и ускорить продвижение к глобальному оптимуму в окрестности участка целевой функции типа «плато» и в результате повысить скорость нахождения глобального оптимума.

Экспериментальные исследования двухмассовой электромеханической системы показали, что синтезированная система имеет меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами. Установлено, что применение синтезированных анизотропийных регуляторов по сравнению с типовыми регуляторами позволило сократить время регулиро-

вання и одновременно уменьшить дисперсию ошибки отработки случайного задающего воздействия.

**ВЫВОДЫ.** Разработан метод многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем, позволяющий удовлетворить разнообразные требования, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах. Возможность такого подхода показана на основе концепции функционально множественной принадлежности вектора состояния. Обоснован и разработан метод выбора матриц, с помощью которых формируется вектор цели стохастического робастного управления путем решения задачи нелинейного программирования. Синтезированные системы являются робастными по отношению к изменению параметров моделей объектов управления и внешних воздействий за счет минимизации анизотропийной нормы. Приведены результаты экспериментальных исследований двухмассовой электромеханической системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез

### EFFICIENCY OF MULTIMASS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH ANISOTROPIC REGULATORS AT MULTICRITERION SYNTHESIS

**B. Kuznetsov, T. Nikitina, M. Tatarchenko, V. Khomenko**

Institute of Technical Problems of Magnetism National Academy of Sciences of Ukraine  
ul. Industrialnaya, 19, Kharkov, 61106, Ukraine. E-mail: bikuznetsov@mail.ru

The problem of multicriterion anisotropic regulators synthesis by multimass electromechanical systems and the possibility of its solution based on the concept of multi-functional accessory of the state vector that can satisfy various requirements that apply to the work of multimass electromechanical systems in different modes. Proved and developed a method of selecting the matrices with which formed the target vector stochastic robust control by solving a nonlinear programming problem. Minimizing the anisotropic norm of a stochastic system provides a minimum sensitivity of the synthesized system to modify the plant models and external influences. The results of experimental studies of two-mass electromechanical system showed that the use of synthesized anisotropic regulators compared with standard controls has reduced the time of the first agreement by five times, to increase the smoothness of motion at low speeds by 1.7 times, to reduce the variance of the random errors mining master control four times.

**Key words:** multimass elektromehanic system, anisotropic regulator.

#### REFERENCES

1. Voronin, A.N. (1992), *Mnogokriterialnyiy sintez dinamicheskikh system* [Multicriteria synthesis of dynamic systems], Naukova dumka, Kiev, Ukraine. (in Russian)
2. Shtoyer, P. (1982), *Mnogokriterialnaya optimizatsiya: teoriya, vyichisleniya, prilozheniya* [Multicriteria optimization: theory, calculation, applications], Nauka, Moscow, Russia. (in Russian)
3. Diamond, P., Vladimirov, I.G., Kurdjukov, A.P. and Semyonov, A.V. (2001), "Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems", *International Journal Control*, Vol. 74, pp. 28–42.
4. Vladimirov, I.G., Kurdjukov, A.R. and Semyonov, A.V. (1996), "State-space solution to anisotropy-based stochastic  $H_\infty$  – optimization problem", *Proceedings of the 13th IFAC World Congress*, San Francisco, pp. 427–432.
5. Semyonov A.V., Vladimirov I.G. and Kurdjukov A.P. (1994), "Stochastic approach to  $H_\infty$  – optimization", *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, Florida, USA.
6. Clerc, M. (2006), *Particle Swarm Optimization*, Springer, London.
7. Gazi, V. and Passino, K.M. (2011), *Swarm Stability and Optimization*, Springer, London.



**ПРОБЛЕМИ  
ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ  
В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ  
СИСТЕМАХ  
НАУКА, ОСВІТА І ПРАКТИКА**

організована:

Інститутом електромеханіки,  
енергозбереження і систем управління (ІЕЕСУ)  
Кременчуцького національного університету  
імені Михайла Остроградського

у співпраці з:



Інститутом електродинаміки НАН України



Українською асоціацією інженерів-електриків



Кафедрою теоретичної електротехніки та  
електричних вимірювань Кошицького  
технічного університету (Словаччина)



Кафедрою мехатроніки Сілезької  
політехніки (Польща)



Кафедрою "Електропривода і автоматизації  
промислових установок і технологічних  
комплексів" факультету інформаційних  
технологій та робототехніки Білоруського  
національного технічного університету

за підтримки спонсорів:



СВ "АЛЬТЕРА" ЕЛЕКТРОТЕХНІКА & АВТОМАТИЗАЦІЯ



Компанія АО «АУТЕЛ»



Компанія ХОЛИТ Дэйта Системс



Інжинірингова компанія НТЦ "Інформаційні системи"



Компанія "АВМ АМПЕР"



ООО НПП "ГЕРА"