

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

**Кременчуцький національний університет  
імені Михайла Остроградського**

**Інститут електромеханіки, енергозбереження  
і систем управління**

# **ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ І ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ**

**№ 2/2013 (22). Частина 2**

**Кременчук – 2013**

ISSN 2072–2052  
e-ISSN 2074–9937

**Головний редактор**

**М. В. Загірняк**, член-кор. Національної Академії педагогічних наук України, д.т.н., проф.

**Заступники головного редактора**

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

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**Бялобржеський О.В.**, к.т.н., доц.;

**Гладир А.І.**, к.т.н., доц.;

**Калінов А.П.**, к.т.н., доц.;

**Коренькова Т.В.**, к.т.н., доц.;

**Некрасов А.В.**, к.т.н., доц.;

**Перекрест А.Л.**, к.т.н., доц.;

**Прус В.В.**, к.т.н., доц.;

**Сергієнко С.А.**, к.т.н., доц.

**МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА**

**Damijan Miljavec**, проф. (Словенія);

**Jimmie Cathey**, проф. (США);

**Johanes Zentner**, проф. (Німеччина);

**Krzysztof Klyuschynsky**, проф. (Польща);

**Miralem Hadziselimovich**, доц. (Словенія);

**Загірняк М.В.**, член-кор. Національної Академії педагогічних наук України, д.т.н., проф.;

**Бешта О.С.**, д.т.н., проф. (м. Дніпропетровськ);

**Бугайчук В.М.** (“Ампер”, м. Кременчук);

**Грабко В.В.**, д.т.н., проф. (м. Вінниця);

**Клепиков В.Б.**, д.т.н., проф. (м. Харків);

**Литвин О.М.** (ТОВ “Holit Data Systems”, м. Київ);

**Павленко О.В.**, д.т.н., проф. (Росія);

**Ращепкин А.П.**, д.т.н., проф. (м. Київ);

**Садовой О.В.**, д.т.н., проф. (м. Дніпродзержинськ);

**Сенько В.І.**, д.т.н., проф. (м. Київ);

**Ткачук В.І.**, д.т.н., проф. (м. Львів);

**Толочко О.І.**, д.т.н., проф. (м. Донецьк);

**Чермалих В.М.**, д.т.н., проф. (м. Київ);

**Шинкаренко В.Ф.**, д.т.н., проф. (м. Київ);

**Юрченко М.М.**, д.т.н., проф. (м. Київ).

**Технічний редактор – Є. В. Носач**, асист.

**Відповідальний за випуск – О. П. Чорний**, д.т.н., проф.

Науково-виробничий журнал з 26.01.2011 р. внесений до Переліку фахових видань, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук. Журнал надсилається до провідних наукових бібліотек України, реферується у Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського. Журнал індексується у загальнодержавній базі даних «УКРАЇНІКА НАУКОВА» (реферативний журнал «ДЖЕРЕЛО»), а також у міжнародній наукометричній базі даних «ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY».

Друкується за рішенням Вченої ради Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (протокол № 6 від 23.04.2013 р.). Свідоцтво про державну реєстрацію друкованих засобів масової інформації серії КВ № 18236–7036 ПР від 05.09.2011 р.

Журнал публікує після рецензування та редагування статті, що містять результати досліджень з питань розвитку науки, освіти і виробництва, впровадження нових результатів фундаментальних і прикладних досліджень у галузі технічних, природничих і гуманітарних наук.

Науковий журнал видається з 2007 року.

© Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2013 р.

ISSN 2072–2052  
e-ISSN 2074–9937

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: journal.eess@gmail.com, apch@kdu.edu.ua, evnosach@mail.ru

## ЗМІСТ

### ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДИСКОВОМ СЕПАРАТОРЕ С МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ СПИРАЛЬНОГО ТИПА <i>И. А. Шведчикова, М. А. Земзюлин</i> .....	18
РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРАТОРА С ШИХТОВАННЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ <i>А. А. Черно, А. П. Гуров, А. Н. Грань, А. Н. Топалов</i> .....	25
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЩЕННОГО ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ ФАЗ <i>Л. А. Васильев, Ю. В. Мнускин, А. Е. Боев</i> .....	29
РОЗРОБКА ТЕПЛОВИХ СХЕМ ЗАМЩЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВОЇ КАРТИНИ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА <i>А. В. Калініченко</i> .....	35
ПОКАЗНИКИ ЛІНІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ МОРСЬКИХ ХВИЛЬ <i>І. П. Кондратенко, А. П. Ращепкін, Д. Д. Ващилин</i> .....	42
РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ІЗ РІЗНИМ СТУПЕНЕМ НАПРАЦЮВАННЯ НА ВІДМОВУ <i>О. О. Сьомка</i> .....	46
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ <i>С. А. Ткач, И. А. Шведчикова</i> .....	52
РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ ВИСОКОГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ НАНОЧАСТИНОК <i>Є. Є. Волканін, В. П. Ляшенко</i> .....	58
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ИНДУКТОРЕ ДЛЯ НАГРЕВА СЫПУЧИХ СРЕД <i>А. О. Березюк, И. П. Кондратенко, А. П. Ращепкин</i> .....	63
АНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ОДНОВРЕМЕННОЙ КОММУТАЦИЕЙ ФАЗ <i>Л. А. Васильев, Ю. В. Мнускин, А. И. Лужнев</i> .....	68
ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ БЕСКОНТАКТНЫХ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИН С РАЗНЫМИ СХЕМАМИ СОЕДИНЕНИЯ ЯКОРНЫХ ОБМОТОК ВОЗБУДИТЕЛЕЙ <i>А. М. Галиновский</i> .....	72

### ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕКТОРНО КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ЛІНІЙНИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ПРИ ВРАХУВАННІ КРАЙОВИХ ЕФЕКТІВ <i>О. І. Яремов, М. Я. Островерхов</i> .....	80
СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНИЗОТРОПИЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ <i>Т. Б. Никитина, М. О. Татарченко</i> .....	86

УДК 621.77

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНИЗОТРОПИЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Т. Б. Никитина, М. О. Татарченко

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: bikuznetsov@mail.ru

Разработана методика синтеза и экспериментального исследования эффективности анизотропийных регуляторов двухмассовой электромеханической системы при случайных внешних воздействиях. Синтез анизотропийных регуляторов сводится к решению трех уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и одного алгебраического уравнения. Приведены примеры сравнения экспериментальных характеристик двухмассовой электромеханической системы с анизотропийными и типовыми регуляторами в различных режимах работы.

**Ключевые слова:** анизотропийные регуляторы, двухмассовая электромеханическая система, экспериментальные исследования.

## ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АНІЗОТРОПІЙНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Т. Б. Нікітіна, М. О. Татарченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: bikuznetsov@mail.ru

Розроблено методику синтезу й експериментального дослідження ефективності анизотропійних регуляторів двомасової електромеханічної системи при випадкових зовнішніх діях. Синтез анизотропійних регуляторів зводиться до рішення трьох рівнянь Ріккати, рівняння Ляпунова й одного алгебраїчного рівняння. Наведено приклади порівняння експериментальних характеристик двомасової електромеханічної системи з анизотропійними й типовими регуляторами в різних режимах роботи.

**Ключові слова:** анизотропійні регулятори, двомасова електромеханічна система, експериментальні дослідження.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Типовым режимом работы многих систем является отработка случайных задающих воздействий либо компенсация случайных возмущающих воздействий. Причем для многих систем управления такие режимы работы сопровождаются еще и изменением структур самих систем управления. Так, например, в системах наведения и стабилизации [1–5], установленных на подвижном основании, заданием является направление на объект исследования, угловое положение которого изменяется случайным образом. Возмущающим воздействием является изменение углового положения подвижного основания, на котором установлена система наведения и стабилизации. Случайное изменение этого возмущающего воздействия обусловлено неровностью поверхности, по которой движется это подвижное основание, и определяется как характеристиками неровности самой поверхности, так и скоростью и характером движения подвижного основания, а также параметрами подвески подвижного основания и т.д. Причем при этих случайных задающих и возмущающих воздействиях в режиме наведения система замкнута по скорости и предназначена для наведения и слежения за подвижным объектом исследования в режиме отработки случайного изменения скорости движения объекта исследования. А в режиме стабилизации система замкнута по углу поворота и предназначена для

стабилизации углового положения объекта управления в направлении на объект исследования.

В последнее время интенсивно развивается теория стохастического робастного управления [1–5]. Системы стохастического робастного управления обладают рядом преимуществ. Во-первых, они робастно устойчивы, т.е. сохраняют устойчивость в определенных пределах. Во-вторых, они имеют существенно меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с оптимальными системами, несмотря на то, что динамические характеристики стохастических робастных систем могут незначительно отличаться от соответствующих характеристик оптимальных систем. Поэтому вопросы проектирования систем управления, работающих при случайных задающих и возмущающих воздействиях, являются актуальными. Однако в работах [1–5] не рассмотрены вопросы экспериментальной оценки эффективности анизотропийных регуляторов электромеханических систем по сравнению с типовыми регуляторами.

Целью данной работы является разработка методики синтеза и экспериментального исследования эффективности анизотропийных регуляторов электромеханических систем, а также синтез и исследование эффективности анизотропийных регуляторов двухмассовой электромеханической системы.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Применение регуляторов, оптимальных по квадратичным критериям качества, показало их высокую чувствительность к структурным и параметриче-

ским возмущениям объекта управления и внешних воздействий. Для уменьшения чувствительности синтезированной системы к структурным и параметрическим возмущениям объекта управления и внешних воздействий вместо  $H^2$  нормы используют  $H^\infty$  норму в следующем виде:

$$\|w_{z,x}\|_\infty \rightarrow \min.$$

Обычно  $H^\infty$  норма определяется путем нахождения максимального сингулярного значения  $\bar{\sigma}(\cdot)$  матрицы передаточной функции с помощью алгоритма Шура в следующем виде:

$$\|w\|_\infty \equiv \sup_\omega \bar{\sigma}(w(j\omega)); \omega \in [0, \infty).$$

Робастные регуляторы, синтезированные по критерию  $H^\infty$ , обладают малой чувствительностью к структурным и параметрическим возмущениям [2-4], однако их динамические характеристики часто оказываются неудовлетворительными в связи с излишней «осторожностью» робастных регуляторов, рассчитанных на работу системы в самых неблагоприятных условиях.

Применение регуляторов, синтезированных по смешанному критерию, включающему  $H^2$  и  $H^\infty$  нормы, позволяет получать системы, обладающие достаточно высокими динамическими характеристиками при низкой чувствительности к изменению параметров и структуры объектов управления. Однако вопрос выбора параметра толерантности  $\gamma$ , характеризующего соотношения между  $H^2$  и  $H^\infty$  нормами, решается на интуитивном уровне. Чем ближе система к оптимальной по  $H^2$  норме, тем она более чувствительна к изменению параметров и структуре моделей объекта управления и внешних воздействий. Чем ближе синтезированная система к оптимальной по  $H^\infty$  норме, тем меньшую точность она имеет, т.к. проявляет излишнюю «осторожность» и рассчитана на работу в самых неблагоприятных условиях.

Одним из корректных подходов к обоснованному выбору смешанного критерия, включающего  $H^2$  и  $H^\infty$  нормы, является построение анизотропных регуляторов [1-5].

Для дискретной динамической системы с передаточной функцией  $w$ , на вход которой поступает дискретная последовательность, сформированная из гауссовской последовательности, с помощью дискретного фильтра с передаточной функцией  $w_\phi$  вводится анизотропная норма системы в следующем виде:

$$\|w\|_a \equiv \sup \left\{ \frac{\|ww_\phi\|_2}{\|w\|_2} : w_\phi \in w_a \right\},$$

так что имеет место следующее соотношение:

$$\frac{1}{\sqrt{m}} \|w\|_2 = \|w\|_0 \leq \lim_{a \rightarrow +\infty} \|w\|_a = \|w\|_\infty.$$

Таким образом, если величина анизотропии входной дискретной системы находится в диапазоне  $0 < a < \infty$ , то значение анизотропной нормы системы  $\|w\|_a$  ограничено значениями  $H^2$  и  $H^\infty$  нормами системы

$$\frac{1}{\sqrt{m}} \|w\|_2 \leq \|w\|_a \leq \|w\|_\infty.$$

При стохастическом подходе к синтезу  $H^\infty$  управления в качестве критерия оптимальности системы используется стохастическая норма системы

$$\|w_{z,x}\|_a \rightarrow \min.$$

При этом фактически используется комбинация стохастической нормы системы и средней анизотропии случайного сигнала, что и приводит к одному из вариантов стохастической нормы, названной анизотропной нормой.

*Синтез анизотропного регулятора.* Рассмотрим синтез анизотропного регулятора 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.

Обозначим  $A, B, C, D$  реализацию исходной системы, замкнутой этим динамическим блоком в следующем виде

$$\mathfrak{Z}(w, w_{ky}) \sim \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & D_{11} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} A & B_2 \bar{C} & B_1 \\ \bar{B} C_2 & \bar{A} & \bar{B} D_{21} \\ C_1 & D_{12} \bar{C} & D_{11} \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим уравнение Риккати

$$R = \bar{A}^T R \bar{A} + q \bar{C}^T \bar{C} + L^T \Sigma^{-1} L;$$

$$\Sigma \equiv [I_{m_1} - q D_{11}^T D_{11} - \bar{B}^T R \bar{B}]^{-1};$$

$$L \equiv [L_1 \quad L_2] \equiv \Sigma [\bar{B}^T R \bar{A} + q D_{11}^T \bar{C}].$$

В этом уравнении скалярный параметр  $q$  выбирается из полуоткрытого интервала

$[0; \| \mathfrak{Z}(w, w_{ky}) \|_\infty^{-2}]$ . Если это уравнение Риккати имеет

решение, то анизотропия сигнала равна

$$-\frac{1}{2} \ln \det \left[ \frac{m_1 \Sigma}{\text{tr} [L P L^T + \Sigma]} \right] = a,$$

а эквивалентный формирующий фильтр

$$W_\phi \sim \begin{bmatrix} \bar{A} + \bar{B} L & \bar{B} \Sigma^{1/2} \\ L & \Sigma^{1/2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} A + B_1 L_1 & B_1 L_2 + B_2 \bar{C} & B_1 \Sigma^{1/2} \\ \bar{B} [C_2 + D_{21} L_1] & \bar{A} + \bar{B} D_{21} L_2 & \bar{B} D_{21} \Sigma^{1/2} \\ L_1 & L_2 & \Sigma^{1/2} \end{bmatrix}$$

имеет грамиан управляемости, определяемый уравнением Ляпунова:

$$P = [\bar{A} + \bar{B} L] P [\bar{A} + \bar{B} L]^T + \bar{B} \Sigma \bar{B}^T.$$

При этом  $a$  – анизотропийная норма системы, замкнутой таким регулятором, равна

$$\|S(W, W_{ky})\|_a = \left\{ \frac{1}{q} \left[ 1 - \frac{m_1}{\text{tr}\{LPL^T + S\}} \right] \right\}^{1/2}$$

Рассмотрим уравнение Риккати

$$S = [A + B_1 L_1] S [A + B_1 L_1]^T + B_1 \Sigma B_1^T - \Lambda \Theta \Lambda^T;$$

$$\Theta \equiv [C_2 + D_{21} L_1] S [C_2 + D_{21} L_1]^T + D_{21} \Sigma D_{21}^T;$$

$$\Lambda \equiv [A + B_1 L_1] S [C_2 + D_{21} L_1]^T + B_1 \Sigma D_{21}^T \Theta^{-1}.$$

Рассмотрим также уравнение Риккати

$$T = \underline{A}^T T \underline{A} + \underline{C}^T \underline{C} - N^T \Pi N;$$

$$\Pi \equiv \underline{B}^T T \underline{B} + D_{12}^T D_{12};$$

$$N \equiv [N_1 \quad N_2] \equiv -\Pi^{-1} (\underline{B}^T T \underline{A} + D_{12}^T \underline{C}),$$

в котором матрицы  $A, B, C, D$  реализации имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} A & B_1 M & B_2 \\ 0 & A + B_1 M + B_1 \hat{C} & 0 \\ C_1 & D_{11} M & D \end{bmatrix},$$

откуда может быть получена  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$  реализация регулятора, оптимизирующего анизотропийную норму.

$$\hat{A} = B_2 \hat{C} + [I_n - \Lambda] \begin{bmatrix} A & \hat{B}_1 \\ C_2 & D_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n \\ M \end{bmatrix};$$

$$\hat{B} = \Lambda;$$

$$\hat{C} = N_1 + N_2.$$

Таким образом, решение задачи синтеза анизотропийных регуляторов сводится к вычислению трех алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и уравнения специального вида для вычисления уровня анизотропии входного сигнала.

**Анализ анизотропийных регуляторов.** Рассмотрим теперь решение задачи анализа анизотропийных регуляторов для многомерной дискретной системы с  $m$  входами и  $p$  выходами и матричной передаточной функцией  $w$ , на вход которой поступает дискретный многомерный гаусовский белый шум с нулевым математическим ожиданием и единичной ковариационной матрицей. Тогда средняя анизотропия дискретной последовательности на выходе такой системы определяется следующим выражением

$$\bar{A}(w_\phi) \equiv -\frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \ln \det \left\{ \frac{m}{\|w_\phi\|_2^2} \hat{w}_\phi(\omega) [\hat{w}_\phi(\omega)]^* \right\} d\omega.$$

Величина средней анизотропии равна нулю, если дискретная последовательность представляет собой гаусовский белый шум с единичной ковариационной матрицей.

Представим исходную дискретную систему в форме пространства состояний

$$w_\phi = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix},$$

т.е. передаточная функция системы  $w_\phi$  задана в виде  $A, B, C, D$  реализации.

Тогда средняя анизотропия дискретной последовательности на выходе системы может быть определена следующим образом

$$\bar{A}(w_\phi) \equiv -\frac{1}{2\pi} \ln \det \left[ \frac{mT}{\text{tr}\{CPC^T + DD^T\}} \right],$$

где матрица  $T$  связана с решением  $R$  уравнения Риккати.

$$R = ARA^T + BB^T - LTL^T;$$

$$T \equiv CRC^T + DD^T;$$

$$L \equiv (ARC^T + BD^T) \Gamma^{-1},$$

а грамиан управляемости  $P$  системы является решением уравнения Ляпунова

$$P = APA^T + BB^T.$$

Для решения уравнения Риккати используется алгоритм для нахождения обобщенных собственных векторов Шура, а для решения уравнения Ляпунова используется алгоритм Шура для унитарной триангуляции матриц.

**Вычисления анизотропийной нормы системы.** Рассмотрим алгоритм вычисления анизотропийной нормы дискретной системы, заданной в пространстве состояний матрицами  $A, B, C, D$ . Запишем для этой дискретной системы уравнение Риккати относительно матрицы  $R$  в следующем виде:

$$R = A^T RA + qC^T C - L^T \Sigma^{-1} L;$$

$$\Sigma \equiv (I_m - qD^T D - B^T RB)^{-1};$$

$$L \equiv \Sigma (B^T RA + qD^T C).$$

Тогда  $a$  – анизотропийная норма этой системы может быть определена в виде

$$\|w\|_a = \left\{ \frac{1}{q} \left[ 1 - \frac{m}{\text{tr}\{LPL^T + \Sigma\}} \right] \right\}^{1/2},$$

где грамиан управляемости  $P$  формирующего фильтра

$$w_\phi = \begin{bmatrix} A + BL & b \Sigma^{1/2} \\ L & \Sigma^{1/2} \end{bmatrix}.$$

Определяется уравнением Ляпунова

$$P = [A + BL] P [A + BL]^T + B \Sigma B^T.$$

При этом величина анизотропии дискретной случайной последовательности на входе системы равна

$$-\frac{1}{2} \ln \det \left[ \frac{m \Sigma}{\text{tr}\{LPL^T + \Sigma\}} \right] = a.$$

Анизотропийная норма системы характеризует не анизотропию дискретных последовательностей на входе и выходе системы, а чувствительность системы в среднем к случайным входным последовательностям со средним уровнем анизотропии, равным  $a$ . Причем при нулевой анизотропии  $a=0$  входной дискретной последовательности анизотропийная норма системы равна  $H^2$  норме системы, а

при бесконечной анизотропии  $a \rightarrow \infty$  входной дискретной последовательности анизотропная норма системы равна  $H^\infty$  норме системы.

*Описание стенда двухмассовой электромеханической системы.* На рис. 1 показана схема изучаемой системы. Механическая часть стенда выполнена на базе двух однотипных микродвигателей постоянного тока ДПТ-25-Н2 [6]. Валы двигателей Д1 и Д2 соединены упругой передачей. Преобразователем электрической энергии в механическую является микродвигатель Д1, а микродвигатель Д2 формирует случайную нагрузку для микродвигателя Д1.

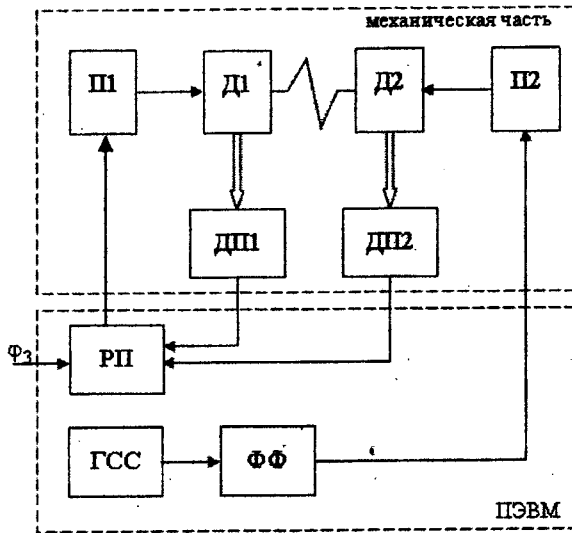


Рисунок 1 – Схема системы управления стендом в режиме регулирования углового положения

В режиме стабилизации, когда система замкнута по углу поворота, управление первым двигателем осуществляется от преобразователя П1 с помощью регулятора положения РП первого двигателя по сигналу с датчиков положения ДП1 либо ДП2 первого либо второго двигателей.

В режиме наведения, когда система замкнута по скорости изменения угла поворота, управление первым двигателем осуществляется от преобразователя П1 с помощью регулятора скорости РС первого двигателя по сигналу с датчиков скорости ДС1, ДС2 первого либо второго двигателей (на рис. 1 регулятор скорости РС и датчики скорости ДС1, ДС2 не показаны). Скорости вращения двигателей измеряются с помощью тех же импульсных датчиков положения ДП1, ДП2 первого и второго двигателей

С помощью второго двигателя создается случайное изменение момента нагрузки. Для имитации случайного воздействия на систему на вход второго двигателя подается случайный сигнал с выхода формирующего фильтра ФФ в виде колебательного звена. На вход формирующего фильтра от генератора случайных сигналов ГСС подается сигнал типа белого шума. С помощью такой системы второй двигатель формирует случайное изменение момента нагрузки. Характеристики случайного изменения

момента нагрузки определяются параметрами формирующего фильтра и собственно двигателя.

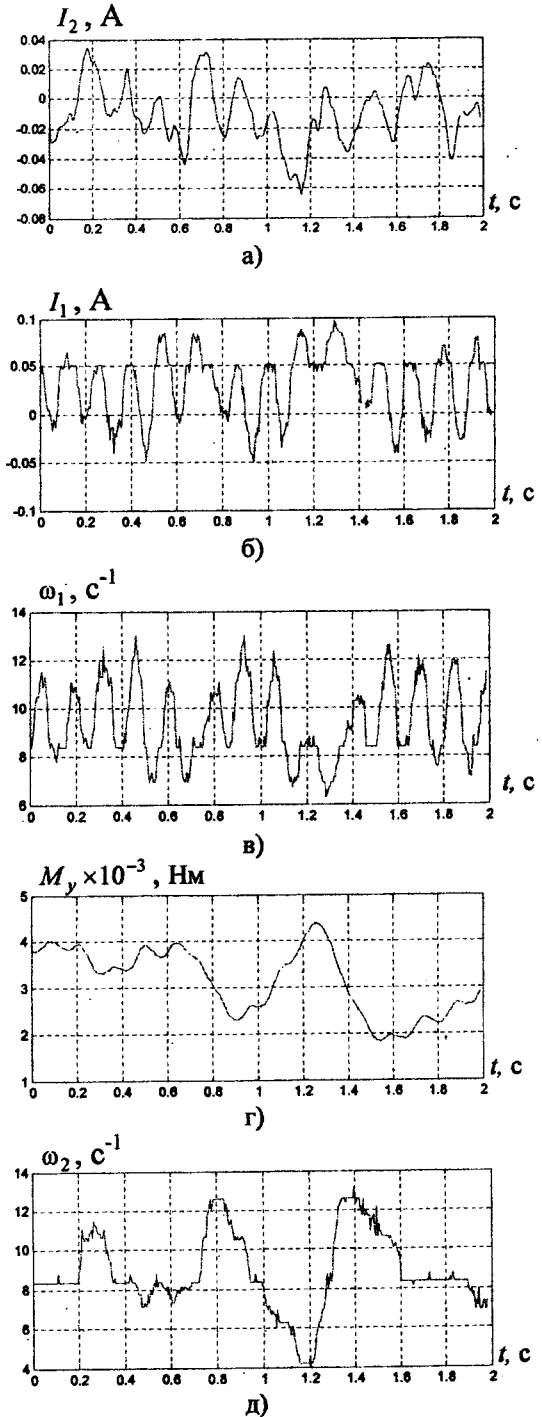


Рисунок 2 – Реализации переменных состояния следящей системы с типовым регулятором при случайном изменении момента нагрузки

На схеме не показан микроконтроллер, с помощью которого осуществляется обмен информацией между стендом и ПЭВМ, преобразователи АЦП и ЦАП, а также контроллер управления преобразователями П1, П2, с помощью которых формируются управляющие напряжения на первый Д1 и второй Д2 двигатели.

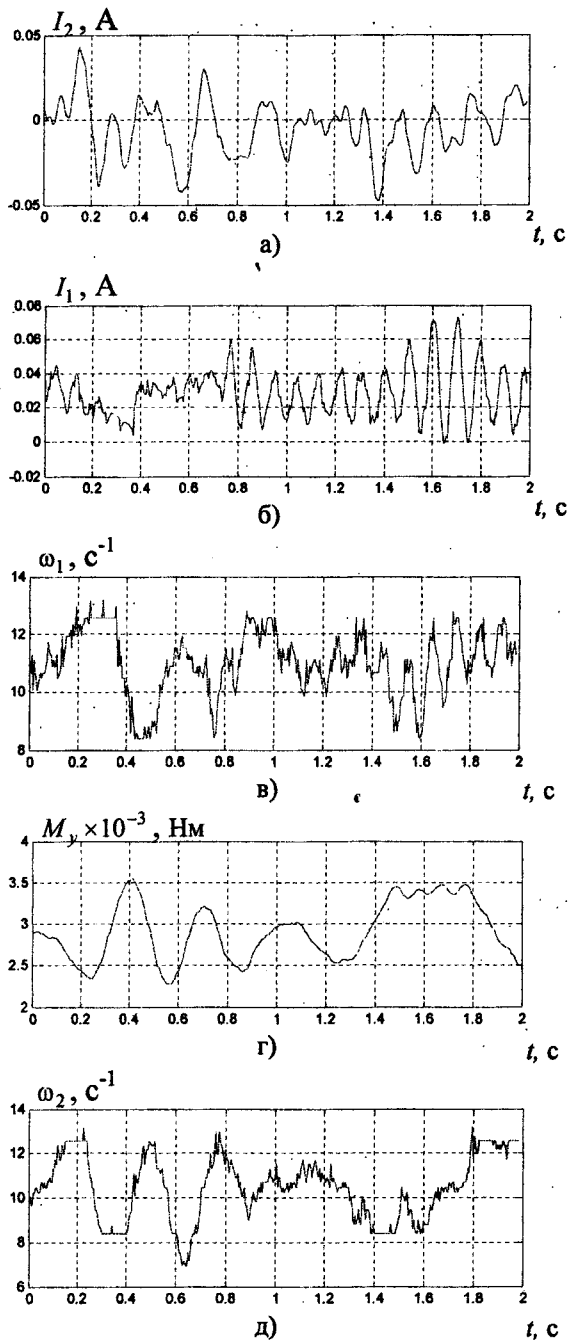


Рисунок 3 – Реалізації перемінних станів слідячої системи з анізотропним регулятором при випадковому зміні моменту навантаження

*Результати експериментальних досліджень.* Вначале рассмотрим работу следящей системы в режиме регулирования скорости при замыкании обратной связи по скорости первого двигателя. На рис. 2 показаны реализации переменных состояния системы с типовым регулятором, а на рис. 3 – реализации переменных состояния системы с анизотропным регулятором. На рис. 2, 3 показаны следующие переменные состояния: а) и б) токи якорных цепей второго и первого двигателей; в) ско-

рость вращения первого двигателя; г) момент упругости и д) скорость вращения второго двигателя.

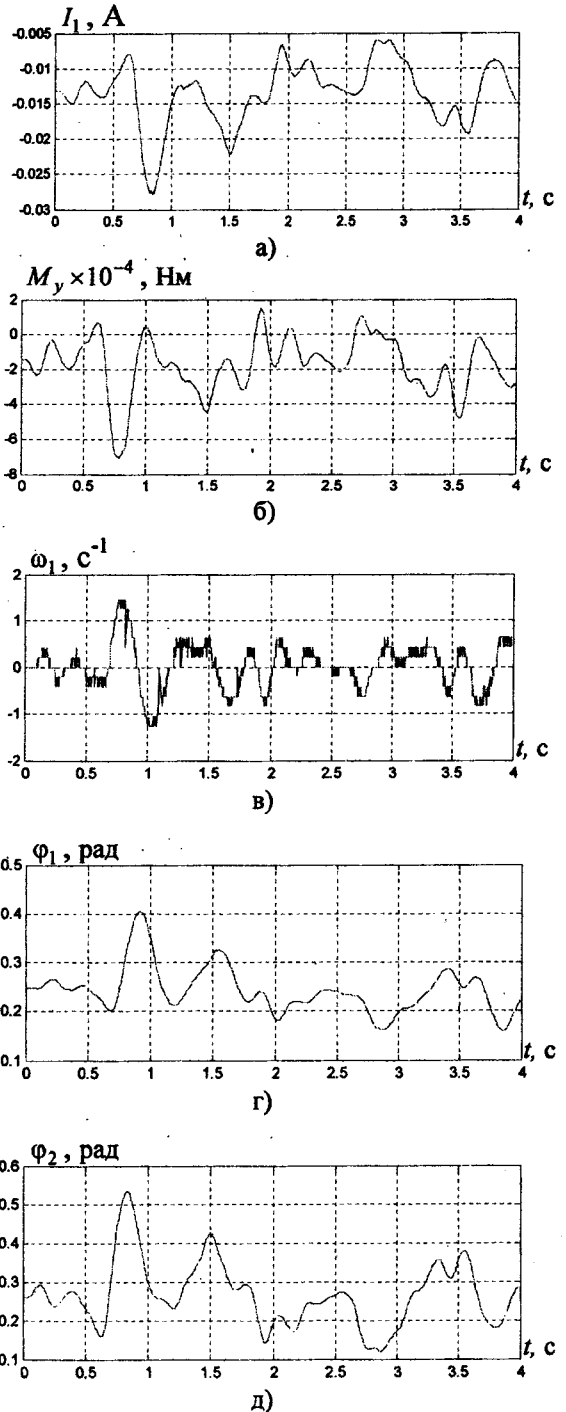


Рисунок 4 – Реалізації перемінних станів системи стабілізації з типовим регулятором при випадковому зміні моменту навантаження

Как видно из этих рисунков, максимальное отклонение скорости вращения второго двигателя в системе управления с типовым регулятором составляет  $\Delta\omega_2 = 9 \text{ c}^{-1}$ , а в системе управления с анизотропным регулятором максимальное отклонение скорости вращения второго двигателя составляет  $\Delta\omega_2 = 6 \text{ c}^{-1}$ .



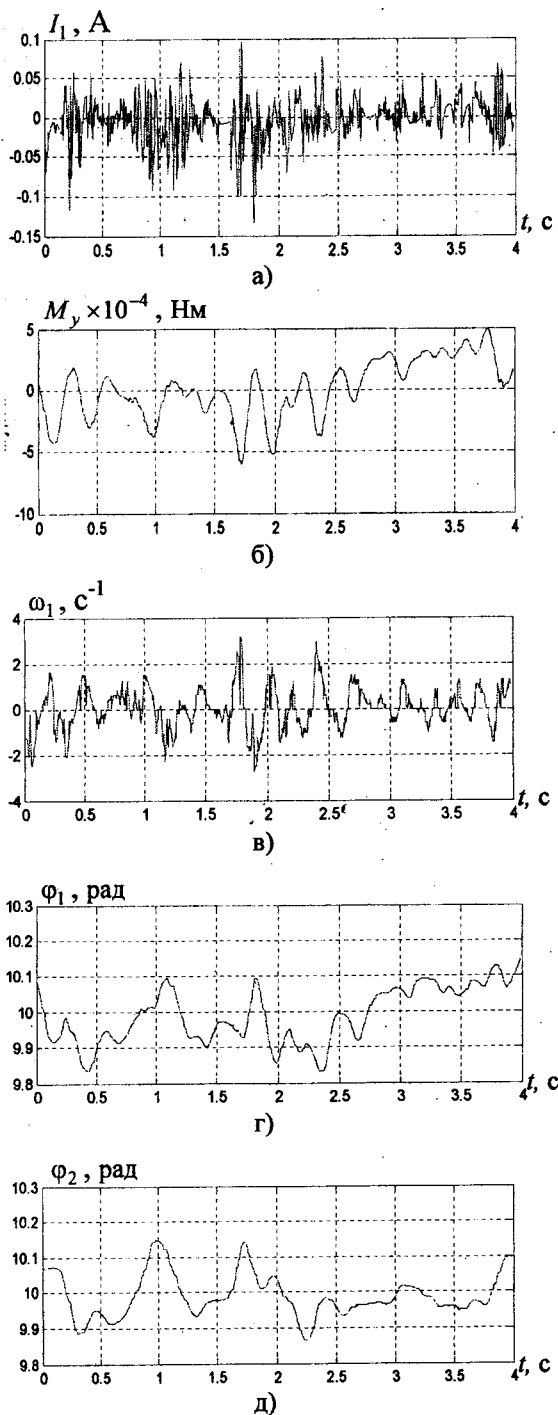


Рисунок 5 – Реалізації змінних станів системи стабілізації з анізотропним регулятором при випадковому зміні моменту навантаження

Таким образом, применение анизотропного регулятора в системе регулирования скорости при замыкании обратной связи по скорости первого двигателя при случайном изменении момента нагрузки позволяет уменьшить ошибку регулирования скорости вращения второго двигателя более чем в 1,5 раза.

Рассмотрим теперь систему стабилизации с обратной связью по углу поворота вала второго двигателя. На рис. 4 показаны реализации случайных

процессов с типовым регулятором, замкнутым по углу поворота вала второго двигателя, а на рис. 5 – реализации случайных процессов с анизотропным регулятором, замкнутым по углу поворота вала второго двигателя.

На рис. 4–5 показаны следующие переменные состояния: а) ток якорной цепи первого двигателя; б) момент упругости; в) скорость вращения первого двигателя; г) и д) – углы поворота валов первого и второго двигателей.

Как видно из этих рисунков, максимальное отклонение угла поворота вала второго двигателя в системе управления с типовым регулятором составляет  $\Delta\varphi_2 = 0,55$  рад, а в системе управления с анизотропным регулятором максимальное отклонение угла поворота вала второго двигателя составляет  $\Delta\varphi_2 = 0,2$  рад. Таким образом, применение анизотропного регулятора в системе управления с обратной связью по углу поворота вала второго двигателя при случайном изменении момента нагрузки позволяет уменьшить ошибку регулирования угла поворота вала второго двигателя более чем в два раза.

**ВЫВОДЫ.** Разработана методика синтеза и экспериментального исследования анизотропного регулятора двухмассовой электромеханической системы. Решение задачи синтеза анизотропных регуляторов сводится к вычислению трех алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и уравнения специального вида для вычисления уровня анизотропии входного сигнала.

Приведены динамические характеристики синтезированной системы при случайном изменении внешних воздействий. Как показали экспериментальные исследования, случайное изменение момента сопротивления, создаваемого вторым двигателем с точностью до коэффициента пропорциональности, практически совпадает с напряжением на якорной цепи и, следовательно, спектральные характеристики случайного изменения момента сопротивления определяются с точностью до масштабного коэффициента усиления параметрами формирующего фильтра в виде колебательного звена второго порядка.

Применение анизотропного регулятора в следящей системе регулирования скорости при замыкании обратной связи по скорости первого двигателя при случайном изменении момента нагрузки позволяет уменьшить ошибку регулирования скорости вращения второго двигателя более чем в 1,5 раза. Применение анизотропного регулятора в системе стабилизации при управлении угловым положением с обратной связью по углу поворота вала второго двигателя при случайном изменении момента нагрузки позволяет уменьшить ошибку регулирования угла поворота вала второго двигателя более чем в два раза.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Никитина Т.Б. Синтез анизотропийних регуляторів многоканальних систем регулювання геометричних параметрів проката // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 30. – С. 230–231.
2. Никитина Т.Б. Стохастический синтез цифрового робастного управления многоканальными итерационными системами // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2008. – № 71. – С. 22–27.
3. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез анизотропийного регулятора стабилизатора в вертикальной плоскости // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 13. – С. 94–103.
4. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов электропривода горизонтального наведения // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Вип. 1/2009 (54). – С. 9–12.
5. Никитина Т.Б. Синтез анизотропийного стабилизатора основного вооружения танка в горизонтальной плоскости // Механіка та машинобудування. – 2009. – № 2. – С. 135–147.
6. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Экспериментальное исследование робастного управления главными приводами прокатных станов с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл на стенде двухмассовой электромеханической системы // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 207–212.

## COMPARISON OF EFFICIENCY OF ELECTROMECHANICS SYSTEMS ANISOTROPIC REGULATORS

**T. Nikitina, M. Tatarchenko**

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

vul. Frunze, 21, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: bikuznetsov@mail.ru

Methods of synthesis and experimental research of anisotropic regulators efficiency by twomass electromechanics system at stochastic external influences is developed. The synthesis of anisotropic regulators is taken to the decision of three Riccati equation, Lyapunov equation and one algebraic equation. Examples of comparison of experimental descriptions of twomass electromechanics system with anisotropic and typical regulators are resulted.

**Key words:** anisotropic regulators, twomass electromechanics system, experimental researches.

## REFERENCES

1. Nikitina, T.B. (2008), «Synthesis of anisotropic regulators of the multichannel control systems of rolled metal geometrical parameters», *Visnik Natsional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivs'kii politehnicnii institut»*, Vol. 30, pp. 230-231.
2. Nikitina, T.B. (2008), «Stochastic synthesis of digital robust control by multichannel iterative systems», *Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya*, Vol. 71, pp. 22-27.
3. Nikitina, T.B. (2009), «Multicriterion synthesis of anisotropic regulator by stabilizator in vertical plane», *Visnik Natsional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivs'kii politehnicnii institut»*, Vol. 13, pp. 94-103.
4. Nikitina, T.B. (2009), «Multicriterion synthesis of anisotropic regulators by electric drive of horizontal aiming», *Visnik Kremenchuts'kogo derzhavnogo politehnicnogo universitetu*. Vol. 1, no. 54, pp. 9-12.
5. Nikitina, T.B. (2009), «Synthesis of anisotropic stabilizator by tank mane armament in horizontal plane», *Mehanika ta mashinobuduvannya*, Vol. 2, pp. 135-147.
6. Kuznetsov, B.I., Nikitina, T.B., Voloshko, A.V. and Vinichenko, E.V. (2012), Experimental research of robust control by main drives of flatting mills taking into account their mutual influencing through the rolled metal on twomass electromechanics system stand, *Tehnicna elektrodinamika*, Vol. 2, pp. 207-212.

Стаття надійшла 28.03.2013.

Коректор Н. О. Гордієнко  
Технічна верстка Алексеева Ю.О., Ромашихін Ю.В.  
Відповідальні секретарі Карпенко О.О., Молодика І.С.

Підписано до друку 03.05.2013. Формат А4. Папір офсетний  
Умов.друк.аркушів 53,2. Наклад 300 прим. Друк разопринтний. Зам.105-13  
Надруковано з готових оригіналів в друкарні ПП Щербатих О.В.  
Кременчук, вул. 29 вересня, 11/19, тел. 79-63-38