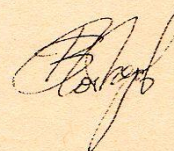


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

КОТЛЯРОВ ВОЛОДИМИР ОЛЕГОВИЧ



УДК 62-83.52

**СИНТЕЗ СТІЙКИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
З ВІД'ЕМНИМ В'ЯЗКИМ ТЕРТЯМ ТА СПОСТЕРІГАЧАМИ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Осичев Олександр Васильович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри автоматизованих
електромеханічних систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Кузнецов Борис Іванович,
Науково - технічний центр магнетизму
технічних об'єктів НАН України, завідувач
відділом проблем управління магнітним
полем

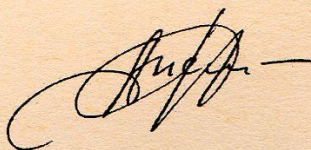
кандидат технічних наук, доцент
Буряковський Сергій Геннадійович,
Українська державна академія
залізничного транспорту, доцент кафедри
автоматизованих систем електричного
транспорту

Захист відбудеться « 14 » 11 2013 р. о 16³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « 11 » 10 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Гурин А.Г

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією зі складних задач створення електроприводів (ЕП) машин і механізмів електротехнічних комплексів та систем є зменшення у них динамічних навантажень коливального характеру, що призводять до зниження продуктивності та якості роботи, прискореного зношування та поломок обладнання. Коливальні процеси в ЕП мають різноманітний характер та численні причини, серед яких пружні зв'язки і зазори у механічних передачах, особливості фрикційного навантаження ЕП. До виникнення фрикційних автоколиваний призводить зокрема спадаюча ділянка кінетичної характеристики тертя, на якій збільшення швидкості робочого органу супроводжується зниженням опору навантаження (ефект Штрібека). Такі автоколивання погіршують техніко-економічні показники функціонування ЕП різного типу та призначення, у тому числі металорізальних верстатів, маніпуляторів роботів, телескопів, антен радіолокаційних станцій, транспортерів, волочилних машин. У прокатних станах фрикційні автоколивання виникають при проковзуванні валків, у колісному електротранспорті при буксуванні.

Усунення шкідливих фрикційних автоколиваний вимагає всебічного вивчення умов їх виникнення. Ця проблема вирішується в рамках наукового напрямку «Динаміка електромеханічних систем (ЕМС) з від'ємним в'язким тертям (ВВТ)», створеного В. Б. Клепковим. В роботах О. В. Осичева, Т. Б. Луцькової, В. С. Маркова та інших з'ясовані умови стійкості процесів в ЕМС із ВВТ "в малому", порушення яких веде до виникнення автоколиваний. Для забезпечення стійкості та поліпшення якості процесів в системі керування (СК) вводять зворотні зв'язки та регулятори численних типів.

Необхідне для замикання зворотних зв'язків вимірювання координат ЕП є самостійним складним завданням. У багатьох випадках використовуються засоби непрямого вимірювання, зокрема спостерігачі, в яких модель об'єкта спостереження відображає стан об'єкта та корегується зв'язками за його координатами, що вимірюються безпосередньо. Але впливу спостерігачів на стійкість процесів в ЕМС із ВВТ дотепер приділялася недостатня увага, хоч відомо, що він може бути значним. Результати досліджень Л. В. Акімова, І. В. Бовдуя, Т. Б. Кузнецової, Є. М. Потапенко, О. Г. Щолокова, Н. Olsson, N. Mallon, H. Nijmeijer та інших стосуються лише деяких ЕМС з ВВТ та відносно малого числа із багатьох відомих типів спостерігачів. Численні можливі варіанти синтезу спостерігачів для ЕМС з ВВТ не зіставлені один з одним за їх впливом на виникнення фрикційних автоколиваний.

Таким чином, порівняння впливу різних спостерігачів на виникнення фрикційних автоколиваний внаслідок нестійкості процесів у ЕМС "в малому" на спадаючій ділянці кінетичної характеристики тертя та розробка методів і засобів синтезу ЕМС зі спостерігачами, що забезпечують зниження негативного впливу спостерігачів, є актуальною задачею яка визначила напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем НТУ "ХПІ" у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України «Дослідження впливу зворотних зв'язків на динаміку електромеханічних систем обтискних прокатних станів у режимі буксування. Розробка експериментальної системи усунення пробуксовок на основі датчиків автоколиваний» (№ ДР 0197U001894) та «Розробка та дослідження систем пригнічення фрикційних автоколиваний і режимів буксування в електроприводах машин та механізмів» (№ ДР 0100U001702), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є забезпечення стійкості процесів в ЕМС з ВВТ шляхом замикання зворотних зв'язків за допомогою спостерігачів, що попереджує виникнення фрикційних автоколиваний.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

1. Встановити властивості та характеристики ЕМС з ВВТ, що впливають на синтез спостерігачів для СК ЕП з фрикційним навантаженням – повну спостережуваність, виявлюваність, індекси спостережуваності та інші;
2. Синтезувати регулятори, що стабілізують ЕМС з ВВТ але потребують використання спос-

терігачів і визначити за ними функціональні та параметричні вимоги до спостерігачів в СК ЕП – їх вихідні сигнали та швидкодію;

3. Виконати структурний та параметричний синтез спостерігачів для ЕМС з ВВТ та встановити за критеріями стійкості їх вплив на процеси керування ЕП, розміри областей стійкості, ступінь та запаси стійкості;

4. Розробити методики проектування СК ЕП зі спостерігачами, що враховують цей вплив, та створити програмні засоби автоматизованого синтезу СК ЕП;

5. Експериментально визначити вимоги до технічної мікропроцесорної реалізації спостерігачів (розрядність, швидкодія), які рекомендовані до використання у ЕМС з ВВТ, але раніш не застосовувались і досвід їх реалізації відсутній.

Об'єкт дослідження – стійкість та якість процесів керування у замкнених через спостерігачі електроприводах з фрикційним навантаженням.

Предмет дослідження – вплив спостерігачів для двомасових ЕМС з ВВТ на показники стійкості процесів у СК ЕП.

Методи дослідження. Значення параметрів ЕП відібрані методом ЛП-пошуку рівномірно розподілених послідовностей та знайдені ідентифікацією за помилкою передбачення. Синтез СК виконано методами модального, оптимального та робастного керування, зокрема методом лінійних матричних нерівностей та за лінійно-квадратичними і рівномірно-частотними критеріями. Оптимізація параметрів ЕМС за розміром областей стійкості виконано методом Нелдера-Міда. Стійкість ЕМС досліджена за алгебраїчними та частотними критеріями, зокрема круговим критерієм абсолютної стійкості. Перехідні процеси розраховані методами числового інтегрування диференціальних рівнянь та методом електромеханічних аналогій. Знання систематизовані методами штучного інтелекту із застосуванням методів логіки предикатів першого порядку.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше встановлені умови повної спостережуваності двомасових ЕМС з ВВТ і їх частин, умови мінімальності порядку спостерігачів для таких ЕМС та умови інваріантності спостерігачів до фрикційного навантаження, що дозволяє раціонально обирати структуру та параметри спостерігачів при їх синтезі;

2. Одержали розвиток методи синтезу замкнених ЕМС з ВВТ, які відрізняються використанням числових методів для оптимізації коефіцієнтів передачі зворотних зв'язків за розміром областей стійкості, застосуванням обмежень на кореневі показники якості процесів та критеріїв робастності, застосуванням інтерполяції коефіцієнтів стандартних форм характеристичних поліномів;

3. Вперше обгрунтоване використання для забезпечення стійкості процесів у ЕМС з ВВТ спостерігачів редукованих та мінімального порядку, тих, що оцінюють лінійний функціонал змінних стану, з векторною корекцією та паралельно з'єднаних. Встановлено залежності розмірів та розташування областей стійкості ЕМС з ВВТ від структури та параметрів спостерігачів;

4. Вдосконалено метод розташування коренів характеристичних поліномів систем керування, який відрізняється вибором кривої другого порядку - еліпсу, що спрощує врахування вимог до спостерігачів при їх синтезі;

5. Визначені доцільні форми представлення знань про спостерігачі для ЕМС з ВВТ, що дозволяють застосовувати для синтезу ЕП комп'ютерні системи автоматизованого проектування зі штучним інтелектом.

Практичне значення отриманих результатів для розробки електротехнічних комплексів металургійної, металообробної та ряду інших галузей полягає:

- у створенні методик проектування ЕМС з ВВТ, що забезпечують усунення шкідливих фрикційних автоколивань та дозволяють скоротити строки проектування спостерігачів;

- у розробці комп'ютерних засобів автоматизації проектування (інформаційно-пошукові системи з характеристик тертя та форм характеристичних поліномів, комп'ютерних моделі та програми синтезу і аналізу регуляторів і спостерігачів, прототип експертної системи з синтезу спостерігачів);

- у рекомендаціях з мікропроцесорної реалізації цифрових спостерігачів та у створенні лабораторних стендів ЕП для їх дослідження.

Отримані результати досліджень і практичних розробок використані в Інституті транспорту газу ПАТ “УКРТРАНСГАЗ” (м. Харків) при створенні систем антипомпажного керування електроприводними газоперекачувальними агрегатами (отримано патент РФ на винахід №2220328), в НТУ “ХПІ” при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт і в навчальному процесі.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Здобувачем виконане моделювання процесів у СК ЕП зі спостерігачами та аналіз його результатів, розраховані індекси спостережуваності двомасових ЕМС з ВВТ, виведені аналітичні умови спостережуваності ЕМС та умови інваріантності спостерігачів, проведено структурний та параметричний синтез СК, розраховані області стійкості, встановлені залежності показників стійкості від параметрів спостерігачів і розроблені методики синтезу, що враховують ці залежності, та їх програмне забезпечення. На базі обладнання фірм Siemens та Motorola створені експериментальні стенди і виконано структурну та параметричну ідентифікацію ЕП з пружним зв’язком. Досліджено мікропроцесорну реалізацію цифрових спостерігачів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи були представлені на міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Алушта, 1998, 2004, 2010 рр.), «Проблеми створення нових машин і технологій» (м. Кременчук, 1999 р.), «Нетрадиційні електромеханічні та електричні системи» (м. Алушта, 1997 р.) та на засіданнях семінарів наукової ради НАН України «Динаміка нелінійних електромеханічних систем» (м. Харків, 2004-2013 рр.).

Публікації. Основні результати роботи опубліковані у 26 наукових працях, з них 15 статей у наукових фахових виданнях України, 1 патент на винахід Російської Федерації, 9 у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації становить 281 сторінок; з них: 3 таблиць по тексту; 64 рисунків та 11 таблиць на 50 окремих сторінках; список використаних джерел з 202 найменувань на 18 сторінках; 7 додатків на 80 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність досліджень, сформульовано їх мету та задачі, визначено об’єкт і предмет дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячено аналітичному огляду відомих методів та засобів усунення фрикційних коливань і проектування спостерігачів. Розглянуті підходи до забезпечення стійкості процесів у ЕМС з ВВТ. Визначені варіанти побудови спостерігачів та моделей фрикційного навантаження, які доцільно застосувати при синтезі ЕМС з ВВТ. Систематизовані відомості зі стандартних форм характеристичних поліномів, що застосовуються при синтезі регуляторів та спостерігачів. Результати аналітичного огляду включені в розроблені комп’ютерні інформаційно-пошукові програмні системи з характеристик тертя та стандартних форм характеристичних поліномів.

У **другому розділі** як об’єкти спостереження досліджені математичні моделі ЕП із фрикційним навантаженням. У якості компромісу між точністю та складністю моделі прийнята лінеаризована двомасова ЕМС (ДЕМС) з ВВТ (рис. 1), що відповідає розімкнутим та замкненим СК ЕП широкого класу. Значення жорсткості характеристики навантаження β_C викликає нестійкість ДЕМС.

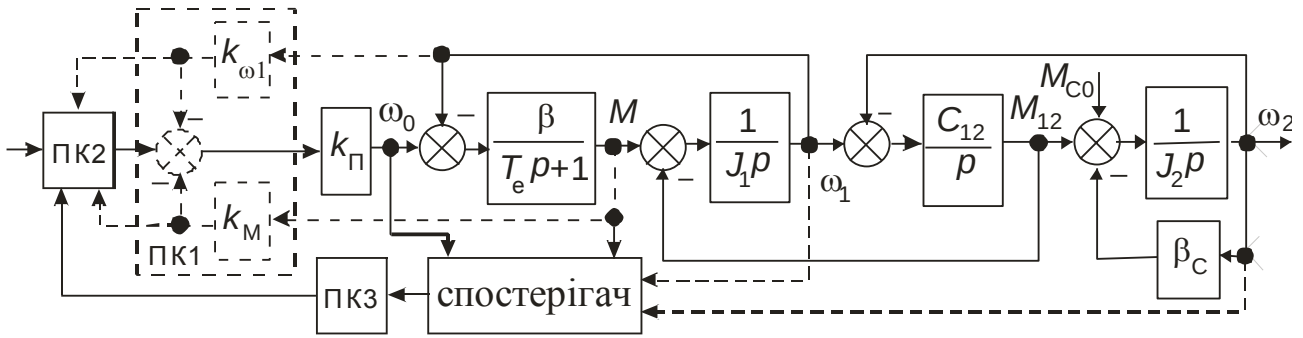


Рис. 1. Структурна схема ДЕМС

До об'єкту можуть бути віднесені і частини пристроїв керування ПК1 і ПК2, наприклад жорсткі зв'язки за безпосередньо вимірюваними координатами чи регулятори СПР. ПК3 стабілізує ЕМС з ВВТ, реалізуючи, наприклад, жорсткий зв'язок за оцінкою спостерігачем пружного моменту M_{12} .

Для узагальнення результатів дослідження ДЕМС представлена у відносному часі t^* та узагальнених параметрах, як показано на рис. 2, де ω_0^* - керуючий вплив, завдання швидкості, M^* , M_{12}^* - відносні момент двигуна та пружний момент, ω_1^* , ω_2^* - відносні швидкості першої та другої мас, M_{C0}^* - збурення, постійна складова навантаження, ν - відношення квадратів резонансних частот механізму та двигуна, T_{M1}^* - відносна електро механічна постійна часу, γ - коефіцієнт інерції, b - відношення жорсткостей механічних характеристик навантаження та двигуна. В обраних діапазонах $T_{M1}^* \in [0,5..25]$, $\nu \in [0,1..25]$, $\gamma \in [1,01..25]$ ця модель відповідає широкому колу розімкнених та замкнених СК ЕП постійного та змінного струму.

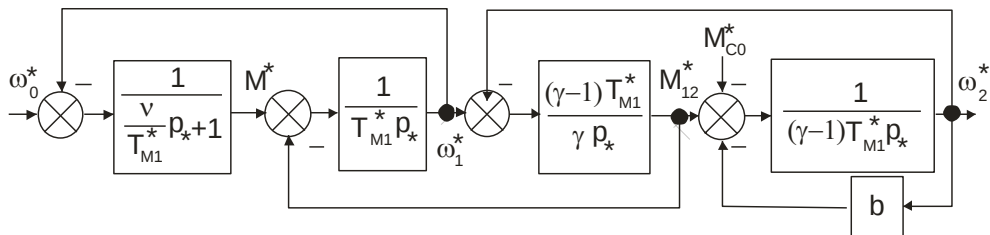


Рис. 2. Структурно-алгоритмічна схема ДЕМС з узагальненими параметрами

Для перевірки технічних обмежень були обрані моделі замкнених СК швидкості ЕП постійного струму валків клітей прокатних станів та механізмів подачі токарних верстатів, що потребують забезпечення стійкості. Розраховані значення їх параметрів належать до вказаних діапазонів і розподілені деякою мірою рівномірно (табл. 1). П-регулятори швидкості та ПІ-регулятори струму СПР віднесені до об'єкту керування і спостереження. Контури струму при розрахунку узагальнених параметрів було згорнуто.

Таблиця 1

№	Механізм	T_{M1}^*	γ	ν
1	Стан 1	1.95	4.33	0.83
2	Стан 2	0.93	1.09	0.05
3	Верстат 1	9.58	1.03	23.62
4	Верстат 2	4.28	1.03	4.72
5	Верстат 3	0.72	1.16	0.30

За критерієм Калмана для обраної структури ДЕМС з ВВТ і її частин отримані аналітичні умови повної спостережуваності та визначено вплив на них параметра b фрикційного навантаження. Неповна спостережуваність розімкненої системи можлива по швидкості першої маси ω_1^* при $b = (\nu^2 + T_{M1}^{*2} \gamma)(\gamma - 1) / \nu \gamma$. Але для $b > 0$ не спостережувані процеси стійкі, що дозволяє синтезувати спостерігачі.

За індексами спостережності ДЕМС із ВВТ встановлено, що найменший перший порядок можуть мати спостерігачі з корекцією за векторним виходом, одна зі складових якого - швидкість другої маси ДЕМС.

Для подальшого проведення синтезу обрані більш двадцяти варіантів структур спосте-

рігачів для ЕМС з ВВТ та її частин, що відрізняються вхідними сигналами (швидкості мас, момент двигуна) та типом структури (табл. 2), у тому числі раніш не досліджені для ДЕМС з ВВТ редуковані спостерігачі, спостерігачі з векторною корекцією, мінімального порядку, що оцінюють лінійний функціонал змінних стану та розширені моделлю постійної складової навантаження $dM_{c0}^* / dt^* = 0$.

Таблиця 2

Варіанти структури спостерігачів

№	Структура					Корекція			Керування			Порядок	Інваріантність
	Еквівалентні	Редуковані	Розширені	Для частини ЕМС	Мінімального порядку	М	ω_1	ω_2					
									ω_0	М	ω_1		
1	X						X		X			4	
2	X							X	X			4	
3	X					X			X			4	
4		X					X		X			3	
5		X						X	X			3	
6		X				X			X			3	
7	X		X				X		X			5	
8	X		X					X	X			5	
9	X		X			X			X			5	
10		X	X				X		X			4	
11		X	X					X	X			4	
12		X	X			X			X			4	
13	X			X			X			X		3	
14	X			X				X		X		3	
15	X			X				X			X	2	
16		X		X			X			X		2	
17					X	X		X	X			1	X
18					X		X	X	X			1	X
19	X		X	X			X			X		4	
20	X		X	X				X		X		4	
21		X	X	X			X			X		3	
22		X		X				X			X	1	
23	X					X	X	X	X			4	
24		X				X		X	X			2	X
25	X					X	X	X	X			4	

Для визначених типів спостерігачів розглянуті залежності величини коефіцієнтів корекції від параметрів ДЕМС з ВВТ, типу, порядку й показника швидкодії спостерігача. Встановлено, що завданням окремих коефіцієнтів коригувальних зв'язків спостерігачів з корекцією за векторним виходом можливо суттєво зменшувати максимальну величину коефіцієнтів. Це дозволило формалізувати процедуру синтезу таких спостерігачів, поставивши завдання параметричної мінімізації максимальних за модулем коефіцієнтів при фіксованій швидкодії спостерігача.

Для ДЕМС із ВВТ синтезовані та досліджені редуковані спостерігачі і встановлено, що при вимірюванні не менш двох координат ДЕМС, одна з яких швидкість другої маси, можлива інваріантність таких спостерігачів до невимірюваного моменту навантаження. Така інваріантність виключає вплив спостерігачів на стійкість замкнених через них ДЕМС із ВВТ. Проведено також структурний та параметричний синтез спостерігачів, що оцінюють лінійний функціонал координат ДЕМС з ВВТ і таким чином виконують функції модального регулятора. Метод їх синтезу базується на базових рівняннях теорії спостереження: $\dot{Z} = FZ + NX$, $TA - FT = N$, де Z та X – вектори змінних стану спостерігача та об'єкту спостереження, T – матриця перетворювання координат, F – матриця стану спостерігача, N – матриця зв'язку об'єкта зі спостерігачем, A – матриця стану об'єкту. Матриця $T = [t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4]$ не є одиничною, як для еквівалентних спостерігачів. Коефіцієнти t_i визначають функціонал змінних стану, що оцінює спостерігач, наприклад, закон модального керування $u = KX$ з $K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$. Створена в пакеті Matlab/Simulink схема такого спостерігача першого порядку з полюсом f та корекцією за координатами M^* та ω_2^* показана на рис. 5. Параметри h_1 та h_2 на рис. 5 – це ненульові елементи матриці N .

Умовою інваріантності такого спостерігача до невідомого моменту опору є нульова матриця входу TB_C за цим збурюванням. Показано, що довільно вибирати швидкодію СК ЕП з інваріантним спостерігачем не можливо - зміна швидкодії СК потребує одночасної зміни коефіцієнтів спостерігача:

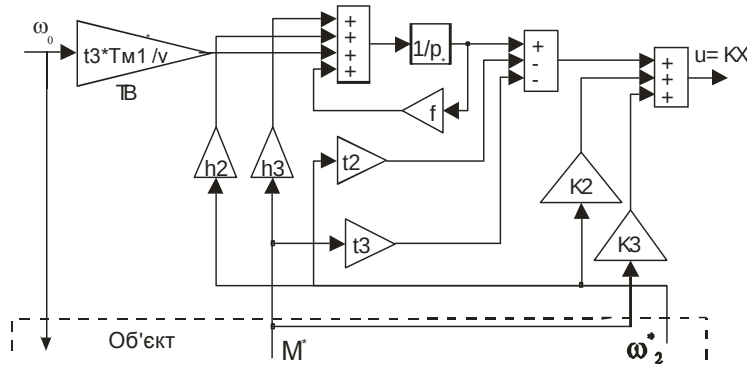


Рис. 5

$$TB_C = [t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ T_{M1}^*(\gamma - 1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 \\ T_{M1}^*(\gamma - 1) \end{bmatrix} = 0, \quad (1)$$

$$t_2 = P_1(\gamma - 1), \quad P_1 = k_1 + k_4 T_{M1}^* f, \quad t_2 = 0 \Rightarrow P_1 = 0 \Rightarrow f = -\frac{1}{T_{M1}^*} \frac{k_1}{k_4}. \quad (2)$$

Швидкодія замкненої СК пов'язана зі швидкодією інваріантних спостерігачів, що виконують функції модального керування, рівнянням третього порядку, яке знайдене за допомогою пакета програм Maple. Аналіз існування рішення рівняння призвів до висновку про доцільність близьких значень показників швидкодії СК та спостерігача. Продемонстровано також, що невеликі порушення умов інваріантності не ведуть до істотних змін стійкості процесів у СК.

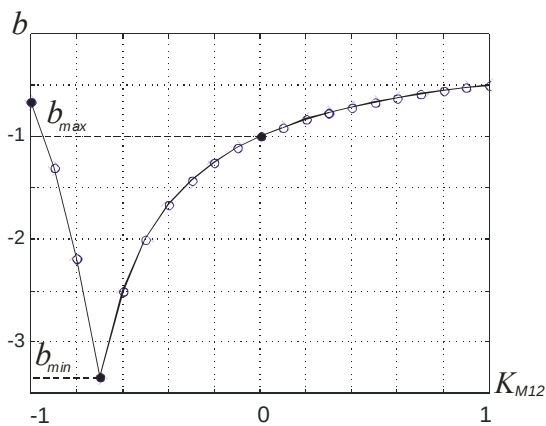
У третьому розділі досліджено області стійкості замкнених СК ЕП та визначено вплив на них неінваріантних спостерігачів. Проведено синтез і порівняння стабілізуючих регуляторів, що визначають вимоги до спостерігачів:

- жорстких зворотних зв'язків (ЖЗЗ) за пружним моментом M_{12}^* і швидкістю ω_2^* , що оптимальні за розміром областей стійкості або забезпечують задані кореневі показники якості процесів для визначених значень параметра b ;
- модальних регуляторів, що забезпечують стандартні розподіли коренів характеристичних поліномів СК, у тому числі оптимальні за величиною параметричних областей стійкості при обмеженій швидкодії СК;
- модальних регуляторів, що забезпечують стандартний розподіл коренів при зворотному

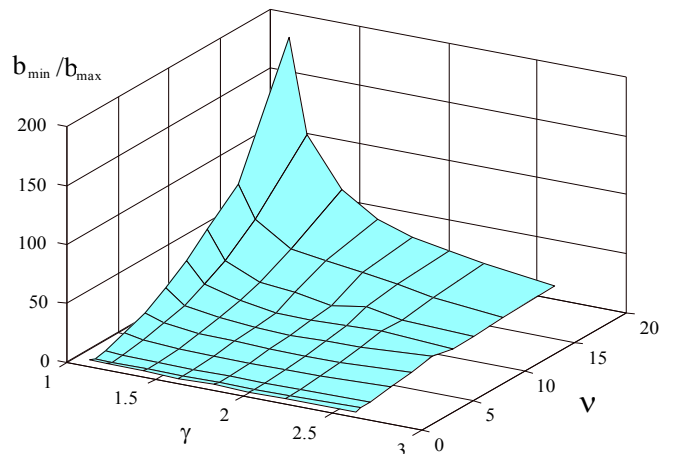
зв'язку за неповним вектором змінних стану;

- оптимальних регуляторів стану, що забезпечують у заданому діапазоні значень параметра фрикційного навантаження b задані прямі показники якості процесів регулювання (їх входження в задану «трубку»);
- регуляторів стану оптимальних за лінійно-квадратичним критерієм;
- робастних H_2 - і H_∞ -регуляторів, що оптимальні за рівномірно-частотними критеріями та мінімізують вплив навантаження M_C^* .

Основною функцією регуляторів прийнято забезпечення стійкості процесів в ЕМС. Поліпшення показників якості керування можливе додатковими засобами. На відміну від попередніх досліджень, синтез ЖЗЗ за моментом M_{12}^* проведено числовими методами параметричної мінімізації за критерієм $\min \leftarrow b_{\min} = f(K_{M12})$, де $b_{\min}$ - це залежне від коефіцієнта K_{M12} передачі зв'язку граничне за стійкістю значення параметра b (рис. 6, а).



а)



б)

Рис. 6. Межі стійкості для ЖЗЗ за моментом M_{12}^*

Оптимальний ЖЗЗ є ефективним у більшості випадків - модуль $b_{\min}$ перевищує модуль межі стійкості розімкнутої системи $b_{\max}$ у декілька разів (рис. 6, б). Наприклад при $T_{M1}^*=10$, $\gamma=1,2$ та $\nu=15$ ЖЗЗ розширює область стійкості більш, ніж у 52 разів ($b_{\max}=-0,0135$, $b_{\min}=-0,704$, $K_{M12}=-3,926$). Якість перехідних процесів у ЕМС з ЖЗЗ також може бути досить задовільною (рис. 7).

Вимоги до робастності ЕМС з ЖЗЗ задавалися засобами пакета програм PARADISE (автор М. Muhler), що дозволяє відображати кореневі показники якості на площину параметрів для їх вибору (рис 8). Задану якість процесів забезпечують і синтезовані системи модального керування, для яких задавалася швидкодія не більша, ніж забезпечувана ЖЗЗ за моментом M_{12}^* .

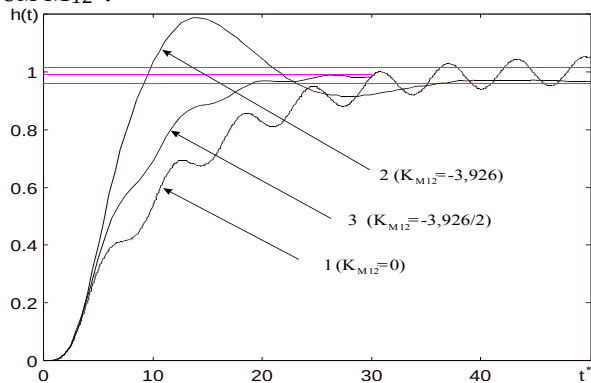
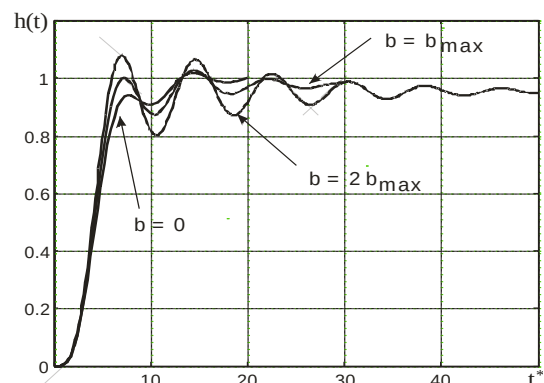
а) різні значення K_{M12} б) різні значення b

Рис. 7. Перехідні функції систем з ЖЗЗ за моментом M_{12}^*

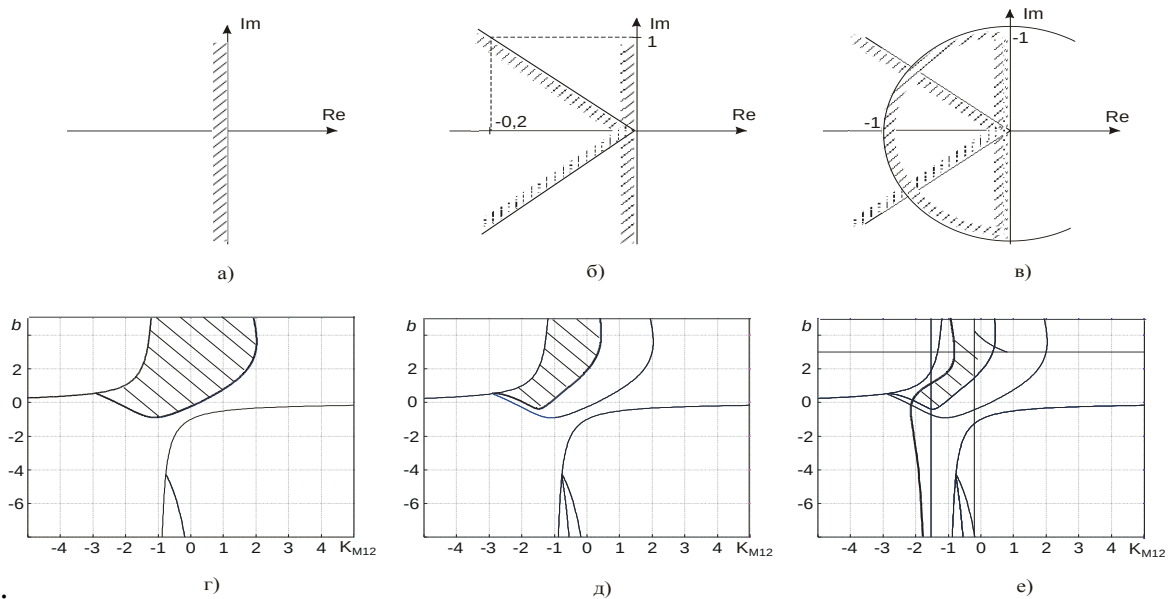


Рис. 8. Кореневі та параметричні області якості ЖЗЗ за моментом M_{12}^*

При фіксованому показнику швидкодії модальний регулятор оптимізувався за критерієм $\min \leftarrow b_{\min} = f(i)$, де i - це номер форми характеристичного полінома в їх складеному списку. Три десятки форм у списку упорядковані за їх властивостями, Коефіцієнти форм інтерпольовані для дробових i . Методами модального керування, синтезовані і ЕМС, замкнені по неповному вектору змінних стану. Великою, що задається, при їх синтезі приймався рівний нулю коефіцієнт передачі виключеного зворотного зв'язку, а шуканими - коефіцієнти інших зв'язків та показник швидкодії системи.

Оптимізація регуляторів стану за прямими показниками якості проводилася засобами бібліотеки Nonlinear Control Design Toolbox пакета Matlab за критерієм $\min \leftarrow \Sigma \delta_i = f(K, b)$, де K - вектор коефіцієнтів регулятора, δ_i - відхилення перехідної характеристики ЕМС від обмежень на її бажану форму при $b \in [b_{\min}, b_{\max}]$. Виконана і оптимізація регуляторів стану за інтегральним лінійно-квадратичним критерієм $\min \leftarrow \int (X^T(t^*) \cdot Q \cdot X(t^*) + u(t^*)^T \cdot R \cdot u(t^*)) dt^*$, де $X(t^*)$ - вектор змінних стану об'єкта керування, $u(t^*)$ - керуючий вплив, Q та R - матриці вагових коефіцієнтів, обраних з умов обмеження швидкодії системи.

Числові методи оптимізації застосовувалися також при синтезі робастних безінерційних H_2 - і H_∞ -регуляторів стану, що забезпечують мінімум матричних норм СК ЕП. Для зниження впливу фрикційного навантаження на швидкість робочого органа засобами бібліотеки програм LMI пакета Matlab мінімізувалися H_2 - і H_∞ -норми передатної функції ЕП для опору M_c .

Серед синтезованих регуляторів для подальшого використання вибрано ЖЗЗ за моментом M_{12}^* . Синтез ЖЗЗ повністю автоматизовано і не вимагає завдання параметра b або показників якості. Забезпечувані області стійкості в більшості випадків досить великі, а якість процесів задовільна.

Синтез регуляторів встановив вимоги до функцій (оцінювання M_{12}^*) та швидкодії спостерігачів, яка задається відносно швидкодії СК. Далі синтез спостерігачів проводився з використанням або стандартних розподілів коренів характеристичних поліномів, або методом розташування коренів на еліпсі, що дозволяє безпосередньо задати праву і ліву межу розташування.

Для замкнених через різні спостерігачі СК були побудовані графіки залежності $n = f(b, b_0)$ (рис. 9,а), де n - ступінь стійкості зі зворотним знаком, b_0 - прийняте при синтезі спостерігача значення параметра b . Для нестійких систем $n = 0$. Аналіз таких графіків дозволив висунути критерії їх порівняння за величиною зон нестійкості M (з $b > b_0$) і L (з $b < b_0$). Запропоновані узагальнюючі показники $S\%$ та $H\%$, характеризують відносну площу зон M і L

до площі усіх досліджених областей разом, та площу областей тільки зони L. Виявлено вплив на ці показники параметрів об'єкта, швидкодії та типу спостерігача.

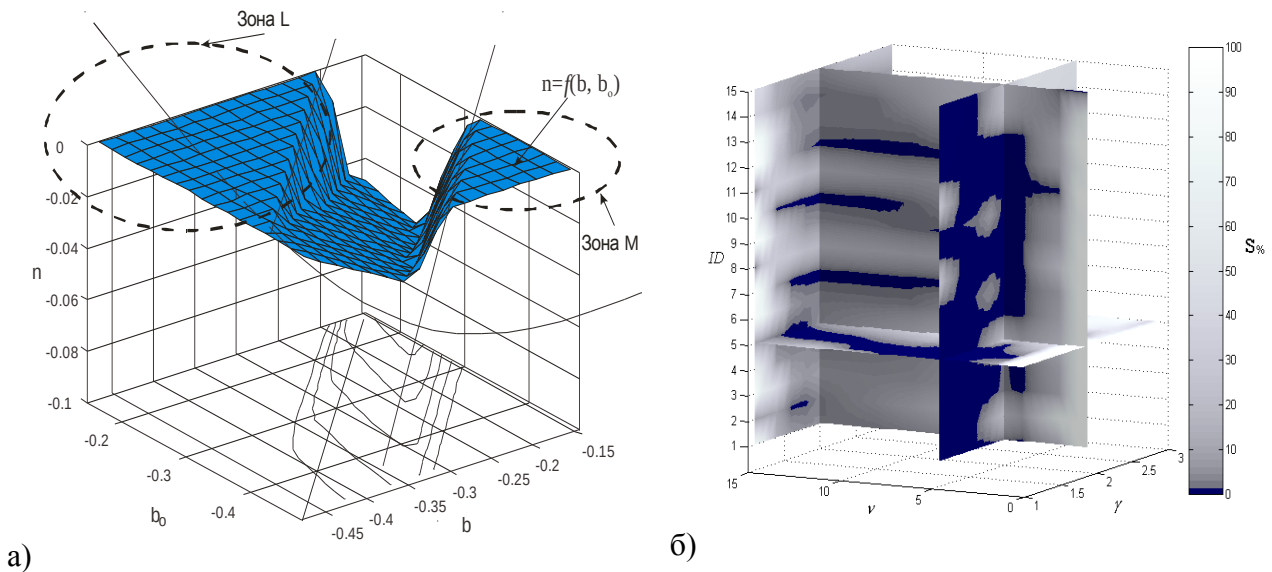


Рис. 9. Області стійкості ДЕМС

Отримані такі висновки що до впливу спостерігачів на стійкість:

1. Вибір сигналу корекції спостерігача суттєво впливає на області стійкості. До близьких результатів іноді призводять корекція за швидкістю ω_l^* і за моментом M^* , перша зазвичай має перевагу;

2. Існують істотні локальні максимуми областей стійкості при низькій швидкодії спостерігача. Збільшення швидкодії не завжди зводить розмір областей нестійкості до нуля;

3. Параметричні області стійкості з $b_0 < b$ в більшості випадків мають більші розміри;

4. Системи зі спостерігачами для частини ДЕМС та розширеними спостерігачами при середній та високій їх швидкодії можуть мати більші області стійкості в порівнянні з еквівалентними спостерігачами стану всієї ЕМС. Ефективним при малій швидкодії може бути спостерігач 2-го порядку з керуванням по швидкості ω_l^* ;

5. У класі редукованих спостерігачів проявляються ті ж тенденції, що й у класі спостерігачів повного порядку. Пристрої першого порядку, що оцінюють лінійний функціонал координат ДЕМС, відносяться до найбільш ефективних. Області стійкості для редукованих та розширених еквівалентних спостерігачів можуть бути близькі за величиною, але по-різному розташовані;

6. Визначальний вплив на області стійкості справляє тип і швидкодія спостерігача, а не задана форма розподілу його коренів.

Вплив параметрів ДЕМС та структури спостерігачів на області стійкості наочно показує рис. 9,б, де ID – це номер типу спостерігача, а розмір областей стійкості вказано тоною шкалою. Відзначено періодичність структури простору параметрів уздовж осі ID та його регулярність уздовж осей γ і ν . На цьому графіку відбито багато із встановлених закономірностей. Типи спостерігачів можуть бути впорядковані за їхнім впливом на стійкість системи, а завдання структурного синтезу спостерігача може вирішуватися як завдання параметричної оптимізації за критерієм $\min \leftarrow S_{\%} = f(ID)$.

Для спрощення оптимізаційного синтезу спостерігачі слід розташовувати на осі ID у наступному порядку: розширені редуковані спостерігачі, редуковані, розширені, ті, що оцінюють лінійний функціонал, спостерігачі повного порядку для частини об'єкта, еквівалентні для ЕМС з ВВТ.

Отримані висновки статистично перевірені для великого числа (більш ніж 10^3) рівномірно розподілених сполучень параметрів ЕМС.

На основі отриманих висновків сформульовані рекомендації із забезпечення стійкості

систем зі спостерігачами, спрямовані на формування раціональної послідовності синтезу спостерігачів. Серед них:

1. В першу чергу слід визначати порядок спостерігача, а потім вибирати координату, за якою буде коректуватися його стан. Першими повинні розглядатися редуковані та розширені спостерігачі, спостерігачі для частини об'єкта і пристрої оцінювання лінійного функціонала координат ДЕМС;

2. Спочатку слід розглядати корекцію спостерігача по швидкості першої маси. Корекція по швидкості другої маси ефективна, насамперед, при малих значеннях параметра γ і великих значеннях ν ;

3. Для попереднього аналізу досить чотирьох-п'яти рівномірно розподілених значень показника швидкодії спостерігача, що в від 3 до 30 разів перевищують значення швидкодії СК. Знизити швидкодію іноді дозволяють спостерігачі з керуванням за ω_1^* і корекцією за ω_2^* та ті, що оцінюють лінійну функцію координат ЕМС. Для зниження швидкодії слід провести пошук локального максимуму областей стійкості, особливо при корекції за швидкістю другої маси;

4. В умовах великої невизначеності для спостерігачів кращім буде вибір значень параметра b_0 , менших найбільш ймовірних значень параметра b ;

5. Форму характеристичного полінома спостерігача слід варіювати в останню чергу.

Зменшити вплив спостерігачів на стійкість ЕМС з ВВТ дозволяє і запропоноване з цією метою їх паралельне з'єднання. Вихідні сигнали y_1 та y_2 двох з'єднаних спостерігачів формують зважену суму $\alpha \cdot y_1 + (1-\alpha) \cdot y_2$, що відповідає оцінюваній координаті ЕМС. Ваговий коефіцієнт $0 < \alpha < 1$ може служити параметром оптимізації, знайдені приклади того, що існують його значення, відповідні до локальних мінімумів областей нестійкості ЕМС.

Знання про синтез спостерігачів представлено засобами логіки предикатів першого порядку. Запропонована методика автоматизованого синтезу спостерігачів з використанням комп'ютерної експертної системи, наведені рекомендації з формування її бази знань, що відбивають особливості ЕМС з ВВТ.

Враховані додаткові фактори, що впливають на використання досліджених спостерігачів: а) нелінійність характеристик фрикційного навантаження ЕП; б) точність визначення параметрів лінеаризованої ЕМС; в) вплив процесів у вентильному перетворювачі.

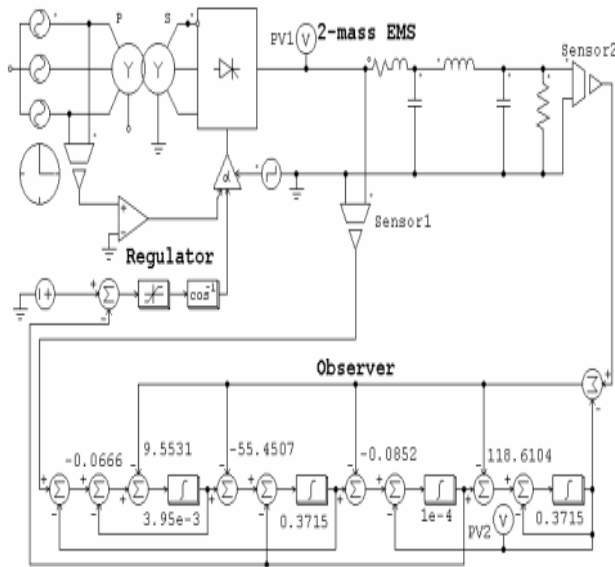
Вплив нелінійності характеристики навантаження перевірено за критеріями абсолютної стійкості - кругового та Попова. Стійкість процесів керування ЕМС "у великому" забезпечено методами робастного керування. Синтезовані статичні H_∞ - та H_2 -регулятори, що гарантують абсолютну стійкість. Сектором розташування нелінійності приймався сектор $[0, b_{min}]$, де b_{min} – значення параметра b , що виводить замкнену систему на межу стійкості "в малому". У досліджених випадках H_2 -критерій оптимізації в порівнянні з H_∞ -критерієм дав більші області стійкості. Але H_∞ -критерій забезпечував опуклість годографа Найквіста – межа стійкості в малому збігалася із межею абсолютної стійкості.

Застосування лінійних спостерігачів для замикання ЕМС робастними регуляторами погіршує межі абсолютної стійкості. Проблема стійкості "у великому" вирішено синтезом поліноміальних спостерігачів, що враховують нелінійність об'єкта у своїй структурі. На першому етапі їх синтезу можуть використовуватися наведені рекомендації із забезпечення стійкості "в малому" ЕМС з лінійними спостерігачами.

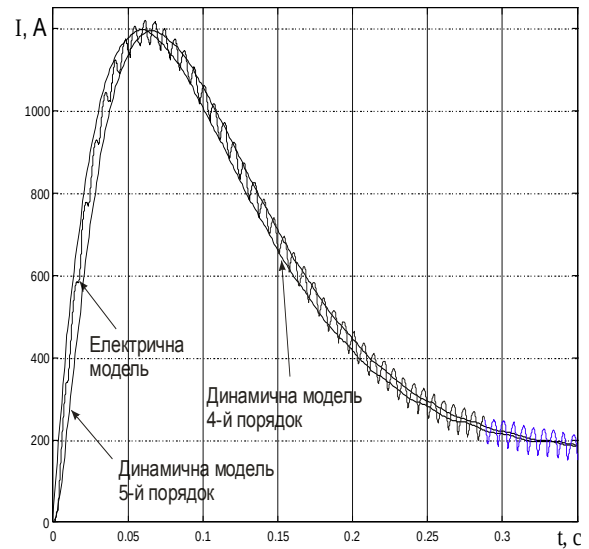
Вплив безінерційного представлення вентильного перетворювача в спостерігачах встановлено за критерієм Найквіста для систем із чистим запізнюванням. Показано, що не врахована в спостерігачі інерційність може не тільки зменшувати, але й збільшувати області стійкості ЕМС з ВВТ. Вибіркова перевірка показала, що негативно така інерційність частіше впливає на стійкість систем з розширеними та редукованими спостерігачами.

Чутливість спостерігачів до сигнальних збурень в об'єкті перевірена дослідженням максимумів амплітудно-частотних характеристик для шуму вимірювання та моделюванням ЕП з тиристорним випрямлячем на рівні принципів електричних схем засобами САПР електронних пристроїв (рис. 10). Моделювання не виявило істотних переваг еквівалентних спос-

терігачів перед редукованими. Як і очікувалось, корекція спостерігачів за сигналом струму двигуна суттєво погіршує якість спостереження, іноді до його неможливості.



а)



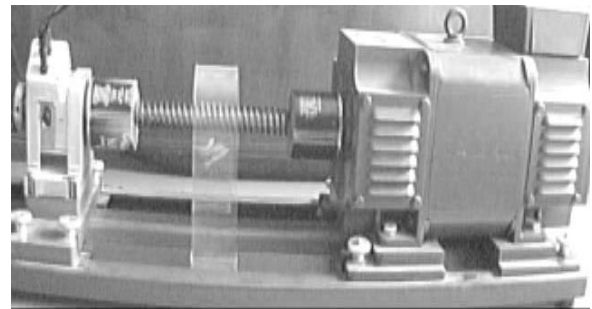
б)

Рис. 10. Моделювання ЕП з тиристорним випрямлячем

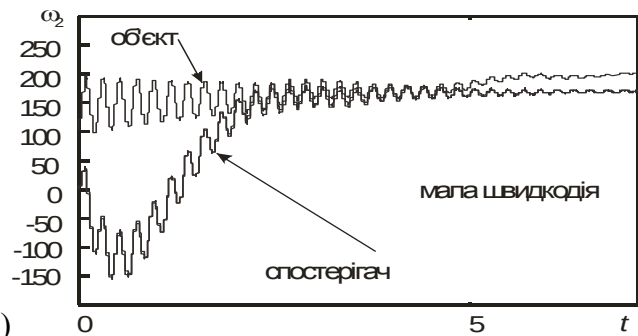
Дослідження відомого ефекту "сплеску" помилки спостереження проведено моделюванням спостерігачів при випадкових ненульових початкових умовах. У гірших випадках максимальні помилки спостереження перевищують початкові на декілька порядків, що треба враховувати при проектуванні СК ЕП.

У четвертому розділі наведені технічна реалізація запропонованих спостерігачів і результати впровадження матеріалів дослідження. Для виявлення впливу на точність спостереження точності моделі ЕМС виконана параметрична ідентифікація лабораторної установки ЕП постійного струму фірми Siemens, доповненої фізичною моделлю пружного зв'язку (рис. 11, а). Ідентифікована модель покладена в основу спостерігачів та виконано порівняння координат ЕП з їх оцінками (рис. 11 ,б, в). Рекомендоване застосування методу ідентифікації за помилкою завбачення в межах діапазона високої швидкодії спостерігачів.

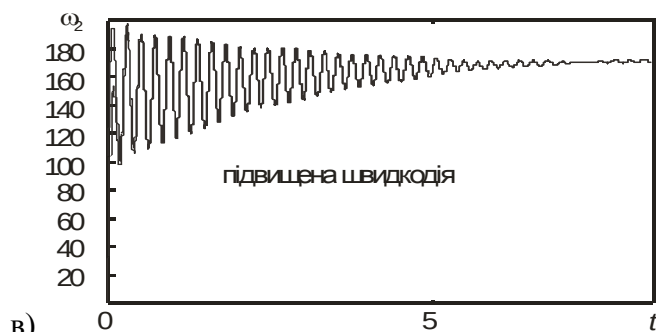
Досліджено вплив на точність спостереження розрядної сітки при мікропроцесорній реалізації спостерігачів. Оцінювання лінійного функціонала змінних стану ЕП із корекцією спостерігача за струмом двигуна та швидкістю другої маси виконано засобами бібліотеки Fixedpoint



а)



б)



в)

Рис. 11

Toolbox пакета Matlab та реалізоване на мікроконтролері MC68HC11. Восьмирозрядний спостерігач виконує свої функції, але якість його роботи задовільна тільки при його високій швидкодії або при застосуванні шістнадцятирозрядної арифметики (рис. 12).

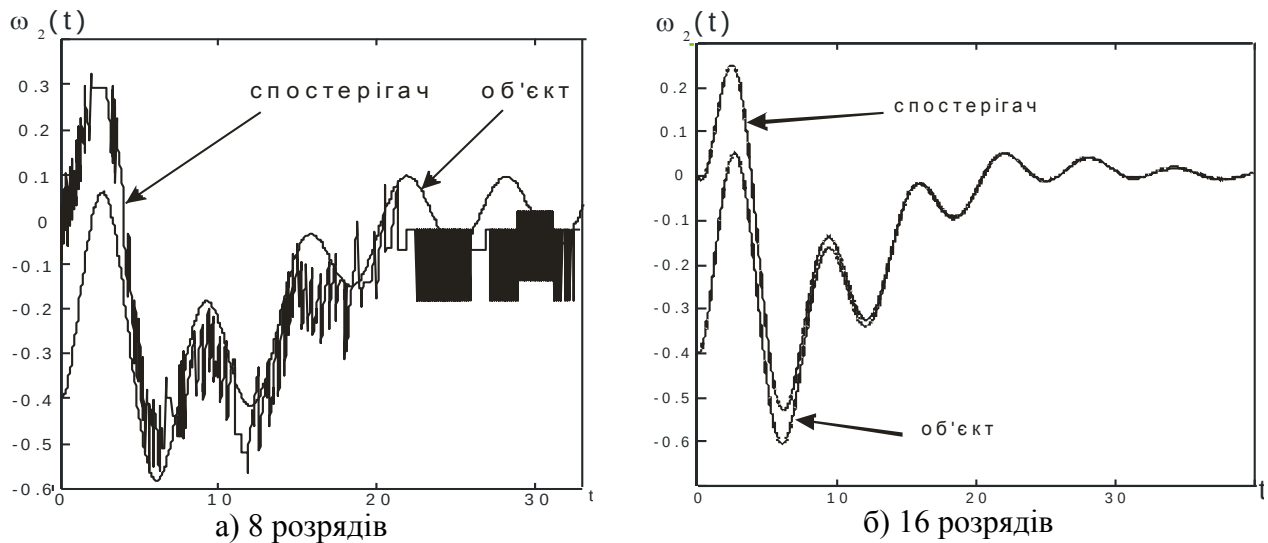


Рис. 12

Результати дисертаційної роботи були використані в Інституті транспорту газу ПАТ “УКРТРАНСГАЗ” при проектуванні систем антипомпажного керування електроприводними газоперекачувальними агрегатами (ГПА), що за своїми властивостями подібні ЕМС з ВВТ. Після лінеаризації характеристик нагнітача (рис. 13, а) та прилеглих ділянок труби (рис. 13, б) ГПА було представлено його еквівалентною електричною схемою (рис. 13, в), яка за формою співпадає з еквівалентною схемою механічної частини ДЕМС. Для оцінки тиску газу P , його витрати Q та віддаленості від помпажу L у системах керування ГПА застосовані спостерігачі, що дозволяє підвищити надійність та швидкість визначення меж помпажу і зменшує ризик динамічних перевантажень ГПА.

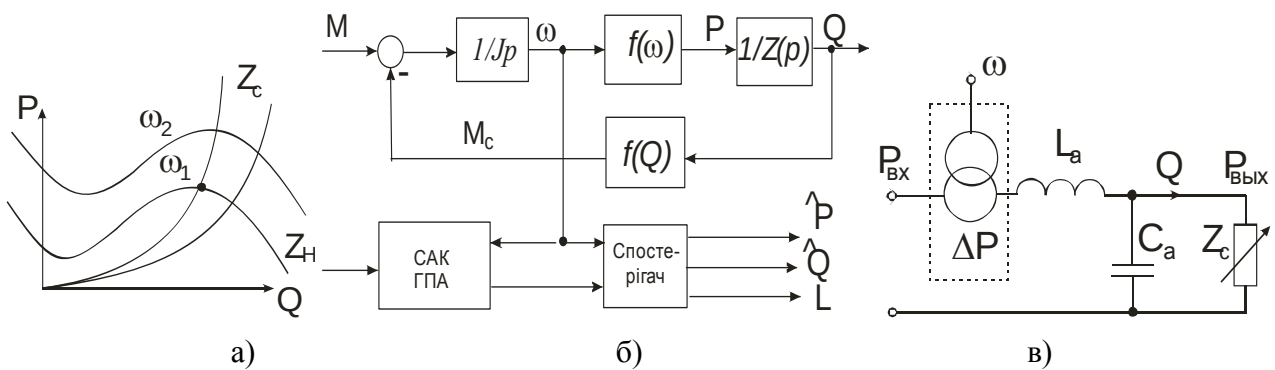


Рис. 13

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі усунення автоколивань в електроприводі з фрикційним навантаженням, що обумовлені спадаючою ділянкою механічної характеристики навантаження. Усунення досягається шляхом замикання зворотних зв'язків за оцінкою координат електроприводів спостерігачами.

У роботі здобуті наступні наукові та практичні результати:

1. Встановлені аналітичні умови повної спостережуваності розімкнутих та замкнених ЕМС з фрикційним навантаженням та їх частин, які визначають можливість синтезу спостерігачів та властивості їх технічної реалізації.
2. Визначені індекси спостережуваності ЕМС з ВВТ, що встановлюють мінімальні порядки спостерігачів, та структури спостерігачів мінімального порядку, що оцінюють лінійний функціонал змінних стану.
3. Отримані умови інваріантності до фрикційного навантаження редукованих спостерігачів стану, та тих що оцінюють лінійний функціонал вектору змінних стану. Виконання умов забезпечує відсутність впливу спостерігачів на стійкість ЕМС з ВВТ.
4. Визначені функціональні та параметричні вимоги до спостерігачів, які отримані за результатами синтезу оптимальних та робастних регуляторів, що стабілізують ЕМС з ВВТ. Зроблено висновки що до властивостей таких регуляторів.
5. Запропонована модифікація раніш відомого методу розташування коренів характеристичних поліномів систем на кривій другого порядку – еліпсі, що спрощує синтез спостерігачів.
6. Запропоновано синтез спостерігачів з векторною корекцією, спрямований на зменшення їх максимальних коефіцієнтів;
7. Зроблено висновки що до впливу на стійкість процесів у замкнених ЕМС різних за типом та параметрами спостерігачів: редукованих, розширених, тих, що оцінюють лінійний функціонал вектору змінних стану, еквівалентних, для частини ЕМС. Спостерігачі впорядковані за їх впливом на стійкість.
8. Обґрунтована доцільність паралельного з'єднання спостерігачів з метою розширення областей стійкості ЕМС з ВВТ.
9. Розроблені методики синтезу спостерігачів та регуляторів, що враховують властивості ДЕМС з ВВТ та дозволяють знизити можливість виникнення фрикційних автоколивань.
10. Розроблено програмне забезпечення автоматизованого синтезу регуляторів та спостерігачів для ЕМС з ВВТ, комп'ютерні інформаційні та експертна системи.
11. Виконана мікропроцесорна технічна реалізація запропонованих до використання спостерігачів для ЕМС з ВВТ, визначені її особливості.
12. Запропоновані підходи до синтезу спостерігачів впроваджені в Інституті транспорту газу ПАТ "УКРТРАНСГАЗ" при проектуванні систем антипомпажного керування електроприводними газоперекачувальними агрегатами, що дозволило зменшити ризик їх динамічних перевантажень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Котляров В.О. О влиянии наблюдающих устройств на устойчивость замкнутой электромеханической системы с отрицательным вязким трением / В.Б. Клепиков, В.О.Котляров, А.В. Осичев // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков : ХГПУ. – 1998. – Специальный вып. – С. 59-62.

Здобувачем з'ясовані умови мінімального порядку та інваріантності спостерігачів, розраховані області стійкості.

2. Котляров В.О. Синтез наблюдателей для электромеханической системы с отрицательным вязким трением средствами программ символьных вычислений / В.О.Котляров, А.В.Осичев // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков : ХГПУ. – 1998. – вып. 27. – С. 40-44.

Здобувач виконав аналіз аналітичних виразів коефіцієнтів спостерігачів.

3. Котляров В.О. Применение программно реализованных современных методов синтеза как средства решения инженерных задач в электроприводе / В.О.Котляров, А.В.Осичев // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків : ХДПУ. – 1999. – вип. 61. – С. 33-38.

Здобувач запропонував методики синтезу жорсткого зв'язку за пружним моментом та робастних регуляторів, приймав участь у аналізі абсолютної

4. Котляров В.О. Автоматизация разработки наблюдающих устройств для электромеханических систем. Построение прототипа экспертной системы / В.О.Котляров // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків : ХДПУ. – 2000. – вип. 113. – С. 142-145.

5. Модели объектов наблюдения и управления при проектировании систем электропривода / В.О.Котляров, С.В.Погорелов, А.В.Осичев, П.М. Касторный // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ „ХПІ”. – 2001. – вип. 10. – С. 145-151.

Здобувач виконав ідентифікацію та аналіз спостережуваності об'єктів, моделювання на рівні принципових схем та цифрову реалізацію спостерігача.

6. Котляров В.О. Основанный на правилах синтез наблюдателей для систем с фрикционной нагрузкой / В.О. Котляров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2002. – Т. 1, вип. 12. – С. 138-141.

7. Котляров В.О. Особенности динамики двухмассовых электромеханических систем с регуляторами состояния при учете волновых процессов в кинематической цепи / А.В.Осичев, В.О.Котляров // Электротехника. – Москва : ЗАО „Знак”. – 2003. – №3. – С. 57-61

Здобувач приймав участь у моделюванні перехідних процесів.

8. Котляров В.О. Синтез транзисторных систем подчиненного регулирования по алгоритмам модального и оптимального управления / А.В.Осичев, В.О.Котляров // Электротехника. – Москва : ЗАО „Знак”. – 2004. – №6. С. 35-37.

Здобувач брав участь в обробці результатів моделювання.

9. Котляров В.О. Применение наблюдающих устройств для обеспечения устойчивости систем с отрицательным вязким трением / В.О. Котляров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – вип. 43. – С. 73-76.

10. Котляров В.О. Применение метода линейных матричных неравенств для синтеза робастных систем с отрицательным вязким трением / В.О. Котляров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – вип. 43. – С. 88-90.

11. Котляров В.О. О сочетании критериев робастности и абсолютной устойчивости при синтезе систем с отрицательным вязким трением / В.О. Котляров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2005. – вип. 45. – С. 193-195.

12. Котляров В.О. Методика определения областей эффективной стабилизации электромеханических систем с отрицательным вязким трением / В.О.Котляров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – вип. 30. – С. 204-206.

13. Котляров В.О. О результатах решения задач стабилизации систем с отрицательным вязким трением посредством применения наблюдающих устройств / В.О.Котляров, А.В.Осичев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2010. – вип. 28. – С. 242-248.

Здобувач виконав огляд досліджень спостерігачів для двомасових систем.

14. Котляров В.О. Синтез наблюдателей с редуцированными моделями электропривода / В.О.Котляров, Л.А. Жилевская // Електромеханічні і енергосберігаючі системи. – Кременчук : КрНУ, 2012. – вип. 3(19). – С.114-115. – Вип. №3/2012(19). – С.114-115.

Здобувач виконав збалансовану редукцію об'єктів спостереження.

15. Котляров В.О. Динамические параметры асинхронных двигателей частотно-

регулируемых электроприводов / Акимов Л.В., Котляров В.О., Литвиненко Д.Г. // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – №3. – С.10-14.

Здобувач виконав комп'ютерні розрахунки постійних часу електроприводів.

16. Пат. 2220328 Российская Федерация, МПК⁷ F04D27/0. Способ защиты компрессора газоперекачивающего агрегата от помпажа / Дудко П.Г., Колодяжный В.В., Сорокин А.А., Хохряков М.В., Дистрянов С.В., Котляров В.О.; заявитель и патентообладатель Дочерняя компания ДК „Укртрансгаз”. – №2002111953/06 ; заявл. 06.05.2002 ; опубл. 27.12.2003, Бюл. №36.

Здобувач приймав участь у комп'ютерному моделюванні процесів антипомпажного керування газоперекачувальним агрегатом.

17. Котляров В. О. О величине коэффициентов наблюдателей состояния двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением / В. О. Котляров, А. В. Осичев // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков : ХГПУ. – 1998. – Специальный вып. – С. 63-64.

Здобувачем запропонована векторна корекція спостерегачів як спосіб зменшення їх коефіцієнтів.

18. Котляров В.О. Об использовании наблюдателей для обеспечения устойчивости электромеханических систем (ЭМС) с нелинейной характеристикой трения (НХТ) / В. О. Котляров, В. Б. Клепиков, А. В. Осичев // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика : труды конф. с международным участием, 16-21 сентября 1996 г., Алушта. – Харьков : Основа, 1996. – С. 118-119.

Здобувач виконав аналітичний огляд досліджень спостерегачів.

19. Котляров В.О. О выборе моделей трения при исследовании электромеханических систем с нелинейной характеристикой трения / Клепиков В.Б., Марков В.С. // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье : труды междуна. научно-техн. конф., 12 - 14 мая 1997 г., Харьков. Ч.3. – Харьков : ХГПУ [и др.], 1997. – С. 104-106.

Здобувачем створено комп'ютерну систему з характеристик тертя

20. Котляров В.О. Метод размещения полюсов стационарного асимптотического наблюдающего устройства // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье : труды междуна. научно-техн. конф., 12 - 14 мая 1997 г., Харьков. Ч.3. – Харьков : ХГПУ [и др.], 1997. – С. 117-119.

21. Котляров В.О. Исследование абсолютной устойчивости электромеханических систем с нелинейной характеристикой трения / В.О. Котляров, С.В. Погорелов, В.С. Марков // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье : труды междуна. научно-техн. конф., 12 - 14 мая 1997 г., Харьков. Ч.3. – Харьков : ХГПУ [и др.], 1997. – С. 122-124

Здобувачем виконано аналіз частотних характеристик.

22. Котляров В.О. О наблюдаемости двухмассовой электромеханической системы // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика : труды конф. с международным участием, 15-20 сентября 1997 г., Алушта. – Харьков : Основа, 1997. – С. 99.

23. Котляров В.О. Об уменьшении ошибок оценивания координат электромеханической системы с отрицательным вязким трением // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика : труды конф. с международным участием, 15-20 сентября 1997 г., Алушта. – Харьков : Основа, 1997. – С. 102-103.

24. Котляров В.О. Стандартные распределения корней в задачах синтеза в электроприводе / А.В. Осичев, В. О. Котляров, В.С. Марков // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика : труды конф. с международным участием, 15-20 сентября 1997 г., Алушта. – Харьков : Основа, 1997. – С. 104-109.

Здобувачем виконано інформаційний пошук розподілень коренів.

25. Котляров В.О. Синтез инвариантных наблюдателей состояния двухмассовой электромеханической системы / В.О. Котляров, В.Б.Клепиков, А.В. Осичев // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье : сб. научн. трудов. – Харьков : ХГПУ, 1998. – Ч. 2, вып. 6. – С. 276-279.

Здобувачем запропоновано використання умов інваріантності.

26. Котляров В.О. О применении алгоритмов μ -синтеза к ДЭМС с ОБТ в среде пакета MATLAB / А.В. Осичев, В.О. Котляров // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : зб. наук. праць. – Харків : ХДПУ. – 1999. – Ч. 1, вип. 7. – С. 112-116.

Здобувач виконав розрахунки та порівняння меж стійкості.

АНОТАЦІЇ

Котляров В.О. Синтез стійких електромеханічних систем з від'ємним в'язким тертям та спостерігачами. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-практичної задачі усунення автоколивань в електроприводах з фрикційним навантаженням, виникнення яких обумовлено нестійкістю процесів керування на спадаючою ділянці механічної характеристики навантаження та веде до зниження продуктивності і якості роботи обладнання електротехнічних комплексів та систем, його прискореного зношування та поломок внаслідок великих динамічних навантажень.

В роботі виконано структурний та параметричний синтез спостерігачів та робастних і оптимальних за різноманітними критеріями регуляторів, що забезпечують стійкість процесів у замкнених двомасових електромеханічних системах з від'ємним в'язким тертям. Виконано порівняння впливу на параметричні області стійкості та якості процесів керування різних за типом та параметрами спостерігачів і регуляторів. Запропоновані способи та засоби зменшення такого впливу у випадках, коли він є негативним.

Ключові слова: двомасова електромеханічна система, електропривод, від'ємне тертя, автоколивання, стійкість, система керування, оптимізація, регулятор, спостерігач, мікропроцесорна реалізація.

Котляров В.О. Синтез устойчивых електромеханических систем с отрицательным вязким трением и наблюдателями. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

Диссертация посвящена решению научно-практической задачи устранения автоколебаний в электроприводе с фрикционной нагрузкой, возникновение которых обусловлено неустойчивостью процессов управления на падающем участке механической характеристики нагрузки и ведет к снижению продуктивности и качества работы оборудования электротехнических комплексов, его ускоренному износу и выходу из строя вследствие больших динамических нагрузок.

В работе проведен анализ известных подходов к подавлению фрикционных автоколебаний и оцениванию координат электромеханических систем с помощью наблюдающих устройств.

Методами модального, оптимального и робастного управления синтезированы регуляторы различных типов, обеспечивающие устойчивость процессов на падающем участке механической характеристики фрикционной нагрузки. Среди них оптимальные по величине областей устойчивости жесткие обратные связи по отдельным координатам электропривода, модальные регуляторы, оптимальные линейно-квадратичные регуляторы, робастные H_2 и H_∞ -регуляторы.

Получены аналитические условия полной наблюдаемости разомкнутых и замкнутых электромеханических систем с фрикционной нагрузкой и их частей, рассчитаны индексы наблюдаемости, которые определяют особенности технической реализации наблюдателей.

Выполнен структурный и параметрический синтез наблюдателей координат электромеханических систем разных типов, включая наблюдатели полного порядка, редуцированные, минимального порядка, оценивающие линейный функционал переменных состояния, расширенные моделью постоянного сопротивления, с векторной коррекцией. Получены условия инвариантности редуцированных наблюдателей к фрикционной нагрузке электропривода, что гарантирует отсутствие влияния наблюдателей на параметрические области устойчивости систем. Указана связь быстродействия инвариантных наблюдателей с быстродействием системы управления. Модифицирован метод размещения корней характеристических полиномов наблюдателей на кривой второго порядка – эллипсе, что обеспечивает компактность размещения, возможность задавать его левую и правую границу. Для наблюдателей с векторной коррекцией предложено минимизировать максимальную величину их коэффициентов.

Установлено влияние разных по типу, структуре и быстродействию наблюдателей на параметрические области устойчивости электромеханических систем. Наблюдатели упорядочены по их влиянию на эти области, даны рекомендации по синтезу наблюдателей, направленные на увеличение областей. Как средство увеличения предложено параллельное соединение двух наблюдателей.

Разработаны методики синтеза устойчивых электромеханических систем и их программное обеспечение: информационно-поисковые системы по характеристикам трения и стандартным формам характеристических полиномов, прототип экспертной системы по наблюдателям.

Дан анализ дополнительных факторов, влияющих на применение синтезированных наблюдателей – нелинейности характеристик фрикционной нагрузки, точности идентификации объекта, процессов в тиристорном преобразователе.

Созданы экспериментальные лабораторные стенды для исследования электроприводов с цифровыми наблюдателями. Выполнена микропроцессорная реализация рекомендованных для применения в электроприводах с фрикционной нагрузкой наблюдателей, дан анализ ее особенностей.

Ключевые слова: двухмассовая электромеханическая система, электропривод, отрицательное трение, устойчивость, автоколебания, система управления, оптимизация, регулятор, наблюдатель, микропроцессорная реализация.

Kotlyarov V.O. Synthesis of stable electromechanical systems with negative viscous friction and observer. – A manuscript.

The dissertation on a competition of a graduate degree of a candidate of engineering sciences on speciality 05.09.03. - electrotechnical complexes and systems.

The thesis treats the solving the problems of removal of self-excited oscillations in the electromechanical systems with friction loading which are determined by instability of the control processes on the falling area of a mechanical characteristics of loading on which force of friction diminishes due to the increasing of sliding speed. These self-excited oscillations lead to the decrease of productivity and quality of working, speed-up wear and breakage of the equipment due to the dynamic loading.

In order of removal of self-excited oscillations the structural and parametric synthesis of regulators and observers is executed which provide the stability of 2-mass electromechanical systems with a negative viscose friction. The influence of different parameters and types of regulators and observers on the control systems stability areas are explored. The methods and means of decreasing a negative influence of the observers on these areas are also proposed. Microprocessor realisation is made for the controllers which are recommended for using. Its property are also explored.

Key words: 2-mass electromechanical system, electric drive, negative friction, stability, self-oscillations, controller, observer based control system, optimization, digital realization, microprocessor.



Підписано до друку 24.09.2013 р. Формат видання 145х215.
Формат паперу 60х90/16. Папір офсетний. Друк – ризографія.
Гарнітура Times New Roman. Умовн. друк. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 085149

Надруковано у СПДФО Миронов М.В.
Свідоцтво ВО4 № 022953 від 31.03.1994 р.
61002, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3