

УДК 621.31

СТАБІЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПІДВІШУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АКСЕЛЕРОМЕТРА

В. І. Теряєв

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
вул. Політехнічна, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: kpivit@gmail.com

Сучасні магнітні опори повинні мати здатність тривало та стійко працювати при малих і високих швидкостях, мати достатню жорсткість і навантажувальну здатність, не створювати гальмівних зусиль, споживати незначну кількість енергії, бути технологічними й недорогими. Найбільш повне вирішення зазначених проблем досягається при використанні систем електромагнітного підвісу, заснованих на властивості електромагніту притягатися до феромагнітного осердя; при цьому вага тіла, що підвішується, і діючі на нього зусилля врівноважуються силами електромагнітного поля. У результаті такого врівноваження може здійснюватися вільне «ширяння» (левітація) тіла, що підвішується, без дотику до навколишніх предметів. Одним із найбільш складних завдань при створенні даних систем є забезпечення їх стійкості. Щоб парировати нестійкість електромагнітного підвісу, необхідно здійснювати динамічне регулювання електромагнітного поля залежно від величини робочого проміжку між левітуючим тілом і електромагнітом. Для розв'язку завдань стійкості й динаміки електромагнітного підвісу застосовуються методи теорії керування з наступною корекцією системи автоматичного регулювання. Проведено ідентифікацію параметрів і характеристик силового електромагніта як елемента електромеханічної системи автоматичного керування. Показано причини структурної нестійкості електромагніта постійного струму та способи його стабілізації. Досліджено можливість забезпечення стійкості та поліпшення показників якості системи автоматичного регулювання проміжку. Розглянуто питання реалізації прикладних завдань аналізу й синтезу магнітного підвісу. Запропоновано використання акселерометра як датчика компенсуючого зворотного зв'язку. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують дану можливість.

Ключові слова: електромагнітний підвіс, нестійкість, стабілізація, акселерометр.

СТАБИЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКСЕЛЕРОМЕТРА

В. И. Теряев

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ул. Политехническая, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: kpivit@gmail.com

Современные магнитные опоры должны обладать способностью длительно и устойчиво работать при малых и высоких скоростях, иметь достаточную жесткость и нагрузочную способность, не создавать тормозных усилий, потреблять незначительное количество энергии, быть технологичными и недорогими. Наиболее полное решение указанных проблем достигается при использовании систем электромагнитного подвеса, основанных на свойстве электромагнита притягиваться к ферромагнитному сердечнику, при этом вес подвешиваемого тела и действующие на него усилия уравниваются силами электромагнитного поля. В результате такого уравнивания может осуществляться свободное «парение» (левитация) подвешиваемого тела без соприкосновения с окружающими предметами. Одной из наиболее сложных задач при создании данных систем является обеспечение их устойчивости. Чтобы парировать неустойчивость электромагнитного подвеса, необходимо осуществлять динамическое регулирование электромагнитного поля в зависимости от величины рабочего зазора между левитирующим телом и электромагнитом. Для решения задач устойчивости и динамики электромагнитного подвеса применяются методы теории управления с последующей коррекцией системы автоматического регулирования. Проведена идентификация параметров и характеристик силового электромагнита как элемента электромеханической системы автоматического управления. Показаны причины структурной неустойчивости электромагнита постоянного тока и способы его стабилизации. Исследована возможность обеспечения устойчивости и улучшение показателей качества системы автоматического регулирования зазора. Рассмотрены вопросы реализации прикладных задач анализа и синтеза магнитного подвеса. Предложено использование акселерометра в качестве датчика компенсирующей обратной связи. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эту возможность.

Ключевые слова: электромагнитный подвес, неустойчивость, стабилизация, акселерометр.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Системи магнітного підвішування, завдяки яким здійснюється левітація (паріння) тіл у просторі, знаходять застосування на транспорті, у приладобудуванні, машинобудуванні, металургії. На даний момент відомі три основні тех-

нології магнітного підвісу: електродинамічний (на рухомих магнітах, у тому числі надпровідних), електромагнітний (на регульованих електромагнітах) і підвіс із використанням постійних магнітів [1–4].

Системи електромагнітного підвісу мають суттєві

переваги над іншими системами магнітного підвищення завдяки тому, що забезпечують працездатність як у стані спокою, так і в процесі руху, мають хороші масогабаритні й енергетичні показники, не використовують вихрових струмів, дозволяють здійснювати регулювання величини робочого повітряного проміжку та повну левітацію. В основі електромагнітного підвищення лежить використання зусилля притягання електромагніту постійного струму з метою компенсації сили гравітації та інших зовнішніх сил, тому даний підвіс можна віднести до електромеханічних систем автоматичного керування [2–4].

Актуальність теми пов'язана з інтенсивним розвитком технології електромагнітного підвісу, що вимагає вдосконалення аналітичних методів синтезу та дослідження динаміки, які враховують особливості магнітного підвісу.

Основною проблемою систем електромагнітного підвищення є нестабільність, яка підсилюється при найменшому зовнішньому впливі. Відомо, що повне магнітне підвищення тіл на основі постійних магнітів або нерегульованих електромагнітів постійного струму неможливе. Цей факт доведено у відомій теоремі С. Ірншоу (S. Earnshaw) [1, 3–5,], згідно з якою система нерухомих тіл, які взаємодіють між собою із силою (притягування або відштовхування), обернено пропорційною квадрату відстані між ними, не може утворювати стійкої врівноваженої системи.

Метою роботи є вивчення причин нестійкості електромагніту постійного струму та дослідження можливостей його стабілізації у системі електромагнітного підвищення.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. В основу досліджень покладено уточнену математичну модель електромагніту, розроблену в [5, 7], яка включає зворотний зв'язок W_{Z1} , що відповідає протиелектроорушійній силі (проти-ЕРС) руху U_z в обмотці, та додатний зворотний зв'язок за проміжком $W_{Z2}=K_{Z2}=I_0/\delta_0$, який враховує залежність зусилля електромагніту від складової магнітного потоку, яка виникає внаслідок зміни робочого проміжку та відповідної магнітної провідності (рис. 1).

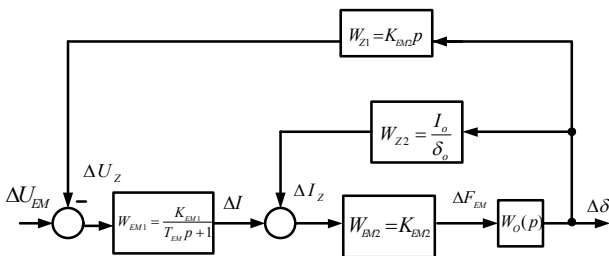


Рисунок 1 – Структурна схема лінеаризованої моделі електромагніта постійного струму

На рис. 1 позначено: W_{EM1} , W_{EM2} – передаточні функції електричної та силової частини електромагніта; $K_{EM1}=1/r$ – коефіцієнт передачі обмотки;

$T_{EM}=L/r$ – електромагнітна стала часу обмотки; L , r – індуктивність та активний опір обмотки; K_{EM2} – коефіцієнт передачі, що пов'язує прирости сили та струму; ΔU_{EM} , ΔI – прирости напруги та струму обмотки; ΔU_Z , ΔI_Z – прирости напруги та струму зворотних зв'язків; ΔF_{EM} , $\Delta \delta$ прирости тягового зусилля та проміжку електромагніту; I_0 , δ_0 – номінальні значення струму та робочого проміжку; $W_O=1/(mp^2)$ – передаточна функція об'єкту керування, m – маса рухомої частини електромагніту та корисного навантаження.

З аналізу структурної схеми (рис. 1) випливає, що з точки зору теорії автоматичного керування наявність додатного зворотного зв'язку за проміжком W_{Z2} перетворює нерегульований електромагніт постійного струму у структурно нестійку ланку. Фізична сутність нестійкості електромагніту пояснюється квадратичною залежністю зусилля від робочого магнітного потоку, а останнього – обернено пропорційною залежністю від проміжку.

Запишемо передаточну функцію частини структурної схеми (рис. 1), охопленої додатним зворотним зв'язком:

$$W_Z = \frac{K_{EM2}r \frac{1}{mp^2}}{1 - \frac{K_{EM2}rK_{Z2}}{mp^2}} = \frac{K_{EM2}r}{mp^2 - K_{EM2}rK_{Z2}} = \frac{1}{\frac{K_{Z2}}{m} p^2 - 1} = \frac{K}{T^2 p^2 - 1} = \frac{K}{(Tp+1)(Tp-1)}, \quad (1)$$

де $K = \frac{1}{K_{Z2}}$; $T = \sqrt{\frac{m}{K_{EM2}rK_{Z2}}}$.

Як видно з отриманого результату, передаточну функцію виконуючої (силової) частини електромагніту можна надати у вигляді послідовного з'єднання аперіодичної ланки першого порядку $\frac{K}{Tp+1}$

стійкої ланки першого порядку з передаточною функцією $\frac{1}{Tp-1}$.

Результат моделювання перехідного процесу руху якоря електромагніту при прикладанні постійної напруги до його обмотки зображено на рис. 2. Рухомою частиною електромагніта переміщується з наростаючим прискоренням, що підтверджує справедливості висновків теореми Ірншоу відносно нестійкості систем на основі постійних магнітів та нерегульованих електромагнітів.

Для досягнення стабільного магнітного підвищення необхідно використовувати замкнене керування по регульованій координаті та інші методи автоматичного управління, які забезпечують компенсацію впливу структурно-нестійких ланок.

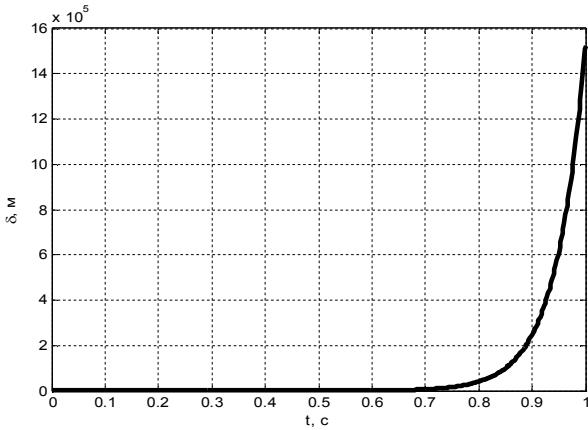


Рисунок 2 – Графік перехідного процесу зміни азору нерегульованого електромагніту

Розглянемо можливість стабілізації структурно-нестійкої ланки з передаточною функцією $\frac{1}{Tp-1}$

рахунок введення компенсуючого зворотного зв'язку з передаточною функцією W_K , як це показано на рис. 3, де є наступні позначення: W_C – передаточна функція керованого перетворювача постійної напруги; K_C, T_μ – його коефіцієнт передачі та стала часу; ΔU – завдання проміжку.

Для повної компенсації дії додатного природного зв'язку передаточна функція штучного негативного зворотного зв'язку за проміжком повинна мати вигляд

$$W_K W_C W_{EM1} = W_{Z2} \quad (2)$$

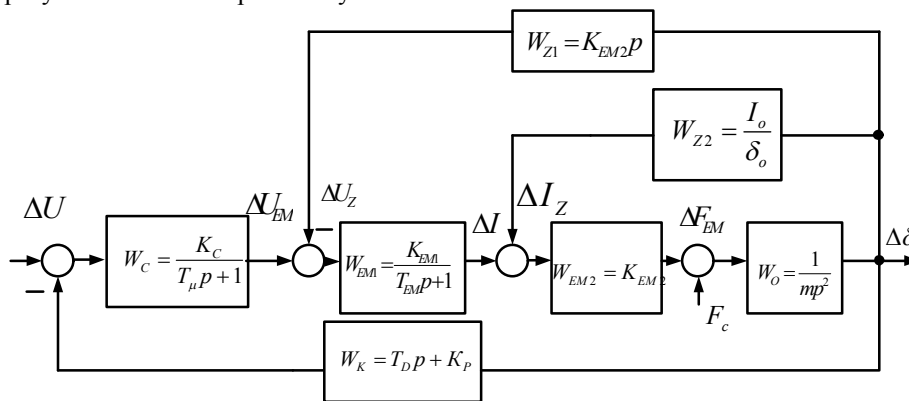


Рисунок 3 – Введення компенсуючого зворотного зв'язку

Звідси передаточна функція корегуючого зворотного зв'язку дорівнює

$$W_K = \frac{W_{Z2}}{W_C W_{EM1}} = \frac{I_0 (T_\mu p + 1) (T_{EM} p + 1)}{\delta_0 K_C K_{EM1}} \approx \frac{I_0 (T_\mu + T_{EM})}{\delta_0 K_C K_{EM1}} p + \frac{I_0}{\delta_0 K_C K_{EM1}} = T_D p + K_P, \quad (3)$$

де T_D, K_P – стала часу та коефіцієнт передачі корегуючої пропорційно-диференціальної (ПД) ланки.

Використання компенсуючого зворотного зв'язку дозволяє усунути причину нестійкості електромагнітного підвісу та зробити електромагніт структурно-стійкою ланкою. Надані на рис. 4 результати моделювання перехідних процесів швидкості та проміжку електромагніта за структурою (рис. 3) з компенсуючим зв'язком свідчать про набуття стійкості системою магнітного підвішування.

В існуючих системах електромагнітного підвішування питання стабілізації вирішується на основі використання сигналу датчика проміжку та його першої похідної або сполученням зворотного зв'язку за проміжком з ПД-регулятором проміжку [5–8]. При цьому виникає необхідність диференціювання сигналу датчика проміжку, який має високочастотні складові та перешкоди, що викликає відомі технічні труднощі.

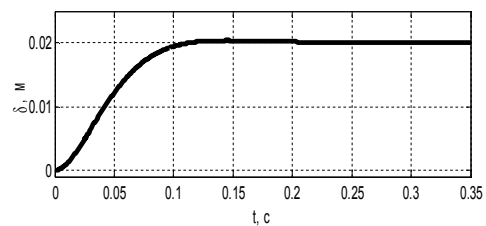
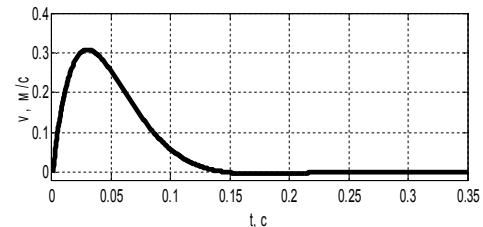


Рисунок 4 – Графік перехідного процесу швидкості руху та проміжку електромагніту при використанні комбінованого керування

Розглянемо технічну реалізацію корегуючого зворотного зв'язку на основі використання акселерометра. З цією метою перетворимо структурну схему (рис. 3), розклавши передаточну функцію об'єкта на окремі співмножники, як це показано на рис. 5.

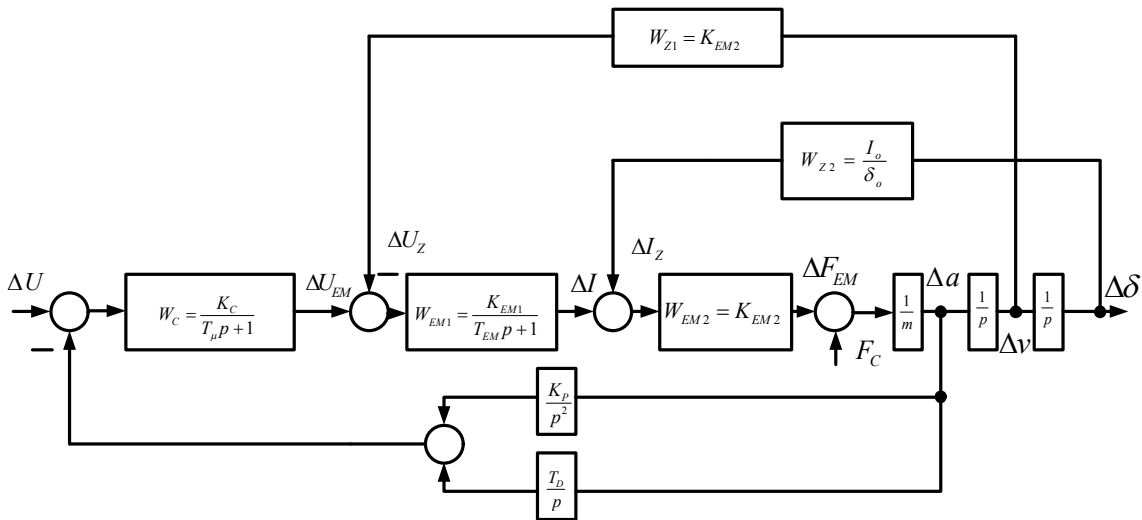


Рисунок 5 – Реалізація корегуючого зворотного зв'язку на основі акселерометра

Результати даного перетворення дають можливість застосувати як датчик корегуючого зворотного зв'язку акселерометр, установлений на рухомій частині електромагніту. Як видно зі структурної схеми, для отримання складових компенсуючого зворотного зв'язку, пропорційних величині робочого проміжку та швидкості його зміни, необхідно здійснити, відповідно, дво- та однократне інтегрування вихідного сигналу акселерометра – прискорення a . Операція інтегрування не викликає технічних ускладнень як при аналоговому, так і цифровому поданні сигналів.

На даний час акселерометри широко використовуються в мобільних телефонах, планшетах, ігрових приставках, фотоапаратах, навігаторах, літальних апаратах та інших пристроях і мають високу точність, надійність, стабільність характеристик та мікромініатюрне інтегральне виконання.

Даний підхід, зокрема, спрощує можливість використання для системи електромагнітного підвішування також методів адаптивного та модального керування або аналітичного конструювання регуляторів, оскільки дозволяє безпосереднє вимірювання змінних стану x_1-x_3 без використання спостерігачів (рис. 6).

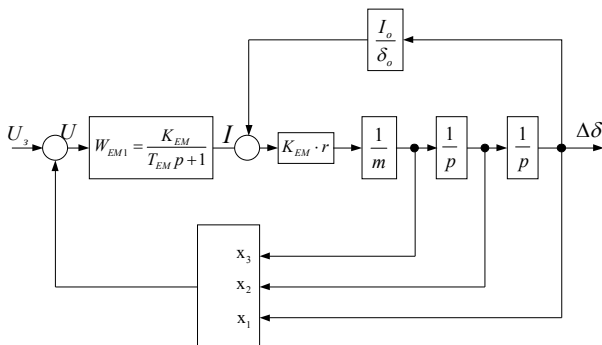


Рисунок 6 – Безпосереднє вимірювання змінних стану за допомогою акселерометра

Зазначимо, що після компенсації додатного зворотного зв'язку W_{z2} і перенесення входу зворотного зв'язку W_{z1} на швидкість v структурна схема електромагніту набуває вигляду, ідентичного структурі двигуна постійного струму з незалежним збудженням (рис. 7). Це надає широкі можливості застосування для керування електромагнітом усіх існуючих добре відпрацьованих методів керування двигунами постійного струму.

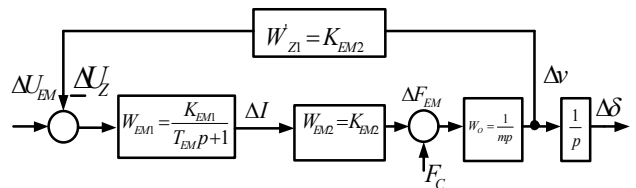


Рисунок 7 – Структурна схема електромагніта постійного струму після компенсації

Експериментальна перевірка. Для перевірки можливості використання акселерометра як датчика зворотного зв'язку була технічно реалізована гібридна експериментальна установка, яка включала стелд з підпружиненою масою, на якій закріплений акселерометр, під'єднаний до комп'ютера, та програмний пакет MATLAB (бібліотека Data Acquisition Toolbox) [9].

Акселерометр STEVAL-MKI014V1 [10] є демонстраційним комплектом з повною, готовою до використання платформою та низьким енергоспоживанням. Функціональна схема акселерометра зображена на рис. 8. Трьохосьовий лінійний емнісний акселерометр включає в себе чутливий елемент і інтерфейс, здатний приймати інформацію від чутливого елемента та забезпечувати передачу аналогового сигналу у зовнішнє середовище (програму).

У доповнення до датчика прискорення MEMS схема акселерометра включає в себе лінійний регулятор напруги і чотирьохядерний підсилювач з ни-

зьким рівнем шуму, виконаний у вигляді неінвертуючого буфера, що забезпечує як прямі виходи датчиків, так і буферизовані виходи сенсора, які доступні користувачеві.

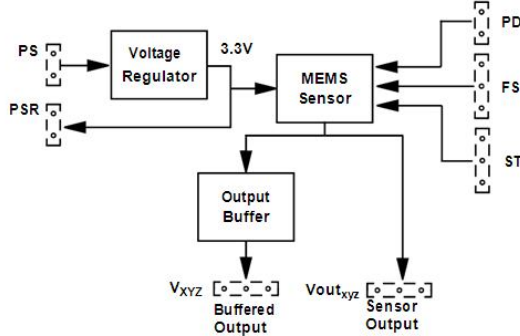


Рисунок 8 – Функціональна схема акселерометра STEVAL-MKI014V1

Для роботи комплекту необхідно подати через роз'єм, позначений PS, напругу постійного струму від 3,7 V до 18 V. Оптимальна напруга живлення – 5 V. Типове споживання струму датчика MEMS становить 0,68 mA, у той час як типовий споживаний струм усієї плати знаходиться в діапазоні від 6 mA.

Напруга живлення, що подається на плату, стабілізується лінійним регулятором напруги, який живить датчик MEMS на 3,3 V.

Виходи (V_{out_x} , V_{out_y} і V_{out_z}) лінійного акселерометра є групою з обмеженням за рахунок використання трьох конденсаторів ємністю 1,5 пФ (C_x , C_y і C_z), які разом з вихідним резистором $R_{out} = 110$ кОм створюють однополюсний низькочастотний фільтр з частотою зрізу близько 1 кГц.

Буферизація вихідних сигналів датчиків досягається за рахунок використання операційного підсилювача Rail-to-Rail з низьким рівнем шуму, налаштованого як неінвертуючий буфер.

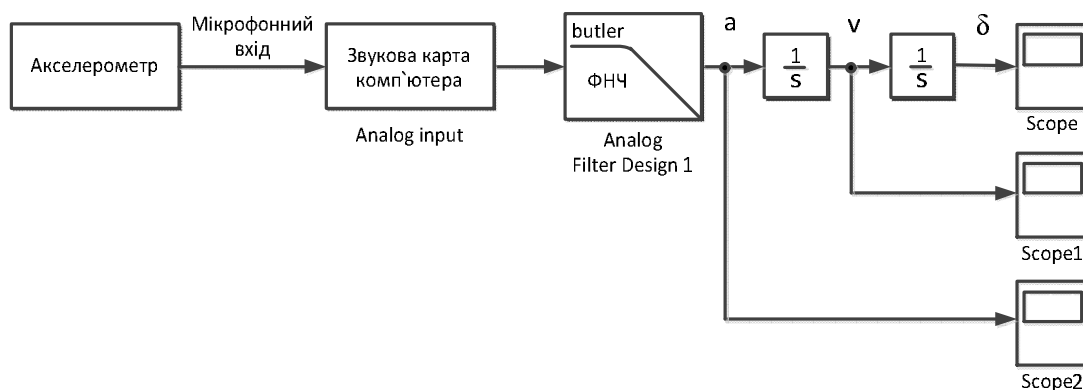


Рисунок 10 – Структурна схема для зняття характеристик акселерометра в Data Acquisition Toolbox

Дослідження включало осцилографування переміщення процесу затухаючих коливань підпружиненої маси після ступінчастого відхилення від врівноваженого стану. Була знята серія дослідів для різних значень початкових відхилень із наростаючою амплітудою.

Для проведення експериментальних досліджень було створено стендову установку, зображену на рис. 9.

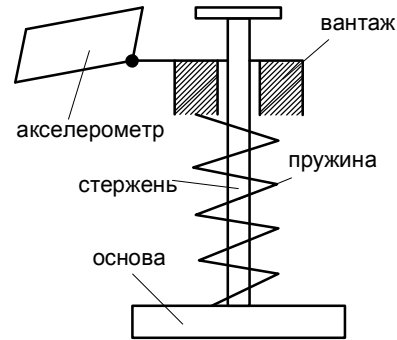


Рисунок 9 – Схематичний вигляд стендової установки

Установка складається з основи, на якій закріплений стрижень. На стрижень надягнута пружина, яка за допомогою вантажу, що знаходиться над пружиною, створює коливання. До вантажу приєднаний акселерометр, який при коливанні пружини починає змінювати координати прискорення, швидкості та положення.

На основі зображеної вище експериментальної установки (рис. 9) здійснено структурну реалізацію корегуючого зворотного зв'язку з використанням акселерометра та програмного пакету Data Acquisition Toolbox (рис. 10). Підключення виходів акселерометра здійснювалось через мікрофонний вхід звукової карти комп'ютера. Для усунення впливу пульсацій напруги живлення використано аналоговий фільтр нижніх частот (ФНЧ) Analog Filter Design 1. Інтегрування змінних здійснювалось стандартними інтеграторами програмного пакету MATLAB.

Результати досліджень показані на рис. 11–13, де надано осцилограми зміни прискорення a , швидкості v та положення (проміжку) δ , записані з осцилоскопів Scope 2, Scope 1, Scope відповідно.

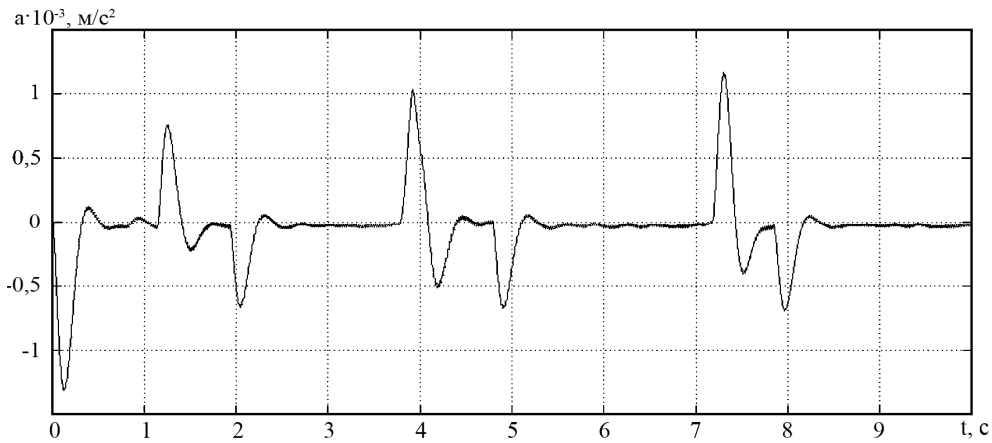


Рисунок 11 – Осцилограма перехідного процесу прискорення

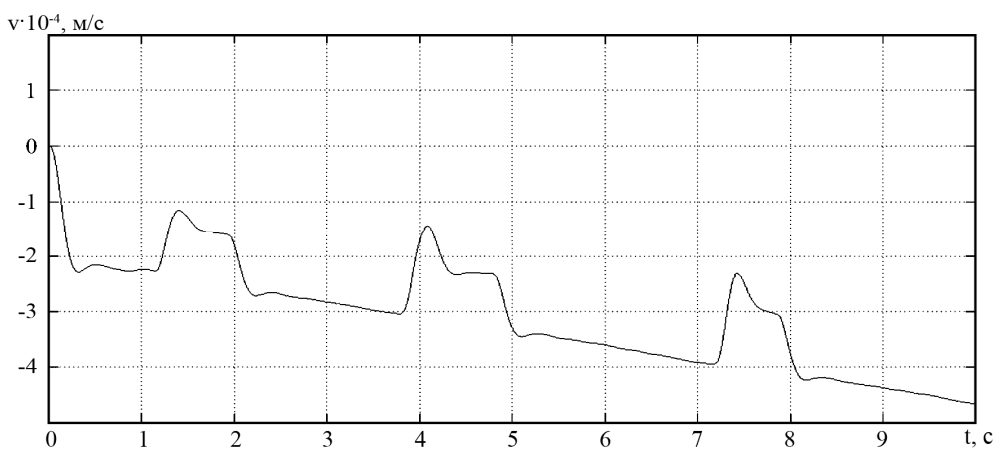


Рисунок 12 – Осцилограма перехідного процесу швидкості

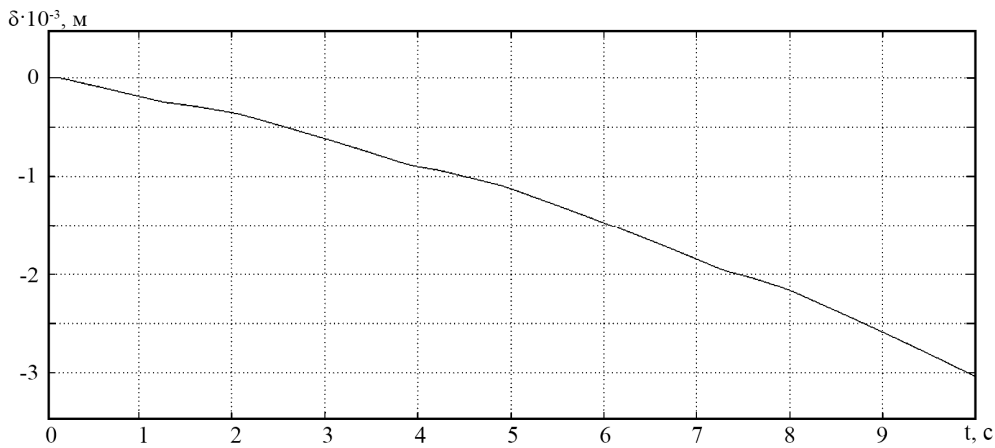


Рисунок 13 – Осцилограма перехідного процесу положення

Отримані результати досліджень свідчать про працездатність експериментальної установки. Сигнал прискорення, який отримується з виходу акселерометра, придатний для реалізації запропонованого принципу комбінованого керування. У той же час на графіках швидкості та положення, які були отримані шляхом інтегрування в пакеті Data Acquisition Toolbox, присутня постійна складова, яка пов'язана з дрейфом нуля акселерометра. Наявність цієї похиб-

ки не впливає на можливість використання акселерометра для надання структурної стійкості електромагніту, але водночас ускладнює використання акселерометра як датчика зазору.

У зв'язку із цим слід відмітити, що наявність розрахункового сигналу положення не передбачає заміни сигналу датчика проміжку, що обумовлено можливістю накопичення похибки у статичному режимі.

ВИСНОВКИ. У ході проведених досліджень було показано причини структурної нестійкості нерегульованого електромагніта постійного струму та необхідність застосування системи автоматичного керування проміжком. Установлено, що саме наявність природного внутрішнього додатного зворотного зв'язку за проміжком призводить до структурної нестійкості електромагніту.

Були визначені шляхи стабілізації систем електромагнітного підвішування та їх удосконалення. Для досягнення стійкого електромагнітного підвішування необхідно використовувати замкнене керування по робочому проміжку з введенням похідної в закон керування.

Уперше запропоноване використання акселерометра, встановленого на рухомій частині електромагніта, з метою реалізації компенсуючого зворотного зв'язку, що суттєво спрощує технічну реалізацію та підвищує якість систем електромагнітного підвішування.

Показано, що після компенсації додатного зворотного зв'язку за проміжком структурна схема електромагніта набуває вигляду, ідентичного структурі двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Це надає широкі можливості застосування для керування електромагнітним підвісом усіх існуючих добре відпрацьованих методів керування двигунами постійного струму.

Результати проведених експериментальних досліджень підтверджують можливість використання акселерометра для реалізації запропонованого принципу комбінованого керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мартыненко Ю. О проблеме левитации тел в силовых полях [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.valtar.ru/Magnets3/magnets7.htm
2. Торнтон Р. Наземный транспорт 80-х годов. – М.: Мир, 1974. – 184 с.
3. Осокин Ю.А., Герди В.Н., Майков К.А., Станкевич Н.Н. Теория и применение электромагнитных подвесов. – М.: Машиностроение, 1980. – 284 с.
4. Анцев Г.В., Богословский С.В., Сапожников Г.А. Проектирование устройств с электромагнитным подвесом. – М.: Наука, Техносфера, 2010. – 422 с.
5. Теряев В.И. Система автоматического регулирования положения транспортного экипажа при магнитном подвешивании. Реферативная информация о научно-исследовательских работах в вузах СССР // Электротехника. – 1978. – Вып. 10. – С. 9–10.
6. Режко Н.А. Системы управления электромагнитным подвесом // В кн. Высококоростной наземный транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом / Под ред. В.И. Бочарова, В.Д. Нагорского. – М.: Транспорт, 1985. – 273 с.
7. Теряев В.И., Бурлака О.П. Математична модель виконавчого електромагніту для систем магнітного підвішування // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 9–11 квітня 2013 р. – Кременчук: КрНУ, 2013. – С. 264–265.
8. Марьенков В.С. Исследование системы управления магнитным подвесом высокоскоростного наземного транспорта [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.uran.donetsk.ua/~masters/2008/kita/marienkov/diss/index.htm
9. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Система управления Toolbox, MATLAB 5 для студентов / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: Диалог-МИФИ, 1999. – 278 с.
10. STEVAL–MKI014V1 User manual [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/CD00190738.pdf

ELECTROMAGNETIC SUSPENSION SYSTEM STABILIZATION USING AN ACCELEROMETER

V. Teriaiev

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

vul. Polytehnichna, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: kpivit@gmail.com

Modern magnetic supports must be capable of long-term and stable operation at low and high speeds, have sufficient rigidity and load carrying capacity, not create braking forces, consuming a small amount of energy to be tech and inexpensive. The most complete solution to these problems is achieved by using electromagnetic suspension systems, based on the property of an electromagnet attracted to ferrromagnetic core, where the weight of the suspended body and acting on it forces is balanced by the efforts of the electromagnetic field. As a result of this balancing can be free, "soaring" (levitation) of suspended body without contact with the surrounding objects. One of the most difficult tasks when creating of these systems is to ensure their sustainability. To fend off the instability of the electromagnetic suspension is necessary to carry out dynamic regulation the electromagnetic field as a function of the working air gap between the electromagnet and the levitated body. To solve the problems of stability and dynamics of electromagnetic suspension the control theory methods are used with subsequent correction of the automatic control system. In the article identification of parameters and characteristics of a power electromagnet as element of electromechanical system of automatic control is carried out. The cause of structural instability of DC electromagnet and ways of its stabilization are shown. Possibility of ensuring stability and improvement of automatic regulation system quality is investigated. Questions of realization of applied tasks of the analysis and synthesis of magnetic suspension are considered. Use of the accelerometer as the sensor of the compensating feedback is proposed. The experimental results confirming this possibility.

Key words: electromagnetic suspension, instability, stabilization, accelerometer.

REFERENCES

1. Martynenko, Yu. (2014), "About problems of levitation bodies in the force fields", available at: www.valtar.ru/Magnets3/magnets7.htm (accessed September 15, 2014).
2. Thornton, R. (1974), *Nazemnyi transport 80-h godov* [Ground transport of 80th], Mir, Moscow. (in Russian)
3. Osokin, Yu.A., Gerdi, V.N., Maykov, K.A. and Stankevich, N.N. (1980), *Teoriya i primeneniye elektromagnitnykh podvesov* [Theory and application of electromagnetic suspensions], Mashinostroenie, Moscow. (in Russian)
4. Antsev, G.V., Bogoslovsky, S.V. and Sapozhnikov, G.A. (2010), *Proektirovaniye ustroystv s elektromagnitnym podvesom* [Designing of devices with electromagnetic suspension], Nauka, Tehnosfera, Moscow. (in Russian)
5. Teriaiev, V.I. (1978), "The automatic control system transport vehicle position with magnetic suspension", *Referativnaya informatsiya o nauchno-issledovatel'skikh rabotakh v vuzakh USSR. Elektrotehnika, Vishcha shkola*, Vol. 10, pp. 9–10. (in Russian)
6. Rezhko, N.A. (1985), *Sistemy upravleniya ehlektromagnitnym podvesom* [Control Systems Electrical magnetic levitation], In the book "High-speed ground transportation with a linear drive and magnetic levitation" / Ed. V.I. Bocharov, V.D. Nagorski, Transport, Moscow. (in Russian)
7. Teriaiev, V.I. and Burlaka, O.P. (2013), "Mathematical model of executive electromagnet for magnetic levitation systems", *Elektromekhanichni ta energetichni sistemy, metody modelyuvannya ta optimizatsii. Zbirnik naukovikh prats XI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodikh uchenikh i spetsialistiv u misti Kremenchuk* [Electromechanical and Energy Systems, Modeling and Optimization Methods. Conference proceedings of the 11th International conference of students and young researches], Kremenchuk, KrNU, April 9–11, 2013, pp. 264–265. (in Russian)
8. Maryenkov, V.S. (2014), "Investigation of magnetic suspension control system of high-speed ground transportation", available at: www.urandonetsk.ua/~masters/2008/kita/marienkov/diss/index.htm (accessed September 15, 2014). (in Russian)
9. Medvedev, V.S. and Potiomkin, V.G. (1999), *Sistema upravleniya Toolbox, MATLAB 5 dlya studentov* [Control System Toolbox, MATLAB 5 for students], Dialog, Moscow. (in Russian)
10. STEVAL–MKI014V1 (2014), User manual, available at: www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/CD00190738.pdf (accessed September 15, 2014).

Стаття надійшла 16.09.2014.