

## СИСТЕМА АКТИВНОГО ВІБРОЗАХИСТУ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПІДВІСУ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Розглянуто актуальну для приладобудування і транспорту проблему стабілізації положення в просторі та віброзахисту обладнання, приладів і людей під час керування мобільними об'єктами (наземний транспорт, в тому числі автомобілі, транспорт з «магнітною левітацією», кораблі, підводні човни, аерокосмічні літальні апарати) в умовах дії координатних і зовнішніх збурень. Теоретично показано можливість активного віброзахисту об'єктів в просторі на основі використання електромагнітної підвіски. Розроблено принципи технічної реалізації системи активного віброзахисту. Її працездатність підтверджена моделюванням.*

*Активний віброзахист здійснюється шляхом компенсації дії зовнішніх і координатних збурень за рахунок створення електромагнітом додаткової складової сили, що діє проти цих збурень за принципом комбінованого керування. Компенсувальний зв'язок за збуренням реалізовано на основі акселерометра. Ефективність зворотного зв'язку за збуренням підтверджується результатами моделювання динамічних режимів відпрацювання завантаження за положенням об'єкта керування і порівняльним аналізом впливу координатних збурень на якість перехідних процесів. Також проаналізовані демпфувальні властивості електромагнітної підвіски, ефективність використання компенсувального зв'язку з використанням акселерометра.*

*Запропоноване рішення не викликає труднощів в технічній реалізації і дозволяє поліпшити точність, швидкодію і чутливість електромагнітної підвіски. Комбінація функцій електромагнітної підвіски і активного віброзахисту в одному комплексі забезпечує формування інваріантних характеристик, вирішує проблему створення безконтактної системи управління позиціонуванням об'єкта в просторі.*

*Розглянуто теоретичні основи побудови систем активного віброзахисту об'єктів в просторі на основі використання електромагнітного підвісу, запропоновані принципи технічної реалізації.*

**Ключові слова:** електромагнітний підвіс, автоматичне керування, стабілізація положення, активний віброзахист, дослідження, технічна реалізація.

### Вступ

Актуальною проблемою для приладобудування і транспорту є стабілізація положення у просторі та віброзахист обладнання, приладів та людей під час керування рухомими об'єктами (наземний транспорт, в т. ч. автомобілі, транспорт на «магнітній подушці», судна, підводні човни, авіаційно-космічні літальні апарати) в умовах координатних та зовнішніх збурень.

У дослідженні розглянуті питання теорії та принципів технічної реалізації системи активного віброзахисту на основі використання електромагнітного підвісу.

### Результати досліджень

Електромагнітний підвіс оснований на використанні електромагніта постійного струму як силового виконавчого елемента. Відомо, що електромагніт постійного струму є структурно-нестійкою ланкою. Фізично це пояснюється зворотно-квадратичною залежністю сили тяги від зазору, що приводить до лавиноподібного зростання зусилля зі зменшенням зазору і навпаки. Нестійкість електромагніта впливає також з будови його структурної схеми та передаточної функції. Для стабілізації електромагнітного підвісу використовується замкнене регулювання [1].

Принцип роботи системи електромагнітного підвішування з регульованим електромагнітом постійного струму полягає у тому, що зміна величини робочого зазору сприймається датчиком зазору і відповідний сигнал подається на вхід системи автоматичного керування, за допомогою якої регулюється величина МРС котушки електромагніта. Зі збільшенням зазору ця МРС також збільшується і навпаки. Величина МРС визначає магнітний потік в зазорі та величину тягового

зусилля електромагніта, яке компенсує вагу корисного навантаження та збурювальні зусилля, що діють на нього [1].

Задачею системи активного віброзахисту є компенсація дії зовнішніх та координатних збурень шляхом створення електромагнітом додаткової складової зусилля, спрямованої на протидію цим збуренням за принципом комбінованого керування, що забезпечує стабілізацію положення об'єкта у просторі, а також його активний віброзахист [2].

Система стабілізації положення об'єкта у просторі та активного віброзахисту (рис. 1) включає: 1 — електромагніт постійного струму; 2 — датчик зазору; 3 — ярмі електромагніта та пов'язане з ним корисне навантаження (об'єкт); 4 — акселерометр; І — інтегратор; Р — регулятор положення (зазору); П — керований перетворювач постійної напруги;  $U_S$  — напруга живлення обмотки електромагніта. Як випливає з рис. 1, збурення передаються через основу 5 на електромагніт постійного струму 1 і одночасно сприймаються акселерометром 4.

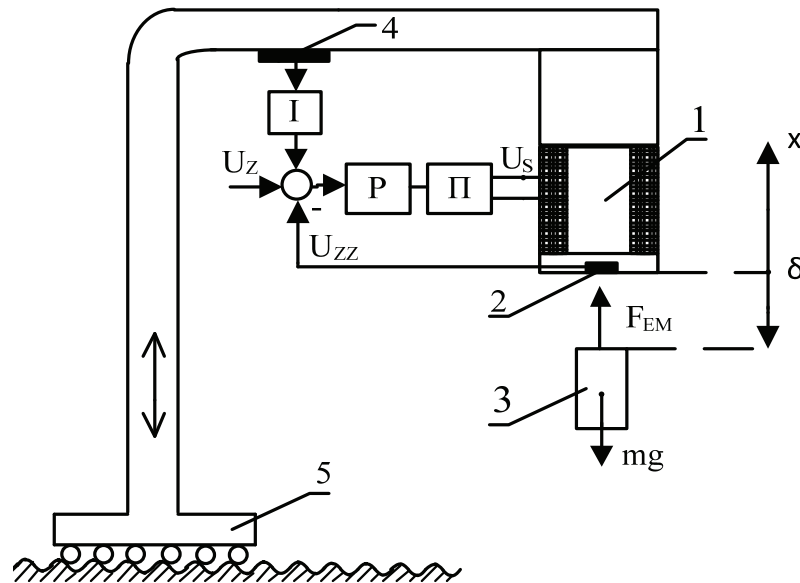


Рис. 1. Функціональна схема системи активного віброзахисту та електромагнітного підвішування:  $\delta$  — робочий повітряний зазор;  $x$  — положення електромагніта відносно нерухомої системи координат;  $m$  — маса об'єкта;  $g$  — прискорення вільного падіння;  $U_Z, U_{ZZ}$  — сигнали завдання та головного зворотного зв'язку за положенням, відповідно;  $F_{EM}$  — електромагнітне зусилля

Компенсувальний зв'язок за збуренням реалізований на основі акселерометра. Зі зміною положення (координати) рухомої частини електромагнітного підвісу внаслідок дії зовнішніх або координатних збурень, акселерометр також змінює своє положення і виробляє сигнал, пропорційний прискоренню. Після двократного інтегрування цей сигнал відповідає зміні положення об'єкта відносно нерухомої системи координат і подається на вхід регулятора положення як компенсувальний зворотний зв'язок.

Оцінка ефективності дії компенсувального зв'язку за збуренням проводилась шляхом порівняльного аналізу відпрацювання координатного збурення по зазору, яке змінюється за гармонічним законом. Моделювання процесу здійснювалось у такій послідовності: в початковий момент часу на вхід системи подавалось ступінчастий сигнал завдання  $U_Z$ , який відповідає усталеному значенню зазору 0,01 м. Після завершення перехідного процесу в момент часу 1,25 с до системи прикладалось збурення по зазору гармонічного характеру з частотою 15 Гц та амплітудою 0,005 м, яке в подальшому не знімалось.

На рис. 2 показані перехідні процеси зміни зазору у системі електромагнітного підвісу без компенсувального зв'язку та за його наявності по збуренню. З графіків видно, що система без компенсувального зв'язку відпрацьовує це збурення з амплітудою, що не перевищує  $\pm 5\%$  від усталеного значення зазору. Зменшення амплітуди коливань зазору порівняно з амплітудою збурення пояснюється власними демпфувальними властивостями електромагнітного підвісу. Проте повністю усунути коливання об'єкта без введення додаткового компенсувального зв'язку не вдається.

Для порівняння двох систем електромагнітного підвісу на рис. 3 показані результати моделювання зміни робочого зазору у збільшеному масштабі для ділянки прикладання координатних збурень.

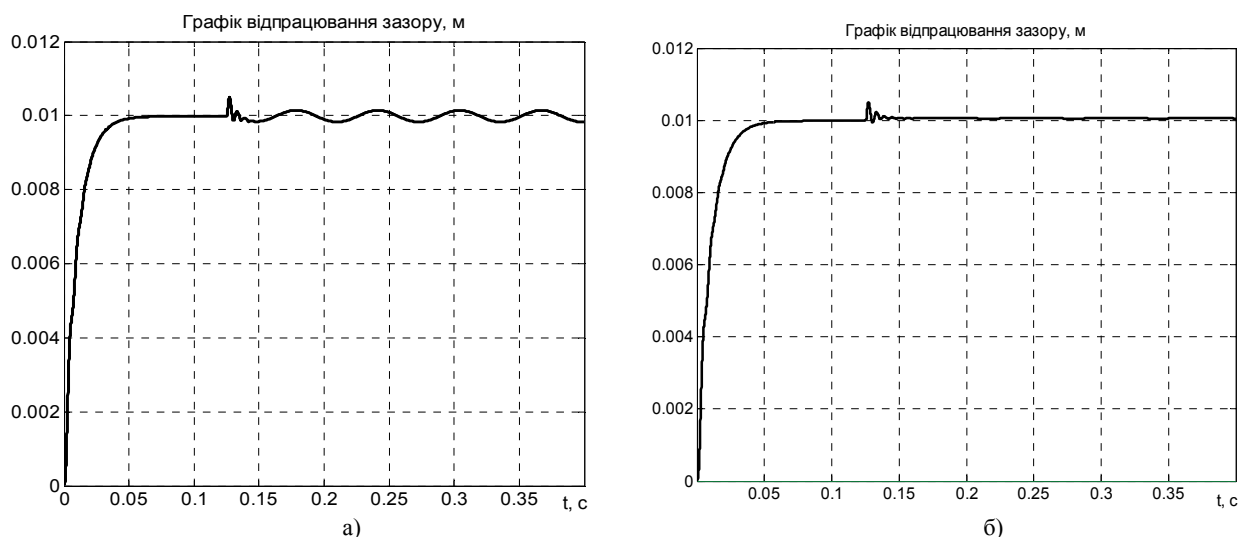


Рис. 2. Відпрацювання зазору у системи електромагнітного підвісу:  
а — без компенсувального зв'язку; б — з використанням компенсувального зв'язку

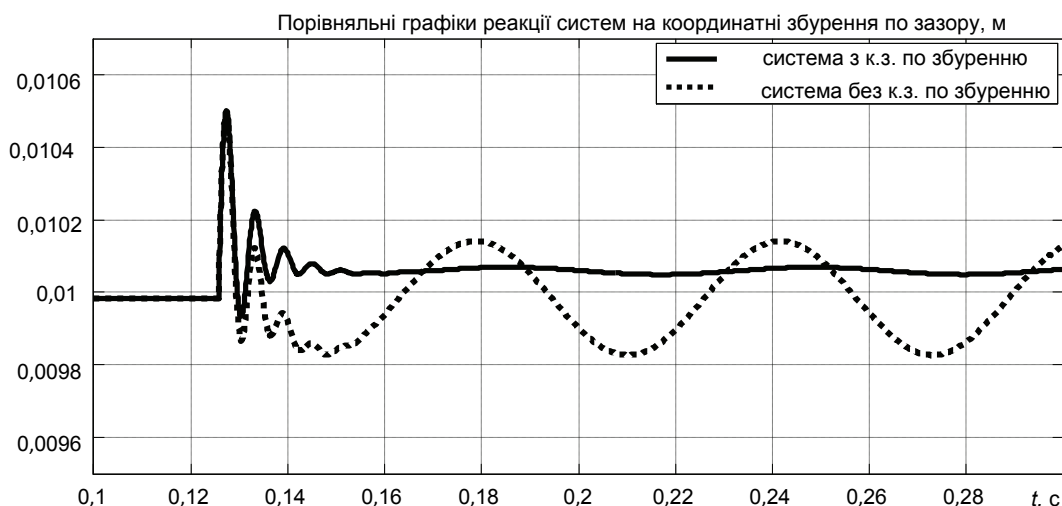


Рис. 3. Порівняльні графіки двох систем: без компенсуючого зв'язку (к.з.) та з використанням к.з.

Аналіз графіків перехідних процесів свідчить про те, що електромагнітний підвіс має хороші властивості демпфування, оскільки система без компенсувального зв'язку, за прикладання зовнішнього координатного збурення по зазору з амплітудою 5 мм, зменшує цей вплив по амплітуді до 0,3 мм, тобто у 15 разів відносно початкового значення. Із застосуванням компенсувального зв'язку (див. рис. 2б та рис. 3) в усталеному режимі спостерігається відпрацювання зазору практично без відхилень, амплітуда коливань порівняно з рис. 2а зменшилась ще у 15 разів і графік зазору набуває лінійного характеру. Відпрацювання зазору за зовнішніх координатних збурень з такою точністю може бути визначальним для використання у надточних приладах.

### Висновки

Теоретично показана можливість здійснення активного віброзахисту об'єктів у просторі на основі використання електромагнітного підвісу. Розроблені принципи технічної реалізації системи активного віброзахисту, підтверджена її працездатність шляхом моделювання. Ефективність дії компенсувального зв'язку за збурення підтверджена результатами аналізу відпрацювання збурення по зазору, а також амплітудними частотними характеристикам замкненої системи.

Подані результати моделювання динамічних режимів відпрацювання завдання за положенням

об'єкта регулювання, а також порівняльний аналіз впливу координатних збурень на якість перехідних процесів в системах з компенсуючим зв'язком та без нього підтверджують доцільність застосування компенсації збурень.

Запропоноване рішення не викликає складнощів в технічній реалізації і дозволяє підвищити точність, швидкодію та чутливість електромагнітного підвісу. Поєднання функцій магнітного підвісу і активного віброзахисту в єдиному комплексі забезпечує формування інваріантної характеристики, що вирішує проблему створення безконтактної системи керування положенням об'єкта у просторі та його активного віброзахисту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] В. І. Теряєв, «Стабілізація системи електромагнітного підвішування з використанням акселерометра,» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи, Щоквартальний науково-виробничий журнал*, вип. 4/2014 (28), с. 71-78, 2014.

[2] В. І. Теряєв, «Система стабілізації положення та активного віброзахисту об'єкта у просторі на основі електромагнітного підвісу,» Патент 120636 Україна, № u201705289; заявл. 30.05.2017; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.01.2018

**Теряєв Віталій Іванович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: kpivit@gmail.com .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

V. I. Teriaiev<sup>1</sup>

## Active Vibration Protection System on the Basis of Electromagnetic Suspension

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

*The article is devoted to the problem of position stabilization in space and vibration protection (vibroprotection) of equipment, instruments and people when controlling mobile objects (land transport, including cars, transport with a "magnetic levitation", ships, submarines, aerospace flying apparatus) under the action of coordinate and external disturbances. Theoretically there has been shown the possibility of active vibroprotection of objects in space based on the use of an electromagnetic suspension. The principles of active vibroprotection technical implementation are developed, and its workability is confirmed by modeling.*

*Active vibroprotection is carried out by compensating the action of external and coordinate disturbances due to the creation of an additional component of the force by the electromagnet, acting opposite to these disturbances by the principle of combined control. Compensating feedback of the disturbance is based on the accelerometer.*

*The effectiveness of the feedback on the disturbance is confirmed by the results of modeling the dynamic modes of the controlled object position and by a comparative analysis of the effect of coordinate perturbations on the quality of the transient processes. There have been also analyzed the damping properties of the electromagnetic suspension, the efficiency of using compensating feedback using an accelerometer.*

*The proposed solution does not cause difficulties in the technical implementation and makes it possible to improve the accuracy, speed and sensitivity of the electromagnetic suspension. The combination of the functions of electromagnetic suspension and active vibroprotection in a single complex provides the formation of invariant characteristics, solves the problem of creating a contactless positioning control system of the object in space.*

**Keywords:** electromagnetic suspension, automatic control, stabilization of position, active vibration protection, research, technical implementation.

**Teriaiev Vitalii I.** — Cand. Sc., (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drive, e-mail: kpivit@gmail.com

## Система активной виброзащиты на основе электромагнитного подвеса

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Рассмотрена актуальная для приборостроения и транспорта проблема стабилизации положения в пространстве и виброзащиты оборудования, приборов и людей при управлении мобильными объектами (наземный транспорт, в том числе автомобили, транспорт с «магнитной левитацией», корабли, подводные лодки, аэрокосмические летательные аппараты) в условиях действия координатных и внешних возмущений. Теоретически показана возможность активной виброзащиты объектов в пространстве на основе использования электромагнитной подвески. Разработаны принципы технической реализации системы активной виброзащиты. Ее трудоспособность подтверждена моделированием.*

*Активная виброзащита осуществляется путем компенсации действия внешних и координатных возмущений за счет создания электромагнитом дополнительной составляющей силы, действующей против этих возмущений по принципу комбинированного управления. Компенсирующая связь по возмущению реализована на основе акселерометра. Эффективность обратной связи по возмущению подтверждается результатами моделирования динамических режимов отработки задания по положению объекта регулирования и объекта управления и сравнительным анализом влияния координатных возмущений на качество переходных процессов. Также проанализированы собственные демпфирующие свойства электромагнитной подвески, эффективность использования компенсирующей связи с использованием акселерометра.*

*Предложенное решение не вызывает трудностей в технической реализации и позволяет улучшить точность, быстродействие и чувствительность электромагнитной подвески. Комбинация функций электромагнитной подвески и активной виброзащиты в одном комплексе обеспечивает формирование инвариантных характеристик, решает проблему создания бесконтактной системы управления позиционированием объекта в пространстве.*

*Рассмотрены теоретические основы построения систем активной виброзащиты объектов в пространстве на основе использования электромагнитного подвеса, предложены принципы технической реализации.*

**Ключевые слова:** электромагнитный подвес, автоматическое управление, стабилизация положения, активная виброзащита, исследования, техническая реализация.

**Теряев Виталий Иванович** — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: kpivit@gmail.com