ПРИХОДЬКО Дмитро Федорович. Назва дисертаційної роботи: "КОЛИВАННЯ КОНСОЛЬНОГО СТРИЖНЯ ІЗ ЗАКРИТИЧНИМ СТАТИЧНИМ СТАНОМ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНІЙ ВІБРАЦІЇ ЗАКРІПЛЕННЯ"

Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ПРИХОДЬКО ДМИТРО ФЕДОРОВИЧ

УДК 539.3

КОЛИВАННЯ КОНСОЛЬНОГО СТРИЖНЯ ІЗ ЗАКРИТИЧНИМ

СТАТИЧНИМ СТАНОМ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНІЙ ВІБРАЦІЇ

ЗАКРІПЛЕННЯ

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Дисертація

на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико – математичних наук

Науковий керівник:

Краснопольська Тетяна

Сiгізмундівна,

доктор фізико – математичних

наук, старший науковий

співробітник

Київ – 2016

ЗМІСТ

ВСТУП 4

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ЗАДАЧІ ДИНАМІКИ КОНСОЛЬНИХ СТРИЖНІВ 9

1.1 Огляд літератури 9

1.2 Теорія динамічних систем 15

1.3 Параметричне збурення коливань 22

РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СТАБІЛІЗАЦІЯ

КОНСОЛЬНИХ СТРИЖНІВ З ЗАКРИТИЧНОЮ ЖОРСТКІСТЮ

31

2.1 Опис експериментальної установки 32

2.2 Методика випробувань 34

2.3 Критерій стабілізації 42

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОЛИВАНЬ КОНСОЛЬНОГО

СТРИЖНЯ ТА ЇЇ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

44

3.1 Основні положення лінійної теорії пружності 44

3.2 Постановка задачі про коливання стрижня з закритичною

жорткістю

68

3.3 Динамічні характеристики згинних коливань 70

3.4 Ідентифікація 74

РОЗДІЛ 4 НЕЛІНІЙНІ КОЛИВАННЯ КОНСОЛЬНОГО СТРИЖНЯ З

ЗАКРИТИЧНОЮ ЖОРСТКІСТЮ

79

4.1 Згинні коливання стрижня при нелінійному законі

пружності

79

4.2 Побудова моделі параметричних коливань стрижня по

двох модах при відсутності початкових напружень

83

4.3 Рівняння згинних коливань стрижня при врахуванні

в’язкого опору

91

4.4 Побудова моделі параметричних коливань стрижня по

двох модах з врахуванням початкових напружень

94

РОЗДІЛ 5 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ СТРИЖНЯ ПРИ 102

ВЗАЄМОДІЇ ДВОХ ВЛАСНИХ ФОРМ

5.1 Аналіз усталених режимів динамічної системи для моделі

закритичного стрижня без початкових напружень

102

5.2 Усталені режими динамічної системи у моделі стрижня з

початковими напруженнями

115

ВИСНОВКИ 122

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 123

4

ВСТУП

Актуальність теми дисертаційної роботи визначається важливістю

розуміння законів динаміки консольно-стрижневих конструкцій в наслідок їх

широкого застосування в сучасній техніці і новітніх технологіях.

Математичне моделювання процесів коливання консольних стрижнів

дозволяє виявити нові аспекти їх динаміки, що раніше не привертали увагу

вчених.

Динаміка найрізноманітніших і важливих елементів сучасної техніки

таких як, висотні споруди, об’єкти ракетно – космічної техніки, чутливі

елементи конденсаторів в подушках безпеки автомобілів – моделюються за

допомогою консольно-стрижневих систем. Однією з важливих задач

динаміки і дослідженні стійкості таких систем є вивчення їх поведінки в

умовах зовнішнього вібраційного впливу, коли реалізуються резонансні

параметричні коливання. При цьому, як правило, виникають небезпечні

динамічні напруження і значні амплітуди коливань. З іншої сторони, відомо,

що високо частотний вібраційний вплив призводить до виникнення таких

несподіваних динамічних явищ як стабілізація верхньго положення

перевернутого маятника при вертикальній вібрації його вісі підвісу (маятник

Стефенсона-Капіци), як рух кільця вгору на оберненому маятнику (маятник

Челомея) і стабілізація кільця в деякому стійкому положенні. Іншим

захоплюючим прикладом є стабілізація у вертикальному положенні гнучкого

каната і навіть рух чародіїв вгору по такому канату, так званий ефект

магічного індійського каната (the ‘Indian rope trick’).

Ці ефекти покладені в основу функціонування деяких приладів і

технологічних процесів. Спосіб вібраційної стабілізації прямолінійної форми

вісі може використовуватись, наприклад, для самоцентрування при подачі

гнучкої проволоки (нитки, шланга) з намоточного барабана модуля для

подальшої її технологічної обробки.

5

Розв’язку задач вібраційної стабілізації гнучких пружних стрижнів при

зовнішньому вібраційному збуренні були присвячені чисельні роботи таких

видатних вчених: В.В. Болотіна, А.С. Вольміра, І.І. Блєхмана, O.М.Гузя, М.П.

Матвєєва, Я.Г. Пановко, Г.Я. Пановко, Г.С. Писаренко, К.М. Рагульскиса,

А.Р. Ржаніцина, С.П. Тимошенко, Г. Циглера, А.П. Яковлева, D. Acheson, B.

Budiansky, A. Champneys, N.J. Mallon, A. Stephenson та інших. Тим не менше,

деякі аспекти цієї проблеми такі, як стабілізація та визначення частотних

діапазонів параметричних коливань по власним формам закритичних

пружних консольних стрижнів (тобто стрижнів, які за означенням

С.П.Тимошенко в положенні вільного спокою прогинаються і мають вигнуту

форму під дією власної ваги) потребують подальшого дослідження. Саме

дослідженню таких актуальних питані і присвячена данна десертаційна

робота.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалась в рамках наукових напрямків кафедри теоретичної

та прикладної механіки КНУ. Зокрема, результати ввійшли у звіт НД теми

14БП038-02 "Математичні та експериментальні методи механіки спряжених

коливальних процесів і хвильових полів та їх застосування в гіроскопічних

геонавігаційних та мікроелектромеханічних системах".

Мета і задачі дослідження. Метою десертаційної роботи є встановлення

закономірностей регулярних і хаотичних динамічних режимів коливань при

згинних деформацях та дослідженны ефекту вібраційної стабілізації

консольних стрижнів із закритичним статичним станом. Поставлена мета

досягається на основі експериментального і теоретичного вивчення

стабілізації і згинних коливань гнучких стрижневих систем.

Для досягнення поставлених цілей були сформульовані наступні наукові

задачі:

 експериментально дослідити ефект стабілізації та коливань закритичного

стрижня при згинних деформаціях та при вертикальних вібраціях з

різними частотами;

6

 визначити основні динамічні характеристики та ідентифікувати параметри

стрижня із закритичним статичним станом;

 побудувати математичні моделі резонансних параметричних коливань

стрижня із закритичним статичним станом при двохмодовій апроксимації

нелінійних згинних деформацій стрижня при урахуванні початкових

напружень і без їх урахування;

 вивчити закономірнoстi регулярних і хаотичних режимів коливань

закритичного стрижня при згинних деформаціях.

Об’єктом досліджень є коливання при згинних деформаціях та

вібраційна стабілізація стрижня із закритичним статичним станом.

Предметом дослідження є динамічні характеристики (власні частоти та

форми) і регулярні та хаотичні режими сталих коливань стрижнів із

закритичним статичним станом при згинних деформаціях.

Методи дослідження. Використовується комплексний метод

дослідження, який складається з об’єднання експериментальних, аналітичних

та чисельних методів дослідження динамічних стрижневих систем. Розробка

розрахункових моделей досліджуваної системи виконана на основі

класичних методів нелінійної механіки. Для розрахункового аналіза

використовувались аналітичні методи: Бубнова-Гальоркіна,

багатомаштабних розкладів, усереднення по швидкому часу, визначення

показників Ляпунова, фазових портретів, часових реалізацій та спектральних

щільностей.

Наукова новизна роботи полягає в

 експерементальному визначенні частотних значень вертикальних вібрацій

для резонансних коливань по другій і третій власним формам згинних

коливань і вертикальній стабілізації стрижня із закритичним статичним

станом;

 побудові математичних моделей резонансних нелінійних параметричних

коливань стрижня із закритичним статичним станом з урахуванням

початкових напружень і без їх урахування;

7

 доведенні існування і визначенні характеристик регулярних та хаотичних

режимів усталених коливань стрижнів із закритичним статичним станом.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що

 встановлені значення параметрів, при яких виникає стабілізація стрижня із

закритичним статичним станом;

 встановлені закономірності регулярних та хаотичних режимів доцільно

використовувати при моделюванні та аналізі коливань консольнострижневих систем при згинних деформаціях.

Особистий внесок здобувача. Результати роботи відображені в шести

статтях. З них одна робота опублікована в міжнародному періодичному

журналі, який включено до міжнародних наукометричних баз.

Формулювання загальної проблеми динаміки закритичних стрижнів

належить д.ф. – м.н. професору В.В. Мелешку, який її сформулював у 2011

році. Постановка основних задач та ідей належать науковому керівнику д.ф.

– м.н. Т.С. Краснопольській. Деякі ідеї та допомога при розрахунках

резонансних характеристик належать д.ф. – м.н. професору О.А. Гуржію.

Побудова аналітичних моделей, експериментальні дослідження і чисельне

моделювання були виконані автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались

на:

 Міжнародній конференції «Шевченкова весна» 19-23 березня, 2012, Київ,

Україна;

 Міжнародній конференції «Сучасні математичні методи досліджень в

механіці», Міжнародна наукова школа–семінар, 8-11 жовтня, 2012, Київ,

Україна;

 семінарі «Сучасні проблеми механіки» (керівники: академік НАН України

В.Т. Грінченко, чл. – корр. НАН України А.Ф. Улітко) Київського

національного університету ім. Т. Шевченка (січень 2012);

 Міжнародній конференції «Шевченкова весна», 2013, Київ, Україна;

8

 II Міжнародній конференції «Сучасні проблеми механіки» 27-29 серпня

2013, Киів, Україна;

 6 Chaotic Modeling and Simulation International Conference, 11-14 june, 2013,

Istanbul, Turkey;

 8

th European Nonlinear Oscillations Conference, 6-11 july, Vienna, Austria

 III Міжнародній конференції «Сучасні проблеми механіки» 27-29 серпня

2015, Киів, Україна

 семінарі «Сучасні проблеми механіки» (керівники: академік НАН України

В.Т. Грінченко, д.ф. – м.н. Я.О. Жук) Київського національного

університету ім. Т. Шевченка (січень 2016).

Публікації. Результати досліджень опубліковані в одинадцяти

публікаціях, у тому числі – в шести статтях та в п’яти збірниках абстрактів

міжнародних конференцій. З них одна стаття опублікована в міжнародному

науковому періодичному журналі, який має DOI (Digital Object Identifier) і

яка включена до міжнародних наукометричних баз. Абстракти доповідей

опубліковані в п’яти збірниках міжнародних конференцій.

Структура та об’єм дисертації. Дисертаційна робота складається з

вступу, п’яти розділів, висновків і списка використаних літературних джерел

з 94 найменувань. Основний текст роботи займає 122 сторінки. В роботі

приведено 30 рисунків і 9 фотографій. Повний об’єм роботи складає 131

сторінку.

ВИСНОВКИ

Удисертаційнійроботівирішенонауковузадачувстановлення

закономірностейрегулярнихіхаотичнихрежимівколиваньстрижняз

закритичнимстатичнимстаномпридвохмодовійапроксимаціїзгинних

деформацій

Такимчиномназахистдисертаційноїроботивиносятьсянаступні

науковірезультати

Побудованіматематичнімоделінелінійнихрезонансних

параметричнихколиваньзакритичногострижняпридвохмодовійїх

апроксимаціїякаобумовленавнутрішнімрезонансомвласнихчастотта

результатамиекспериментальнихспостереженьякприурахуванні

початковихнапруженьтакіприїхвідсутності

Методамисучасноїтеоріїдинамічнихсистемвстановленіосновні

класирежимівусталенихколиваньвпобудованихмоделяхрегулярніта

хаотичні

АналізуючипоказникиЛяпуновафазовіпортретиспектральні

щільностіусталенихрежимівдоведеноіснуванняівизначенні

характеристикирегулярнихіхаотичнихрежимівмоделей

Показанощоурахуванняпочатковихнапруженьпризводитьдо

зменшеннячастотколиреалізуютьсяхаотичніусталенірежимитадо

зменшенняамплітудколиваньпотретійформі

Визначенітапроаналізованівласніформиівласнічастоти

згиннихколиваньстрижняіззакритичнимстатичнимстаномщоконсольно

закріплений

Показанощоефектистабілізаціїірезонанснихзгиннихколивань

стрижняіззакритичнимстатичнимстаномпідтверджуються

експериментальнимирезультатамиЕкспериментальноотриманічастоти

стабілізаціїдобреспівпадаютьзобрахованимипотеоретичномукритерію

стабілізаціїаналітичнопобудованомувроботахШамнііФрейсера