

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МЕЛІТОПОЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ БОГДАНА ХМЕЛЬНИЦЬКОГО



ШЕВЧЕНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 514.18

**ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСУ
ХИТНОЇ ПРУЖИНИ**

05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Мелітополь-2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій (м. Харків).

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Семків Олег Михайлович,
Національний університет цивільного захисту України (м. Харків), проректор-начальник відділу організації служби.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Карасв Олександр Гнатович,
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного (м. Мелітополь), завідувач кафедри сільськогосподарських машин;

кандидат технічних наук
Залевська Ольга Валеріївна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського» (м. Київ), доцент кафедри
автоматизації проектування енергетичних процесів та систем.

Захист відбудеться 28 вересня 2020 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 18.053.02 у Мелітопольському державному педагогічному університеті імені Богдана Хмельницького за адресою: 72312, м. Мелітополь, вул. Гетьманська, 20, ауд. 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького за адресою: 72312, м. Мелітополь, вул. Гетьманська, 20.

Автореферат розісланий «27» серпня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Д.В. Спирінцев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для пояснення складних явищ або процесів часто використовують наочні механічні інтерпретації. Зокрема, для коливальних процесів у якості моделей розглядають маятникові аналоги. Класичним прикладом вважається модель оберненого маятника з віброуючою точкою кріплення (маятник Капиці), яка надала фізичне пояснення цілому класу задач. Не менш вражаючі механічні інтерпретації пов'язані з іншим видом маятника. У ідеалізованому вигляді він складається з точкового вантажу маси m , прикріпленого до кінця невагомої пружини жорсткістю k і довжиною h у ненавантаженому стані. Інший кінець пружини закріплений нерухомо (або може вібрувати). Утворена в такий спосіб коливальна система має рухатися тільки у вертикальній площині, при цьому зберігаючи вісь пружини прямолінійною. Зазначений різновид маятника в літературі одержав назву *хитної пружини* (swinging spring). В даному випадку точковий вантаж одночасно приймає участь у двох видах коливань: подібних пружині – коли переміщається вздовж прямолінійної осі пружини, і подібних маятнику – коли здійснює коливання сумісно з її віссю. У поводженні такої коливальної системи були виявлені цікаві й глибокі фізичні закономірності. Мова йде про процеси із внутрішніми нелінійно пов'язаними представленнями різних коливальних компонентів. При цьому, що істотно, складові компоненти системи обмінюються енергією між собою. Використання хитної пружини приймається як парадигма вивчення таких нелінійних зв'язаних систем.

Особливе значення має дослідження умови виникнення стану резонансу хитної пружини. Тобто, коли частота (або період) позовжніх коливань точкового вантажу відрізнятиметься в кратну кількість разів від частоти (або періоду) його поперечних коливань. Переважна кількість можливих впроваджень зазначеного стану резонансу має безпосереднє відношення до порушення стійкості й керованості механічних виробів в процесі їх руху. Наприклад, при розрахунках переміщення корабля або літака необхідно враховувати обмін енергією між поперечними і шляховими (подовжніми) коливаннями як компонентами динамічної системи. В більшості випадків частоти цих коливань приймають як співвідношення 2:1.

Звичайно, стан резонансу хитної пружини виникає при певній комбінації значень маси вантажу, довжини пружини у ненавантаженому стані, жорсткості пружини, а також опису закону руху точки кріплення пружини. Але на стан хитної пружини ще мають впливати і початкові значення параметрів ініціювання коливань. В цьому можна переконатися, якщо резонанс інтерпретувати за допомогою траєкторії руху вантажу хитної пружини. Тому необхідно розробити ще не досліджений універсальний спосіб синтезу множини траєкторій залежно від параметрів хитної пружини і від параметрів ініціювання її коливань. Увагу слід зосередити на випадках, коли траєкторіями будуть періодичні криві, а також на важливих можливостях керувати різновидами резонансу. В цьому полягає актуальність обраної теми досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконане на кафедрі інженерної та аварійно-рятувальної техніки Національного університету цивільного захисту України Державної служби України

з надзвичайних ситуацій у період з 2016 по 2019 рр. відповідно до тематики досліджень університету, а також відповідно до плану науково-дослідної роботи за темою: «Запобігання надзвичайним ситуаціям природного і техногенного характеру шляхом раннього виявлення загроз» (№ ДР 0119U001008), у розробці якої автор брав участь, як співвиконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розробка методу геометричного моделювання резонансу хитної пружини на основі побудови траєкторії руху її вантажу з врахуванням як основних її параметрів, так і початкових умов виникнення коливань.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження необхідно було розв'язати такі *основні задачі*:

- здійснити аналіз літературних джерел з метою виявлення існуючих методів побудови періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини;
- визначити значення змінних параметрів, за яких траєкторія руху вантажу хитної пружини (у тому числі і з рухомим підвісом) матиме вигляд періодичної;
- побудувати фазові траєкторії функцій узагальнених координат хитної пружини і її різновидів та надати оцінки діапазону змін їх величин;
- охарактеризувати одержані геометричні форми траєкторій за допомогою відношення горизонтальних і вертикальних періодів коливань вантажу;
- скласти таблицю форм періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини, які відповідають обраним значенням жорсткості пружини та маси вантажу;
- описати процес руху хитної пружини з врахуванням перетікання горизонтальних коливань у вертикальні і навпаки, що характерно для резонансного стану хитної пружини;
- визначити множину траєкторій руху вантажу хитної пружини, яка відповідатиме заданим відношенням вертикальних і горизонтальних частот коливань вантажу;
- впровадити результати дисертаційного дослідження у практичну діяльність та в навчальний процес.

Об'єктом дослідження є процес побудови траєкторії вантажу хитної пружини (у тому числі і з рухомою точкою підвісу) з метою виявлення та аналізу її резонансу.

Предметом дослідження є геометричне моделювання періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини, залежно від заданих значень його маси, жорсткості та довжини пружини у ненавантаженому стані, а також від обраних початкових умов ініціювання коливань.

Методи дослідження. Розв'язання поставлених у дисертаційному дослідженні задач здійснювалося на базі методів геометричного моделювання, диференціальних рівнянь, аналітичної та обчислювальної геометрії, основних положень прикладної геометрії, а також за допомогою методів математичного моделювання та геометричного проектування.

Теоретична база досліджень. Теоретичним та практичним аспектам прикладної геометрії присвячено роботи вчених: Н.М. Аушевої, Ю.І. Бадаєва, В.Д. Борисенка, В.В. Ваніна, В.М. Верещаги, В.В. Гнатушенка, С.М. Ковальова, Ю. М. Ковальова, В.М. Корчинського, Л.М. Куценка, Є.В. Мартина, В.Є. Михайленка, В. М. Найдиша, А.В. Найдиша, В.М. Несвідоміна, С.Ф. Пилипаки, О.Л. Підгорного, В.

О. Плоского, Є.В. Пугачова, К.О. Сазонова, Г.Я. Тулученко, О.М. Семківа, А.Н. Хомченка, О.В. Шоман, В.П. Юрчука та їх учнів.

Розв'язанню класу задач, пов'язаних з резонансами хитних пружин, присвячено роботи вчених: Г.Т. Алдошина, Д.А. Булдакової, В.В. Вановського, М.Н. Заріпова, А.В. Кірюшина, А.А. Клименка, Ю.В. Міхлина, О.Г. Петрова, М.М. Шундерюка, А.В. Фомічова, С.П. Яковлева та їх учнів.

Наукова новизна одержаних результатів.

Уперше:

- розроблено спосіб обчислення значень параметрів та початкових умов, за яких траєкторія руху вантажу хитної пружини (у тому числі і з рухомою точкою підвісу) матиме вигляд періодичної;

- складено таблицю геометричних форм періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини, які відповідають обраним значенням жорсткості та маси;

- побудовано фазові траєкторії функцій узагальнених координат хитної пружини і її різновидів та надано оцінки діапазону змін їх величин та швидкостей руху вантажу;

- визначено множину траєкторій руху вантажу хитної пружини, яка відповідатиме заданим відношенням вертикальних і горизонтальних частот коливань вантажу (для прикладу – 2:1, 7:3, 9:4 і 11:2);

Удосконалено:

- спосіб визначення чисел, які характеризують одержані геометричні форми періодичних траєкторій руху, і які відповідають даному відношенню горизонтальних і вертикальних періодів коливань вантажу.

Отримав подальшого розвитку:

- розв'язок класу задач, пов'язаних з процесом руху хитної пружини з врахуванням перетікання горизонтальних коливань у вертикальні і навпаки, що характерно для резонансного стану хитної пружини.

Обґрунтованість і достовірність результатів підтверджується зіставленням результатів тестових прикладів із близькими за змістом, комп'ютерною візуалізацією змодельованого руху вантажу хитної пружини у режимі комп'ютерної анімації за створеними алгоритмами, а також впровадженнями в навчальний процес. Основні положення роботи опубліковані в журналі [1], включеного до наукометричної бази SCOPUS, де здійснено рецензування коректності результатів з позицій технічної механіки. Основні положення дисертації проілюстровано засобами комп'ютерних анімацій [23].

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що проведені дослідження створюють передумови для розробки геометричних моделей задач, розв'язки яких можна пояснити за допомогою хитної пружини. Коливання хитних пружин мають відношення до динаміки літаків і кораблів. Вони дозволяють змодельовувати ефекти порушення стійкості й керованості швидкохідних кораблів і надзвукових літаків. Хитні пружини мають відношення до розрахунку конструкцій висячих мостів, вантово-балкових систем, канатних доріг, космічних тросових системи для втримання об'єктів, гнучких шлангів, різноманітних антен, тощо.

Результати передано для впровадження на підприємства:

– ТОВ «Харківський завод підйомно-транспортного устаткування» (акт від 05.02.2020, м. Харків) для моделювання вітрового навантаження на вантажних канатних дорогах з метою передбачення можливих амплітуд коливання дротів або тросів, на які діють пориви вітру;

– «Аякс» (акт від 19.02.2020, м. Харків) для розробки проектної документації нового будівництва заводу по виробництву пінополіуретану з метою розрахунків подрібнення газових бульбашок у рідині за рахунок коливальних імпульсів тиску;

– «Пожтехніка Україна» (акт від 28.01.2020, м. Харків) для розробки експериментального пожежного сповіщувача, призначеного для визначення ознак виникнення пожежі шляхом виявлення часток диму.

Результати також впроваджено в освітній процес Національного університету цивільного захисту України (акт від 19.02.2020, м. Харків) – на кафедрі інженерної та аварійно-рятувальної техніки для ознайомлювальних лекцій при викладанні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» в рамках освітніх програм «Пожежна безпека», «Цивільний захист» та «Охорона праці».

Особистий внесок здобувача. Визначення загального напрямку дисертаційного дослідження, формулювання його мети та окреслення кола задач належить науковому керівнику. Усі положення, що виносяться на захист і складають наукову новизну дисертаційної роботи, отримані особисто здобувачем і наведені в роботах [1–20]. У публікаціях, які підготовлені за участю співавторів, результати, що належать здобувачеві, зазначені в списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Дисертаційна робота в цілому, а також її основні результати доповідались та обговорювались на таких наукових конференціях і семінарах: на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Прикладна геометрія та інформаційні технології в моделюванні об'єктів, явищ і процесів» (м. Миколаїв, 2016 р.) [13]; VI International Scientific and Practical Conference, Osaka, Japan, 2020 [14]; V International Scientific and Practical Conference, Lviv, Ukraine, 2020 [15]; VII International Scientific and Practical Conference, Liverpool, United Kingdom, 2020 [16]; на XI Міжнародній науково-практичній конференції "Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій" (м. Черкаси, 2020) [17]; на XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (м. Мелітополь, 2017 р.) [18]; на XX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (м. Мелітополь, 2018 р.) [19]; на XXI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (м.

Мелітополь, 2019 р.) [20]; на VI Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених» (м. Київ, 2017 р.) [21]; на круглому столі «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням» (м. Харків, 2019 р.); на Міжнародній науково-практичній конференції «Графічні технології моделювання об'єктів, процесів та явищ» (м. Одеса, 2020 р.) [22].

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 22 наукових праці: 8 статей у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних (у тому числі одна у виданні, що входить до наукометричної бази SCOPUS), 4 статті у наукових фахових виданнях України, одна не фахова стаття, а також опубліковано 9 тез доповідей на конференціях. Серед опублікованих праць 10 виконано одноосібно.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 183 сторінки друкованого тексту, що включає 84 рисунки, 3 додатки на 22 сторінках. Обсяг основної частини дисертації становить 161 стор. Список використаних джерел нараховує 152 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз літературних джерел за темою дисертаційного дослідження з метою виявлення існуючих моделей та способів побудови періодичних траєкторій вантажу хитних пружин.

Перевагу було надано способу проекційного фокусування, який запропонував О.М. Семків. На рис.1 наведено схему хитної пружини. В якості узагальнених координат обрано кут відхилення $u(t)$ осі і величину $v(t)$ подовження пружини.

Вважається, що хитна пружина з масою m вантажу має жорсткість k і довжину h у ненавантаженому стані. Необхідно визначити набір цих значень, коли вантаж рухався б по пер

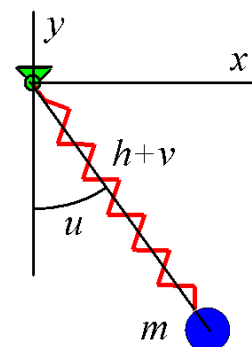


Рис.1. Схема хитної пружини

далі прийняті умови ідеалізації.

Віртуальні координати точкового вантажу обчислимо за формулами:

(1)

Складання диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду:

(2)

виконано з використанням Лагранжіана:

(3)

Для прикладу оберемо числові значення $g=9,81$; $k=30$ і $h=1$. Також назначимо початкові значення для кута відхилення пружини: $u(0)=0$ і $du(0)=1,5$, і для подовження пружини: $v(0)=1$; $dv(0)=0$. В якості керуючого параметра буде значення маси m . На рис. 2 зображено вигляд фазових траєкторій для знайденого критичного значення $m_0=3,332$. Після обчислення m_0 необхідно його формально підставити на місце m в систему рівнянь Лагранжа другого роду (2) і чисельно розв'

язати її методом Рунге-Кутти відносно функцій $u(t)$ і $v(t)$. Тоді на площині Oxu можна побудувати наближене зображення траєкторії вантажу хитної пружини (рис. 3).

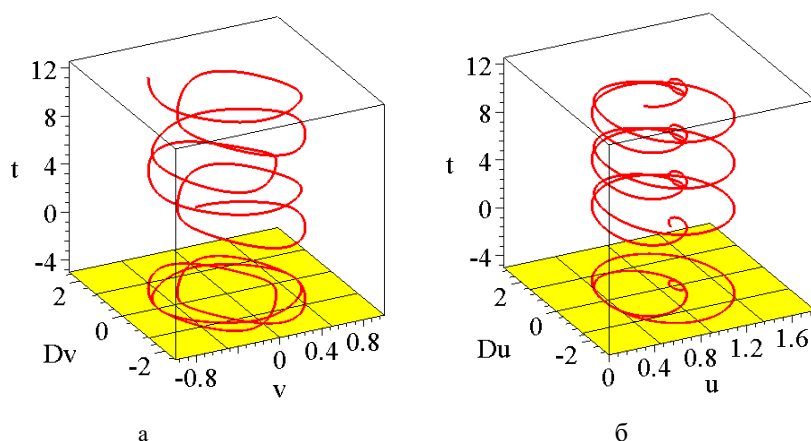


Рис. 2. Інтегральна крива: а) не сфокусована
б) сфокусована для критичного значення $m=3,332$

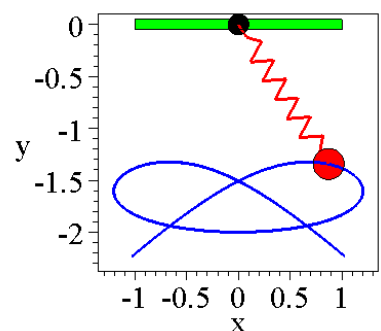


Рис. 3. Траєкторія руху вантажу хитної пружини

В результаті проведеного аналізу літературних джерел не було виявлено розв'язані питання за темою дисертації та не знайдено досліджень стосовно розрахунку періодичних траєкторій переміщення вантажу хитної пружини з рухомою точкою підвісу, а також стосовно табличного представлення геометричних форм періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини залежно від її параметрів.

У другому розділі роботи розглянуто випадки руху вантажу хитної пружини, коли задана функція опису коливання точки підвісу вздовж осей Ox або Oy .

Нехай точка підвісу хитної пружини рухається вздовж осі Ox за законом $x=f(t)$. Тоді координати рухомого точкового вантажу можна обчислити за формулами (1). Лагранжіван задамо як різницю кінетичної і потенціальної енергій ($g=9,81$):

(4)

Систему рівнянь Лагранжа другого роду одержуємо у вигляді:

(5)

Визначимо значення маси m , яка б періодично рухалася б по траєкторії переміщення вантажу хитної пружини жорсткістю k і довжиною h у ненавантаженому стані. Нехай $k=50$ і $h=2$. Закон руху точки кріплення задамо функцією $f(t)=\sin(2t)$. В якості параметра оберемо значення маси m вантажу.

Чисельним методом Рунге-Кутти розв'язуємо систему рівнянь (5) із початковими умовами $u(0)=0$; $du(0)=1$; $v(0)=2$; $dv(0)=0$. На рис. 4 зображено інтегральні криві у фазових просторах $\{u, Du, t\}$ і $\{v, Dv, t\}$ для знайденого

критичного значення $m=5,142$. Час інтегрування $T=16$. Бачимо, що внаслідок суттєвої не лінійності задачі фазові траєкторії не вдається сфокусувати як у попередньому прикладі. Тому одержану траєкторію руху вважатимемо умовно періодичною. В результаті виконання наведених вище дій знайдемо наближене зображення на площині Oxu траєкторії руху вантажу (рис. 5).

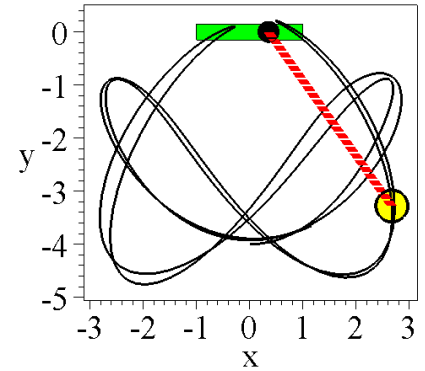
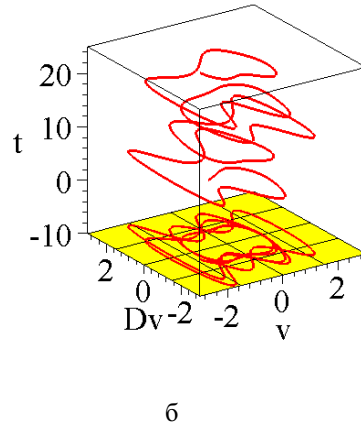
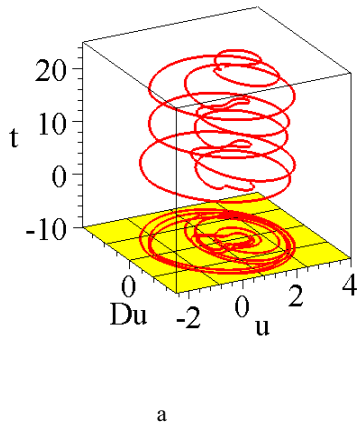
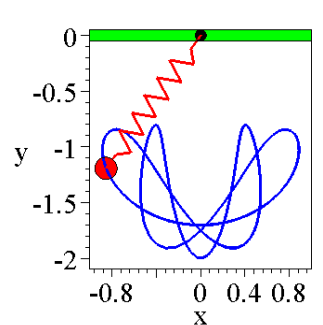
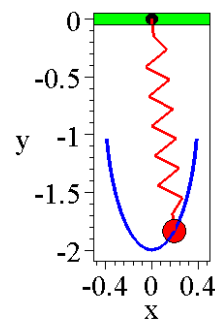
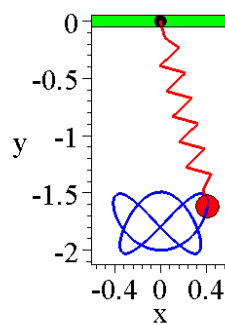
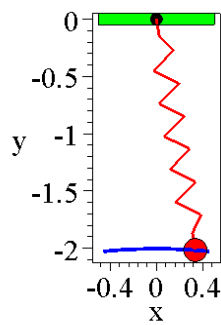
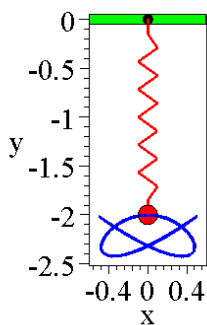


Рис. 4. Інтегральні криві: а) у фазовому просторі змінної $u(t)$; б) у фазовому просторі змінної $v(t)$, які сфокусовані для критичного значення $m=5,142$

Рис. 5. Траєкторія руху вантажу хитної пружини з рухомою точкою підвісу

Зазначимо, що у випадках умовно періодичних траєкторій спосіб О.М. Семківа рекомендує скористатися графіком насиченості зображення лінії фазової траєкторії. Мінімальна кількість пікселів зображення досягається при $m_0=5,142$.

Далі наведено спосіб складання таблиці геометричних форм періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини залежно від її параметрів. При цьому вдалося систематизувати коливання хитних пружин. Спочатку визначимо значення жорсткості k пружини, яка б забезпечила періодичну траєкторію переміщення вантажу маси m хитної пружини довжиною h у ненавантаженому стані. Початкові значення для кута $u(0)=0$; $du(0)=0,5$, а для подовження пружини $v(0)=1$; $dv(0)=0$. В результаті обчислюємо миттєві положення хитної пружини і періодичні траєкторії руху вантажу масою $m=1$ (рис. 6) залежно від значень коефіцієнта жорсткості k .



а

б

в

г

д

Рис. 6. Періодичні траєкторії вантажу на пружині для:
а) $k=7,99$; б) $k=9,55$; в) $k=12,67$; г) $k=18,12$; д) $k=22,96$

В роботі також одержано зображення фазових траєкторій функцій узагальнених координат, відповідних періодичним траєкторіям рис. 6. За допомогою

фазових траєкторій було визначено діапазони зміни функцій узагальнених координат, а також швидкостей їх зміни.

Наведено класифікацію періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини. Ідентифікувати форму періодичних траєкторій доцільно за допомогою періодів

вертикальних і горизонтальних коливань вантажу.

В табл. 1 наведено значення відношення горизонтальних періодів коливань до вертикальних залежно від геометричної форми траєкторій руху для періодичних траєкторій (рис. 6). Також наведено значення мас вантажів m для відповідних значень коефіцієнта жорсткості k .

Таблиця 1.

Значення мас вантажів для періодичних траєкторій,
відповідних жорсткостям k

Форма траєкторії	Значення коефіцієнтів жорсткості						Значення відношень періодів
	7.99	9.5	12.67	18.12	22.96	28.87	
	0.276	0.33	0.44	0.63	0.8	1	1.71
	0.35	0.415	0.554	0.793	1	1.25	1.525
	0.44	0.23	0.7	1	1.26	1.58	1.36
	0.63	0.75	1	1.423	1.8	2.27	1.14
	0.83	1	1.32	1.9	2.4	3	0.986
	1	1.18	1.58	2.26	2.85	3.6	0.9

Для того, щоб визначити допустиме значення маси m для довільного $10 < k < 35$ з метою одержати певну траєкторію вантажу запропоновано інтерполяційну формулу. Цим проілюстровано можливість не лише побудувати періодичну траєкторію, але і обрати одну з них, тобто було розв'язано, у певному розумінні, обернену задачу визначення періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини.

У третьому розділі дисертаційної роботи розглянуто опис процесу «перетікання» енергії під час коливань хитної пружини в стані її резонансу типу 2:1.

Розглянуто хитну пружину з вантажем масою m , жорсткістю k і довжиною L_0 у ненавантаженому стані. На декартовій площині Oxy позначимо через $X(t)$ і $Y(t)$ координати відхилення в часі t вантажу від положення рівноваги. При такому відхиленні потенціальна енергія виростає на величину:

(6)

Коли X і Y менші миттєвої довжини L , то вираз (6) наближено дорівнюватиме

(7)

плюс інші складові, які характеризуються більш високими ступенями відхилень. Величини U_Y і U_X – це потенціальні енергії, які виникають внаслідок вертикальних

і горизонтальних коливань. А величина U_{XY} – це особлива добавка, яка породжує взаємодію між зазначеними коливаннями. Завдяки такій взаємодії коливання по вертикалі впливатимуть на горизонтальні коливання й навпаки.

Після введення нових позначень U_X , U_Y і U_{XY} система рівнянь коливань по горизонталі й вертикалі матиме вигляд:

(8)

Без правих частин в рівняннях (8) одержуємо описи незалежних коливань по вертикалі й горизонталі із частотами ω_Y і ω_X . А добавки в правих частинах вказують на існування сили, яка змушує додатково розгойдувати коливання. Якщо частоти ω_Y і ω_X довільні, то ця сила мала і не виявляється ні в якому істотному ефекті. Але якщо виконується співвідношення $\omega_Y = 2\omega_X$, то настає стан резонансу. Адже сила, яка є рушієм коливань, для обох типів коливань містить компоненту з тією же частотою, що й саме коливання. У результаті ця сила сприятиме розгойдуванню одного типу коливань і придушенню іншого типу. Саме так горизонтальні й вертикальні коливання перетікають одне у інше.

Наведемо приклад, який ілюструє зазначений ефект. Для цього оберемо значення параметрів хитної пружини, які б наближено задовольняли стану її резонансу. Наприклад, $m=0,35$; $k=150$; $L_0=0,1$. Тоді $\omega_Y/\omega_X=2,09$. Тобто умова виникнення резонансу типу 2:1 виконується. Повну довжину пружини оберемо $L=0,5$. Систему диференціальних рівнянь (8) розв'язуємо чисельно методом Рунге-Кутта. Графіки будуємо за допомогою 5000 одержаних точок. В якості прикладу оберемо такі початкові умови: $x_0=0$; $\dot{x}_0=0,25$; $y_0=-0,2$; $\dot{y}_0=0$. На рис. 7 наведено траєкторію руху точки з координатами $X(t)$, $Y(t)$ за час $T=35$. На рис. 8 зображено графіки відхилень вантажу для відповідних координат. На рис. 9 наведено графіки потенціальних енергій для коливань вздовж відповідних координат, а також графік добавки, яка породжує взаємодію між зазначеними коливаннями.

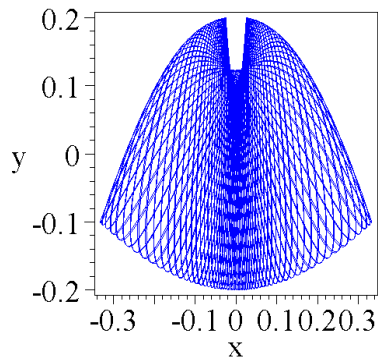
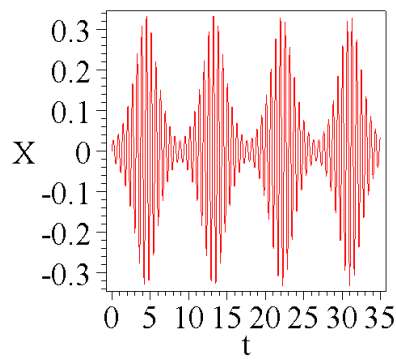
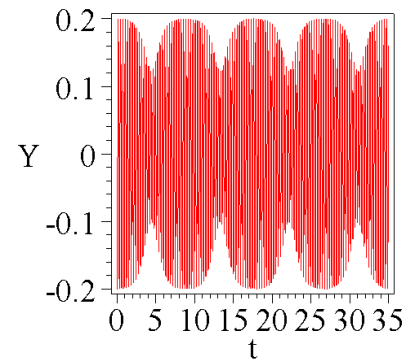


Рис. 7. Траєкторія руху вантажу

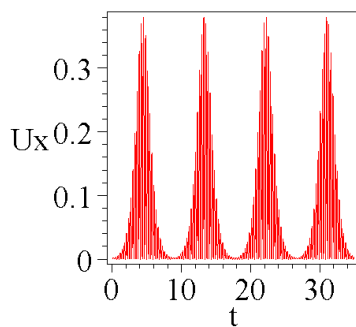


а

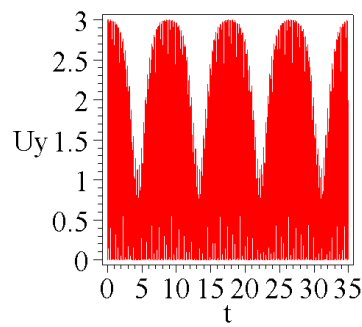


б

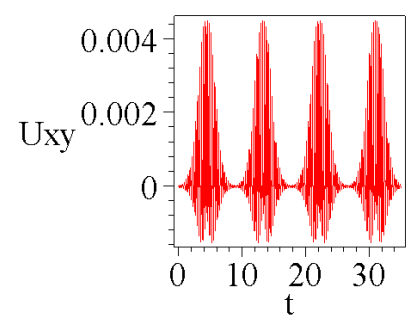
Рис. 8. Графіки відхилень вантажу:
а) для координати X; б) для координати Y



а



б



в

Рис. 9. Графіки потенціальних енергій для: а) коливань вздовж координати X; б) коливань вздовж координати Y; в) добавки, яка породжує взаємодію між зазначеними коливаннями

Далі розглянемо спосіб керування резонансом періодичних траєкторій вантажу.

На першому етапі для обраного типу резонансу за допомогою складеної програми визначаються значення параметрів m, h, k , які б забезпечили цей резонанс. Нехай точковий вантаж має координати (X_0, Y_0) . Тоді критерій існування резонансу базується на зображенні двох графіків функцій $X(t)$ і $Y(t)$, які описують відстань точкового вантажу до відповідних координатних осей.

На другому етапі обирається один з параметрів (наприклад Y_0 або DY_0) у якості змінної величини. Далі у вигляді комп'ютерної анімації будується множина траєкторій руху вантажу, залежно від параметра Y_0 . В результаті обираються значення параметра Y_0 , які відповідають періодичним траєкторіям руху вантажу хитної пружини, зображених на відповідних кадрах анімації.

Наприклад, нехай $x_0=0,6$; $Dx_0=0$; $Dy_0=0$, а параметр y_0 змінюється в межах $0,1 < y_0 < 0,6$. На рис. 10 наведено вигляд двох графіків відхилень точки від відповідних

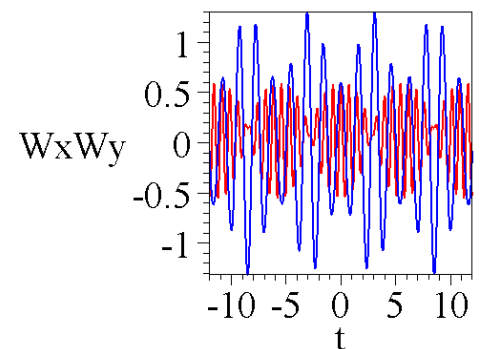


Рис. 10. Графіки відхилень точки від відповідних осей для $y_0=0,6$

осей для $y_0=0,6$. За допомогою обрання значення параметра y_0 можна досягти того, що траєкторія матиме вигляд періодичної кривої.

На рис. 11 зображено знайдені варіанти розв'язків, коли траєкторія руху вантажу хитної пружини буде періодичною. Отже, особливість керування резонансом хитної пружини полягає у врахуванні початкових умов виникнення коливань. З'являється можливість вибору різновиду резонансу, керуючись графічними характеристиками траєкторії хитної пружини. Наприклад, з врахуванням довжини траєкторії або щільності пікселів, що її зображують. Особливо цікаві траєкторії руху вантажу у вигляді обмеженої дуги кривої, або ті, що заповнюють певні області площини Oxy .

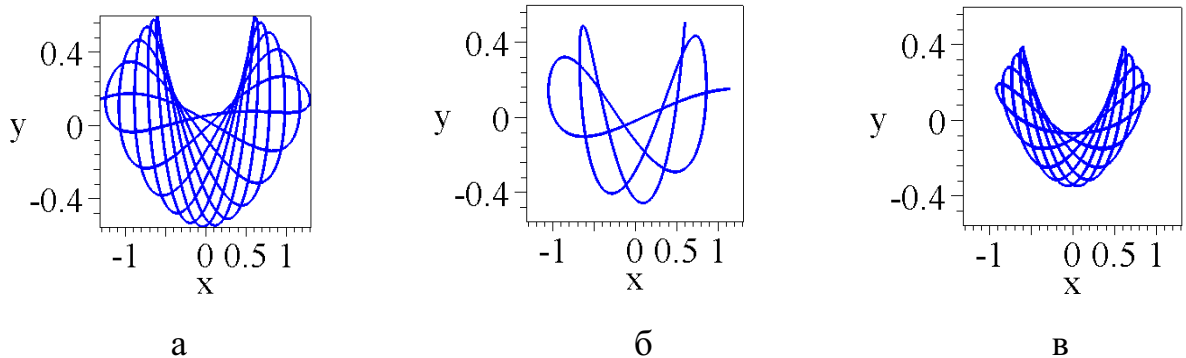


Рис. 11. Варіанти періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини: а) $y_0=0,6$; б) $y_0=0,5$; в) $y_0=0,39$

У четвертому розділі дисертаційної роботи розглядається розв'язання практичних задач аварійно-рятувальних служб.

Задача 1. Моделювання траєкторії точки на дроті електропередачі в умовах поривів вітру.

Розглядається модель коливання прольоту лінії електропередачі в умовах поривів вітру. Для цього обрано уявну площину, розташовану по нормалі до напрямку прольоту (нормальну площину). На площині оберемо точку, що є слідом перетину дроту лінії електропередачі (рис. 12). В роботі наведено спосіб побудови траєкторії обраної точки за умови, що на дрід впливають пориви вітру.

Особливість досліджень полягає у використанні для цього механічного аналогу – хитної пружини. Доцільність вибору такого аналогу пояснюється необхідністю вивчення динамічної системи «провід в поривах вітру», нелінійно зв'язані коливальні компоненти обмінюються енергією між собою. Дійсно, у випадку коливання точки на дроті (у

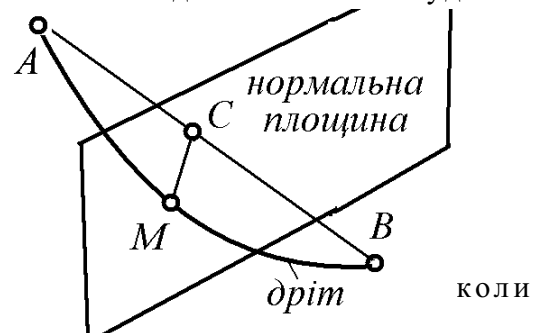


Рис. 12. Нормальна площина та хитна пружина СМ (у нормальній площині) відбувається обмін енергіями між поперечними (горизонтальними) і поздовжніми (вертикальними) коливаннями точки. Цей феномен можна дослідити за допомогою математичного апарату хитної пружини. При цьому особливе значення має можливість дослідження стану резонансу. Для провідів резонанс настає тоді, коли у нормальній площині частота горизонтальних коливань відрізняється в два рази від частоти вертикальних коливань точки на дроті.

Розглянемо на нормальній площині з декартовими координатами Oxy коливальну систему типу «хитна пружина». Нехай пряма, натягнута між точками A і B кріплення дроту, перетинає площину в точці C (рис.12), яка вважається нерухомою. Слід провисаючого дроту на площині позначимо як M . Тоді відрізок CM буде умовним зображенням хитної пружини закріпленої в точці C із вантажем в точці M . Жорсткість пружини позначимо як k , через h позначимо довжину пружини без вантажу, масу вантажу позначимо m , а через H – довжину пружини з вантажем у рівноважному (вертикальному) стані, $g=9,81$ – прискорення земного тяжіння. Точка M в момент часу t матиме координати $M(x(t); y(t))$.

Необхідно побудувати траєкторію руху по нормальній площині вантажу хитної пружини та визначити стан її резонансу залежно від її жорсткості.

В розділі 2 показано, що рівняння руху хитної пружини може мати вигляд:

(9)

де Частота ω_x визначає коливання точкової маси горизонтально, а значення ω_y описує частоту по вертикалі. Якщо $\lambda=0$, то рівняння (9) описують незалежні коливання точки.

Далі слід зіставити параметри фізичних характеристик дротів з параметри хитної пружини. Маса вантажу m логічно пов'язати з приведеною масою дроту, через h позначити довжину проекції на нормальну площину дроту у спокої, а через H – довжину проекції дроту на нормальну площину, який вже знаходиться у навантаженому вітром стані. При цьому, (x_0, y_0) – початкові координати рухомої точки на нормальній площині, а Dx_0 і Dy_0 – заподіяні поривом вітру початкові швидкості рухомої точки вздовж відповідних осей координат. Змінною обрано жорсткість k , яку можна пов'язати з фізико-механічними характеристиками дроту.

В якості тесту розв'яжемо систему рівнянь (9) з такими значеннями параметрів: $h=5$; $H=9$; $m=9,81$, та з початковими умовами: x_0 Dx_0 y_0 ; Dy_0

На рис. 13 – 15 зображено траєкторії руху (позиції «а») по нормальній площині вантажу хитної пружини (що є слідом дроту) та графіки відстані рухомої точки до відповідних координатних осей (позиції «б» і «в») при жорсткостях k .

Там же наведено обчислене відношення , яке визначає резонанс за умови, коли ω_x і ω_y - частоти коливань точки по горизонталі і вертикалі. При $k \rightarrow 0$, що вказує на резонанс хитної пружини (і дроту).

Для перевірки скористаємося відомим результатом¹. Систему рівнянь (9) там розв'язано з умовами: $h=0,6614$ м; $H=0,82$ м; $m=0,0485$ кг; $k=3$ Н/м; $g=9,81$ м/с², $x_0=0$ м; $Dx_0=0,78$ м/с; $y_0=-0,1$ м; $Dy_0=0$ м/с. На рис. 15 зображено траєкторію руху (позиція «а») та графіки відстані точки до координатних осей (позиції «б» і «в»), які близькі відомим результатам. При цьому, , що не є резонансом.

Peng Zhang, Liang Ren, Hongnan Li, Ziguang Jia, and Tao Jiang. Control of Wind-Induced Vibration of Transmission Tower-Line System by Using a Spring Pendulum / Hindawi Publishing Corporation Math. Problems in Engineering. Volume 2015, Article ID 671632, pp. 1-10.

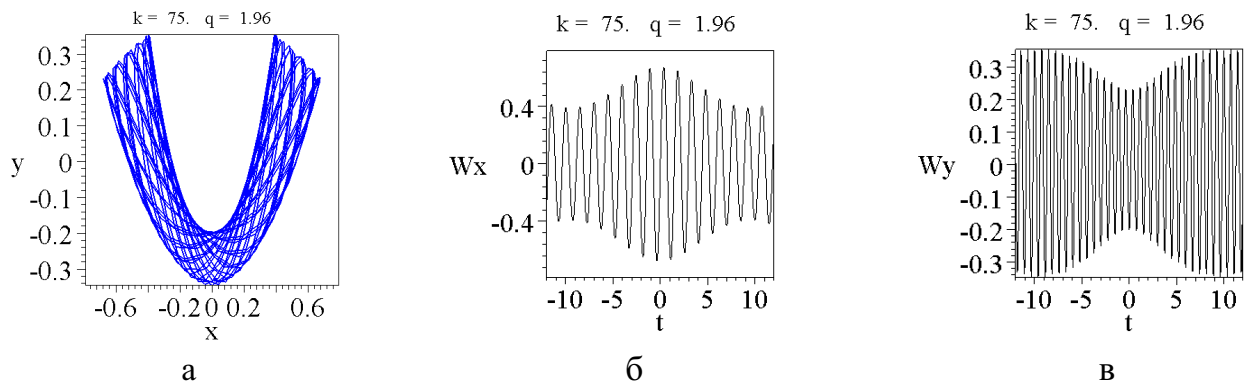


Рис. 13. Зображення: траєкторії (а) і графіків відстаней до осі Ox (б) і осі Oy (в) при значеннях параметрів $kq96$

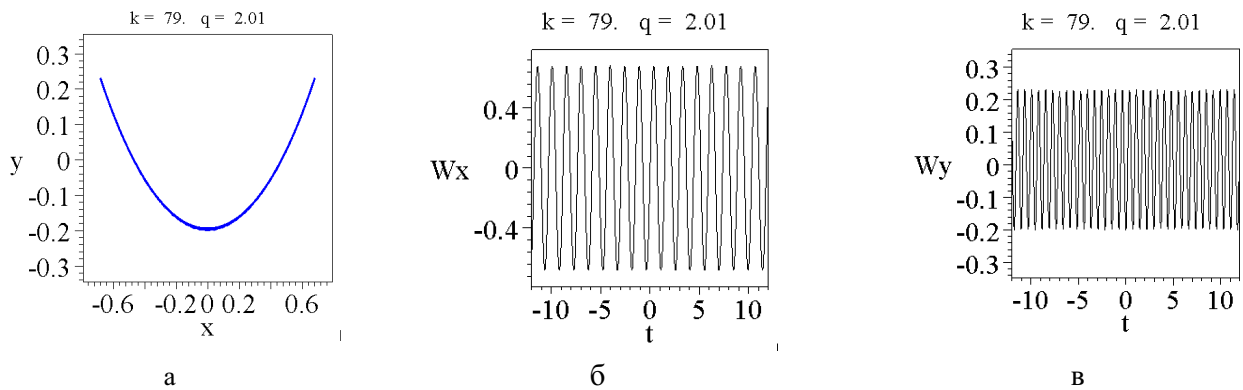


Рис. 14. Зображення: траєкторії (а) і графіків відстаней до осі Ox (б) і осі Oy (в) при значеннях параметрів kq

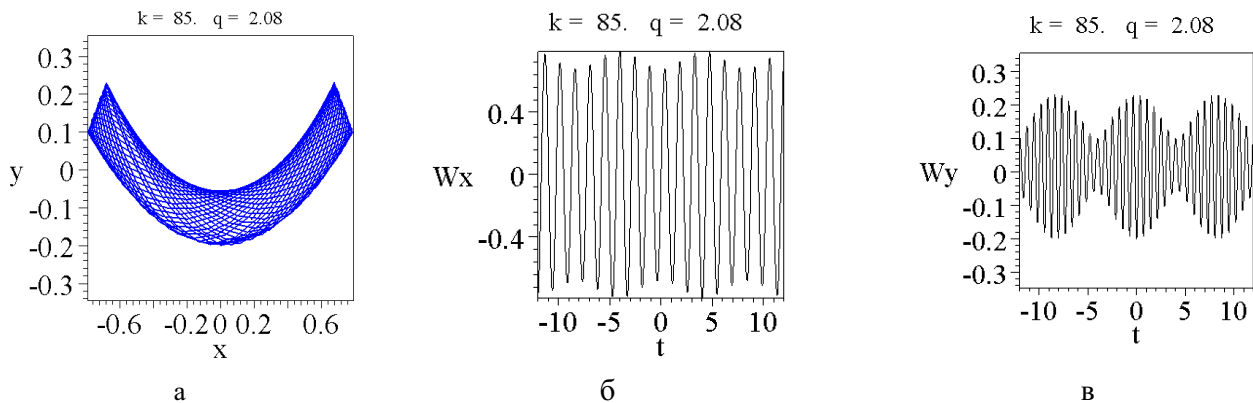


Рис. 15. Зображення: траєкторії (а) і графіків відстаней до осі Ox (б) і осі Oy (в) при значеннях параметрів kq

На рис. 16 зображені результати, одержані у роботі авторів Peng Zhang та інш. Ми уточнили цей результат. Для цього знайдено значення $k=3$ Н/м. В цьому випадку одержимо , що ближче до стану резонансу. На рис. 17 наведено траєкторію руху та графіки відстані точки до координатних осей для k

Отже, побудована траєкторія руху по нормальній площині вантажу хитної пружини дозволяє аналізувати коливання дроту під поривами вітру, а також опосередковано визначити стан резонансу дротів на основі аналогії їх коливань з коливаннями хитної пружини.

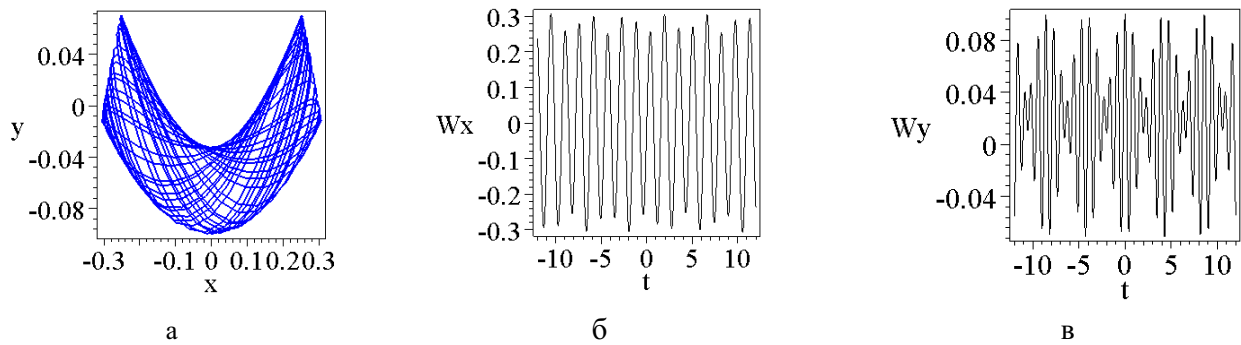


Рис. 16. Зображення: траєкторії (а) і графіків відстаней до осі Ox (б) і осі Oy (в), одержані в роботі авторів Peng Zhang та інш.

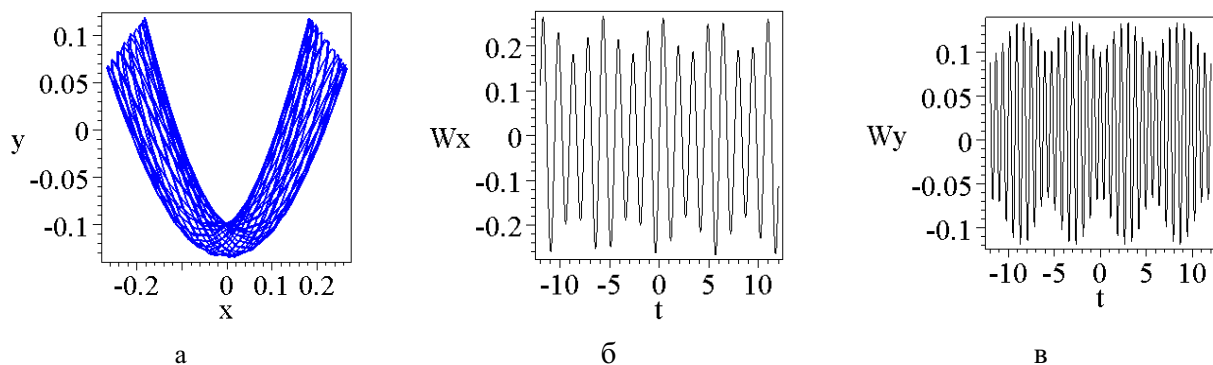


Рис. 17. Зображення: траєкторії (а) і графіків відстаней до осі Ox (б) і осі Oy (в), одержані для k

Результати використані на підприємстві ТОВ «Харківський завод підйомно-транспортного устаткування» при моделюванні вітрового навантаження на вантажних канатних дорогах для передбачення можливих амплітуд коливання дротів або тросів, на які діють пориви вітру.

Задача 2. Моделювання процесу роздрібнення газової бульбашки на основі його аналогії з хитною пружиною.

Гасіння газорідними сумішами пожеж у вертикальних резервуарах, що містять легкозаймисті рідини, повинно супроводжуватись постійним роздрібнюванням у цих сумішах газових бульбашок. Відомі роботи, у яких запропоновано резонансну модель подрібнення газової бульбашки в рідині у нестационарному полі тиску.

Резонансне дроблення бульбашки в рідині здійснюється за рахунок перекачування енергії між радіальною і деформаційною модами коливань. При цьому спостерігається цікавий ефект – при відносно невеликій амплітуді змінного тиску акустичної хвилі у рідині розвивається досить велика амплітуда деформаційних коливань – завдяки якій і здійснюється дроблення бульбашки.

Доцільність вибору хитної пружини як аналогу пояснюється необхідністю вивчення роздрібнення бульбашки за умови, що нелінійно зв'язані коливальні компоненти обмінюються енергією між собою. У бульбашки відбувається обмін енергіями між радіальними і деформаційними коливаннями. Цей факт в даній роботі досліджується за допомогою математичного апарату хитної пружини, де аналогічно здійснюється обмін енергіями між поперечними (маятниковими) і поздовжніми (

пружинними) коливаннями. Необхідно розробити інженерний спосіб унаочнення процесу роздрібнення сферичної газової бульбашки з використанням хитної пружини, як аналогу цього процесу.

Використаємо спосіб О.М. Семківа, для визначення періодичної траєкторії вантажу хитної пружини з рухомою точкою кріплення. Зображення пружини аналогічне рис. 1, але з позначенням закон руху точки кріплення у вигляді функції $y=f(t)$. Також задані маса m вантажу, жорсткість k пружини, початкова довжина h пружини у ненавантаженому стані, а також початкові умови виникнення коливань.

У якості узагальнених координат оберемо значення кута $u(t)$, який вісь хитної пружини утворює з вертикальною віссю Oy , а також величину $v(t)$, пов'язану зі зміною довжини пружини в часі. Координати точкового вантажу обчислимо так:

(10)

Лагранжіан задамо як різницю кінетичної і потенціальної енергій:

(11)

В результаті маємо систему рівнянь Лагранжа другого роду:

(12)

Для прикладу розглянемо хитну пружину з параметрами $mk=202,8$; $h=2,5$ і з початковими умовами $u(0)=2,5$; $du(0)=0$; $v(0)=0$; $dv(0)=3$. Закон руху точки кріплення задамо функцією $y=0,25\sin(t)$. Всі величини в умовних одиницях. Ці параметри обрано так, щоб хитна пружина була в стані резонансу. Чисельним методом Рунге-Кутти розв'язуємо систему рівнянь (12) відносно функцій $u(t)$ і $v(t)$. Для побудови траєкторії руху вантажу хитної пружини слід у виразі (1) віртуальних координат (x, y) підставити одержані розв'язки системи (12). В результаті знайдемо графіки відстаней від рухомої точки до відповідних координатних осей (рис. 18 і рис. 19), а також наближене зображення траєкторії руху вантажу хитної пружини з рухомою точкою кріплення (рис. 20). Графіки відстаней показують, що періоди горизонтальних коливань приблизно у два рази більше періодів вертикальних коливань. Це вказує на стан резонансу хитної пружини. Це підтверджує і періодична траєкторія руху її вантажу.

Об'єднаймо задачу про дроблення газової бульбашки з задачею про хитну пружину. При виведенні з рівноважного стану газової бульбашки виникають коливання, які можна розділити на два класи – радіальні, пов'язані зі зміною об'єму при незмінній (сферичній) формі, і деформаційні, зумовлені зміною геометричної форми. Для побудови аналогії процесу дроблення газової бульбашки з коливанням хитної пружини необхідно встановити зв'язок між їх компонентами.

А саме – радіальній моді коливань бульбашки нехай відповідає координата точкового вантажу пружини по вертикалі, а деформаційній моді – координата по горизонталі. Вібрації точки підвісу пружинного маятника відповідає змінний тиск в

рідині, який генерується поза рідиною з метою дроблення бульбашки.

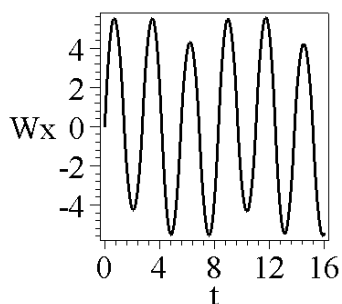


Рис. 18. Графік відстаней до осі Oy

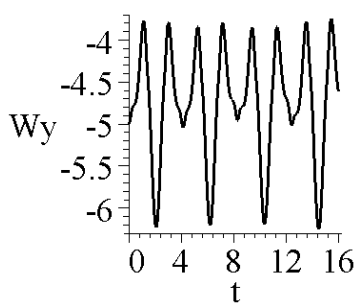


Рис. 19. Графік відстаней до осі Ox

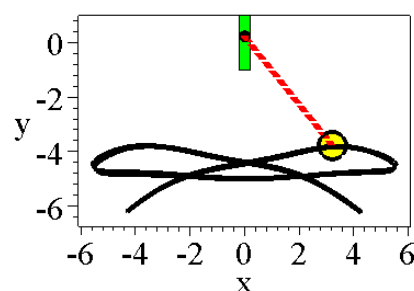


Рис. 20. Траєкторія вантажу хитної пружини

У резонансному випадку радіальна і деформаційні моди коливань періодично міняються місцями, і енергія однієї моди переходить в іншу, чим і обумовлена цікавість до феномену хитної пружини. При перекачуванні енергії радіальних коливань амплітуда резонансної деформаційної моди коливання бульбашки аномально різко зростає, що дає змогу роздрібнити бульбашка в рідині при порівняно малих енергетичних витратах на генерування змінного зовнішнього акустичного поля тисків. Тобто при відносно невеликій амплітуді тиску акустичної хвилі розвивається досить велика амплітуда деформаційних коливань, завдяки чому і відбувається дроблення газової бульбашки.

Позначимо радіальну і деформаційну моди коливань як r і d , відповідно. Тоді для побудови певних фаз процесу роздрібнення газової бульбашки можна використати вираз:

$$\dots, \quad (13)$$

де $\dots$; $\dots$.

Адже мода коливань описує цілий клас перетворень. У нашому випадку – всі можливі радіальні коливання, а також всі можливі деформаційні коливання.

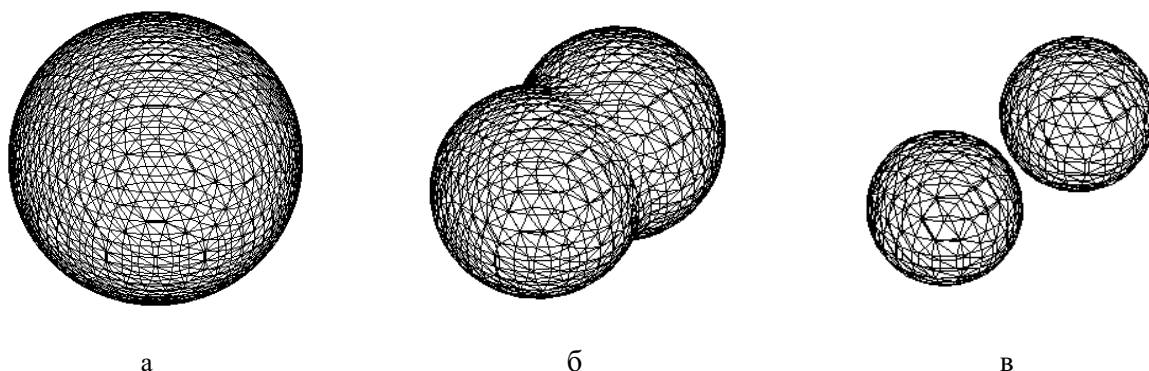


Рис. 21. Геометрична модель фаз роздрібнення бульбашки ($r=0,5$): а) початкова ($d=0$); б) проміжна ($d=0,5$); в) заключна ($d=1$)

Резонансний стан хитної пружини (рис. 20 та коментарі до нього) дозволяє визначити значення радіальної і деформаційної мод коливань. На рис. 21 наведено

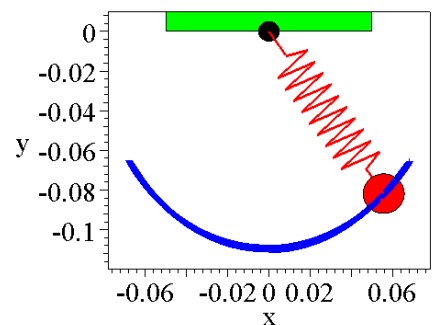
зображення певних фаз процесу роздрібнення для $r, 5$ і d

Результати використані на підприємстві «Аякс» при розробці проектної документації нового будівництва заводу по виробництву пінополіуретану для розрахунків подрібнення газових бульбашок у рідині за рахунок імпульсів тиску.

Задача 3. Спосіб розрахунку відбивача пожежного сповіщувача диму з наносенсорним чутливим датчиком.

Сучасні розробки сповіщувачів диму використовують композиційні наноматеріали, що визначають основу нового типу хімічних сенсорів «електронний ніс». Принцип дії наносенсорних чутливих датчиків заснований на зміні електропровідності наноплівки композиційної під дією парів речовини. Для підвищення ефективності дії сповіщувачів диму з наноконпозиційними матеріалами доцільно доповнити їх конструкції пристроями (відбивачами) для концентрування часток диму на чутливій поверхні наносенсорного датчика. У випадку рухомого відбивача, на який діють вібрації, його геометрична форма може змінюватися. Це позначиться на якості фокусування.

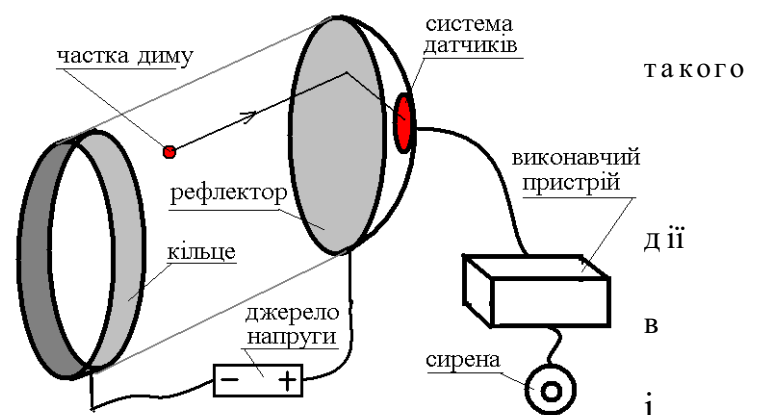
Для усунення цього недоліку пропонується така гіпотеза. У випадку рухомого відбивача стабільність форми його профілю для



наносенсорного чутливого датчика можна побачити на рис. 22. Форма відбивача для резонансу 3:1 періодами вертикальних і горизонтальних коливань хитної пружини. Наприклад, резонанс 3:1 можна забезпечити при $h=0,1$; $m=0,18$ і $k=150$. Тоді періоди мають

значення T_1 і T_2 , відношення яких дорівнює 2, 9146, що наближено визначає резонанс 3:1. На рис. 22 наведену хитну пружину, траєкторія вантажу якої окреслює профіль відбивача, стійкого до резонансу.

На рис. 23 наведено можливу схему наносенсорного сповіщувача диму. Принцип його полягає у такому. Частка диму (розміром 5 – 10 мкм) розганяється електричному полі, створеного різницею потенціалів між кільцем відбивачем (діаметр кільця 50 – 70 мкм).



Після механічного відбиття частка попадає до системи датчиків і реєструється виконавчим пристроєм. Звідси слідує необхідність розрахувати форму відбивача так, щоб спрямований на нього паралельний потік часток диму сконцентрувався на активній поверхні датчика наперед обраної форми. Враховуючи, що відбивачем планується обирати поверхню обертання, то розглядається хід променів (траєкторій часток) у осевому перетині поверхні. Метод розрахунку відбивача полягає у використанні диференціального рівняння, розв'язком якого буде опис відбивача з

неточковими фокусами.

Розглянемо відрізок QT прямої, що проходить через точку падіння променя $M(x, f(x))$, її відповідну точку $Q(x_Q, y_Q)$ на ортотоміці, та точку $T(x_T, y_T)$ на відбитому промені. Маємо рівняння відрізка QT:

$$\frac{y - y_Q}{x - x_Q} = \frac{y_T - y_Q}{x_T - x_Q}, \quad (14)$$

де значення x_Q і y_Q задано виразами для ортотоміки. Вилучимо з (14) похідну:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_T - y_Q}{x_T - x_Q}, \quad (15)$$

де

;

;

Вираз (15) буде тим диференціальним рівнянням, що допоможе знайти функцію $y = f(x)$.

В якості прикладу розглянемо на площині Oxy фокальну криву з рівнянням

$$y = at^2 + bt + c, \quad \text{де параметр } t \text{ змінюється у межах } t_1 \leq t \leq t_2.$$

Прив'язку до фокальної кривої здійснимо виразами

;

, де

. В наведених прикладах вважається, що падаючі промені будуть паралельними, і направлені «назустріч» осі Ox .

Нехай профіль чутливого елемента має вигляд півкола. Наведено варіант розрахунків для параметрів: $a = -66$; $b = 44$; $x_{kk} 1\pi$; $t_2 \quad d = -40$; x_{00} На рис. 24 зображено відбивальну криву на полі ізоклін, а на рис. 25 – промені, що нею відбиті на півколо (чутливий датчик). На рис. 26 наведено зображення відбивальної поверхні та чутливого сферичного елемента.

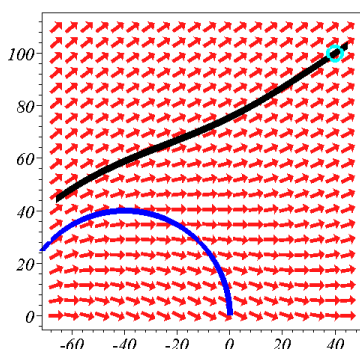


Рис. 24. Поле ізоклін і відбивальна крива

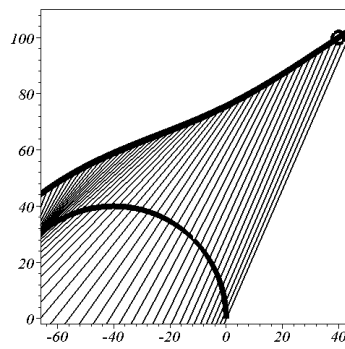


Рис. 25. Сім'я відбитих від кривої променів

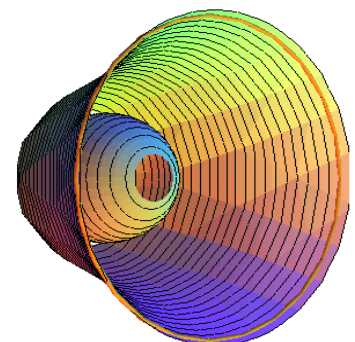


Рис. 26. Зображення визначених поверхонь

Результати роботи впроваджено на підприємстві «Пожтехніка України» при розробці експериментального пожежного сповіщувача, призначеного для визначення ознак виникнення пожежі шляхом виявлення часток диму.

ВИСНОВКИ

Дисертацію присвячено розробці методу геометричного моделювання резонансу хитної пружини на основі побудови траєкторії руху її вантажу з врахуванням як основних її параметрів, так і початкових умов виникнення коливань, що дозволило проілюструвати розв'язки деяких задач у галузі аварійно-рятувальної тематики.

Значення для науки полягає у створенні основ для системного та обґрунтованого застосування інструментальних засобів сучасної прикладної геометрії під час моделювання руху вантажу хитної пружини як парадигми розв'язання кола задач, для яких характерним є процес перетікання енергії у компонентах динамічної системи.

Значення для практики полягає у створенні передумов розвитку геометричних технологій формування розв'язків з використанням моделі хитної пружини при дослідженні: атмосферного балансу планети, коливання молекули вуглекислого газу, моделювання вібрації гелікоптера. Можливість виникнення таких явищ необхідно враховувати при розрахунку різноманітних конструкцій будівельної механіки – висячих мостів, вантово-балочних систем, канатних доріг, ліній електропередачі, різноманітних антен тросових системи для втримання об'єктів, гнучких шлангів, тощо.

При цьому отримано результати, що мають науково-практичну цінність:

1. Здійснено аналіз літературних джерел за темою дисертаційних досліджень, який дозволив зробити висновок про те, що на теперішній час не існує методів побудови періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини з врахуванням не лише головних її параметрів, але і початкових умов ініціювання коливань. Це являлось стримуючим чинником розвитку методів розв'язання задач для яких характерним є процес перетікання енергії у компонентах динамічної системи.

2. З використанням методу проєкційного фокусування інтегральної кривої з фазового простору на фазову площину для системи рівнянь Лагранжа другого роду розроблено універсальний спосіб побудови періодичної траєкторії руху вантажу хитної пружини. Аналіз зміни одержаної фазової кривої залежно від керуючого параметра дозволяє побудувати періодичну траєкторію руху вантажу хитної пружини та її різновидів.

3. Побудовані фазові траєкторії функцій узагальнених координат хитної пружини дозволили надати оцінки діапазону змін їх величин та швидкостей руху вантажу. Перехід від параметрів хитної пружини до параметрів конкретної задачі дозволить адекватно описати досліджуваний процес.

4. Одержані геометричні форми періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини запропоновано характеризувати за допомогою відношення горизонтальних і вертикальних періодів коливань вантажу. Це дозволяє визначити споріднені геометричні форми траєкторій руху, тобто однакові траєкторії для різних комбінацій головних параметрів хитної пружини.

5. Складено таблицю геометричних форм періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини, які відповідають значенням її жорсткості k та маси m . Це дозволило розв'язати у певному розумінні обернену задачу синтезу періодичних траєкторій вантажу хитної пружини.

6. Описано процес руху вантажу хитної пружини за допомогою системи диференціальних рівнянь з компонентами, у які входять значення частот вертикальних і горизонтальних переміщень точки на пружині. Це дозволило визначити множину траєкторій руху вантажу хитної пружини, яка відповідатиме заданим відношенням вертикальних і горизонтальних частот коливань вантажу (для прикладу – 2:1, 7:3, 9:4 і 11:2).

7. Одержано наближеного розв'язання системи диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду з компонентами, у які входять значення частот вертикальних і горизонтальних переміщень точки на пружині. Це дозволило інтерпретувати процес коливання вантажу хитної пружини з врахуванням перетікання горизонтальних коливань у вертикальні і навпаки, що характерно для резонансного стану хитної пружини.

8. Розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення за допомогою якого проведено комп'ютерне моделювання на прикладах практичних задач у сфері цивільного захисту. У тому числі для моделювання вітрового навантаження на вантажних канатних дорогах для передбачення можливих амплітуд коливання дротів або тросів, на які діють пориви вітру, а також для розрахунків подрібнення газових бульбашок у рідині за рахунок коливальних імпульсів тиску.

Результати дисертації впроваджено в навчальний процес на кафедрі інженерної та аварійно-рятувальної техніки Національного університету цивільного захисту України для ознайомлювальних лекцій при викладанні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» в рамках освітніх програм «Пожежна безпека», «Цивільний захист» та «Охорона праці».

Подальший розвиток одержаних результатів дисертаційного дослідження доцільно спрямувати на розробку моделей та методів, коли шуканий розв'язок поставленої задачі можна пов'язати з періодичною траєкторією руху вантажу хитної пружини. І серед множини таких траєкторій необхідно перевагу зосередити на траєкторії найменшої довжини. Адже згідно загальному принципу «мінімальної енергії» логічно вважати, що саме випадок з найкоротшим періодом траєкторії буде цікавим при реалізації конкретного впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в міжнародних виданнях
та у виданнях, які включено до наукометричних баз:

1. L. Kutsenko, V. Vanin, O. Shoman, P. Yablonskyi, L. Zapolskiy, N. Hrytsyna, S. Nazarenko, V. Danylenko, E. Sivak, S. Shevchenko. Modeling the resonance of a swinging spring based on the synthesis of a motion trajectory of its load. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Applied mechanics. 2019. Vol. No.7. P. 53-64. (Збірник включено до наукометричних баз Scopus, Index Copernicus, WorldCat).

Особисто здобувачу належить розробка та обґрунтування алгоритмів і програм побудови варіантів коливання хитної пружини з проявами резонансів.

2. Куценко Л.М., Шевченко С.М., Васильєв С.В. Періодичні траєкторії руху вантажу хитної пружини залежно від її параметрів. Danish Scientific Journal,

Copenhagen, 2020. Vol.1. No.33. P. 28-34. (Збірник включено до наукометричних баз eLIBRARY.R , *The General Impact Factor*).

Особисто здобувачу належить розробка та обґрунтування алгоритмів і програм унаочнення процесу коливань хитної пружини залежно від її параметрів.

3. Куценко Л.М., **Шевченко С.М.**, Васильєв С.В., Руденко С.Ю. Періодичні траєкторії руху вантажу хитних пружин. *Sciences of Europe*, 2020. Vol 1. No. 48. P.19-26. (Збірник включено до наукометричних баз eLIBRARY.RU, *Index Copernicus*, *The General Impact Factor* , *International Scientific Indexing*, *ISSUU*, *Calaméo*).

Особисто здобувачу належить розробка та обґрунтування алгоритмів і програм моделювання процесу періодичних коливань хитної пружини.

4. Куценко Л.М., **Шевченко С.М.**, Васильєв С.В., Руденко С.Ю. Періодичні траєкторії руху вантажу комбінованих хитних пружин. *Magyar Tudományok Journal* 2020. Vol. 38. P. 58-64. (Збірник включено до наукометричних баз *The General Impact Factor*, *DIIF*, *ISSUU*).

Особисто здобувачу належить розробка та обґрунтування алгоритмів і програм моделювання процесу періодичних коливань комбінованих хитної пружини.

5. **Шевченко С.М.** Резонанс хитної пружини. *Polish journal of science*, 2020. Vol. 1, No. 25. P. 57-64. (Збірник включено до наукометричних баз eLIBRARY.RU, *Slideshare* , *ISSUU*, *Impact Factor* , *SIS*).

6. **Шевченко С.М.** Изображение орбиты в пространстве как поверхность мнимых источников. *Norwegian Journal of development of the International Science*. Oslo. Norway, 2019. No. 34. P.54 -57. (Збірник включено до наукометричних баз eLIBRARY.RU, *ISSUU*, *Calaméo*).

7. **Шевченко С.М.** Описание компонентов отражательной системы в зависимости от формы рефлектора. *International independent scientific journal* Kraków , Rzeczpospolita Polska, 2019. Kazimierza Wielkiego 34. No.8. P. 21-25 (Збірник включено до наукометричних баз eLIBRARY.RU, *Index Copernicus*, *The General Impact Factor*, *ISSUU*, *Calaméo*).

8. Семків О.М., **Шевченко С.М.** Комп'ютерне моделювання траєкторії переміщення вантажу хитної пружини з рухомою точкою підвіски. *Znanstvena misel journal*. Slovenia, 2020. Vol.1, No.40. P. 54-66. (Збірник включено до наукометричних баз eLIBRARY.RU, *The General Impact Factor* , *ISSUU*, *Calaméo*).

Особисто здобувачу належить розробка та обґрунтування алгоритмів і елементів програм унаочнення процесу коливань хитної пружини з рухомою точкою підвіски.

Статті у наукових фахових виданнях України:

9. **Шевченко С.М.** Моделювання плоского фокусатора із фрагментів сім'ї співфокусних парабол. *Сучасні проблеми моделювання: збірник наукових праць. Технічні науки*. Мелітополь, 2018. Вип.10. С.155-160.

10. **Шевченко С.М.** Фазові портрети відбивальних систем в областях, обмежених фрагментами еліпса. *Сучасні проблеми моделювання: збірник наукових праць. Технічні науки*. Мелітополь, 2017. Вип.9. С.173-177.

11. Куценко Л.М., **Шевченко С.М.** Врахування позиційних умов при розрахунку еліптичних відбивальних систем. *Сучасні проблеми моделювання:*

збірник наукових праць. *Технічні науки*. Мелітополь, 2017. Вип. 8. С.92-97

Особисто здобувачу належить розробка та обґрунтування алгоритмів і програм унаочнення відбивальних систем.

12. **Шевченко С.М.**, Адашевська І.Ю. Геометричне моделювання профілю відбивача пожежного сповіщувача диму. *Сучасні проблеми моделювання: збірник наукових праць. Технічні науки*. Мелітополь, 2016. Вип.7. С.167-173.

Особисто здобувачу належить розробка та обґрунтування алгоритмів і програм та унаочнення профілю відбивача пожежного сповіщувача диму.

Наукові праці в інших виданнях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. **Шевченко С.М.** Визначення форми профілю відбивача пожежного сповіщувача диму. *Геометричне моделювання та інформаційні технології: науковий журнал*. Миколаїв, 2016. №2, жовтень 2017. С.111-117.

14. Куценко Л.М., Семків О.М., **Шевченко С.М.** Нехаотичні періодичні траєкторії руху точкового вантажу хитної пружини. Abstracts of VI International Scientific and Practical Conference, Osaka, Japan, 26-28 February 2020. P. 546-551.

15. **Шевченко С.М.** Пружинний маятник як механічна модель дослідження декількох нелінійно зв'язаних систем. Abstracts of V International Scientific and Practical Conference, Lviv, Ukraine 2-3 March 2020. P. 259- 264.

16. Куценко Л.М., **Шевченко С.М.** Огляд робіт, присвячених періодичним траєкторіям руху вантажу хитної пружини. Abstracts of VII International Scientific and Practical Conference, Liverpool, United Kingdom, 4-6 March 2020. P. 580-588.

17. **Шевченко С.М.** Моделювання дроблення газової бульбашки за допомогою матеріальної точки на пружині. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції (09-10 квітня 2020 року)*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 227-229.

18. Куценко Л.М., **Шевченко С.М.** Врахування позиційних умов при розрахунку еліптичних відбивальних систем. Тези доповідей 19 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (Мелітополь, 06-09 червня 2017 р.). Мелітополь: МДПУ, 2017. С. 22-23.

19. Семків О.М., **Шевченко С.М.**, Піксасов М. М. Застосування перетворення Хафа для виділення фазових кривих подібних еліпсу. Тези доповідей 20 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (Мелітополь, 05-08 червня 2018 р.). Мелітополь: МДПУ, 2018. С. 6.

20. Запольський Л.Л., **Шевченко С.М.** Розкриття каркасу параболічної антени з заданою фокусною відстанню. Тези доповідей 21 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (Мелітополь, 04-07 червня 2019 р.). Мелітополь: МДПУ, 2019. С. 13.

21. **Шевченко С.М.** Геометричне моделювання квазіеліпсоїда з фокусом у вигляді кривої лінії. Тези доповідей 6-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених» (Київ, 28-29 квітня 2017 р.). Київ: Національний технічний

університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2017. С. 251.

22. **Шевченко С.М.** Побудова періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини. Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «*Графічні технології моделювання об'єктів, процесів та явищ*» (Одеса, 23-24 квітня 2020 р.). Одеса: Військова академія, 2020. С. 39.

Додаткові матеріали за змістом дисертації:

23. Куценко Л. М., Пікрасов М. М., **Шевченко С. М.** Ілюстрації до статті "Моделювання резонансу хитної пружини на основі синтезу траєкторії руху її вантажу", 2019. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8950>

АНОТАЦІЯ

Шевченко С.М. Геометричне моделювання резонансу хитної пружини. – *На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.01.01 «Прикладна геометрія, інженерна графіка» (131 «Прикладна механіка»). – Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, м. Мелітополь, Україна, 2020.

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу в галузі геометричного моделювання – розроблено метод геометричного моделювання резонансу хитної пружини на основі побудови траєкторії руху її вантажу з врахуванням як основних її параметрів, так і початкових умов виникнення коливань.

Проведений аналіз літературних джерел не виявив існуючих способів обчислення періодичних траєкторій руху точкового вантажу хитної пружини та визначення змінних параметрів, за яких траєкторія руху вантажу хитної пружини матиме вигляд періодичної. За допомогою відношення горизонтальних і вертикальних періодів коливань вантажу було охарактеризовано одержані геометричні форми траєкторій. Складено таблицю форм періодичних траєкторій руху вантажу хитної пружини, які відповідають обраним значенням жорсткості пружини та маси вантажу. Побудовано фазові траєкторії функцій узагальнених координат хитної пружини та надано оцінки діапазону змін їх величин. Було описано процес руху хитної пружини з врахуванням перетікання горизонтальних коливань у вертикальні і навпаки, що характерно для резонансного стану хитної пружини. Визначено множину траєкторій руху вантажу хитної пружини, які відповідають відношенням вертикальних і горизонтальних частот коливань вантажу.

Результати дисертаційного дослідження були передані для використання на ряд підприємств та в освітній процес Національного університету цивільного захисту України.

Ключові слова: геометричне моделювання, хитна пружина, резонанс хитної пружини, періодична траєкторія руху вантажу.

АННОТАЦИЯ

Шевченко С.Н. Геометрическое моделирование резонанса качающейся пружины. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.01.01 «Прикладная геометрия, инженерная графика». – Мелитопольский государственный педагогический университет имени Богдана Хмельницкого, г. Мелитополь, Украина, 2020.

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача в области геометрического моделирования – разработан метод геометрического моделирования резонанса качающейся пружины на основе построения траектории движения ее груза с учетом, как основных ее параметров, так и начальных условий возникновения колебаний.

Проведенный анализ литературных источников не выявил существующих способов вычисления периодических траекторий движения груза качающейся пружины и определения значений параметров для обеспечения периодической траектории движения груза качающейся пружины. С помощью отношения горизонтальных и вертикальных периодов колебаний груза были охарактеризованы геометрические формы траекторий. Составлена таблица форм периодических траекторий движения груза качающейся пружин, которые отвечают выбранным значением жесткости пружины и массы груза. Построены фазовые траектории функций обобщенных координат качающейся пружины и получены оценки диапазона изменений их величин. Описан процесс движения качающейся пружины с учетом перетекания горизонтальных колебаний в вертикальные и наоборот, что характерно для ее резонансного состояния. Определено множество траекторий движения груза качающейся пружины, соответствующих заданному отношению вертикальных и горизонтальных частот колебаний груза.

Результаты диссертационного исследования были переданы для использования на ряд предприятий и в образовательный процесс Национального университета гражданской защиты Украины.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, качающаяся пружина, резонанс качающейся пружины, периодическая траектория движения груза.

ABSTRACT

Shevchenko S. Geometric modeling of Resonance of a Swing Spring. – Manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.01.01 «Applied Geometry, Engineering Graphics». – Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, Melitopol, Ukraine, 2020.

In the dissertation, an important scientific and practical problem in the field of geometric modeling was solved – a method for geometric modeling of the resonance of a swinging spring based on constructing the trajectory of its load, taking into account both its basic parameters and the initial conditions for the occurrence of oscillations, was developed. To achieve the goal of the dissertation research, an analysis of literary sources was carried out in order to identify existing methods for calculating the periodic trajectories of the point load of a swinging spring and determine the values of variable parameters at which the trajectory of the load of the swinging spring will look periodic.

Using the ratio of horizontal and vertical periods of load oscillations, the obtained geometric shapes of the trajectories were characterized. A table of forms of periodic trajectories of the load of the swinging springs, which correspond to the selected value of the stiffness of the spring and the mass of the load. The phase trajectories of the functions of the generalized coordinates of the swinging spring and its varieties are constructed and estimates of the range of changes in their values are provided. The process of moving a swinging spring was described taking into account the flow of horizontal vibrations into vertical ones and vice versa, which is typical for the resonant state of a swinging spring. The set of trajectories of the load of the swing spring, which corresponds to a given ratio of vertical and horizontal frequencies of the oscillations of the load.

Visual mechanical interpretations are often used to explain complex phenomena or processes. In particular, for oscillatory processes, pendulum analogues are considered as models. A classic example is the inverse pendulum model with a vibrating attachment point (Kapitsa pendulum), which provided a physical explanation for a whole class of problems. No less impressive mechanical interpretations are associated with another kind of pendulum. In an idealized form, it consists of a point load of mass m attached to the end of a weightless spring of rigidity k and length h in an unloaded state. The other end of the spring is fixed (or may vibrate).

An oscillating system is formed that should only move in a vertical plane, while keeping the axis of the spring straight. This type of pendulum in the literature was called the swinging spring (swinging spring). In this case, a point load simultaneously participates in two types of oscillations: similar to a spring – when it moves along the rectilinear axis of the spring, and like a pendulum – when it vibrates together with its axis. When referring to such an oscillatory system, interesting and deep physical laws were discovered. We are talking about processes with internal nonlinearly connected representations of various vibrational components. At the same time, which is essential, the components of the system exchange energy with each other. And the use of a swing spring is accepted as a paradigm for the study of such nonlinear coupled systems. Of particular importance is the study of the conditions for the occurrence of a resonance state of a swinging spring. That is, when the frequency (or period) of longitudinal vibrations of a point load differs by a multiple of times from the frequency (or period) of its transverse vibrations. The vast majority of possible implementations of this state of resonance is directly related to the violation of stability and controllability of mechanical products in the process of their movement. For example, when calculating the movement of a ship or aircraft, it is necessary to take into account the energy exchange between transverse and track (longitudinal) vibrations as components of a dynamic system. In most cases, the frequencies of these oscillations are taken as a ratio of 2:1. Of course, the resonance state of the swinging spring occurs when a certain combination of the mass of the load, the length of the spring in the unloaded state, the stiffness of the spring, as well as the description of the law of motion of the spring attachment point. But the initial values of the parameters of the initiation of oscillations must also influence the state of the swinging spring. This can be seen if the resonance is interpreted using the trajectory of the load of the swinging spring. The paper illustrates the possibility of not only constructing a periodic trajectory, but also choosing one of them as the initial one. That is, in a certain sense, the inverse problem of determining the periodic trajectories of the load of the swing

spring was solved. Three examples are given regarding emergency rescue services. The peculiarity of controlling the resonance of a swinging spring is to take into account the initial conditions for the occurrence of oscillations. It becomes possible to choose the type of resonance, guided by the graphic characteristics of the trajectory of the swinging spring. For example, given the length of the trajectory or the density of the pixels that represent it.

Therefore, it is necessary to develop a yet unexplored universal method for the synthesis of many trajectories depending on the parameters of the swinging spring and the parameters of the initiation of its oscillations. And attention should be focused on cases when the trajectories are periodic curves. And also on important features to control the kinds of resonance. This is the relevance of the research topic. The results of the dissertation research were introduced into the practical activities of the company and in the educational process of the National University of Civil Defence of Ukraine.

Keywords: geometric modeling, swinging spring, resonance of the swinging spring, periodic trajectory of the load.

Підписано до друку 02.06.2020 р. Формат 60× 84× 1/16. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк.1,3. Тираж 120 прим. Зам.: № 3107

Надруковано ФО-П Однорог Т.В.
72313, м. Мелітополь, вул. Героїв Сталінграду, 3а
Тел. (067) 61 20 700
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
Державного реєстру видавців, виробників і розповсюджувачів
видавничої продукції від 29.01.2013 р. серія ДК № 4477

