

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

ХРОМОВ ОЛЕГ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.778

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ  
НАМОТУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ З УРАХУВАННЯМ РОЗСІЯННЯ ЕНЕРГІЇ

05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

Харків – 2012

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана в Севастопольському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Севастополь.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Харченко Олександр Олегович**,  
Севастопольський національний  
технічний університет,  
декан факультету технології і автоматизації  
машиноприладобудування та транспорту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Філімоніхін Геннадій Борисович**,  
Кіровоградський національний  
технічний університет,  
професор кафедри деталей машин  
та прикладної механіки

кандидат технічних наук,  
**Ларін Олексій Олександрович**,  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут",  
доцент кафедри динаміки та міцності машин

Захист відбудеться «16» травня 2012 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.10 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «12» квітня 2012 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д64.050.10



В.Г. Сукіасов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Намотувальні верстати, що використовуються у виробництві сталевих канатів, кабелів і металокорду, реалізують одну з відповідальних підготовчих операцій загального технологічного процесу – перемотування довгомірних виробів з великих тарних котушок на зарядні котушки звиваючих машин. Основними вимогами, що висувуються до намотувального устаткування, є стабільність процесу перемотування, тобто рівномірне укладання виробу на котушку і відсутність проміжних обривів при мінімальних експлуатаційних витратах. Можливість виконання даної вимоги залежить, перш за все, від характеру коливань технологічного натягнення перемотуваного виробу. Тому в сучасній структурі системного проектування даних верстатів особливо важливе місце займає розділ динамічного аналізу процесу перемотування. Від точності динамічних моделей значною мірою залежить ефективність робіт з модернізації або створення нових зразків устаткування.

У відомих роботах по динаміці процесу перемотування до цих пір розглядалися і вирішувалися переважно задачі, пов'язані з розрахунком власних частот крутильних коливань живлячих і приймальних котушок. При цьому досліджувані технічні об'єкти розглядалися, як системи з ідеальними пружними зв'язками. Другий вид задач пов'язаний з розрахунком амплітуд крутильних коливань приймальної котушки і коливань технологічного натягнення перемотуваного виробу. При застосуванні до намотувальних верстатів даний розрахунок представляє особливий інтерес, оскільки їх експлуатація передбачає необхідність стійкої роботи в білярезонансних режимах, як при розгоні або гальмуванні, так і на окремих етапах сталого процесу. Розробка ефективної методики теоретичного аналізу білярезонансних коливань можлива тільки на основі моделі, що враховує наявність процесів розсіяння енергії в системі. У сучасній технічній літературі недостатньо відомостей про якісні і кількісні параметри, необхідні для аналітичного опису розсіяння енергії в ланках намотувального верстата.

Таким чином, проведення комплексних досліджень впливу розсіяння енергії на динаміку білярезонансних режимів роботи намотувальних верстатів є актуальними завданнями прикладної теорії коливань механічних систем. Вирішення цих завдань дозволить підвищити ефективність дослідницьких і проектних робіт, направлених на модернізацію технологічного устаткування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі автомобільного транспорту Севастопольського національного технічного університету (СевНТУ) у рамках держбюджетної НДР МОН України «Експериментальні дослідження і вдосконалення методики математичного моделювання білярезонансних коливань елементів машин з нелінійними інтегральними характеристиками внутрішнього демпфування» (ДР № 0111U003329), а також на підставі перспективного плану модернізації технологічного устаткування Харцизької філії ПАТ «Виробниче Об'єднання «СТАЛЬКАНАТ-СИЛУР» завод СИЛУР» (м. Харцизьк, Україна).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає в удосконаленні розрахунково-експериментальних методів динамічного аналізу і підвищенні стабільності робочого процесу намотувальних верстатів.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- виконати аналіз впливу нелінійних процесів розсіювання енергії на коливання ланок машин в білярезонансних режимах роботи на основі експериментальних та теоретичних досліджень;
- розробити лабораторні стенди і провести експериментальні дослідження власних демпфуючих властивостей елементів намотувального верстата;
- на основі теоретичних і експериментальних даних розробити узагальнену комп'ютерну методику динамічного аналізу і оцінки стабільності процесу перемотування довгомірних виробів;
- провести комплексні дослідження впливу розсіювання енергії на вимушені коливання технологічного натягнення виробів, що перемотуються, при різних режимах роботи верстата легкої серії;
- надати рекомендації по зниженню амплітуди коливань і підвищенню стабільності роботи намотувального устаткування.

*Об'єкт дослідження* – процес динамічної зміни технологічного натягнення довгомірного виробу при взаємодії з елементами намотувального верстата.

*Предмет дослідження* – параметри досліджуваної системи, що відображають вплив процесів розсіювання енергії на динамічні характеристики намотувального верстата в білярезонансних режимах роботи.

**Методи дослідження.** У роботі використовувалися аналітичні методи теоретичної механіки і прикладної теорії коливань. Для розв'язання диференціальних рівнянь руху досліджуваних об'єктів застосовувався метод Рунге-Кутти з використанням математичного пакету MathCAD. Для вивчення впливу процесів розсіювання енергії на коливання досліджуваного об'єкту і перевірки адекватності динамічних моделей використовувався метод фізичного моделювання, методи математичної статистики для аналізу результатів експерименту й оцінки похибок вимірювання.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- отримала розвиток модель для врахування нелінійних процесів розсіювання енергії з використанням комбінованої степеневої функції тертя. У задачах динаміки технологічних машин дана функція дозволяє найповніше відобразити вплив різних процесів розсіювання енергії на амплітуду білярезонансних коливань;
- отримано узагальнені формули для розрахунку амплітуди і коефіцієнта динамічності коливань в режимі резонансу з урахуванням комбінованої функції тертя;
- вперше виконані експериментальні дослідження власних демпфуючих характеристик ланок намотувального верстата;
- розроблена уточнена динамічна модель процесу перемотування, яка відрізняється від відомих тим, що враховує вплив розсіювання енергії в елементах намотувального верстата на амплітуду коливань технологічного натягнення довгомірного виробу при перемотуванні;

– одержав подальшого розвитку процес вивчення закономірностей динамічної зміни натягнення довгомірного виробу в білярезонансних режимах роботи намотувального верстата, а також впливу різних чинників на амплітуду коливань натягнення.

**Практичне значення одержаних результатів** в галузі динаміки машин для сталеканатного виробництва полягає в обґрунтуванні запропонованих рекомендацій по зниженню амплітуди білярезонансних коливань натягнення перемотуваного виробу і вибору параметрів для забезпечення стабільної роботи намотувальних верстатів легкої серії.

Реалізована методика комп'ютерного аналізу динаміки процесу перемотування довгомірних виробів відкриває нові можливості для ефективного вирішення проектних і виробничих задач, пов'язаних з оцінкою стабільності роботи, підвищенням продуктивності і коефіцієнта використання намотувальних верстатів.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на Харцизькій філії ПАТ «Виробниче Об'єднання «СТАЛЬКАНАТ-СИЛУР» завод СИЛУР», (м. Харцизьк, Україна) у вигляді: 1) методики експериментального визначення демпфуючих властивостей приймального пристрою намотувального верстата; 2) методики динамічного аналізу робочого процесу для намотувальних верстатів легкої серії.

Отримані результати досліджень з моделювання розсіяння енергії прийняті до використання в навчальному процесі на кафедрі автомобільного транспорту і кафедрі технічної механіки і машинознавства СевНТУ, а також при виконанні курсових і дипломних студентських проектів. Застосування отриманих результатів дозволяє підвищити точність динамічних розрахунків при проектуванні різних технічних систем, робочий цикл яких включає білярезонансні режими коливань.

**Особистий внесок здобувача.** Усі принципи теоретичні й експериментальні результати, що отримані в дисертації, базуються на розробках і дослідженнях, виконаних автором. У процесі виконання роботи автор самостійно проводив експерименти, аналіз і обробку результатів. Здобувачем створено стенди для експериментальних досліджень процесів розсіяння енергії в ланках намотувального верстата. Публікації відображають результати досліджень, виконаних особисто автором. У дисертації не використані ідеї співробітників, що сприяли виконанню роботи.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися і обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Надійність і довговічність механізмів, елементів конструкцій і біомеханічних систем» (м. Севастополь, 2007 р., 2009 р., 2010 р., 2011 р.), Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Прогресивні напрями розвитку машино-приладобудівних галузей і транспорту» (м. Севастополь, 2009 р., 2010 р., 2011 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Виробництво і експлуатація сталевих канатів – проблеми і рішення» (м. Одеса, 2008 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення» (м. Севастополь, 2010 р.).

**Публікації.** Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертації опубліковані в 14 наукових працях, з яких 10 у наукових фахових виданнях України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 164 сторінки, з них 61 рисунок по тексту, 17 рисунків на 12 окремих сторінках; 9 таблиць по тексту; 82 найменування використаних літературних джерел на 9 сторінках; 5 додатків на 9 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність, теоретичне та практичне значення досліджень за темою дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, представлено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, наведено інформацію про апробацію роботи та публікації основних результатів.

У першому розділі розглянуто конструкції і тенденції розвитку намотувальних верстатів. Виконано аналіз досліджень в області динаміки процесу перемотування, а також робіт, пов'язаних з урахуванням розсіяння енергії при аналізі коливань ланок машин.

Питанням теорії динамічного аналізу процесу перемотування довгомірного виробу присвячені роботи Нестерова П.П., Хорхордіна Н.І., Рижикова В.А., Ветрова А.П., Бохонського О.І., Хромова Є.В. та ін. Динамічна модель даного процесу включає рівняння крутильних коливань котушки і функцію, що описує зміну технологічного натягнення довгомірного виробу. У загальному випадку модель має нелінійний характер, що обумовлено наявністю фрикційного гальма або муфти, одностороннього пружного зв'язку і випадкових кінематичних обурень.

У роботах, що стосуються динаміки процесу, розв'язувалися переважно задачі, пов'язані з розрахунком власних частот крутильних коливань живлячих і приймальних котушок. При застосуванні до намотувальних верстатів особливий інтерес представляє задача розрахунку амплітуд крутильних коливань приймальної котушки і коливань технологічного натягнення виробу, що перемотується, в зоні приймального пристрою. Розробка ефективної методики для вирішення вказаної задачі можлива тільки на основі моделі, що враховує наявність процесів розсіяння енергії в системі.

Проблемам моделювання розсіяння енергії в елементах механічних систем присвячена велика кількість робіт вітчизняних і зарубіжних фахівців: Писаренка Г.С., Тимошенко С.П., Нашифа А., Пановка Я.Г., Blanter M.S., Plekhov O.A., Puškár A., Thorby D. та ін.

Питання вибору раціональної моделі для широкого кола об'єктів, зокрема для намотувальних верстатів, до цих пір не знайшло належного відображення в науково-технічній літературі. Багато дослідників механічних коливань приймають за умовчанням модель лінійно-в'язкого тертя незалежно від походження

причин розсіяння енергії, що часто не відображає повною мірою дійсного характеру демпфування.

З урахуванням викладеного зроблений висновок, що розвиток методів математичного моделювання процесу перемотування і проведення комплексних досліджень впливу розсіяння енергії на динаміку роботи намотувальних верстатів залишаються актуальними питаннями прикладної теорії коливань.

**Другий розділ** присвячений вдосконаленню методології вибору форми і параметрів функції тертя з використанням експериментальної осцилограми затухаючих коливань механічної системи за наявності нелінійних процесів розсіяння енергії.

При розробці динамічної моделі, що враховує розсіяння енергії, тобто власні демпфуючі властивості технічного об'єкту, поставлено два допоміжні завдання: 1) визначити, яка з вказаних вище функцій тертя точніше відображає процеси розсіяння енергії конкретного досліджуваного об'єкту; 2) для вибраної моделі визначити показник степеня  $n$  і невідомі коефіцієнти тертя  $\alpha$  та  $B$ . Вирішення цих завдань повинно, очевидно, спиратися на порівняльний аналіз експериментальних і розрахункових обвідних ліній з осцилограм затухаючих коливань (рис. 1). Відомо, що у разі перших двох функцій можна отримати наближені аналітичні формули для обвідної лінії  $a(t)$ . Для цього використовують метод гармонійного балансу, і замість диференційного рівняння коливань застосовується теорема про зміну кінетичної енергії системи  $\Delta E = A_y + A_m \approx 0$  ( $A_y, A_m$  – роботи сили пружності і сили тертя за один цикл коливань).

У дисертації на основі функцій обвідної лінії  $a(t)$  отримано зворотні формули для розрахунку коефіцієнтів тертя за двома точками експериментальної осцилограми. Показано, що при заданому значенні частоти власних коливань форма розрахункової обвідної лінії (рис. 1), побудованої за двома точками експериментальної осцилограми, залежить тільки від значення показника степеневі функції тертя  $n$  і не залежить від вибраної моделі тертя. Для аналізу відмінностей між гістерезисною і швидкісною моделями тертя необхідні експериментальні осцилограми затухаючих коливань досліджуваного об'єкту, записані при декількох значеннях власної частоти. При цьому жодна із степеневих функцій з цілим показником  $n$  не може повною мірою відобразити форму експериментальної обвідної лінії. Пояснюється це тим, що вказані функції включають лише один невідомий коефіцієнт тертя. Для точнішого відображення нелінійного характеру дійсної обвідної лінії затухаючих коливань доцільно використовувати складніший вид функції для приведеної сили тертя, що включає два та більше невідомих параметра, і що дозволяє врахувати проміжні точки з експериментальної осцилограми. Запропонована методика обробки експериментальної осцилограми на основі чисельного розв'язання диференційного рівняння руху системи із застосуванням ітераційної процедури.

Виконаний аналіз впливу виду функції тертя на амплітуду білярезонансних коливань механічного осцилятора. На рис. 2 представлений приклад амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) для різних варіантів функції.

Аналіз АЧХ показав, що значення амплітуди і коефіцієнта динамічності осцилятора при співвідношенні частот  $0,9 \leq p/k \leq 1,1$  (біля резонансних режимів) істотно залежать від прийнятого виду функції тертя.

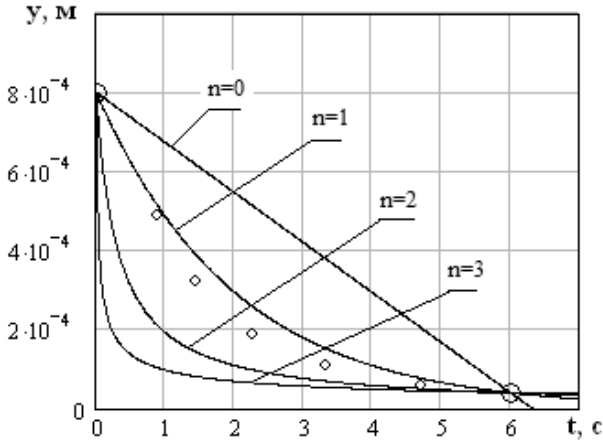


Рис. 1 Розрахункові графіки обвідних ліній для різних значень показника  $n$  степеневі функції тертя (° – точки з експериментальної обвідної)

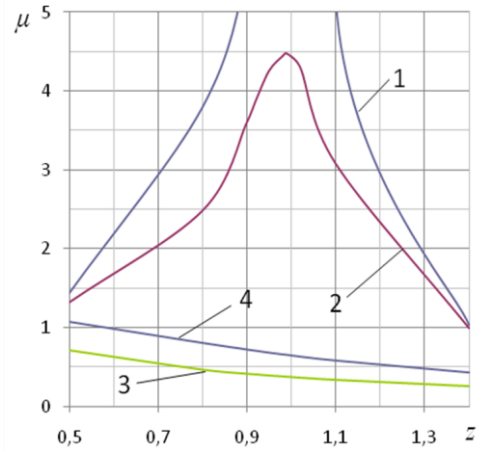


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики механічного осцилятора при різних видах функції тертя: 1, 2, 3 – для простої степеневі функції відповідно при  $n = 0, 1, 2$ ; 4 – для комбінованої функції

Комбінована степеневі функція з постійними коефіцієнтами дозволяє найповніше відобразити вплив нелінійних процесів розсіяння енергії на амплітуду коливань механічної системи. Для вказаного виду функції отримано узагальнені формули, що дозволяють виконувати розрахунок амплітуди і коефіцієнта динамічності вимушених гармонійних коливань в режимі резонансу

$$a = \frac{-d_2 + \sqrt{d_2^2 - 4d_1d_3}}{2d_3} \quad \text{и} \quad \mu = \frac{a}{a_0} = \frac{\left(-d_2 + \sqrt{d_2^2 - 4d_1d_3}\right)p^2}{2d_3 \cdot f_0},$$

де прийняті позначення:  $d_1 = 4 \cdot b_1 - \pi \cdot f_0$ ,  $d_2 = \pi \cdot p \cdot b_2$ ,  $d_3 = \frac{8}{3} \cdot p^2 \cdot b_3$ ;

$b_1 = \frac{B_1}{m}$ ,  $b_2 = \frac{B_2}{m}$ ,  $b_3 = \frac{B_3}{m}$  – приведені коефіцієнти демпфування;  $a$  – амплітуда вимушених коливань;  $a_0$  – зміщення осцилятора під дією статичної сили  $f_0$ ;  $p$  – частота вимушених коливань.

**Третій розділ** присвячений створенню лабораторних стендів і проведенню експериментів з вивчення демпфуючих властивостей ланок приймального пристрою намотувального верстата. До складу вузла входять: вал з опорами, приймальна котушка і пружний зв'язок у вигляді кінцевого відрізка виробу, що перемотується. Динамічна модель окремо враховує демпфуючі властивості виробу, що перемотується, за допомогою приведеної сили тертя  $F_{mn}$  і демпфуючі



властивості опорного вузла з котушкою за допомогою приведенного моменту тертя  $M_{те}$ . У зв'язку з цим для проведення експериментів розроблені і виготовлені два стенди в лабораторії кафедри технічної механіки та машинознавства СевНТУ.

На одному стенді (рис. 3) виконана серія експериментів, присвячена дослідженню демпфуючих характеристик тонкого сталевго дроту і прядка. Методика дослідження заснована на обробці експериментальних осцилограм затухаючих коливань вантажу, підвішеного на довгомірному виробі.

Другий стенд (рис. 4) імітує процес перемотування, де котушка здійснює крутильні коливання біля положення статичної рівноваги. У цій серії експериментів досліджувалися демпфуючі характеристики приймального пристрою в цілому.

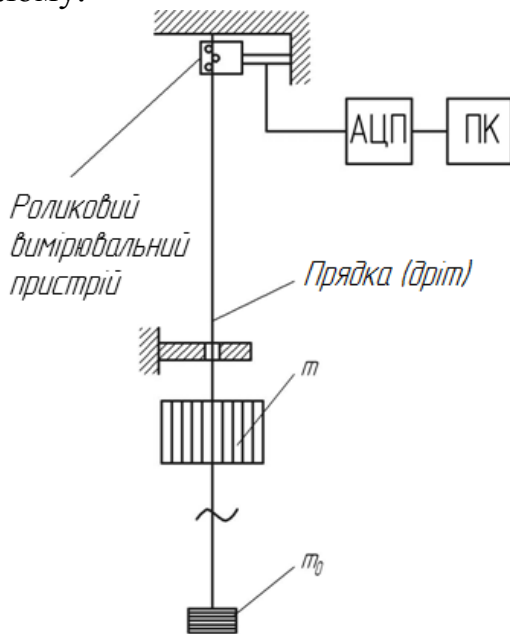


Рис. 3. Схема стенду для дослідження демпфуючих властивостей пружного зв'язку

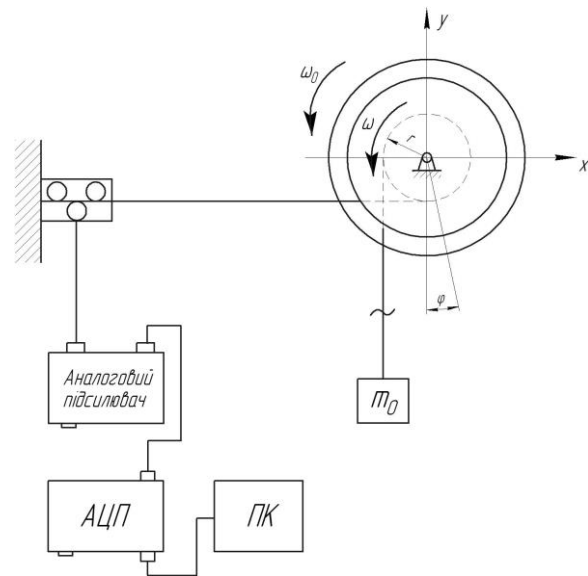


Рис. 4. Схема стенду для дослідження демпфуючих властивостей приймального пристрою

У стендах використовувався спеціально створений в лабораторії кафедри технічної механіки і машинознавства СевНТУ роликовий вимірювальний пристрій, який дозволяє фіксувати величину змінного натягнення тонкого виробу в режимі реального часу. На основі виконаних експериментів вперше отримано значення коефіцієнтів тертя для різних видів довгомірних виробів (табл. 1) і для приймального пристрою верстата легкої серії з котушкою  $D=200$  мм (табл. 2).

Таблиця 1

Експериментальні значення коефіцієнтів тертя для різних видів довгомірних виробів

Коефіцієнт тертя Досліджуваний елемент	$B_{n1}$ (Н)	$B_{n2}$ (кг/с)	$B_{n3}$ (кг/м)
Прядка (1+6+12)	0,0030÷0,0046	5,6÷8,7	163÷230
Дріт, $d = 1$ мм	0,0006÷0,0008	3,5÷4,5	240÷250
Дріт, $d = 0,2$ мм	0	0,3÷0,5	20÷25

Експериментально встановлено, що коефіцієнти тертя в дослідженому діапазоні частот коливань можна вважати постійними. При цьому частка коефіцієнтів тертя, що відображають розсіяння енергії в пружному зв'язку, складає 0,5...12 відсотків в порівнянні з повною енергією, що поглинається в приймальній пристрої в цілому.

Таблиця 2

Експериментальні значення коефіцієнтів тертя  $B_{ni}$ ,  $B_i$ ,  $C_i$

Досліджувана система	Середні значення коефіцієнтів		
Пружний зв'язок: прядка (1+6+12)	$B_{n1} = 0,0034 \text{ Н}$	$B_{n2} = 7,0 \text{ кг/с}$	$B_{n3} = 170 \text{ кг/м}$
Приймальний пристрій з прядкою (1+6+12)	$B_1 = 0,13 \text{ Н}$	$B_2 = 82 \text{ кг/с}$	$B_3 = 1125 \text{ кг/м}$
Приймальний пристрій без прядки	$C_1 = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}$	$C_2 = 0,153 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$	$C_3 = 0,087 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

**Розділ 4** присвячений дослідженню впливу розсіяння енергії на вимушені стаціонарні і нестационарні коливання приймальної котушки. На основі серії натурних і чисельних експериментів виконана перевірка ефективності динамічної моделі, що розробляється, стосовно вимушених коливань досліджуваної системи. Схема лабораторного стенду представлена на рис. 5.

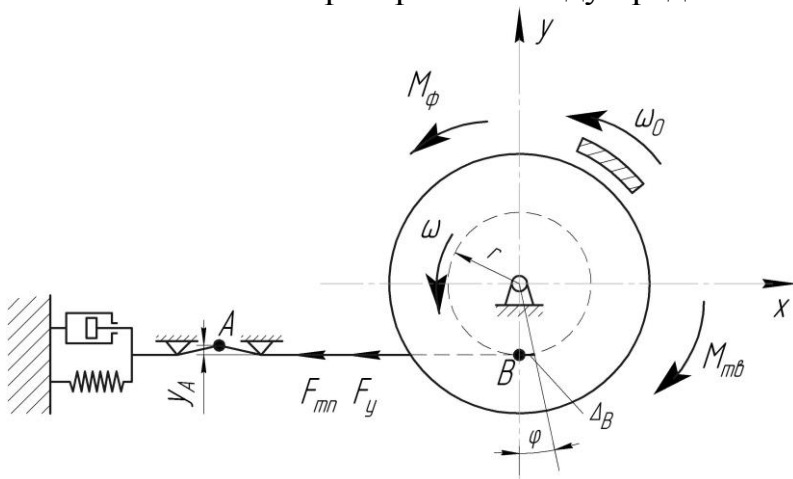


Рис. 5. Схема лабораторного стенду з джерелом кінематичного збурення

Диференціальне рівняння крутильних коливань котушки з урахуванням розсіяння енергії має вигляд

$$J\ddot{\varphi} = M_y + M_0 \cdot \text{sign}(\omega_0 - \dot{\varphi}) - r \cdot \left( B_{n1} \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}) + B_{n2} \cdot \dot{\varphi} \cdot r + B_{n3} \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot r^2 \right) - \left( C_1 \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}) + C_2 \cdot \dot{\varphi} + C_3 \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \right), \quad (1)$$

де  $M_y = \begin{cases} 0 & \text{при } \varphi \leq 0 \\ -cr[r\varphi + \Delta_A(t)] & \text{при } \varphi > 0 \end{cases}$  – момент сили пружності  $F_y$ , що виникає

за рахунок деформації розтягування довгомірного виробу;  $\varphi$  – змінна динамічна складова кута повороту котушки;  $c$  – коефіцієнт подовжньої жорсткості перемотуваного виробу;  $r$  – радіус зовнішнього шару виробу, намотаного на

катушку;  $\Delta_A(t) = a \cdot \left(1 - \sin^s\left(\frac{\omega_1 \cdot t}{2}\right)\right)$  – негармонійна функція кінематичного збурення;  $a, s$  – амплітуда деформації і показник степеня, залежні від геометричних розмірів і форми кулачка;  $\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30}$  – кутова швидкість обертання кулачка (частота збурення);  $M_0$  – змінний момент, залежний від характеристики тертя гальмувального пристрою;  $\omega_0$  – кутова швидкість обертання двигуна;  $\dot{\varphi} = \omega$  – кутова швидкість обертання катушки;  $B_{n1}, B_{n2}, B_{n3}$  – коефіцієнти тертя, що враховують розсіяння енергії в пружному зв'язку (прядка або дріт);  $C_1, C_2, C_3$  – коефіцієнти тертя, що враховують розсіяння енергії в опорному вузлі з катушкою.

Розв'язання останнього рівняння дозволяє отримати функцію, що описує крутильні коливання катушки  $\varphi(t)$  і потім розрахувати значення змінного натягнення дроту згідно залежності

$$F_y(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } \varphi \leq 0 \\ -c \cdot [r \cdot \varphi(t) + \Delta_A(t)] & \text{при } \varphi > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Аналіз експериментальних і розрахункових осцилограм коливань натягнення показав, що в досліджуваному діапазоні частоти кінематичного обурення розрахункові осцилограми достатньо точно відображають дійсний характер зміни і величину амплітуди вимушених коливань.

Для повнішого уявлення про поведінку досліджуваної системи при стаціонарних коливаннях будувалися графіки залежності коефіцієнта динамічності  $\mu$  від параметра  $z = n_1 / n$  для трьох варіантів динамічної моделі (рис. 6).

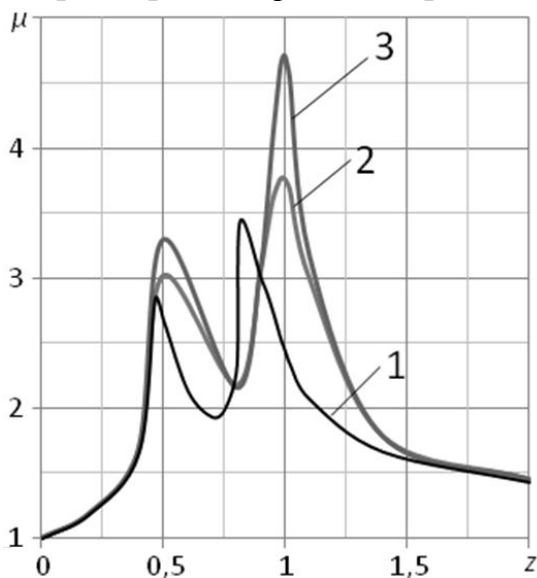


Рис. 6. Залежність коефіцієнта динамічності  $\mu$  від параметру  $z$  для трьох варіантів моделі досліджуваного процесу:  
 1 – з одностороннім зв'язком і комбінованою функцією тертя;  
 2 – з двостороннім зв'язком і комбінованою функцією тертя;  
 3 – з двостороннім зв'язком і простою (лінійною) функцією тертя

З графіків видно, що у разі негармонійної функції кінематичного збурення існує дві області різкого підвищення амплітуди коливань натягнення

(біля резонансної області). При цьому розрахункові значення коефіцієнта динамічності істотно залежать від прийнятого виду динамічної моделі. Наприклад, заміна двостороннього пружного зв'язку на односторонній призводить до зсуву основної зони резонансу і підвищення точності розрахунку коефіцієнта динамічності на 5...10 %. Застосування комбінованої функції тертя замість простої лінійної додатково підвищує точність розрахунків на 20...30 %.

При дослідженні нестационарних коливань розгін кулачка здійснювався згідно функції  $\omega_1(t) = \omega_k \cdot (1 - e^{-b \cdot t})$ . На основі аналізу результатів чисельних і натурних експериментів для різних значень параметра  $z$  встановлено, що різке збільшення амплітуди коливань натягнення може виникати як в сталих резонансних режимах роботи верстата, так і при менших частотах під час розгону. Дослідження показали, що запропонована модель тертя, заснована на комбінованій функції, найповніше відображає вплив процесів розсіяння енергії не тільки у разі стаціонарних, але і при нестационарних коливаннях.

**Розділ 5** присвячений моделюванню і дослідженню коливань натягнення виробу в зоні приймального пристрою намотувального верстата. Аналіз коливань в цій зоні представляє найбільший практичний інтерес для вирішення завдань управління якістю намотування. Розрахункова схема досліджуваного процесу представлена на рис. 7.

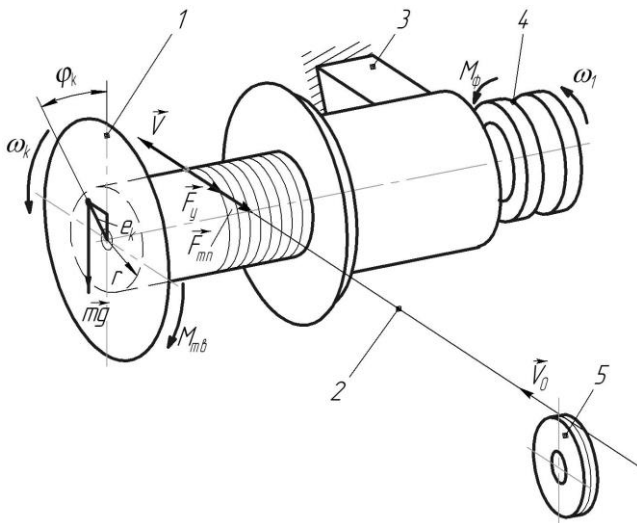


Рис. 7. Розрахункова схема приймального пристрою:  
1 – приймальна котушка;  
2 – довгомірний виріб (прядка або дріт); 3 – основа;  
4 – фрикційна муфта; 5 – шків витяжного механізму

Математична модель включає диференціальне рівняння крутильних коливань котушки з врахуванням кінематичного та динамічного збурень

$$J\ddot{\varphi} = M_y + mg \cdot e_k \cdot \sin(\omega_0 t) + M_0 \text{sign}(\beta\omega_0 - \omega) - r(B_{1n} \text{sign}(\dot{\varphi}) + B_{2n} \dot{\varphi} \cdot r + B_{3n} \text{sign}(\dot{\varphi}) \dot{\varphi}^2 r^2) - (C_1 \text{sign}(\dot{\varphi}) + C_2 \dot{\varphi} + C_3 \text{sign}(\dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2) \quad (3)$$

і функцію, що описує зміну технологічного натягнення згідно залежності

$$F_y(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } \varphi(r + \Delta r) \leq 0 \\ -c\varphi(r + \Delta r) & \text{при } \varphi(r + \Delta r) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

де  $M_y = \begin{cases} 0 & \text{при } \varphi \cdot (r + \Delta r) \leq 0 \\ -c\varphi \cdot (r + \Delta r)^2 & \text{при } \varphi \cdot (r + \Delta r) > 0 \end{cases}$ ;  $\Delta r$  – циклічна зміна радіусу за

рахунок нерівності зовнішнього шару виробу;  $m$  – маса котушки з намотаним на неї виробом;  $e_k$  – відхилення центру мас котушки;  $\beta$  – постійний коефіцієнт.

Розроблена узагальнена модель враховує розсіяння енергії в елементах системи, а також два види збурень – динамічне і кінематичне. Ефективність моделі перевірена в серії чисельних експериментів. Показано, що врахування власних демпфуючих властивостей системи істотно змінює уявлення про характер її коливань.

Для остаточної перевірки відповідності математичній моделі реальному процесу розроблений і виготовлений лабораторний зразок намотувального верстата, схему якого приведено на рис. 8.

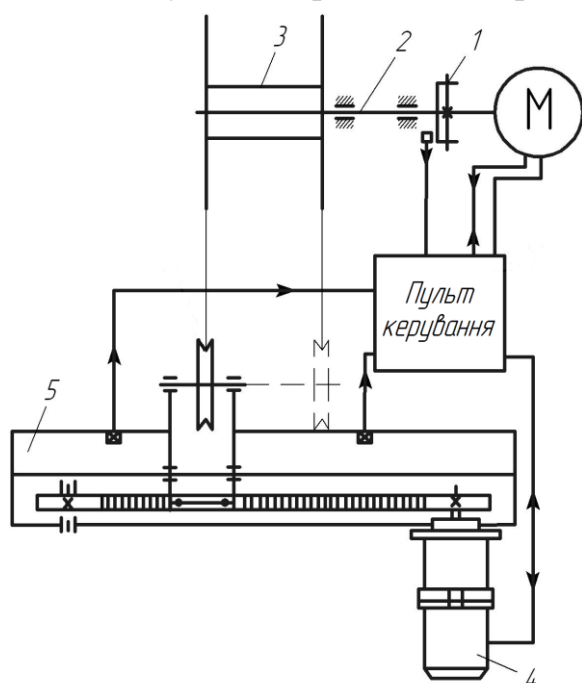
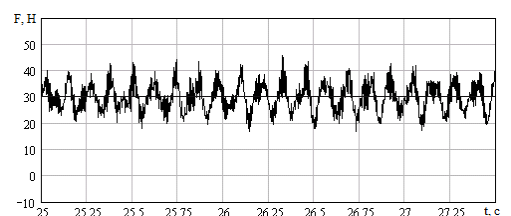
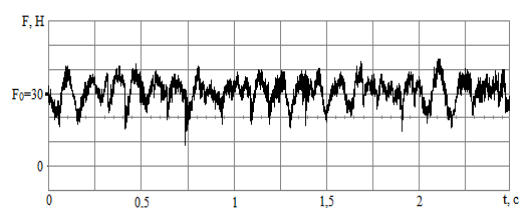


Рис. 8. Схема намотувального верстата:  
1 – фрикційна муфта; 2 – тримальний вал;  
3 – приймальна котушка; 4 – привід укладальника;  
5 – укладальник



а



б

Рис. 9. Розрахункова (а) та експериментальна (б) оцилограми коливань при змішаному збуренні для  $e_k = 0,0008$  м

Верстат призначений для перемотування тонких довгомірних виробів діаметром від 0,2 до 1,5 мм. Виконані на верстаті експерименти присвячені оцінюванню впливу нерівностей зовнішнього шару виробу і ексцентриситету центру мас на характер і інтенсивність коливань натягнення. Результати досліджень показали, що при якісному укладанні виробу найбільш істотний вплив на амплітуду коливань натягнення надає динамічне збурення, тобто ексцентриситет центру мас котушки (рис. 9). Тому на стадії проектувальних розрахунків впливом нерівної поверхні в першому наближенні можна нехтувати.

Теоретичні та експериментальні дані дозволили розробити вдосконалену методику динамічного аналізу. Цифрова реалізація описаної методики може

здійснюватися за допомогою стандартних математичних пакетів або на основі спеціалізованого програмного комплексу. Розроблена методика, по суті, є комп'ютерний імітатор, що дозволяє здійснювати кількісний динамічний аналіз робочого процесу верстата при довільних значеннях варійованих параметрів, не удаючись до проведення натурних експериментів.

У роботі виконаний комплексний динамічний аналіз процесу для всього діапазону довгомірних виробів, які можуть перероблятися на верстаті з катушкою  $D = 200$  мм.

Кінцевим результатом аналізу є розробка технічних рекомендацій по забезпеченню стійкого процесу роботи намотувального верстата легкої серії:

1) верстат доцільно використовувати для перемотування наступних виробів: круглий сталевий дріт діаметром  $d = (0,2 \div 0,6)$  мм або багатодротяна прядка (спіральный канат) діаметром  $d = 0,4 \div 1,4$  мм;

2) середнє технологічне натягнення  $F_0$  рекомендується вибирати з діапазону 5...30 % від розривного зусилля. Для конкретного виду виробу значення даного параметра слід уточнювати на основі аналізу розрахункової осцилограми коливань натягнення;

3) ексцентриситет центру мас катушки  $e_k$  необхідно підтримувати на рівні 0,00015...0,00100 м.

Вказані вимоги щодо ексцентриситету катушки можуть виконуватися на основі проведення наступних технічних заходів:

1) заміна наявного парку катушок зварної конструкції на технологічніші катушки з використанням механічних методів з'єднання деталей, що дозволяє виключити неконтрольовані зміни форми і взаємного розташування окремих деталей при збірці катушки;

2) введення обов'язкових операцій контролю фактичної величини ексцентриситету центру мас і балансування, як при виготовленні катушок, так і в процесі їх подальшої експлуатації;

3) застосування схеми установаження катушки на суцільному консольному валу замість зазвичай вживаної схеми установки катушки на двох конічних пінолях. Як показує досвід, конусна поверхня пінолей знаходиться в умовах великої контактної напруги і достатньо швидко зношується, внаслідок чого в процесі експлуатації відбувається неконтрольований зсув катушки щодо осі обертання (збільшується ексцентриситет). Застосування тримального консольного валу дозволяє різко понизити контактну напругу і триваліше підтримувати стабільне значення ексцентриситету центру мас.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язаний комплекс науково-практичних задач, пов'язаних з вдосконаленням методів динамічного аналізу процесу перемотування і дослідженням впливу розсіяння енергії на динаміку роботи намотувальних верстатів в білярезонансних режимах. Впровадження результатів роботи в діючому канатному виробництві дозволяє понизити частку бракованої продук-

ції, підвищити коефіцієнт корисного використання устаткування і зменшити виробничі витрати на виконання підготовчої операції перемотування. Виконані дослідження відкривають також додаткові можливості для створення нових конкурентоспроможних зразків намотувальних верстатів, а також живлячих пристроїв для канатних машин і приймальних механізмів волочильних станів. Основні теоретичні і практичні результати роботи полягають в наступному:

1. Виконано аналіз впливу нелінійних процесів розсіяння енергії на коливання ланок машин в білярезонансних режимах роботи. Показано, що вигляд і параметри функцій тертя, що відображають процеси розсіяння енергії, істотно впливають на характеристики білярезонансних коливань механічних систем. Для розробки адекватної моделі коливань технологічного натягнення довгомірних виробів в процесі роботи намотувального верстата доцільно використовувати нелінійну комбіновану функцію в'язкого тертя. Застосування цієї функції дозволяє на 20...30 відсотків підвищити точність розрахунку амплітуди білярезонансних коливань.

2. Для комбінованої функції тертя отримано узагальнені формули за розрахунком амплітуди і коефіцієнта динамічності білярезонансних коливань. Розроблено методику визначення коефіцієнтів тертя з використанням ітераційної процедури і чисельного розв'язання диференційного рівняння руху. Методика забезпечує відповідність розрахункової і експериментальної осцилограм коливань з похибкою не більше 5 відсотків.

3. Розроблено лабораторні стенди і проведено експериментальні дослідження власних демпфуючих властивостей елементів намотувального верстата, отримано відомості про закономірності динамічної зміни натягнення довгомірного виробу при стаціонарних і нестаціонарних режимах роботи верстата, а також нові відомості про вплив різних чинників на амплітуду коливань натягнення.

4. На основі теоретичних і експериментальних даних розроблено узагальнену комп'ютерну методику динамічного аналізу і оцінки стабільності процесу перемотування довгомірних виробів. Методика підвищує ефективність технологічних розрахунків, дозволяє виявляти можливі причини нестабільної роботи діючого устаткування, проводити раціональний вибір варійованих параметрів процесу, і на цій основі ухвалювати ефективні рішення по вдосконаленню технології і конструкції верстатів.

5. Проведено комплексні дослідження впливу розсіяння енергії на вимушені коливання технологічного натягнення виробів, що перемотуються, при різних режимах роботи верстата легкої серії. Розроблено уточнену модель процесу перемотування, яка відрізняється від існуючих тим, що враховує розсіяння енергії і дозволяє найточніше відображати зміни амплітуди коливань технологічного натягнення довгомірного виробу при перемотуванні. Точність і адекватність математичної моделі перевірено в ході експериментів на лабораторному зразку намотувального верстата. Розбіжність розрахункових і експериментальних осцилограм коливань натягнення не перевищує 15 відсотків.

6. Надано рекомендації по зниженню амплітуди коливань і підвищенню стабільності роботи намотувального устаткування. Результати дисертаційної

роботи впроваджені на Харцизькій філії ПАТ «Виробниче Об'єднання «СТАЛЬКАНАТ-СИЛУР» завод СИЛУР» (м. Харцизьк, Україна).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хромов О.В. Применение энергетического метода для определения коэффициента демпфирования нелинейной характеристики трения / Е.В. Хромов, О.В. Хромов // Вісник СевНТУ. Серія «Механіка, енергетика, екологія». – Севастополь: СевНТУ, 2008. – Вип. 87. – С. 119 – 122.

*Здобувачем виведено формули для розрахунку коефіцієнта демпфування у разі довільного вигляду простої степеневій функції тертя.*

2. Хромов О.В. Анализ резонансных колебаний осциллятора в случае комбинированной степенной функции трения / О.В. Хромов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – №2. – С. 120 – 123.

3. Хромов О.В. Экспериментальные исследования характеристик внутреннего демпфирования питающего устройства намоточного станка / О.В. Хромов, Н.В. Клипаков // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2009. – №12. – С. 120 – 123.

*Здобувачем розроблено лабораторний стенд, підготовлена методика і виконана обробка результатів експерименту.*

4. Хромов О.В. Экспериментальные исследования характеристик внутреннего трения стальных спиральных канатов и проволоки / О.В. Хромов // Праці Одеського політехнічного університету. – Одеса, 2009. – Вип. 1 (31) – С. 32 – 35.

5. Хромов О.В. Методика и проблемные вопросы применения гистерезисной модели внутреннего трения материала в теории колебаний машин и конструкций / В.Г. Хромов, Е.В. Хромов, О.В. Хромов // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2010. – Вип. 1 (33). – С. 274 – 281.

*Здобувачем проведено числові і натурні експерименти з перевірки ефективності застосування гістерезисної моделі тертя в прикладній теорії коливань машин.*

6. Хромов О.В. Выбор модели внутреннего трения на основе экспериментальных осциллограмм затухающих колебаний системы / О.В. Хромов // Вісник СевНТУ. Серія «Механіка, енергетика, екологія». – Севастополь: СевНТУ, 2010. – Вип.106. – С. 35 – 39.

7. Хромов О.В. Моделирование вынужденных колебаний технологического натяжения длинномерного изделия в процессе перемотки с учетом демпфирующих свойств исследуемой системы / О.В. Хромов // Вісник СевНТУ. Серія «Механіка, енергетика, екологія». – Севастополь: СевНТУ, 2010. – Вип. 110. – С. 175 – 178.

8. Хромов О.В. Особенности методики экспериментального определения демпфирующих характеристик механической системы в случае нелинейной комбинированной функции трения / В.Г. Хромов, Е.В. Хромов, О.В. Хромов //



Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2011. – Вип. 2 (38). – С. 270 – 275.

*Здобувачем виконано теоретичний аналіз можливості виведення кінцевих формул для розрахунку коефіцієнтів демпфування у разі комбінованої степеневі функції тертя.*

9. Хромов О.В. Нестационарные колебания катушки намоточного станка с нелинейными характеристиками внутреннего демпфирования / В.Г. Хромов, О.В. Хромов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №22. – С. 141 – 146.

*Здобувачем виконано розробку узагальненої моделі процесу перемотування, лабораторного стенду, а також проведено числові і натурні експерименти з дослідження нестационарних коливань натягнення довгомірного виробу в приймальній пристрої намотувального верстата.*

10. Хромов О.В. Конструктивные особенности и перспективы развития намоточных станков в сталеканатном производстве / О.В. Хромов, А.О. Харченко // Вісник СевНТУ. Серія «Механіка, енергетика, екологія». – Севастополь: СевНТУ, 2011. – Вип. 120. – С. 162 – 166.

*Здобувачем виконано системний аналіз структури, конструкцій і перспективних напрямів розвитку основних елементів намотувального верстата.*

11. Хромов О.В. Колебания натяжения нити в роликовом демпфирующем устройстве перемоточного станка / О.В. Хромов // Надежность и долговечность механизмов, элементов конструкций и биомеханических систем: материалы междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 4 – 7 сент. 2007 г. – Севастополь: СевНТУ, 2007. – С. 185 – 189.

12. Хромов О.В. Компьютерный анализ процесса колебаний технологического натяжения элементов каната при свивке / Е.В. Хромов, О.В. Хромов // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Одесса, 2008. – №6. – С. 202 – 208.

*Здобувачем виконано числові експерименти з моделювання вимушених коливань технологічного натягнення довгомірних виробів при перемотуванні.*

13. Хромов О.В. Анализ точности метода гармонического баланса в задачах моделирования затухающих колебаний / Е.В. Хромов, О.В. Хромов // Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем и элементов их конструкций: материалы междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 8 – 11 сент. 2009 г. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – С. 163 – 164.

*Здобувачем виконано аналіз точності методу гармонічного балансу і проведено числові експерименти.*

14. Хромов О.В. Повышение эффективности технологического процесса перемотки путем совершенствования механизма привода намоточного оборудования / О.В. Хромов, А.О. Харченко, Е.В. Хромов // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: материалы междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 6 – 10 сент. 2010 г. – Севастополь: СевНТУ. – Т.1. – 2010. – С. 94 – 96.

*Здобувачем виконано системний аналіз структури і перспективних напрямів розвитку основних елементів намотувального верстата.*

## АНОТАЦІЇ

Хромов О.В. Аналіз динаміки робочого процесу намотувальних верстатів з урахуванням розсіяння енергії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальних науково-практичних задач, пов'язаних з розвитком розрахунково-експериментальних методів динамічного аналізу і підвищенням стабільності робочого процесу намотувальних верстатів. Особлива увага приділена дослідженню, моделюванню і врахуванню в динамічній моделі власних демпфуючих властивостей ланок верстата.

У роботі виконано порівняльний аналіз різних енергетично еквівалентних варіантів функцій тертя, що відображають процеси розсіяння енергії. Встановлено, що при застосуванні до задач динаміки технологічних машин комбінована степенева функція тертя дозволяє найточніше описувати вплив різних видів розсіяння енергії на амплітуду білярезонансних коливань.

Розроблено лабораторні стенди і вперше виконано натурні експерименти по вивченню розсіяння енергії в ланках намотувального верстата. В результаті експериментів отримано значення коефіцієнтів тертя для різних видів довгомірних виробів і для приймального пристрою верстата легкої серії.

Нові відомості про енергопоглинаючу здатність ланок верстата дозволили розробити уточнену динамічну модель процесу перемотування. Для перевірки відповідності математичної моделі виконана серія натурних і чисельних експериментів. Отримані результати підтверджують повну якісну і задовільну кількісну відповідність розрахункових і експериментальних осцилограм коливань.

Завершальна частина роботи присвячена моделюванню і оцінюванню впливу різних чинників на інтенсивність коливань технологічного натягнення виробу в зоні приймального пристрою намотувального верстата. На основі нових теоретичних і експериментальних даних розроблена вдосконалена методика і комп'ютерний імітатор, що дозволяють здійснювати динамічний аналіз робочого процесу верстата при довільних значеннях варійованих параметрів.

Розроблено практичні рекомендації по зниженню амплітуди коливань натягнення перемотуваних виробів і забезпеченню стабільного процесу роботи намотувального верстата для існуючого діапазону швидкості обертання приймальної котушки. Результати роботи впроваджені в діючому сталеканатному виробництві.

*Ключові слова:* прикладна теорія коливань, методи дослідження та розрахунку динамічних процесів у машинах, намотувальний верстат, процес перемотування довгомірного виробу, односторонній пружний зв'язок, білярезонансні коливання технологічного натягнення, процеси розсіяння енергії.

Хромов О.В. Анализ динамики рабочего процесса намоточных станков с учетом рассеяния энергии. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

В современной структуре системного проектирования намоточных станков особо важное место занимает раздел динамического анализа процесса перемотки. В известных работах по динамике процесса решались преимущественно задачи, связанные с расчетом собственных частот крутильных колебаний питающих и приемных катушек. При этом исследуемые технические объекты рассматривались, как системы с идеальными упругими связями. В приложении к намоточным станкам особый интерес представляет второй вид задач, связанный с расчетом амплитуд крутильных колебаний приемной катушки и колебаний технологического натяжения перематываемого изделия. Разработка эффективной методики решения подобных задач возможна только на основе модели, учитывающей наличие процессов рассеяния энергии в системе.

Диссертационная работа посвящена решению актуальных научно-практических задач, связанных с развитием расчетно-экспериментальных методов динамического анализа и повышением стабильности рабочего процесса намоточных станков. Особое внимание уделено исследованию, моделированию и учету в динамической модели собственных демпфирующих свойств звеньев станка.

В работе выполнен сравнительный анализ различных энергетически эквивалентных вариантов функций трения, отображающих процессы рассеяния энергии. Установлено, что в приложении к задачам динамики технологических машин комбинированная степенная функция трения позволяет наиболее точно описывать влияние различных видов рассеяния энергии на амплитуду около-резонансных колебаний. Для указанной функции разработана методика определения коэффициентов трения, включающая многократное численное решение уравнения колебаний, а также сравнительный анализ расчетной и экспериментальной осциллограмм затухающих колебаний системы. Кроме того, в приложении к комбинированной функции получены конечные формулы, позволяющие выполнять расчет амплитуды и коэффициента динамичности исследуемого объекта в режиме резонанса при гармоническом возмущении.

Разработаны лабораторные стенды и впервые выполнены натурные эксперименты по изучению рассеяния энергии в звеньях намоточного станка. Первый этап экспериментов посвящен исследованию демпфирующих свойств тонких длинномерных изделий (стальная проволока и прядь). Во втором этапе исследовались демпфирующие характеристики приемного устройства намоточного станка в целом. Для этого записывались и обрабатывались экспериментальные осциллограммы затухающих колебаний груза, подвешенного на длинномерном изделии, а также осциллограммы затухающих крутильных колебаний приемной катушки станка.

Новые сведения об энергопоглощающей способности звеньев станка позволили разработать уточненную динамическую модель процесса перемотки.

Для проверки соответствия математической модели реальному процессу разработан и изготовлен лабораторный образец намоточного станка, выполнена серия натурных и численных экспериментов. Полученные результаты подтверждают полное качественное и удовлетворительное количественное соответствие расчетных и экспериментальных осциллограмм колебаний. Исследования показали, что применение в динамической модели комбинированной функции трения вместо простой линейной повышает точность расчетов амплитуды вынужденных колебаний на 20...30 %.

Заключительная часть работы посвящена моделированию и оценке влияния различных факторов на интенсивность колебаний технологического натяжения изделия в зоне приемного устройства намоточного станка. Модель учитывает наличие динамического и кинематического возмущений, а также нелинейный характер рассеяния энергии в элементах системы. На основе новых теоретических и экспериментальных данных разработана усовершенствованная методика и компьютерный имитатор, позволяющие осуществлять динамический анализ рабочего процесса станка при произвольных значениях варьируемых параметров (среднее технологическое натяжение, эксцентриситет центра масс катушки, линейная скорость подачи изделия). В ходе численных экспериментов исследованы особенности крутильных колебаний питающей катушки станка при наличии односторонней упругой и подвижной фрикционной связей. Выполнен количественный анализ влияния рассеяния энергии на стационарные и нестационарные колебания натяжения длинномерного изделия при гармоническом и негармоническом видах возмущения. Показано, что учет собственных демпфирующих свойств системы существенно изменяет представление о характере её колебаний. Например, согласно предложенной динамической модели автоколебания, возникающие в станке, имеют быстро затухающий характер, что вполне согласуется с экспериментальными данными.

Разработанная методика повышает эффективность технологических расчетов, позволяет выявлять возможные причины нестабильной работы действующего оборудования, производить рациональный выбор варьируемых параметров процесса, и на этой основе принимать эффективные решения по совершенствованию технологии и конструкции станков.

В диссертации рассмотрен пример использования методики для анализа рабочего процесса намоточных станков легкой серии. Сформулированы практические рекомендации по снижению амплитуды колебаний натяжения перематываемых изделий и обеспечению стабильного процесса работы намоточного станка для существующего диапазона скорости вращения приемной катушки. Результаты работы внедрены на Харцызском сталеканатном заводе «СИЛУР» (г. Харцызск, Украина). Внедрение результатов работы позволяет повысить технико-экономические показатели действующих и вновь проектируемых намоточных станков.

*Ключевые слова:* прикладная теория колебаний, методы исследования и расчета динамических процессов в машинах, намоточный станок, процесс перемотки длинномерного изделия, односторонняя упругая связь, околорезонансные колебания технологического натяжения, процессы рассеяния энергии.

Khromov O.V. Dynamic analysis of winding machine operation taking into account energy dissipation – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand.Tech.Sci. behind a speciality 05.02.09 – dynamic and strength of machines. – National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkov, 2012.

Thesis deals with solution of the urgent theoretical and technical problems related to development of experimental-calculated methods of dynamic analysis and increase in stability of the winding machine operation. The special attention was paid to research, modeling and taking into account eigen damping properties of the machine elements in the dynamic model.

Comparative analysis has been made for different energy-equivalent variants of friction function representing energy dissipation processes. It was ascertained that combined power function of friction allows to describe more accurately the influence of different types of energy dissipation on near-resonant oscillation amplitude in the problems of technological machine dynamics.

Laboratory benches have been developed and full-scale experiments concerning the study of energy dissipation in winding machine elements have been carried out for the first time. As a result, friction coefficients have been obtained for different types of long-length products and for the intake of machine of light series.

New data about energy-absorbing capacity of machine elements make it possible to develop advanced dynamic model of winding process. A number of full-scale and numerical experiments have been implemented for conformance testing of mathematical model. The results obtained confirm full qualitative and satisfied quantitative conformance of calculating and experimental oscillograms.

The final part of thesis is devoted to modeling and evaluating of influence of different factors on oscillation intensity of technological tension of a product in the intake area of the winding machine. On the basis of new theoretical and experimental data advanced methodology and computer simulator have been developed. They allow to implement dynamic analysis of the machine operation under the arbitrary values of variable parameters.

Practical guidelines have been developed to reduce the oscillation amplitude of wound product tension and to ensure the stable operating of winding machine for existent range of rotational velocity of takeup spool. Research results have been implemented in wire rope industry.

*Key words:* applied theory of oscillations, research and calculation methods of machinery dynamic processes, winding machine, winding process of a long-length product, unilateral elastic constraint, near-resonant oscillations of technological tension, energy dissipation processes.



Відповідальний за випуск:  
к.т.н., доцент кафедри динаміки  
та міцності машин НТУ "ХПИ"  
Сукіасов В.Г.

Підписано до друку 22.03.2012 р.  
Формат 60x90/16. Папір офсетний. Ум. друк. арк. 0,8.  
Наклад 100 прим. Зам. № 7. Видавництво СевНТУ, НМЦ, 43-52-10  
99053, м. Севастополь, вул. Університетська, 33