

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

**Колот Олександр Володимирович**

УДК 62-82.001

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПРИВОДІВ  
ШЛЯХОМ ВРАХУВАННЯ СТОХАСТИЧНОСТІ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Спеціальність 05.02.03 - Системи приводів

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

**Харків – 2005 р.**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі "Конструювання верстатів та машин" в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

<b>Науковий консультант:</b>	заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, <b>Струтинський Василь Борисович</b> , Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", завідувач кафедрою конструювання верстатів та машин
<b>Офіційні опоненти:</b>	доктор технічних наук, доцент, <b>Скляревський Олександр Миколайович</b> , Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, завідувач кафедрою гідравліки і теплотехніки; доктор технічних наук, професор, <b>Самарчанц Вадим Федорович</b> , „Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут засобів технологічного устаткування „ВЕЛТ”, м. Харків, директор; доктор технічних наук, професор, <b>Зайончковський Геннадій Йосипович</b> , Національний авіаційний університет, м. Київ, завідувач кафедрою гідро газових систем.
<b>Провідна установа:</b>	Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2006 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 при Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2005 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

д.т.н., Пермяков О.А.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Системи приводів з успіхом застосовуються в різних галузях техніки. Гідропривід, як складова частина системи приводів є ефективним засобом автоматизації машин різного призначення. Ефективними елементами гідроприводу є гідравлічні амортизатори. Вони відрізняються компактністю, високими енергетичними характеристиками, низькою матеріалоемністю. Значну роль вони відіграють в електроприводах транспортних систем. Електрогідроприводи часто застосовують у вигляді складних комплектних систем. Прикладом такої складної комплектної системи приводів є стендове обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів. Вона включає стенд, що має механічну частину, електрогідропривід та досліджуваний об'єкт у вигляді гідравлічного амортизатора. Параметри і характеристики окремих підсистем складним чином впливають один на одного. Дана складна система приводів є типовою. Як правило, в техніці використовуються комплексні системи приводів, зв'язані між собою. Дані системи відзначаються значною складністю. При їх розробці, як правило, розглядають окремі підсистеми, вважаючи їх взаємний вплив несуттєвим. Це різко зменшує ефективність розроблених систем приводів як в енергетичному плані так і у функціональному призначенні. Розгляд системи приводів у комплексі являє собою надзвичайно актуальну наукову проблему, яка має важливе значення для розвитку машинобудування.

Однією із причин ускладнення задач комплексного аналізу є складність і різномасштабність системи приводів по її елементах, наявність складних робочих процесів, специфічних ефектів, які мають місце при роботі гідроприводу. Характеристики системи приводів визначаються сотнями факторів, які відрізняються по масштабу впливів у десятки і сотні разів. Точне врахування всіх факторів не є доцільним по причині суттєвого ускладнення одержаних причинно-наслідкових і аналітичних моделей системи приводів.

Весь комплекс факторів, які визначають властивості системи приводів може бути врахований з використанням теоретичної бази теорії ймовірностей і теорії випадкових процесів. При цьому досягається суттєве спрощення складних взаємопов'язаних характеристик елементів приводу та їх систем. Виникає можливість врахування різноманітних робочих процесів. На основі даних методів аналізу суттєво підвищується достовірність результатів і висновків, що дає можливість значно підвищити ефективність розробленої системи приводів.

Підвищення ефективності системи приводів шляхом врахування стохастичних характеристик досягається: вдосконаленням конструкції їх складових елементів, поліпшенням енергетичних характеристик або розширенням функціональних можливостей. Врахування випадкових факторів додатково покращує ергономічні та екологічні параметри системи приводів, зокрема приводить до знищення шуму і вібрацій. Повномасштабне врахування стохастичного характеру характеристик

складових частин системи приводу і, зокрема, гідроприводу являє собою складну науково-технічну проблему, яка має важливе народногосподарське значення.

В даний час немає загального підходу до вирішення вказаної проблеми. Окремі розробки, які стосуються стохастичних шумових характеристик системи приводів носять фрагментарний характер. Вони закінчуються загальними рекомендаціями по боротьбі з шумом, але не виявленням всього комплексу взаємопов'язаних факторів, які формують вібраційні і акустичні характеристики складових систем приводів.

Для визначення стохастичних характеристик системи приводів необхідно використати потужний математичний апарат і сучасні методи алгоритмічного і програмного забезпечення, зокрема застосувати сучасні програмні продукти, які наявні в математичних пакетах MathCAD і Matlab. Лише на цій основі, застосувавши методи імітаційного математичного моделювання складових систем приводів можна створити передумови для суттєвого підвищення їх ефективності. Причиною випадкових змін характеристик гідропривода, як складової частини системи приводів, є особливість його робочих процесів. Тому визначення стохастичних характеристик потребує детального їх вивчення з аналізом причин і наслідків дії окремих фізичних ефектів та їх взаємодії.

В цілому науковий напрямок дослідження системи приводів і їх складових частин шляхом врахування випадкових процесів, які в них протікають, є актуальним і перспективним. Розробка даного напрямку дає можливість суттєво підвищити ефективність системи приводів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконані дослідження тісно пов'язані з науковими розробками, які ведуться на кафедрі конструювання верстатів та машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Дослідження виконані безпосередньо при розробці держбюджетних тем: ДБ № 2491 (№ держ. реєстрації 0101U002282) "Розробка наукових основ статистичної динаміки та методів математичного моделювання стохастичних динамічних процесів металорізальних верстатів", ДБ №2750-ф (№ держ. реєстрації 0104U003270) "Розробка комплексу тензорних математичних моделей дисипативних робочих процесів у системах приводів металорізальних верстатів" і є частиною наукового напрямку акціонерного товариства "МІНТЕК", реалізованому у господарчих темах № ПЗ/Т – 032793/НЮ від 08.07.2003р., № Л/Т – 031163/НЮ від 23.07.2003р., № ЗЭРЗ – 05-341/15 від 12.10.2005р. "Виготовлення та впровадження стендів мод. СВД11-0,047 ПТ та СВД 23-0,5 ПТ з комп'ютерною діагностикою для випробування гасителів коливань" згідно патентів України на винаходи № 72048 "Спосіб діагностики гасителів коливань" та № 72280 "Стенд для випробування гасителів коливань", що відповідає постановам Кабінету Міністрів України щодо підвищення безпеки руху на залізничному транспорті України.

**Метою роботи** є підвищення ефективності системи приводів на основі дослідження

стохастичних змін їх характеристик та їх цілеспрямованого вдосконалення.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні **задачі досліджень**:

1. Провести інформаційні дослідження в галузі системи приводів у напрямку визначення причин і наслідків випадкових змін характеристик в їх складових частинах - гідроприводі та електроприводі.

2. Сформулювати у вигляді комплексної системи методичні основи аналізу і синтезу стохастичних параметрів системи приводів.

3. Визначити елементи класифікації систем приводів з точки зору виникнення і прояву стохастичних змін характеристик гідроприводу та його елементів.

4. Дати вичерпний аналіз робочих процесів у елементах системи приводів, які є причинами стохастичних змін основних параметрів гідроприводу.

5. Визначити характер випадкових змін характеристик елементів системи приводів та розробити методи розрахунку характеристик і визначити вплив випадкових факторів на їх показники загальної ефективності.

6. Дати детальний аналіз конструктивних особливостей гами автономних дисипативних елементів систем гідроприводу (гідравлічних амортизаторів) і визначити причини і наслідки зниження їх ефективності під дією випадкових експлуатаційних факторів.

7. Розробити замкнену стохастичну математичну модель автономної дисипативної складової системи приводів (гідравлічного амортизатора), яка дозволяє здійснити їх комплексне дослідження із врахуванням випадкових змін характеристик гідроприводу у процесі експлуатації.

8. Розробити високоефективну систему приводів стендового обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів, визначити особливості випадкових змін параметрів гідроприводу та їх вплив на ефективність роботи стендового обладнання.

9. Створити алгоритмічно-програмний комплекс для імітаційного математичного моделювання процесу діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів, який дає можливість комплексного аналізу випадкових змін параметрів системи приводів.

10. На основі імітаційного математичного моделювання систем приводів стендового обладнання розробити ефективні методи обробки результатів випробувань, які базуються на сучасних методах спектрального аналізу випадкових процесів і супроводжують роботу системи приводів.

**Об'єктом досліджень** є системи приводів, зокрема автономні дисипативні елементи системи: електропривід, гідропривід, (гідро розподільник, гідравлічний амортизатор) та типові представники систем приводу – стендове обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів.

**Предметом досліджень** є стохастичні процеси в системах приводів, зокрема короткочасні та довготривалі випадкові зміни параметрів та характеристик автономних дисипативних елементів систем (гідравлічних амортизаторів) і електрогідропривода стендового обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів.

**Наукова новизна:** Вперше в практиці розробки та дослідження системи приводів виконано комплексний аналіз стохастичного характеру основних робочих процесів гідроприводу, зокрема характеристики нестационарної течії рідини в трубопроводах, стиску робочого середовища. Зроблено висновки про властивості випадкових змін окремих параметрів та можливості їх опису методами теорії ймовірності. Встановлено характер зв'язків випадкових властивостей робочих процесів із характеристиками окремих агрегатів системи приводів та характеристиками привода в цілому.

Розроблена комплексна стохастична математична модель автономного дисипативного елемента приводу (гідравлічного амортизатора), яка дозволяє визначити вплив окремих параметрів привода, зокрема його випадкових параметрів на загальні процеси зміни і перетворення енергії в системі приводів. Створено алгоритмічно-програмний комплекс для імітаційного математичного моделювання системи приводів стендового обладнання для діагностичних випробувань амортизаторів. Імітаційне математичне моделювання дозволяє виконати математичний супровід процесу випробувань амортизатора в стендових умовах. При цьому здійснюється аналіз дії стохастичних чинників як в стендовому обладнанні так і в самому амортизаторі з метою суттєвого підвищення ефективності стендових випробувань амортизатора, шляхом підвищення достовірності їх результатів і розширення інформативності випробувань. Одержаний масив інформації при стендових випробуваннях запропоновано обробляти методами спектрального аналізу процесів із врахуванням специфіки роботи амортизатора в умовах експлуатації.

Вперше запропоновано метод спектрального аналізу підвищеної надійності, який дозволяє значно підвищити точність визначення високочастотних складових процесу шляхом виключення штучних точок розриву, які виникають по причині похибок визначення періоду циклічного процесу зміни силових і кінематичних параметрів амортизатора.

**Практична цінність.** Визначено причини випадкових змін характеристик основних елементів гідроприводу. Знайдені числові значення випадкових змін характеристик. Дані практичні рекомендації по знаходженню основних числових характеристик випадкових змін параметрів гідроприводу, зменшенню високочастотних коливань ротора крокового двигуна.

На основі аналізу конструкцій автономних дисипативних елементів приводів (гідравлічних амортизаторів) встановлено взаємозв'язок дефектів деталей амортизатора зі змінами його характеристик, зокрема із випадковими змінами характеристик. Встановлений взаємозв'язок дозволяє значно підвищити достовірність діагностичних випробувань амортизаторів.

Головним практичним результатом роботи є розроблене, апробоване і впроваджене в Укрзалізниці стендове обладнання, яке дозволяє здійснити діагностичні випробування амортизатора за законами, які відповідають реальним умовам роботи амортизатора в процесі експлуатації. Стендове обладнання доповнено спеціальною методикою аналізу результатів, яка дозволяє розширити обсяг інформації, отриманої в процесі випробувань амортизатора.

#### **Особистий внесок здобувача:**

Автором запропонована методика теоретичного та експериментального визначення випадкових змін дисипативних параметрів елементів системи привода. Запропоновано методику діагностики деталей гідроприводу із врахуванням стохастичних факторів їх виготовлення та експлуатації. Автором розроблена імітаційна математична модель дисипативних характеристик комплектних гідромеханічних систем. Розроблено стендове обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів та методика їх діагностичних випробувань на спеціальному стендовому обладнанні. Дана оцінка впливу зносу основних деталей гідравлічного амортизатора на його характеристики.

Автором запропоновано методику спектрального аналізу результатів діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів, яка базується на приведенні процесу з нечітко визначеним періодом до строго періодичного. На основі спектрального аналізу автором запропоновано методику розпізнавання характеру несправностей гасителів коливань.

**Апробація роботи.** Основні результати роботи доповідалися і дістали позитивну оцінку на IV Міжнародній конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", 5-8 червня 2001 року м. Харків; VIII Міжнародній конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", 2-6 червня 2003 року, м. Черкаси; IV Міжнародній конференції "Прогресивна техніка і технології - 2003", 28 червня - 2 липня 2003 року, м. Севастополь; X Міжнародній науково-технічній конференції "Машиностроение и техносфера XXI века", 8 – 14 вересня 2003 р., м. Севастополь (доповідь відзначена почесною грамотою президії конференції); III Міжнародній науково-технічній конференції "Процеси механічної обробки, верстати та інструмент", 9-11 жовтня 2003 року; Міжнародній науково-технічній конференції "Промислова гідравліка і пневматика" присвяченій 100-річчю з дня народження Т. М. Башти, 17-18 лютого 2004 року, м. Київ; IX Міжнародній конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", 2-5 червня 2004 року, м. Київ; X Міжнародній конференції "Прогресивна техніка і технології - 2004", 24 – 28 червня 2004 року, м. Севастополь, V Міжнародній науково-технічній конференції "Вібрації в техніці та технологіях", 17-21 жовтня 2004 р., м. Вінниця; Міжнародній науково-практичній конференції "Наука в транспортному вимірі", 11 -13 травня 2005 року, м. Київ (доповідь, рекомендована програмним комітетом до опублікування у спеціальному номері журналу "Залізничний транспорт України"); X Юбилейной международной конференции "Гидроаэромеханика в инженерной

практике", 23-26 мая 2005 года, г. Краматорськ; VI Міжнародній науково-технічній конференції "Прогресивна техніка і технології - 2005", 22-26 червня 2005 року, м. Севастополь.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано: монографія, відомчий нормативний документ міністерства транспорту України, 17 статей у фахових виданнях ВАК України, отримано 6 патентів України, 9 інших друкованих робіт.

**Структура і обсяг роботи.** дисертація складається з вступу, дев'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел. Робота містить 478 сторінок, в тому числі 150 рисунків і 40 таблиць, список літератури включає 213 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**В першому розділі** наведено аналіз сучасного стану проблеми підвищення ефективності гідроприводу шляхом врахування випадкових змін його характеристик. Подані основоположні наукові праці в галузі гідроприводу, в яких указано на причини і наслідки можливих змін характеристик гідроприводу. Розробці даної проблеми присвячені роботи Башти Т.М., Брон Л.С., Бочарова В.П., Бадаха В.М., Гаминіна Н.С., Гладкого П.М., Зайончковського Г.Й., Іванова М.І., Лур'є З.Я., Лещенка В.А., Лисенка В.С., Нікітіна Г.А., Комарова А.А., Прокоф'єва В.М., Склярєвського О.М., Струтинського В.Б., Тумаркіна М.М., Хаймовича Є.М., Чупракова Ю.І., Федорця В.О., та багатьох інших.

Відзначено, що зміни характеристик мають невизначений (стохастичний) характер. Основними причинами зміни характеристик автори вважають зміни параметрів течії рідини, обумовлені гідродинамічними процесами. Пульсації динамічних параметрів виникають також внаслідок невизначеності сил тертя в рухомих з'єднаннях. Джерелами випадкових збурень в гідросистемах часто є гідронасоси, робота розподільчої та регулюючої гідроапаратури в особливих (автоколивальних) режимах. В розділі також розглянуто застосування систем електрогідроприводу в стендовому обладнанні, зокрема крокового електродвигуна, гідророзподільника, гідроамортизатора.

На основі аналізу стану розробки наукової проблеми обґрунтовано актуальність, визначено мету і сформувані основні задачі досліджень.

**У другому розділі** наведені методологічні основи аналізу і синтезу випадкових процесів у гідроприводі. Розглянуто аналіз випадкових величин, знаходження законів їх розподілу. Визначено характеристики систем випадкових величин, елементи їх кореляційного та регресійного аналізу. Встановлені основні статистичні характеристики випадкових процесів. Описані процеси типового виду. Знайдені їх математичні моделі у вигляді кореляційних функцій та спектральних щільностей. Встановлені основні закономірності внутрішньої структури випадкових процесів і методи аналізу на основі канонічного розкладу випадкових процесів.



Розглянуто загальні причини синтезу випадкових вхідних параметрів системи приводів. Стохастичні входи задаються або реалізаціями випадкових процесів (випадкових чисел) або статистичними характеристиками випадкових процесів (рис.1).

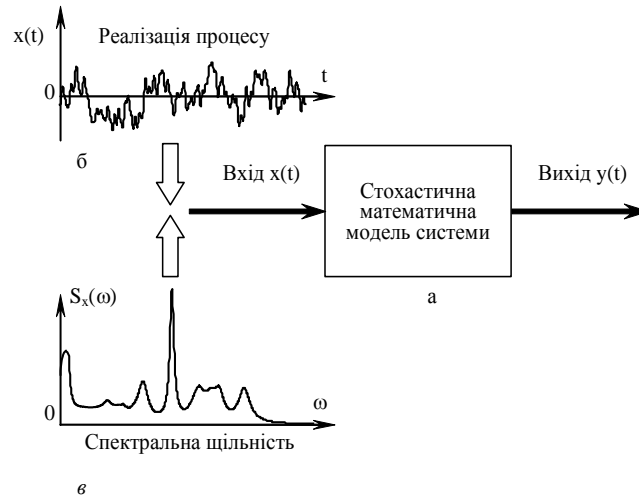
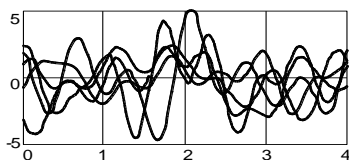


Рис. 1. Способи визначення вхідних параметрів стохастичної математичної моделі (а) у вигляді реалізації вхідного випадкового процесу (б) та шляхом формування його статистичної характеристики (спектральної щільності) (в).

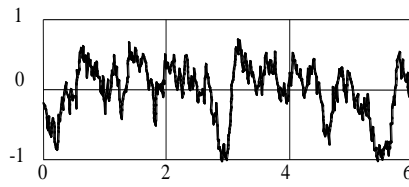
Розроблено методи побудови математичних моделей статистичних характеристик випадкових параметрів системи приводів і відповідно синтезу даних параметрів. Методи включають формування статистичної характеристики у вигляді суми типових (базисних) статистичних характеристик і відповідних їм випадкових параметрів гідроприводу.

Більш загальним методом є формування набору реалізацій випадкових процесів. Застосовано різні форми математичних моделей, які синтезують реалізацію випадкового процесу (рис. 2 а, б, в, г).

$$x^*(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k(\omega_0 t + \alpha^*) + b_k \sin k(\omega_0 t + \alpha^*) \quad x^*(t) = \sum_{k=1}^N a_k^* \sin[\Phi_k^*(t) + b^*]$$



а



б

$$x^*(t) = \sum_{k=1}^N a_k^* \text{cal}\left(k, \frac{t}{T}\right) + b_k^* \text{sal}\left(k, \frac{t}{T}\right)$$

$$x^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k(t_k) \frac{\sin[2\pi f_n(t - t_k)]}{2\pi f_n(t - t_k)}$$

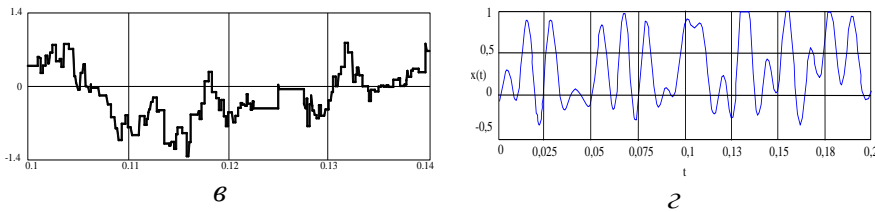
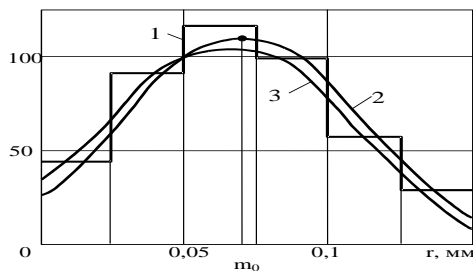


Рис. 2. Математичні моделі реалізації процесу: а - при формуванні полігармонічних процесів; б - при формуванні змінної випадкової частоти; в - при формуванні процесу із кусково-постійних ортогональних функцій Уолша; г - при формуванні процесів із обмеженим спектром.

У третьому розділі розглянуті гідродинамічні процеси, які обумовлюють випадкові зміни характеристик окремих пристроїв гідроприводу. Встановлено, що основними стохастичними гідродинамічними процесами є: деформації робочого середовища гідроприводу, обумовлені наявністю нерозчиненого повітря; забруднення рідини; відривні та кавітаційні явища; турбулентність та інші. Визначено кількісні характеристики випадкових розмірів бульбашок нерозчиненого повітря. Експериментальні дані у вигляді гістограми (рис.3, крива 1) частоти наявності кількості бульбашок повітря відповідного розміру апроксимовані нормальним законом (крива 2) і законом розподілу Грама-Шарльє (крива 3)



Крива 2

$$\frac{dN}{dr} = \varphi(r) = \frac{N_{ок}}{W_k \sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(r-m)^2}{2\sigma^2}}$$

Крива 3

$$\frac{dN}{dr} = \varphi(r) = \frac{\mu_3}{6\sigma^3} \varphi_{(r)}^{(3)} + \left( \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 \right) \frac{\varphi_{(r)}^{(4)}}{24}$$

Рис. 3. Гістограма (крива 1) експериментально визначених значень наявності кількості бульбашок повітря та відповідні закони їх розподілу: нормальний (крива 2), Грама-Шарльє (крива 3).

Середній діаметр бульбашки  $m$  та середньоквадратичне відхилення діаметра  $\sigma$ , які визначають закони розподілу, є статистичними характеристиками локальної деформативності рідини при наявності нерозчиненого повітря. Дані статистичні характеристики пов'язані із концентрацією повітря в робочій рідині наступною залежністю:

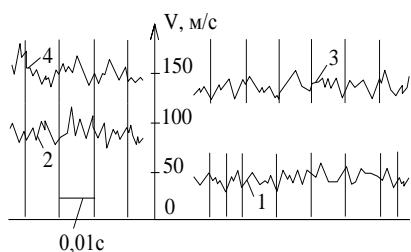
$$C_0 = 16,2 \sigma^3 N_0 \left[ 0,2 \left( \frac{m}{\sigma} \right)^3 \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{m}{\sqrt{2}\sigma} \right) + \frac{1}{2} e^{-\frac{m^2}{2\sigma^2}} \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{m}{\sigma} \right)^2 \right] + \frac{m}{\sigma} e^{-0,4 \frac{m}{\sigma}} \right]$$

Наявність бульбашок приводить до випадкових змін локального модуля пружності рідини та відповідних змін характеристик пристроїв гідроприводу.

Аналогічний вплив мають випадкові розміри і розташування частинок забруднень. В результаті досліджень встановлено, що закон розподілу кількості частинок забруднень певного розміру близький до експоненціального. Забруднення в основному проявляються в процесі облітерації малорозмірних каналів, що приводить до випадкових змін характеристик гідроприводу. На випадкові зміни характеристики впливають також явища в'язкого та інерційного відриву потоків, вихроутворення в проточній частині елементів гідроприводу.

Найбільш характерним стохастичним процесом в гідроприводі є турбулентність. Розглянуті основні статистичні характеристики параметрів, які зазнають випадкових змін внаслідок турбулентності (рис.4).

Суттєвий вплив на випадкові зміни характеристик мають динамічні явища в трубопроводах, зокрема гідроударні процеси, хвильові процеси різної фізичної природи. В цілому комплекс гідродинамічних



явищ в своїй сукупності приводить до випадкових змін параметрів течії і, відповідно, випадкових змін характеристик елементів гідроприводу.

Рис. 4. Пульсації швидкості турбулентного руху рідини в трубопроводі.

У четвертому розділі розглянуто випадкові зміни характеристик основних пристроїв гідроприводу. Визначено випадкові зміни гідравлічного опору дроселів різного виду, зокрема регульованих дроселів і клапанів (рис.5).

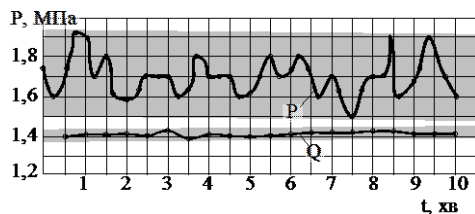


Рис. 5. Зміни витрати рідини і перепаду тиску.

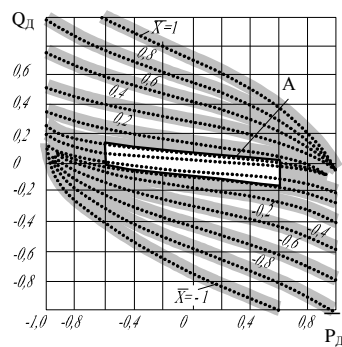


Рис. 6. Узагальнена статична характеристика реального дроселя розподільника.

Випадкові зміни статичних характеристик регулюючої гідроапаратури мають місце в межах полоси, ширина якої сягає 5..15% номінального значення характеристики. В межах полоси випадкові значення характеристики, як правило, відповідають нормальному закону розподілу. Встановлено закони розподілу та діапазони випадкових змін статичних характеристик керуючої гідроапаратури, зокрема чотирьохдросельного золотникового гідророзподільника (рис.6).

Розроблена спеціальна методика аналізу випадкових змін динамічних характеристик елементів гідропривода. Згідно методики, вихідний параметр гідропривода визначено своїм середнім значенням (математичним сподіванням)

$$\bar{Y}_{il}(t) = \sum_{k=1}^K x_{ak} [\bar{U}_{ijl}(k\omega_0) \cos(k\omega_0 t + \psi_{ok}) + \bar{V}_{ijk}(k\omega_0) \sin(k\omega_0 t + \psi_{ok})]$$

та дисперсією

$$\sigma_{yi}^2(t) = \sum_{k=1}^K [\sigma_{Uij}^2(k\omega_0) \cos^2(k\omega_0 t + \psi_{ok}) + \sigma_{Vij}^2(k\omega_0) \sin^2(k\omega_0 t + \psi_{ok}) + \sin^2(k\omega_0 t + \psi_{ok}) \text{cov}\{U_{ij}, V_{ij}\}]$$

В дані залежності входять статистичні параметри дійсної та уявної частотних характеристик гідропривода, зокрема математичні сподівання  $\bar{U}$  та  $\bar{V}$ , дисперсії характеристик  $\sigma_U$  і  $\sigma_V$  та коефіцієнт кореляції (коваріація) характеристик  $\text{cov}(U_{ij}, V_{ij})$ .

Аналогічно визначені випадкові зміни амплітудно-частотної, фазо-частотної та амплітудно-фазової характеристик елемента гідропривода.

Знайдені статистичні параметри випадкових характеристик типових елементів гідропривода (рис. 7 а, б).

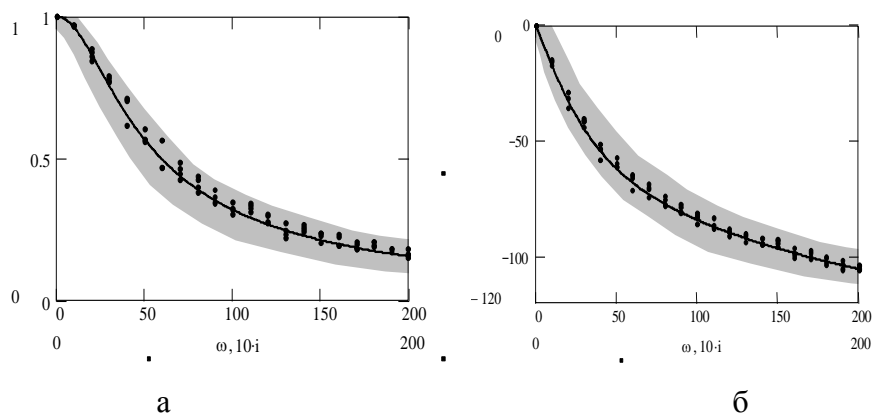


Рис.7. Амплітудно-частотна характеристика (а), амплітудно-фазова характеристика (б) дроселюючого гідророзподільника.

Випадкові зміни статичних і динамічних характеристик елементів гідропривода обумовлюють загальні випадкові зміни характеристик системи приводів.

У п'ятому розділі наведені результати досліджень випадкових процесів в системах гідропривода. Теоретично і експериментально вивчені дисипативні процеси, які мають місце під

час руху робочої рідини в трубопроводах. Експериментально визначено закономірності випадкових змін лінійного (ламінарного) та квадратичного (турбулентного) коефіцієнтів опору.

Встановлено, що дисипативні параметри гідроприводу (коефіцієнти опору) характеризуються своїми середніми значеннями (математичним сподіванням) та випадковими відхиленнями від середніх значень. Закон розподілу випадкових змін гідравлічного опору трубопроводу є близьким до нормального (рис.8).

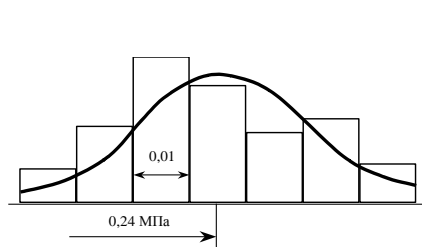


Рис.8. Гістограма експериментально визначених значень перепадів тиску на гідролінії між гідророзподільником та гідроциліндром та відповідний закон розподілу.

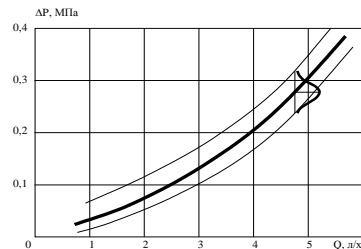


Рис.9. Випадкові зміни значень перепаду тиску в гідромагістралі між гідроциліндром і гідророзподільником.

Таким чином, перепади тиску в гідролініях можуть бути описані залежністю:

$$\Delta p = R_1 Q + R_T Q^2 + \delta \Delta p,$$

де  $R_1$ ,  $R_T$  — лінійний та квадратичний опори гідролінії;  $Q$  — витрати рідини;  $\delta \Delta p$  — центрована випадкова величина, закон розподілу якої близький до нормального (рис.9).

В процесі досліджень визначено деформативні параметри привода та закономірності їх випадкових змін. Розрізняють статичні (ізотермічні) процеси деформації та динамічні (адіабатичні) процеси. Для експериментального визначення статичної деформативності привода шток гідроциліндра навантажувався спеціальним силовимірювачем.

Деформативність привода в ізотермічному режимі характеризується наявністю розсіяння випадкових значень та гістерезисними явищами (рис.10).

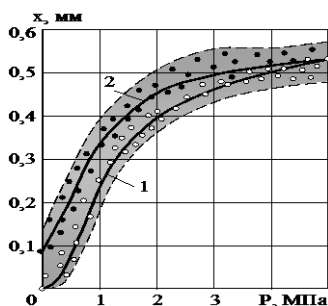


Рис.10. Діапазон змін залежності переміщення штока гідроциліндра при дії на нього статичної сили: крива 1 — навантаження; крива 2 — розвантаження поршня гідроциліндра.

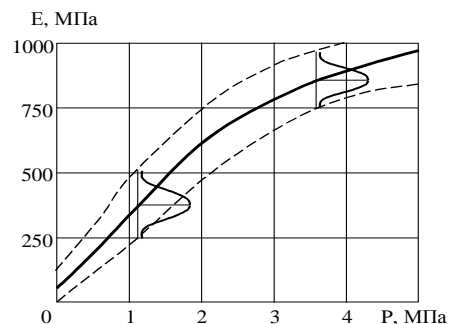


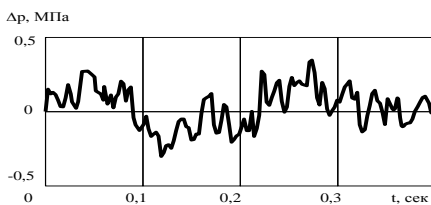
Рис.11. Експериментально визначена залежність математичного сподівання ізотермічного модуля пружності від тиску та розсіяння значень модуля пружності.

В результаті обробки експериментальної характеристики сила-деформація знайдені значення еквівалентного ізотермічного модуля пружності гідропривода. Вони утворюють полосу, в межах якої розподіл значень модуля пружності близький до нормального закону (рис.11).

Деформативність привода в динамічних режимах визначалася при переміщенні штока по синусоїдальному закону за допомогою кулісного механізму. В результаті експериментальних вимірів знайдені значення адіабатичного модуля пружності при частотах переміщення штока гідроциліндра 2...5 Гц, що відповідає умовам роботи обладнання..

Інерційні властивості гідроприводу, визначені теоретично і уточнені експериментальними методами. Переміщення штока також задавалось по синусоїдальному закону. Виміряні поточні значення динамічного перепаду тиску в гідролінії (рис.12).

Залежність перепаду тиску від часу подана у вигляді розкладу в ряд Фур'є з коефіцієнтами  $a_L$ ,  $b_L$ . Вони послужили основою для розрахунків

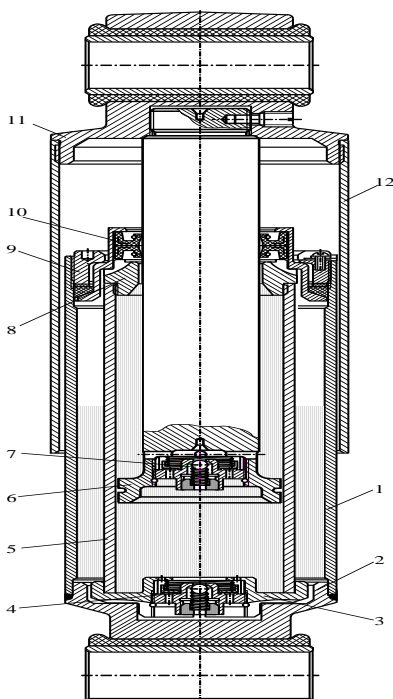


коефіцієнта інерційного опору гідролінії, який залежить від частоти  $\omega$  синусоїдальних переміщень поршня амплітуди  $x_0$ .

Рис. 12. Експериментально визначена залежність перепаду тиску в порожнинах гідроциліндра при синусоїдальному переміщенні поршня гідроциліндра.

$$L(t) = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_p} a_L \cos k\omega t + b_L \sin k\omega t - R_1 x_0 \omega \cos \omega t - R_T (x_0 \omega)^2 \cos^2 \omega t}{-x_0 \omega^2 \sin \omega t}$$

Шляхом обробки експериментальних даних визначені середні значення коефіцієнтів інерційного опору та їх відхилення від середніх значень. Відхилення мають випадковий характер із законом розподілу близьким до нормального. Для математичного опису інерційних параметрів використано гаусівський випадковий процес, заданий своїм канонічним розкладом.



**В шостому розділі** розглянуті конструктивні особливості об'єкта діагностичних випробувань. Виконано аналіз конструкцій гідравлічних амортизаторів залізничних вагонів та вагонів метрополітену. Вибраний типовий представник гідравлічних амортизаторів (рис.13).

Рис. 13. Конструктивна схема гідравлічного амортизатора: 1 – стакан; 2 – нижня голівка; 3 – дно; 4 – нижній клапан; 5 – циліндр; 6 – поршень зі штоком; 7 – верхній клапан; 8 – напрямна втулка; 9 – кришка; 10 – манжетне ущільнення; 11 – верхня голівка; 12 – кожух.

В результаті аналізу встановлені основні дефекти вузлів

амортизаторів, їх вплив на характеристики та способи усунення дефектів.

В цьому розділі виконано імітаційне математичне моделювання амортизатора, як автономної дисипативної гідромеханічної системи. Розглянуто окремо стохастичні характеристики вузла верхнього клапана (рис.14), нижнього клапана та пари шток-напрямна втулка. Запропоновано замкнена гідравлічна розрахункова схема амортизатора (рис.15).

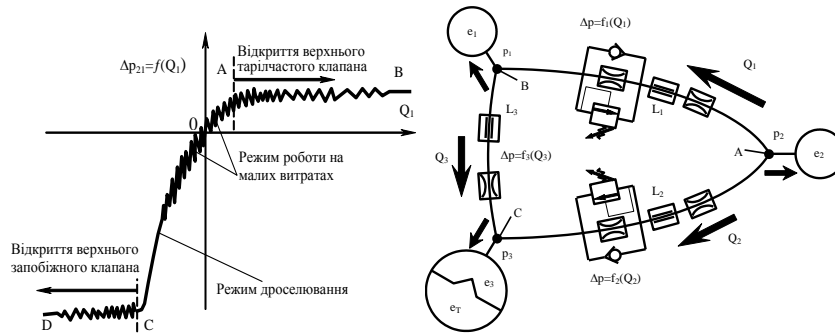
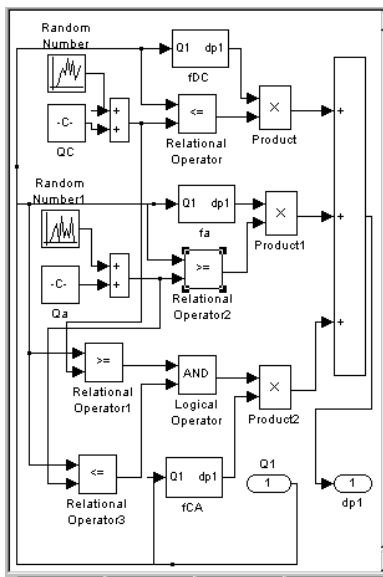


Рис.14. Нелінійна статична характеристика вузла верхнього клапана.

Рис.15. Еквівалентна гідравлічна схема амортизатора.

Розроблені та апробовані стохастичні математичні моделі швидкозношуваних вузлів амортизатора.



Верхній клапанний вузол має чотири різні режими роботи. Тому його статична характеристика визначається логічною функцією, що має чотири гілки. Відповідно (див. рис.14) характеристика клапана описана залежністю:

$$\Delta p_{21} = f_1(Q_1) = \begin{cases} f_{AB}(Q_1) & \text{при } Q_1 \geq Q_A; \\ f_{OA}(Q_1) & \text{при } 0 \leq Q_1 \leq Q_A; \\ f_{OC}(Q_1) & \text{при } 0 \geq Q_1 \geq -Q_C; \\ f_{CD}(Q_1) & \text{при } Q_1 \leq -Q_C. \end{cases}$$

Розроблена структурна математична модель нелінійної статичної характеристики верхнього клапанного вузла (рис.16)

Враховані процеси деформації рідини в порожнинах амортизатора. Деформативність повітряної фази визначено із рівняння стиску об'єму повітря в корпусі амортизатора  $p_3 W_{\Pi} = RT$ .

Рис.16. Математична модель нелінійної статичної характеристики верхнього клапанного вузла.

Баланс витрат в порожнині корпусу гідроциліндра описано рівнянням:  $Q_2 + Q_3 = e_3 \frac{dp_3}{dt} + e_T \dot{T}$ , де:  $e_3 = \frac{RT}{p_3^2} + \frac{W_3}{E_3}$  – коефіцієнт

деформативності газоповітряного робочого середовища в порожнині корпусу амортизатора.

Для обчислення стохастичних деформативних параметрів робочого середовища в порожнині корпусу амортизатора розроблена структурна математична модель (рис.17).

В результаті об'єднання окремих моделей сформована загальна структурна математична модель гідравлічної частини амортизатора (рис.18).

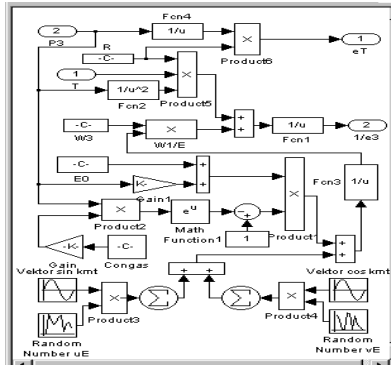


Рис.17. Структурна математична модель стохастичних деформативних параметрів робочого середовища.

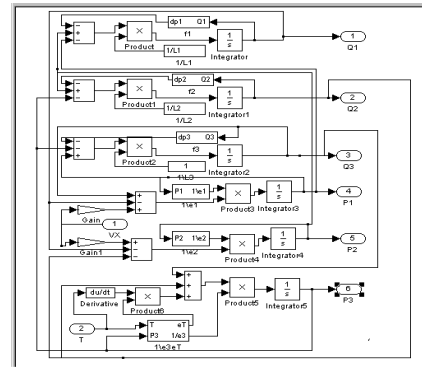


Рис.18. Загальна структурна математична модель гідравлічної частини амортизатора.

Імітаційна модель амортизатора включає засоби формування закону переміщення штока, який відповідає реальним умовам роботи амортизатора в процесі експлуатації.

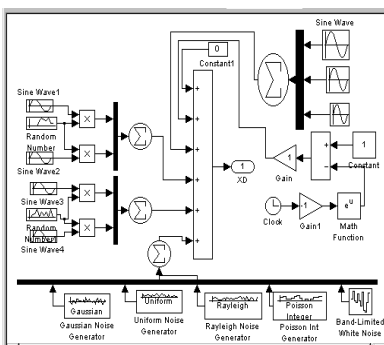


Рис.19. Структура блока формування змішаних детермінованих стохастичних переміщень поршня амортизатора.

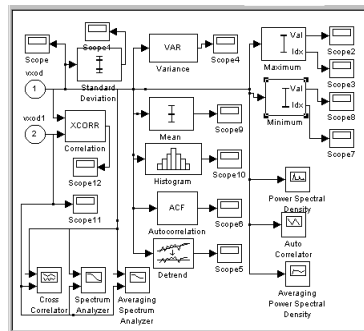


Рис.20. Структура реєструючого блока використаного при імітаційному моделюванні переміщення штока амортизатора.

Виконано аналіз фактичних переміщень штока амортизатора. На цій основі сформульовані концептуальні принципи імітаційного моделювання. Переміщення штока подано у вигляді суперпозиції детермінованих та стохастичних переміщень поршня амортизатора (рис.19).

Для здійснення процедури імітаційного моделювання і обґрунтування стратегії дослідження та одержання обґрунтованих висновків у моделі існує блок аналізу стохастичних вихідних параметрів (рис.20). В процесі досліджень розроблена і апробована загальна структурна математична модель амортизатора (рис.21) та виконана її апробація



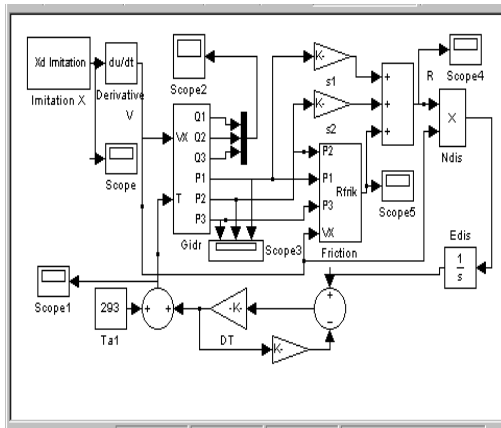


Рис.21. Структурна математична модель інтегральних дисипативних процесів амортизатора.

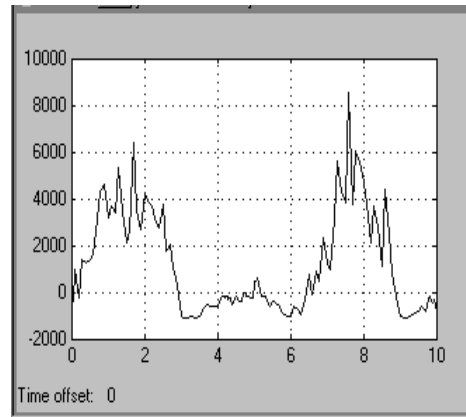


Рис.22. Залежність загального зусилля на штоці амортизатора при циклічному переміщенні штока.

Виконані розрахунки інтегральних дисипативних процесів амортизатора. В тому числі знайдена залежність (рис.22) загального зусилля на штоці амортизатора при циклічному стохастичному переміщенні штока, яке відповідає реальним експлуатаційним умовам. Апробація імітаційної моделі амортизатора підтвердила її адекватність.

У восьмому розділі наведені дані про розроблене стендове обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів (рис. 23).

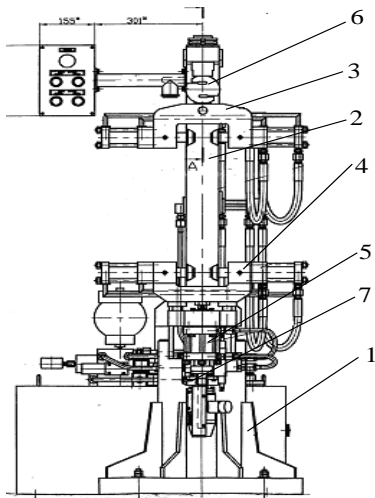
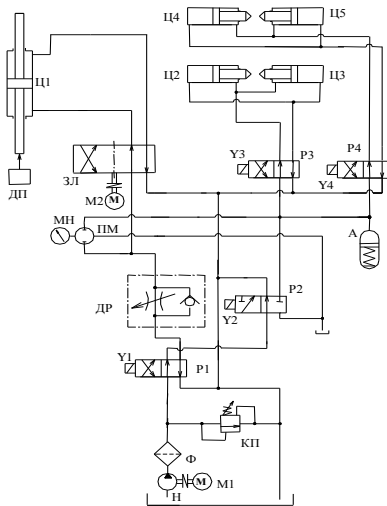


Рис.23. Стендове обладнання:  
1 – силова основа;  
2 – траверса; 3 - гідроциліндр верхнього захвата;  
4 – гідроциліндр нижнього захвата; 5 – обертовий золотник, утворюючий синусоїдальний закон руху гідроциліндром переміщення; 6 – пристрій-вимірювач зусилля на штоці; 7 – пристрій-вимірювач переміщення.



Рис. 24. Загальний вигляд стендового обладнання для визначення характеристик амортизатора.

Стенд має автономну гідравлічну систему з контрольно-регулювальною апаратурою (рис.25).



Розроблена структурна математична модель системи приводів стендового обладнання (включаючи гідравлічний амортизатор), яка моделює роботу стенда при стандартних умовах випробувань.

Розглянуті окремо ділянки гідросистеми обох порожніх гідроциліндра при різних умовах роботи привода. Математична модель правої частини гідросистеми для режиму гальмування поршня справа має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dQ_1}{dt} = \frac{1}{L_1} [\pm P_{1in} \mp P_{1o} - R_{1n}Q - R_{1T}|Q_1|Q_1]; \\ \frac{dQ_{1S}}{dt} = \frac{1}{L_{1S}(x)} [-P_{1in} + P_{1S} - R_{1S}(x)Q_{1S}]; \\ \frac{dP_{1in}}{dt} = \frac{1}{C_{1in}} [-Q_1 + Q_{1S} + s_{1in}v]; \\ \frac{dP_{1S}}{dt} = \frac{1}{C_{1S}} [s_{1S}v - Q_{1S}]. \end{cases}$$

Рис.25. Гідравлічна схема стендового обладнання для визначення характеристик амортизатора.

Математична модель стенда реалізована у вигляді структури (рис.26).

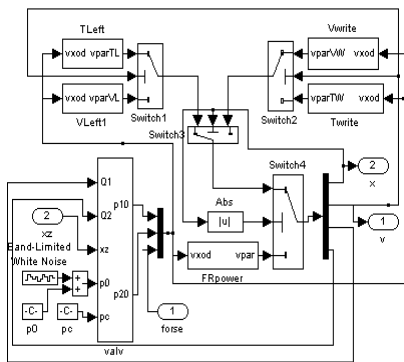


Рис.26. Логічно-структурна математична модель для опису режиму роботи гідроциліндра стенда.

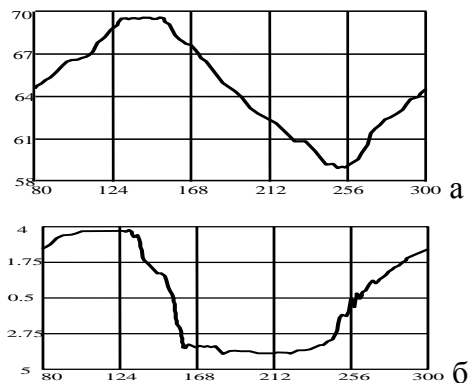


Рис.27. Розрахункові графіки переміщення штока (а) та зусилля на штоці амортизатора (б), одержані в результаті математичного моделювання.

В результаті математичного моделювання одержані розрахункові графіки переміщення штока та зусилля на штоці амортизатора при типових умовах стендових діагностичних випробувань.

Розроблена динамічна модель системи кроковий електродвигун – гідророзподільник.

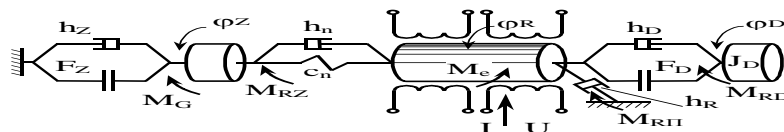


Рис. 28. Динамічна модель системи кроковий електродвигун – гідророзподільник.

Модель являє собою трьохмасову ланцюгову систему із пружно дисипативними зв'язками.

Розроблена структурна математична модель для визначення динамічних властивостей електропривода. Вона включає окремі блоки, які призначені для моделювання динамічних навантажень на окремі елементи електропривода (див. рис. 29. 30) і враховує наявність випадкових змін параметрів крокового двигуна та характеристики системи регулювання струму в обмотках крокового двигуна.

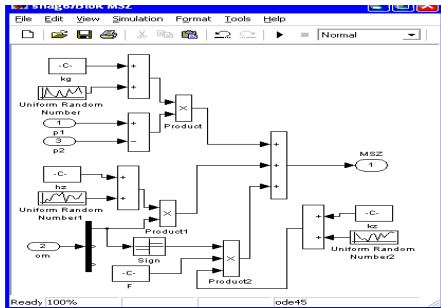


Рис.29. Структурна математична модель обчислення моменту опору з врахуванням випадкових змін його коефіцієнтів.

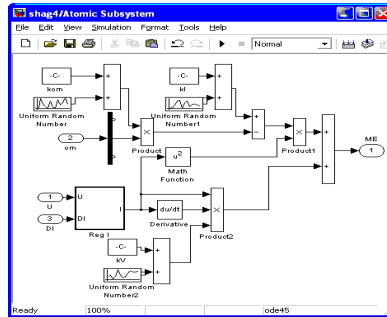
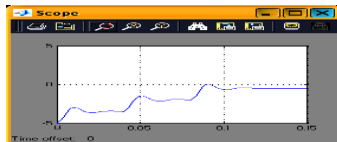
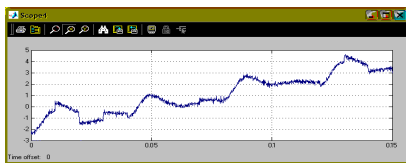


Рис.30. Структурна математична модель визначення моменту дії електромагнітних сил на ротор крокового електродвигуна.

Розроблена математична модель електропривода використана для дослідження динамічних характеристик роботи електропривода. Виконано розрахунки кута повороту вала крокового електродвигуна в різних режимах роботи стендового обладнання. На рис. 31а наведено результати розрахунків кутового переміщення золотника при відпрацюванні трьох одиничних кроків для номінальних фіксованих значень коефіцієнтів динамічної системи.

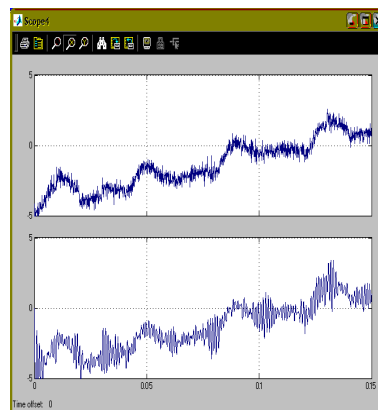


а



б

Рис. 31. Кутове переміщення золотника до зміни конструкції демпфера (а) і після зміни(б).



а

б

Рис. 32. Вплив навантаження на вал гідро розподільником (б), в порівнянні з не навантаженням (а).

Наявність випадкових змін параметрів електропривода та навантаження приводять до виникнення височастотних коливань ротора крокового двигуна. Інтенсивність височастотних коливань залежить від навантаження електропривода.

Встановлено, що навантаження вала електродвигуна у вигляді гідророзподільника знижує розмах випадкових високочастотних коливань (рис. 32,б) в порівнянні з коливаннями вала електродвигуна без навантаження (рис. 32,а). Відповідно змінена конструкція демпфера крокового двигуна і при цьому одержане значне згладження високочастотних коливань (див. рис. 31,б).

В дев'ятому розділі наведені запропоновані методи обробки результатів діагностичних випробувань амортизаторів на розробленому стендовому обладнанні. Методи базуються на обробці експериментально визначеної полярної діаграми "сила-переміщення" (рис. 34) з врахуванням схеми (див. рис. 33).

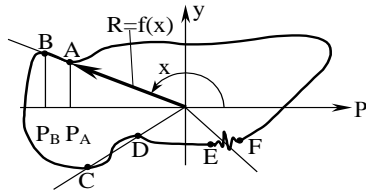


Рис.33. Особливості визначення процесу в полярній системі координат.

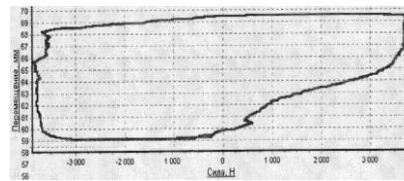


Рис.34. Експериментально визначена діаграма сила-переміщення при стендових випробуваннях амортизатора.

Встановлені особливості полярної діаграми, зокрема наявність точок розриву, неоднозначностей та високочастотних осциляцій (рис.34.), які необхідно врахувати при її аналізі. Полярна діаграма описується в параметричному вигляді тригонометричними рядами. На основі цього опису здійснюється спектральний аналіз характеристик амортизатора.

Запропоновано виконати спектральний аналіз полярної діаграми по спеціальній методиці. Вона виключає введення штучних точок розриву процесу, обумовленого нечітко визначеним періодом циклічності діаграми. Методика базується на перетворенні процесу до форми дискретної моделі, екстраполяцію дискретної моделі на два сусідні періоди циклічності з послідуочим згладженням трьох періодів процесу за допомогою кубічних сплайнів. Центральний період згладженої залежності використовується для спектрального аналізу процесу.

Одержані лінійчасті спектри параметрів для одного періоду циклічності. Зокрема, знайдені спектри амплітуд зусилля на штоці амортизатора (рис.35) і переміщення штока (рис.36).

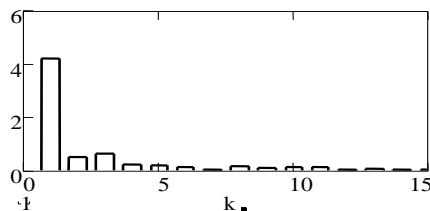


Рис.35. Спектр амплітуд 15-ти перших гармонік розкладу залежності зусилля на штоці амортизатора від часу.

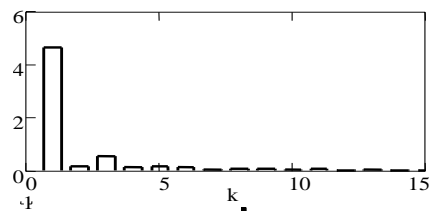


Рис.36. Спектр амплітуд розкладу переміщення штока амортизатора в ряд Фур'є.

Знайдені лінійчасті спектри амплітуд в залежності від коефіцієнтів рядів Фур'є та квадратів модулів комплексних коефіцієнтів (спектр потужності) є основою побудови точної математичної моделі експериментально визначених силових і кінематичних характеристик амортизатора.

З метою аналізу характеристик амортизатора сформовані полярні діаграми для суми основних гармонічних складових процесу. Перші гармоніки розкладу дають основну еліптичну складову полярної діаграми (рис.37).

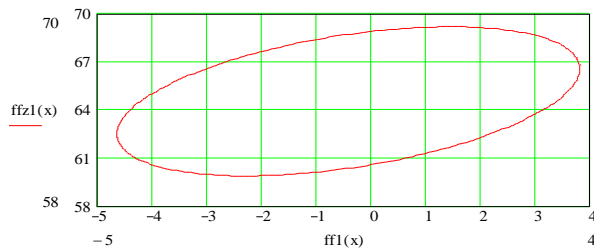


Рис.37. Полярна діаграма "сила-переміщення", яка враховує лише основні (перші) гармоніки розкладу параметрів у ряд Фур'є.

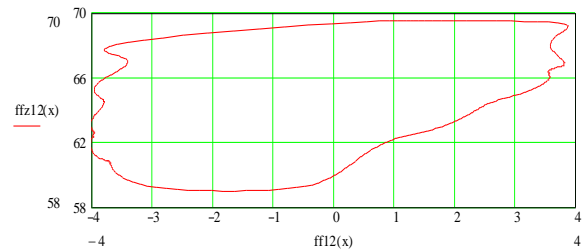


Рис.38. Полярна діаграма, яка враховує 12 гармонік розкладу параметрів у ряд Фур'є.

Врахування певної кількості гармонік наближає одержану полярну діаграму до експериментально визначеної. Вже десять-дванадцять гармонік розкладу (рис.38) моделюють експериментальну залежність з точністю 2...3%. Висока точність розкладу полярної діаграми на гармонічні складові дозволяє визначити високочастотні гармоніки (порядку 100 і вище) і встановити їх взаємозв'язок із характеристиками окремих вузлів і агрегатів амортизатора. Це значно підвищує ефективність діагностичних випробувань амортизаторів.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблені та адаптовані для опису стохастичних параметрів системи приводів методи аналізу і синтезу випадкових процесів, які дозволяють описати його специфічні характеристики, а саме: 1) показники стабільності роботи, 2) параметри точності при випадкових збуреннях, 3) випадкові зміни його дисипативних і жорсткісних параметрів при циклічному русі виконавчого механізму (штока гідроциліндра).

2. Встановлено, що причинами випадкових змін параметрів гідропривода, як складової частки системи приводів, є специфічні робочі процеси, які визначають закономірності перетворення і дисипації енергії. Головними процесами, які вносять вклад у формування стохастичних змін параметрів є: 1) процеси деформації робочого середовища по причині включень нерозчиненого повітря, 2) забруднення рідини і пов'язані з цим явища облітерації малорозмірних каналів, 3) вихрові та відривні явища в проточній частині гідропривода, 4) кавітаційні та хвильові процеси, зокрема гідроударні. Основними процесами, які визначають стохастичні характеристики

гідропривода, є турбулентність та динамічні перехідні явища, які супроводжують зміни режимів руху рідини. Обґрунтовано наявність суттєвих випадкових змін дисипативних параметрів гідросистем, що обумовлено зокрема турбулентним рухом рідини в трубопроводах та перехідними режимами в агрегатах гідропривода. Для експериментального визначення випадкових змін дисипативних параметрів гідросистем доцільно використати експериментальні методи. При цьому гідросистема оснащується спеціальною апаратурою, що включає диференціальний манометр і пристрої виміру витрати на даній ділянці гідросистеми. Встановлено, що випадкові зміни перепаду тиску на гідролінії знаходяться в діапазоні близько 0,07 МПа при номінальних перепадах тиску на гідролінії 0,1..0,4 МПа.

3. Системи приводів та його елементи мають випадкові зміни своїх характеристик. Статичні характеристики змінюються як випадкові величини. Закони розподілу випадкових змін статичних характеристик визначаються особливостями елемента приводу. В більшості випадків закон розподілу можна вважати нормальним. При цьому математичне сподівання випадкових змін характеристики в точці відповідає номінальному значенню характеристики, а середньо квадратичне відхилення (стандарт) складає 1..2% від номінального значення характеристики. Динамічні характеристики змінюються як системи взаємозалежних (корельованих) випадкових величин та системи випадкових процесів. Вони характеризуються двомірними і багатомірними законами розподілу. За виключенням особливих випадків має місце двомірний нормальний закон розподілу. При цьому динамічні характеристики системи приводів (перехідні і частотні) утворюють смуги своїх ймовірних значень із відповідними розсіяннями і математичними сподіваннями. Діапазони випадкових змін їх динамічних характеристик складають 4..10%.

4. Для розрахунку випадкових змін статичних і динамічних характеристик складових частин системи приводів рекомендовано використати спеціальні методи, які полягають в синтезі базових випадкових параметрів гідропривода і електропривода у вигляді масивів випадкових величин або випадкових процесів і подальшому визначенні випадкового поля вихідних параметрів гідропривода і електропривода шляхом математичного моделювання. В результаті знаходяться діапазони випадкових змін вихідних параметрів та їх статистичні характеристики. Застосування запропонованих методів дозволяє суттєво підвищити точність і надійність визначення вихідних параметрів гідропривода і є основою для суттєвого підвищення ефективності його застосування, зокрема у гідрофікованих випробувальних машинах циклічної дії, якими є стендове обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів.

Для визначення впливу статичних і динамічних характеристик електропривода гідро розподільника на характеристики стендового обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів, розроблена динамічна модель системи кроковий електродвигун – гідро розподільник, на підставі якої описані динамічні процеси в електроприводі. Шляхом

математичного моделювання обчислені випадкові елементи опору електропривода та враховані випадкові зміни його параметрів, що дозволило зменшити високочастотні коливання ротора крокового двигуна за рахунок зміни маси інерційного демпфера.

5. В результаті детального аналізу конструктивних особливостей гами гідравлічних амортизаторів встановлено, що зниження їх ефективності в процесі експлуатації є наслідком дії багаточисельних факторів випадкового характеру. Вони проявляються як раптовими (різко змінними) порушеннями регламентованих режимів роботи основних вузлів амортизаторів, так і постійними, порівняно невеликими, випадковими змінами їх характеристик. Визначено вплив випадкових змін параметрів гідравлічної системи амортизаторів на загальні показники ефективної їх роботи. Встановлено якісний і кількісний зв'язок паспортних параметрів амортизатора із випадковими змінами характеристик окремих гідроагрегатів.

6. Встановлено, що основними деталями амортизатора, які зношуються в процесі експлуатації шток, гільза циліндра і напрямна втулка. Зношені поверхні деталей амортизатора можуть бути описані полігармонічними випадковими процесами, які допускають математичний опис у вигляді канонічного розкладу по системі ортогональних гармонічних функцій. Знос деталей амортизатора в основному впливає на витрату рідини в зазорі між штоком гідроциліндра і напрямною втулкою. При цьому витрата рідини може змінитися в 10 і більше раз. Зношення отвору напрямної втулки відбувається нерівномірно. Зношена ділянка має протяжність по куту  $270...300^\circ$ . Загальний лінійний знос по діаметру знаходиться в межах 0,4 мм. При цьому середній діаметральний зазор від номінального значення (0,02...0,04 мм) збільшується до 0,5 мм і вище. Встановлено, що знос поверхні спричиняє виникнення конусності отвору, причому більший діаметр конуса знаходиться з боку поршня амортизатора. Величина різниці діаметрів отвору на вході і виході змінюється в межах 0,05...0,3 мм.

7. Розроблена замкнена стохастична математична модель автоколивальної дисипативної гідросистеми амортизатора враховує випадкові зміни характеристик його основних вузлів і дозволяє визначити основні стохастичні параметри, які характеризують процеси дисипації енергії, а також здійснити імітацію різноманітних режимів випробувань амортизатора. При цьому враховується весь комплекс факторів, зокрема умови роботи амортизатора, які пов'язані із зміною його експлуатаційних характеристик. Математична модель силової частини стенда враховує випадкові зміни параметрів привода і дозволяє розрахувати закон переміщення поршня амортизатора та його робоче зусилля в функції часу. Розрахунки відповідають експериментальним даним з точністю 5..7%.

8. В результаті математичного моделювання та експериментальних досліджень встановлено, що дисипація енергії суттєвим чином змінює характеристики амортизатора внаслідок зміни температурного режиму роботи основних гідравлічних пристроїв амортизатора. Різке підвищення

температури на перших циклах роботи амортизатора пояснюється інтенсивним тепловиділенням і нерівномірністю розподілу температур по об'єму амортизатора. Стабілізація температури пояснюється зменшенням дисипативних сил по причині зменшення в'язкості рідини і збільшенням тепловіддачі від корпусних деталей амортизатора. Загалом термічний режим амортизатора характеризується циклічними змінами температури, причому цикли відповідають середнім періодам переміщень штока амортизатора.

9. Розроблене стендове обладнання дозволяє здійснити діагностичні випробування амортизаторів із визначенням інтегральних показників їх якості та визначити відповідність характеристик амортизаторів паспортним даним. Стендове обладнання оснащено гідроприводом та системою керування. Воно забезпечує режими випробування амортизатора, які відповідають реальним умовам експлуатації. Навантаження формуються із детермінованих плавноміних та різкозмінних складових із доповненням стохастичними збуреннями, які відповідають натурним.

10. Застосування методів спектрального аналізу для дослідження експериментально визначених залежностей зусилля і переміщення штока амортизатора часто дає низьку точність або приводить до збою обчислювальної процедури, внаслідок неточного визначення циклічного процесу на межах інтервалу періодичності. Основною причиною збою процедур спектрального аналізу є штучно введені в процес розриви першого роду на межах інтервалу періодичності, які є наслідком неточного визначення періоду процесу. Це приводить до високочастотних осциляцій (явища Гібса), часткових сум ряду Фур'є на межах інтервалу періодичності процесу і необхідності врахування значного числа гармонік в частковій сумі ряду. Відповідно, коефіцієнти розкладу з високими номерами мають незначні абсолютні величини, які порівняні із похибками обчислення коефіцієнтів. Внаслідок некоректності постановки задачі, стосовно нескінченного ряду Фур'є, наявність високочастотних складових, з неточно визначеними коефіцієнтами, обумовлює виникнення грубих похибок часткових сум ряду Фур'є, а в багатьох випадках приводить до розходження часткової суми ряду і збою обчислювальної процедури. З метою забезпечення надійної роботи алгоритмів спектрального аналізу запропоновано сформулювати дискретну модель процесу для одного періоду (циклу) переміщення штока амортизатора. Потім узагальнити розроблену модель на два сусідніх періоди. Після цього згладити одержану дискретну модель за допомогою процедури сплайн-інтерполяції і, використавши одержану символічну модель для одного (центрального) періоду, знайти коефіцієнти розкладу циклічного процесу в ряд Фур'є і здійснити повний комплекс спектрального аналізу процесу.

11. В результаті спектрального аналізу експериментально визначених залежностей зусилля і переміщення штока амортизатора встановлено, що суттєвими є гармоніки з номерами 3..5. Врахування такого числа гармонік дозволило з достатньою точністю описати окремо зміну зусилля і переміщення штока в часі. Основними гармоніками даних залежностей є перші. На



перших гармоніках зосереджена основна потужність (середній квадрат значення) циклічних процесів зусилля і переміщення штока. Для діагностики характеристик амортизатора встановлено, що найбільш доцільно використати полярну діаграму “сила-переміщення”, визначену експериментально, та використати розклад її складових (окремо сили і переміщення) в ряди Фур’є. Врахування лише суттєвих складових розкладу є недостатнім. Для забезпечення необхідної точності опису полярної діаграми врахування лише суттєвих складових розкладу є недостатнім. Для достатньо точного опису полярної діаграми необхідно врахувати 10..15 гармонік. Для виявлення особливих ділянок діаграми, зокрема точок зламу, високочастотних осциляцій та обмежень необхідно врахувати близько 100 гармонік розкладу.

### СПИСОК ОСНОВНИХ РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Колот О.В. Оцінка впливу зносу основних деталей гідравлічного амортизатора на його характеристики. // Вестник НТУУ "КПИ" серія "Машиностроение", Киев, 2003, № 44, с.134-137.

2. Колот О.В. Стендове обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів. // Промислова гідравліка і пневматика. Всеукраїнський науково-технічний журнал, Вінниця 2004, № 3, с. 79-83.

3. Колот О.В. Методика і результати експериментального визначення випадкових змін дисипативних параметрів гідропривода. // Вестник НТУУ "КПИ". Машиностроение, К.: 2004, № 45, с. 117-120.

4. Колот О.В. Розробка стохастичної математичної моделі клапанного вузла гідравлічного амортизатора залізничних вагонів. // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях . – Харків: НТУ „ХПІ” -2005. -№9 -С. 70-77.

5. Колот О.В. Діагностичні випробування гідравлічних гасителів коливань на спеціальному стендовому обладнанні. // Журнал "Залізничний транспорт України". Спеціальний випуск № 3/1. Київ. 2005. –С. 154-160.

6. Струтинський В.Б., Колот О.В. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів. // Монографія. – Краматорськ: ЗАТ "Тираж - 51", 2005. -530 с.

Автором особисто написано 6 і 10 розділи монографії. Розділи 3, 4, 5, 7, 8 і 9 написані спільно з науковим консультантом. Дольова участь автора в написанні цих розділів 50%.

7. Струтинський В.Б., Даниленко О.В., Колот О.В., Дем’яненко С.К., Алексеева А.В. Аналіз точності токарного верстата методами спектрального аналізу форми обробленої поверхні // Вестник НТУУ "КПИ". Машиностроение, Киев, 2002, № 43, т.1. С. 86-88.

Автором розроблені методи спектрального аналізу процесу.

8. Струтинський В.Б., Колот О.В. Імітаційне математичне моделювання дисипативних характеристик комплектних гідромеханічних систем. // Промислова гідравліка і пневматика. Всеукраїнський науково-технічний журнал, Вінниця 2003, № 2, с. 63 – 68.

Автором розроблена імітаційна математична модель дисипативних характеристик комплектних гідромеханічних систем.

9. Струтинський В.Б., Кравець О.М., Колот О.В., Даниленко О.В., Самі (Мох'д Амін) Мох'д Іхміш. Дослідження робочих процесів тертя в динамічній системі верстата методами тензорного числення. // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Випуск № 12. Кіровоград 2003. - С. 287-296.

Автором запропоновано методику дослідження робочих процесів тертя із врахуванням стохастичних характеристик взаємодії двох поверхонь.

10. Струтинський В.Б., Шевченко О.В., Верба І.І., Колот О.В., Ковальов В.А., Самі (Мох'д Амін) Мох'д Іхміш. Визначення теплових потоків у вузлах металорізальних верстатів методами тензорного числення. // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Випуск № 13. Кіровоград 2003. - С. 8-15.

Автором запропоновано методику визначення теплових потоків у вузлах систем приводів.

11. Струтинський В.Б., Верба І.І., Даниленко О.В., Дем'яненко С.К., Колот О.В. Визначення частотних характеристик металорізального верстата на основі дискретних спектрів форм перерізів заготовок та обробленої поверхні // Всеукраїнський науково-технічний журнал "Вібрації в техніці і технологіях" №1 (27) 2003, с. 94-97.

Автором запропоновано методику визначення частотних характеристик системи приводів верстатів.

12. Струтинський В.Б., Колот О.В. Експериментальне визначення випадкових деформативних параметрів стендового обладнання для випробувань гідравлічних амортизаторів. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ – Київ: ДДМА, вип.№16, 2004, с. 88-96.

Автором запропоновано методику експериментальних досліджень та розроблені конструктивні рішення стендового обладнання для випробувань гідравлічних амортизаторів.

13. Струтинський В.Б., Колот О.В. Дем'яненко С.К. Особливості аналізу результатів діагностичних випробувань системи гідроприводу циклічної дії. // Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету. Вип. 6 - Кременчуг, 2004 (29). - С. 96-99.

Автором запропоновано методику діагностичних випробувань системи гідроприводу циклічної дії.

14. Струтинський В.Б., Колот О.В. Застосування методів спектрального аналізу процесів при діагностичних випробуваннях гідравлічних амортизаторів. // Збірник наукових праць Кіровоградського Національного Університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Випуск №15. Кіровоград, 2004.– с. 405-410.

Автором обґрунтовано методику спектрального аналізу процесів при діагностичних випробуваннях гідравлічних амортизаторів.

15. Струтинський В.Б., Колот О.В. Закономірність зносу основних деталей гідравлічних амортизаторів транспортних засобів. // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Випуск № 14. Кіровоград 2004. - С. 128-137

Автором визначено характер та головні кількісні параметри зносу основних деталей гідравлічних амортизаторів транспортних засобів.

16. Струтинський В.Б., Колот О.В. Спектральний аналіз результатів випробувань гідравлічних амортизаторів. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ – Київ: ДДМА, вип.№15, 2004, с. 117-125.

Автором виконано спектральний аналіз результатів випробувань.

17. Струтинський В.Б., Колот О.В. Спектральний аналіз вібраційних процесів із нечітко визначеним періодом циклічності. // Всеукраїнський науково-технічний журнал „Вибрації в техніці і технологіях” № 2 (40) 2005, с. 104-110.

Автором обґрунтовано проведення спектрального аналізу вібраційних процесів з нечітко визначеним періодом циклічності.

18. Струтинський В.Б., Колот О.В. Розробка методів спектрального аналізу процесів з нечітко визначеним періодом // Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вибрації в техніці і технологіях” №1 (28) 2005, с. 75-83.

Автором запропоновано методику приведення процесу з нечітко визначеним періодом до строго періодичного процесу.

19. Колот В.О., Колот О.В., Міхеєнков Ю.С., Малиновський М.Д., Лішаєв Г.П., Плеханов В.М. Методика расчета профиля обода железнодорожного колеса. // Свідectво про державну реєстрацію прав автора на твір ПА № 3025 від 05.06.2000.

Автором запропонована роозрахункова схема математичного обчислення криволінійного профіля.

20. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм. Колот В.О., Колот О. В., Малиновський М.Д., Міхеєнков Ю.С., Сергієнко М.І. Відомчий нормативний документ міністерства транспорту України. Стандартизація

та сертифікація залізничного транспорту. Видання офіційне.–Донецьк: ТОВ“Либідь”,2001. – 154 с.

Автором розроблено технічне завдання і методику виконання НДР.

21. Спосіб діагностики гасителів коливань. Колот О.В., Колот В.О. Патент на винахід №72048, G01M17/04, опубл. Бюл. №1, 2005.

Автором запропоновані принципово нові ознаки метода діагностики гасителів коливань.

22. Стенд для випробування гасителів коливань. Колот В.О., Колот О.В., Міхеєнков Ю.С., Тарадай В.О. Патент на винахід № 72280, G01M17/04, опубл. Бюл. № 2, 2005 р.

Автором запропоновані принципово нові ознаки виконавчого механізму стенда.

## АНОТАЦІЯ

Колот Олександр Володимирович. Наукові основи підвищення ефективності системи приводів шляхом врахування стохастичності їх характеристик - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.03 – "Системи приводів". – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків, 2005.

Створено наукові основи підвищення ефективності системи приводів. Підвищення ефективності здійснено шляхом врахування наявності випадкових змін характеристики гідроприводу, як складової частини системи приводів.

Виконано обґрунтування стохастичних змін характеристики приводу. Доведено, що причиною випадкових змін характеристики є особливості робочих процесів, зокрема це деформативні процеси робочої рідини, в якій присутнє нерозчинене повітря у вигляді дрібнодисперсної газової фази. Стохастичними гідродинамічними процесами є турбулізація, відривні і кавітаційні явища в рідині та інші.

Встановлено наявність випадкових змін стохастичних динамічних характеристик окремих гідросистем та системи приводів.

Випадкові зміни характеру системи приводів розглянуті на конкретних прикладах приводів стендового обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів.

Виконано детальний аналіз об'єкта випробувань. Розглянуто ряд конструкцій амортизаторів залізничних вагонів та вагонів метрополітену. Обґрунтовано вибір типового гідравлічного амортизатора і розроблена його імітаційна модель. Виконано імітаційне математичне моделювання процесу стендових діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів. При цьому враховано стохастичні зміни статичних і динамічних характеристик системи електро- та гідроприводів стендового обладнання та гідравлічного амортизатора. Врахування випадкових змін характеристики дало можливість суттєво збільшити обсяг

інформації, одержаної в результаті діагностичних випробувань амортизаторів та підвищити її достовірність. Для цього розроблені спеціальні методи спектрального аналізу результатів діагностичних випробувань амортизаторів.

**Ключові слова:** системи приводів, гідродинамічні процеси, стохастичні характеристики, гідравлічний амортизатор, стендове обладнання, діагностичні випробування, спектральний аналіз результатів, підвищення ефективності.

## АННОТАЦІЯ

Колот Александр Владимирович. Научные основы повышения эффективности системы приводов путем учета стохастичности их характеристик - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.03 – "Системы приводов". – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт". – Харьков, 2005.

Разработаны научные основы повышения эффективности системы приводов. Повышение эффективности осуществлено путем учета наличия случайных изменений характеристики гидропривода, как составляющей части системы приводов.

Выполнено обоснование стохастических изменений характеристики гидропривода. Доказано, что причиной случайных изменений характеристики являются особенности рабочих процессов, в частности это деформативные процессы рабочей жидкости, в которой присутствует нерастворенный воздух в виде мелкодисперсной газовой фазы. Стохастическими гидродинамическими процессами являются турбулизация, отрывные и кавитационные явления в жидкости и др.

Установлено наличие случайных изменений стохастических динамических характеристик отдельных гидросистем и системы приводов.

Случайные изменения характера системы приводов рассмотрены на конкретных примерах приводов стендового оборудования для диагностических испытаний гидравлических амортизаторов.

Выполнен детальный анализ объекта испытаний. Рассмотрен ряд конструкций амортизаторов железнодорожных вагонов и вагонов метрополитену. Обоснован выбор типового гидравлического амортизатора и разработана его имитационная модель. Выполнено имитационное математическое моделирование процесса стендовых диагностических испытаний гидравлических амортизаторов. При этом учтены стохастические изменения статических и динамических характеристик системы электро- и гидроприводов стендового оборудования и гидравлического амортизатора. Учет случайных изменений характеристики дал возможность существенно

увеличить объем информации, полученной в результате диагностических испытаний амортизаторов и повысить их достоверность. Для этого разработаны специальные методы спектрального анализа результатов диагностических испытаний амортизаторов.

**Ключевые слова:** системы приводов, гидродинамические процессы, стохастические характеристики, гидравлический амортизатор, стендовое оборудование, диагностические испытания, спектральный анализ результатов, повышение эффективности.

## ANNOTATION

Kolot Alexander Vladimirovitch. Scientific bases of increase of efficiency of the system of drives by the account of stochastic of their descriptions is Manuscript.

Dissertation on competition of graduate degree of doctor of engineering sciences on speciality 05.02.03 are "Systems of drives". it is the National technical university the "Kharkov polytechnic institute". it is Kharkov, 2005.

Scientific bases of increase of efficiency of the system of drives are developed. The increase of efficiency is carried out by the account of presence of casual changes of description of hydraulic drive, as the component part of drives sistem.

Ground of stochastic changes of description of hydraulic power is executed. It is proved that the reason of casual changes of description is the features of working processes, in particular this deformation processes hydraulic drive processes of working liquid in which the undissolved air phase. Are stochastic hydrodynamic processes turbulence and cavitation phenomena in liquids and other.

The presence of casual changes of stochastic dynamic descriptions of separate hydraulic systems and system of drives are set.

The casual changes of character of the system of drives are considered on the concrete examples of drives of stand equipment for the diagnostic tests|trials| of hydraulic shock absorbers.

The detailed analysis of object of tests is executed. The row of constructions of shock absorbers of railways carriages and carriages is considered to underground passage. The choice of model hydraulic shock absorber is grounded and its simulation model is developed. The imitation mathematical design of process of stands diagnostic tests of hydraulic shock absorbers is executed. The stochastic changes of static and dynamic descriptions of the system of electro- and hydro drives of stand equipment hydraulic and shock absorber are thus taken into account. The account of casual changes of description enabled substantially to multiply the volume of the information got as a result of diagnostic tests of shock absorbers and to promote their authenticity. The special methods of spectral analysis of results of diagnostic tests of shock absorbers are developed for this purpose.

**Keywords:** systems of hydraulic drive, hydrodynamic processes, stochastic descriptions, hydraulic shock absorber, stand equipment, diagnostic tests, spectral analysis of results, increase of efficiency.