

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Андренко Павло Миколайович

УДК 681.523.4

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТІВ З ГІДРАВЛІЧНОЮ
ОСЦИЛЯЦІЄЮ ДЛЯ СИСТЕМ ГІДРОПРИВОДІВ**

Спеціальність 05.02.02 – машинознавство

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2009

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі “Гідропневмоавтоматика і гідропривод” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Лур’є Зіновій Якович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри гідравлічних машин, м. Харків.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Зайончковський Геннадій Йосипович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри гідрогазових систем, м. Київ;

доктор технічних наук, професор
Фінкельштейн Зельман Лазаревич,
Донбаський державний технічний університет,
завідувач кафедри прикладної гідромеханіки,
м. Алчевськ;

доктор технічних наук, доцент
Ніколенко Ілля Вікторович,
Національна академія природоохоронного і
курортного будівництва,
завідувач кафедри водопостачання,
водовідведення та санітарної техніки,
м. Сімферополь.

Захист відбудеться “10” червня 2009 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11 у Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корпус № 1, ауд. 214.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “23” квітня 2009 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

Майборода В.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Технічний рівень гідроприводів (ГП) технологічних та мобільних машин в значній мірі залежать від показників технічного рівня гідравлічної апаратури, яка входить до пристроїв керування виконавчими механізмами. Значна частина таких пристроїв містить гідроапарати з гідравлічним керуванням, використання яких у ГП дозволяє підвищити їх експлуатаційні характеристики, будувати чисто гідравлічні пристрої керування, легко організувати внутрішні зворотні зв'язки, вони простіші в експлуатації, надійніші і дешевші. Нездатність гідроапаратів з гідравлічним керуванням забезпечити високу точність підтримання в заданих межах вихідної величини та чутливість до керуючих сигналів знижує показники технічного рівня ГП.

Тенденція останніх десятиліть більш широкого застосування гідроапаратів з осциляцією викликана прагненням споживачів до підвищення технічного рівня ГП. Але, для гідроапаратів з гідравлічним керуванням не розроблено досконалий гідравлічний вібраційний контур, який здійснює осцилюючий зворотно-поступальний рух запірно-регулюючого елемента, відсутній метод розрахунку його коефіцієнта передачі. Створення і використання гідроапаратів з гідравлічним керуванням та осциляцією дозволить підвищити технічний рівень ГП.

Аналіз робіт по проектуванню гідроапаратів з осциляцією, на базі електронних керуючих пристроїв, та ГП, побудованих на їх основі, дозволив визначити ряд особливостей, без урахування яких неможливий їх подальший розвиток та підвищення технічного рівня: урахування в математичних моделях гідроапаратів та ГП частоти і амплітуди осциляції запірно-регулюючого елемента, форми його дроселюючої кромки, нестаціонарності робочих процесів; обґрунтування методів для дослідження їх математичних моделей та багатокритеріальної оптимізації параметрів; ряду інших важливих факторів, які суттєво впливають на показники якості робочих процесів. Комплексне урахування цих факторів підвищує точність математичних моделей гідроапаратів та ГП і відкриває можливість більш повного використання сучасних методів математичного моделювання і теорії оптимальних систем.

Викладене вище обумовлює актуальність вибраної теми дисертації, спрямованої на вирішення важливої науково-практичної проблеми - розвиток наукових основ проектування апаратів з гідравлічною осциляцією для систем ГП, шляхом розробки гідравлічного вібраційного контуру, повних математичних моделей гідроапаратів, комплексного дослідження робочого процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась у рамках науково-дослідної роботи кафедри гідропневмоавтоматика і гідропривод НТУ “ХП” “Удосконалення гідравлічних і пневматичних силових систем та систем керування промислового призначення” (№ ДР 01.86.00012831), госпдоговірної НДР “Розробка слідкуючого електрогідравлічного розподільника” (№ ДР 01.89.0063649), госпдоговірної НДР “Розробка програми багатокритеріальної оптимізації конструктивних параметрів гідравлічного захисту ПЕДів” (№ 70706) та договору про творче співробітництво “Впровадження розробок по підвищенню експлуатаційних характеристик гідрофікованого устаткування”. Пошукувач брав безпосередню участь у виконанні першої НДР як виконавець, а в інших – як науковий керівник.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення показників технічного рівня ГП, за рахунок розвитку наукових основ проектування, розробки і застосування принципово нового класу гідроапаратів з осциляцією та гідравлічним керуванням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити концепцію і визначити структуру гідроапаратів з гідравлічним керуванням та осциляцією, спричиненою пульсацією тиску робочої рідини (РР).
2. Виявити закономірності та особливості робочих процесів, що відбуваються у гідроапаратах з осциляцією та ГП, побудованих на їх базі.

3. Розробити математичні моделі і методи розрахунку таких гідроапаратів, їх структурних елементів та ГП.

4. Установити взаємозв'язок між конструктивними параметрами та параметрами робочого процесу гідроапаратів з осциляцією, гідравлічного вібраційного контуру, їх вихідними характеристиками і характеристиками ГП.

5. Розробити принципи побудови ГП на базі гідроапаратів з осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром.

6. Розвинути наукові основи проектування гідроапаратів з осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром і реалізувати їх в методах, методиках, алгоритмах та програмному комплексі проектування таких гідроапаратів у складі систем ГП.

Об'єктом дослідження є робочі процеси, що відбуваються у ГП побудованих на базі гідроапаратів з осциляцією.

Предметом досліджень є розрахункові методи гідроапаратів з осциляцією, вихідні характеристики ГП, побудованих на їх базі, нові концептуальні рішення гідроапаратів з гідравлічним керуванням для підвищення технічного рівня ГП.

Методи досліджень. Основними методами досліджень були: системний аналіз, який відкрив можливість декомпозиції ГП та гідроапаратів з осциляцією і гідравлічного вібраційного контуру на основні вузли з урахуванням взаємозв'язків усіх елементів; методи теорії автоматичного керування та математичного моделювання, які застосовувалися для визначення статичних та динамічних характеристик гідроапаратів та ГП, показників їх технічного рівня; методи механіки рідини і газу, за допомогою яких обґрунтовано межу квазістаціонарності робочих процесів у ГП, зроблена оцінка хвильових процесів, стисливості і двофазності РР, визначені витрати витоків, осьова гідродинамічна сила і коефіцієнт передачі гідравлічного вібраційного контуру; методи теорії оптимальних систем, за допомогою яких визначалися оптимальні параметри розроблених гідроапаратів; експериментальні методи досліджень, за допомогою яких перевірялась адекватність розроблених математичних моделей гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром та ГП. Достовірність теоретичних положень роботи підтверджується результатами експериментальних досліджень і практикою промислового впровадження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому що:

1. Запропоновано нову концепцію побудови та проектування гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром, яка підвищує їх технічний рівень та поліпшує експлуатаційні характеристики ГП, і складається з наступного:

- * вперше запропоновано для здійснення осциляції запірно-регулюючих елементів гідроапаратів використовувати пульсації тиску РР на виході із об'ємного насоса, що дозволяє на єдиній енергетичній основі створювати гідроапарати з осциляцією та гідравлічним керуванням;

- * виявлені закономірності та особливості робочих процесів, що відбуваються у гідроапаратах з осциляцією та ГП, збудованих на їх основі, які підвищують точність математичних моделей;

- * отримані нові аналітичні залежності, котрі враховують параметри осциляції запірно-регулюючого елемента, для визначення: осьової гідродинамічної сили; сили тертя; приведеної жорсткості пружних елементів гідроапарата; тиску у демпфуючих порожнинах; витрати витоків, і покладені в основу методів їх розрахунку та забезпечують побудову адекватних, натурним зразкам, моделей;

- * отримана аналітична залежність приведенного коефіцієнта осциляції для гідроапаратів з осциляцією, яка використовується для їх оцінки при проектуванні;

- * вперше розроблені математичні моделі: узагальнена, для гідравлічного вібраційного контуру; гідроапаратів з осциляцією, спричиненою пульсацією тиску РР; ГП з переливним клапаном з гідравлічним вібраційним контуром та ГП лінійного переміщення, які дозволяють досліджувати робочі процеси у гідроапараті та ГП з урахуванням параметрів осциляції запірно-регулюючих елементів,

що складає розвиток наукових основ проектування апаратів з гідравлічною осциляцією для систем ГП.

2. Узагальнено та формалізовано принципи побудови ГП, на базі гідроапаратів з осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром, які дозволяють алгоритмізувати процес прийняття рішень про доцільність їх використання в даному ГП.

3. Вперше встановлено вплив параметрів осциляції запірно-регулюючого елемента, форми дроселюючої кромки, жорсткості пружного елемента гідравлічного вібраційного контуру на витрату, умову виникнення кавітації, точність та динамічні властивості гідроапаратів з осциляцією та ГП.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені нові конструкції і компоновки гідравлічного устаткування, які реалізують концептуальне рішення апаратів з осциляцією та гідравлічним керуванням, чим забезпечено підвищення технічного рівня систем ГП, зокрема зменшення порогу чутливості, підвищення точності регулювання тиску і витрати, скорочення часу перехідного процесу.

На основі створених математичних моделей у роботі розвинуті методи, методики, алгоритми і програмний комплекс, які становлять нову базу для проектування гідроапаратів з осциляцією і гідравлічним вібраційним контуром та аналізу робочих характеристик апаратів у складі систем ГП. Розробки використано у нових, захищених авторськими свідоцтвами, конструкціях гідророзподільника та регульованому гідроапараті.

Дано теоретичне обґрунтування способу реалізації гідравлічного вібраційного контуру. Запропоновані нові форми дроселюючих кромки гідроапаратів.

Розроблена методика імітаційного математичного моделювання робочих процесів у гідроапаратах з осциляцією та ГП, яка дозволяє досліджувати вплив конструктивних та робочих параметрів гідроапаратів і навантаження ГП на його точність.

Клапан з гідравлічним вібраційним контуром упроваджений в насосних станціях типу С100, модернізованих та поставлених АТ “ІНТОС” на “Чорноморський машинобудівний завод” та в гідросистему плоскошліфувального верстата ЗГ71 на ЗАО “РЕММАШСТРОЙ”. Розроблені гідроапарати з гідравлічним вібраційним контуром рекомендовано до включення в номенклатуру виробництва АТ “Гідроапаратура”.

Розроблені методики і рекомендації:

- визначення гідродинамічної сили на запірно-регулюючому елементі;
- розрахунку витоків у гідроапаратах з осциляцією;
- визначення динамічних параметрів пружних елементів;
- імітаційного моделювання та багатокритеріальної оптимізації гідроапаратів з осциляцією;
- рекомендації, щодо модернізації і технічного обслуговування ГП,

які упроваджено в проектно-конструкторські та дослідні роботи АТ “Гідроапаратура”, СП ЗАТ “ХЭМЗ – ІРЕС”, ТОВ “ВНІГІДРОПРИВОД” та “ПРОМГІДРОПРИВОД”.

Рекомендації, щодо зменшення динамічних навантажень у ГП пресів Б 1642, зменшення трудомісткості ремонту, за рахунок застосування розроблених гідроапаратів з осциляцією, прийняті для упровадження у копрових цехах ВАТ “Запоріжсталь” та “АрселорМіттал” Кривий Ріг.

Результати досліджень використовуються у навчальному процесі НТУ “ХПІ” та Сумського державного університету в дисциплінах “Гідропневмоавтоматика” і “Надійність та експлуатація гідромашин та гідроприводів”, та при дипломному і курсовому проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та практичні результати роботи, які виносяться на захист, отримані особисто автором і викладені в 33 роботах, опублікованих одноосібно. До числа основних напрямків роботи, виконаних одноосібно здобувачем, необхідно віднести:

– розробку концепції, принципів побудови і розвиток наукових основ проектування гідроапаратів з гідравлічним керуванням й осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром;

- математичні моделі структурних елементів і гідроапаратів з осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром та ГП побудованих на їх базі;
- результати теоретичних досліджень робочих процесів у гідроапаратах з осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром, їх структурних елементах та у ГП;
- методика, алгоритми і програмні модулі розрахунку та проектування гідроапаратів з гідравлічним керуванням й осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром.

Розробка методів експериментальних досліджень, експерименти та обробку отриманих даних автор виконував особисто і разом з виконавцями науково-дослідних робіт та аспірантами кафедри. Спільні публікації та винаходи виникли, як результат колективної праці, і створювалися спільно всіма зазначеними в публікаціях співавторами.

Формулювання проблеми і задач досліджень здійснювалися разом з науковим консультантом.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідались й обговорювались на міжнародних конференціях і семінарах: науково-технічній конференції “Гидравлика и гидропривод машин, автоматов и промышленных роботов в машиностроении” (м. Севастополь, 1990 р.); Всесоюзній науково-технічній конференції “Перспективы и тенденции развития гидропневмоприводов и их элементной базы в машиностроении” (м. Харків, 1991 р.); науково-технічній конференції “Совершенствование и автоматизация производственных процессов гидравлическими и пневматическими устройствами” (м. Челябінск, 1991 р.); Міжнародній науково-практичній конференції Micro-CAD “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (м. Харків, 1997 р., 1999 р., 2002 – 2008 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” (м. Суми, 1999 р., м. Харків, 2001 р., м. Київ, 2002 р., 2004 р., м. Черкаси, 2003 р., м. Краматорськ, 2005 р.); Міжнародній науково-технічній конференції Асоціації фахівців промислової гідравліки і пневматики (м. Кіровоград, 2000 р., м. Вінниця, 2002 р., 2006 р., м. Київ, 2004 р., м. Львів 2005 р., м. Кременчук, 2008 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Гидравлические машины, гидропривод и гидропнеумоавтоматика” (м. Москва, 2000 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Hydraulika a pneumatika 2003” (Casta-Pila, Словачія, 2003 р.); Науково-технічному семінарі “Сучасні проблеми промислової гідравліки і пневматики” (м. Вінниця, 2003 р.); V міжнародному науково-технічному семінарі “Innowacje i postep w Hydraulice i pneumatyce” (м. Варшава, Польща, 2003 р.); Науковому семінарі Інституту Автоматики і Робототехніки Політехніки Варшавської (м. Варшава, Польща, 2003 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості” (м. Кривий Ріг, 2004 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Наукові основи створення вискоєфективних землерийно-транспортних машин” (м. Харків, 2004 р.). У повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на пленарних засіданнях Міжнародної науково-практичної конференції “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” (м. Київ, 2006 р., м. Луганськ, 2007 р.); на наукових семінарах кафедр: “Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв” Вінницького національного технічного університету (2007 р.), “Прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки” Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” (2007 р.), Машинознавства Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (2008 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи надруковано 64 наукові праці, з них 50 статей у фахових виданнях, затверджених переліком ВАК України, 10 – матеріали та тези доповідей міжнародних конференцій і семінарів, 2 авторські свідоцтва та 1 патент на винахід, 1 навчальний посібник, 33 роботи опубліковані одноосібно.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, семи розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 455 сторінок, у тому числі 292 сторінки основного тексту, з них 74 ілюстрації по тексту, 39 ілюстрації на 26 сторінках, 10 таблиць по тексту, 20 таблиць на 17 сторінках, 5 додатків на 109 сторінках, 307 найменувань використаних джерел на 30 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику дисертаційної роботи, розкрито актуальність наукової проблеми, сформульовано мету й основні задачі досліджень, викладено наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі виконано аналітичний огляд ГП технологічних та мобільних машин, збудованих з використанням гідроапаратів з гідравлічним керуванням, який показав, що одним із напрямків поліпшення статичних і динамічних характеристик таких ГП є створення гідроапаратів з гідравлічним керуванням та осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром.

Значний внесок у вирішення цієї проблеми внесли роботи Башти Т.М., Бочарова В.П., Гаминіна М.С., Глікмана Б.Ф., Губарева О.П., Данілова Ю.А., Зайончковського Г.Й., Захарова Ю.М., Іскович–Лотоцького Р.Д., Коробочкина Б.Л., Лещенко В.А., Лур'є З.Я., Марцинковського В.А., Навроцького К.Л., Прокоф'єва В.М., Попова Д.М., Струтинського В.Б., Хаймовича Е.М., Хохлова В.А., Чупракова Ю.І., Яхно О.М., Blackburna J.F., Guillaona M., Kolleka W., Mednisa W. й ін.

Розрахунок гідроапаратів і визначення сил, що діють на їх запірно-регулюючі елементи, спирається на результати досліджень Абрамова Є.І., Баранова В.Н., Грігор'єва О.Л., Гольдфарба Л.С., Грунауера О.А., Діментберга Ф.М., Клітного В.В., Максумової Є.В., Попова Є.П., Сітнікова Б.Т., Федорца В.А., Хвінгії М.В., Чкалова В.В., Koscielnego W.J., Pizona A. та ін. Методам опису робочих процесів, що відбуваються у гідроапаратах та ГП, присвячені роботи Альтшуля А.Д., Глазкова М.М., Гурбана В.Ю., Ємцева Б.Т., Зайченка Є.Т., Колісниченка К.А., Комітовського М.Д., Кожевникова С.Н., Лойцяньського Г.Л., Лямаєва Б.Ф., Нікітіна Г.А., Ніколенка І.В., Пирсола Н., Сьоміна Д.О., Скворчевського Є.О., Складєвського О.М., Тарка Л.М., Філіпової Л.А., Фінкельштейна З.Л., Цуханової Є.В., Чарного І.А. та ін.

Проведений аналіз літературних джерел дозволив установити, що існуючі методи підвищення точності підтримання в заданих межах вихідної величини та чутливості до керуючих сигналів гідроапаратів з гідравлічним керуванням, які органічно входять до пристроїв керування виконавчими механізмами ГП та істотно впливають на показники їх технічного рівня, нездатні забезпечити високу точність та чутливість до керуючих сигналів. Потреба в забезпеченні місцевих гідравлічних зворотних зв'язків у сучасних пристроях керування виконавчими механізмами ГП приводить до необхідності розробки гідроапаратів з гідравлічним керуванням принципово нового типу. Застосування осциляції запірно-регулюючих елементів гідроапаратів дозволяє підвищити техніко-економічні показники ГП. Таким чином, важливим напрямком подальшого розвитку конструкцій гідроапаратів з гідравлічним керуванням є розробка гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром який реалізує осцилюючий зворотно-поступальний рух запірно-регулюючих елементів, і дозволяє забезпечити високу точність підтримання в заданих межах вихідної величини та чутливість до керуючих сигналів.

Як показує аналіз методів розрахунку і проектування гідроапаратів з осциляцією, на базі електронних керуючих пристроїв, та ГП, збудованих на їх базі, вони виконувалися без належного врахування таких важливих факторів: складних робочих процесів, що відбуваються у гідроапаратах та ГП; можливості розірвання РР та виникнення кавітації у порожнинах гідроапарата, витоків обумовлених осциляцією запірно-регулюючого елемента. Визначення сил, що діють на запірно-регулюючі елементи таких гідроапаратів, а саме сили тертя, осьової гідродинамічної сили, сил пружного елемента та демпфірування, провадилося без комплексного врахування параметрів осциляції запірно-регулюючих елементів, форми дроселюючої щілини, дійсного розташування запірно-регулюючого елемента в гільзі. Невизначено вплив параметрів осциляції запірно-регулюючого елемента на робочі характеристики таких гідроапаратів та ГП. Для вирішення поставленої проблеми не була розроблена концепція побудови гідроапаратів з гідравлічним керуванням та гідравлічною осциляцією, належним чином обґрунтовані: ряд прийнятих припущень; методи для

дослідження математичних моделей та багатокритеріальної оптимізації гідроапаратів з осциляцією та ГП, збудованих на їх базі; форма дроселюючої щілини запірно-регулюючих елементів; невизначені границі квазістаціонарності робочих процесів у ГП та гідроапаратах.

Гідроапарати з гідравлічним керуванням мають значні резерви і, якщо їх використати, можна значно підвищити показники їх технічного рівня та ГП. Прогрес у цьому напрямку стримує відсутність:

- концепції побудови гідроапаратів з осциляцією, спричиненою пульсацією тиску РР, що визначає їх призначення, можливості, роль і місце у ГП;
- системного підходу до аналізу властивостей і характеристик таких гідроапаратів та ГП, збудованих на їх базі;
- науково обґрунтованих методів розрахунку і проектування гідроапаратів з осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром, включаючи і багатокритеріальну оптимізацію параметрів;
- принципів побудови ГП створених на базі гідроапаратів з осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром.

Рішення цих питань визначило мету і задачі досліджень, що наведені у загальній характеристиці роботи. Широкі можливості реалізації поставленої наукової проблеми відкриваються при системному підході, коли конструкція основних структурних елементів гідроапаратів, гідравлічні зв'язки між ними, РР, робочі процеси досліджуються в рамках спільної технічної системи (рис. 1).

Другий розділ присвячено розробці концепції побудови гідроапаратів з осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром, вибору методів їх досліджень. Виявлено, що у більш ніж 65% гідроапаратів запірно-регулюючий елемент виконано у вигляді прецизійної пари золотник – гільза. Проаналізовано вплив конструктивних та робочих параметрів на показники їх технічного рівня. Установлено, що за цими показниками гідроапарати з гідравлічним керуванням значно поступають гідроапаратам з електричним керуванням, та осциляцією, яка здійснюється за допомогою електричного вібраційного контуру. Розглянуто причини виникнення пульсацій тиску РР на виході об'ємного насосу. Встановлено, що переважаючою її гармонікою є перша.

Вперше запропоновано для здійснення осциляційного зворотно-поступального руху запірно-регулюючого елемента гідроапарата використовувати пульсації тиску РР з виходу об'ємного насосу, які підсилюються у підсилювачі пульсацій, і який разом з додатковою порожниною та пружними елементами, розташованими в порожнинах гідроапарата, утворюють гідравлічний вібраційний контур. Це дозволило на єдиній енергетичній основі створити новий клас гідроапаратів з осциляцією, на базі яких можна реалізувати основні операції керування виконавчими механізмами ГП (табл. 1).

У загальному випадку підсилювач пульсацій складається з трубопроводів, каналів та камер, якими пульсації тиску РР від насоса надходять до додаткової порожнини гідроапарата. Нами розроблено гідравлічний вібраційний контуром з підсилювачем пульсацій тиску РР принцип дії якого базується на інтерференції хвиль.

Значною мірою характеристики, а отже і технічний рівень гідроапаратів та ГП, залежить від типу дроселюючих кромки запірно-регулюючих елементів. В роботі розглядаються різні їх типи: гостра – тип I; конічна – тип II; з трикутними запилами – тип III; з запилами у вигляді сегменту круга – тип IV; одна кромка гостра з напівкруглою канавкою, а друга конічна тип – V; з двома гострими кромками з напівкруглими канавками – тип VI; з двома профільованими – тип VII.

Рис. 1. Науково-практична проблема дисертаційної роботи і задачі, що її складають

Гідроапарати з гідравлічним керуванням і гідравлічним вібраційним контуром

Обґрунтовано вибір методів багатокритеріальної оптимізації та математичного опису робочих процесів, що відбуваються у гідроапаратах з гідравлічним вібраційним контуром і ГП. Відмічено особливості їх використання. Розроблена методика визначення границі квазістаціонарності робочих процесів у гідроапаратах та ГП.

Розробці та розвитку методів розрахунку основних елементів і вузлів гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром присвячено **третій розділ** роботи. Обґрунтовано прийняті припущення. Уточнено метод розрахунку сили тертя запірно-регулюючого елемента, який базується на, уточненій нами, фізичній моделі Штрибекка. Отримано нову аналітичну залежність для її розрахунку, яка на відміну від відомих ураховує: параметри осциляції запірно-регулюючого елемента, його неконцентричне розташування відносно втулки, площу поверхні тертя, силу прикладену з боку пружного елемента, та визначається за виразом

де t – час; i – сумарна жорсткість і попередній підтиск пружного елемента; r – радіальний зазор; z – переміщення запірно-регулюючого елемента, з урахуванням осциляції; f – функція Кронекера від d – відповідно діаметр і кількість робочих витків пружного елемента; l – довжина запірно-регулюючого елемента; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості РР; μ_0 – коефіцієнт, значення якого знаходиться в межах 0,19 – 0,21; μ_1 – безрозмірний коефіцієнт тертя, який враховує положення запірно-регулюючого елемента в гільзі; d_1 – відповідно діаметр запірно-регулюючого елемента і ефективна довжина контакту між ним та гільзою.

У розробленому методі розрахунку осьової гідродинамічної сили, за результатами моделювання ліній току усталеної течії в'язкої нестисливої РР у проточній порожнині гідроапарата, уперше визначено кут нахилу вектора швидкості потоку РР до осі запірно-регулюючого елемента гідроапарата – для досліджуваних їх типів. Він становить: для типу I – 69° ; типу II – 43° ; типу III – 53° ; типу IV – 63° ; типу V – 75° . Отримані значення кута для запірно-регулюючого елемента типу I, збігаються з даними наведеними у відомих літературних джерелах, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

Уперше отримані вирази для визначення відносних значень осьової гідродинамічної сили ($F_{\text{гп}}$) на осцилюючому запірно-регулюючому елементі гідроапарата (чотирищільниковому гідророзподільнику) для різних його типів.

Тут A – відповідно амплітуда осциляції та відкриття запірно-регулюючого елемента; ω – частота осциляції; μ – коефіцієнт, який урахує інерційну дію несталого потоку на запірно-регулюючий елемент; μ_0 – коефіцієнт жорсткості гідродинамічної пружини; ρ – густина РР; l – відповідно відстані між віссю каналу живлення та виточкою у гільзі гідророзподільника, віссю каналу зливу та виточкою у гільзі гідророзподільника; p_1 – відповідно тиск живлення і зливу; α – кут нахилу дроселюючого ребра до осі запірно-регулюючого елемента; β – кут нахилу трикутного запилю до осі запірно-регулюючого елемента; n – відповідно кількість та радіус сегменту.

Уточнено фізичну модель гідродинамічної сили для гідроапаратів з осциляцією. Проведено аналіз впливу μ на відносну гідродинамічну силу для запірно-регулюючих елементів різних типів.

В розробленому методі розрахунку сили демпфірування вперше отримана аналітична залежність для визначення зміни перепаду тиску в демпфіруючій порожнині гідроапарата, яка урахує параметри осциляції запірно-регулюючого елемента

де p_1 – відповідно тиск у демпфіруючій порожнині та проточній частині гідроапарата; d_1 – відповідно діаметр і площа дроселя; μ – коефіцієнт витрат дроселя; μ_0 – коефіцієнт кінематичного тертя; m – маса запірно-регулюючого елемента та пов'язаних з ним елементів з приведеною до запірно-регулюючого елемента маси РР; θ_0 – початкове максимальне відхилення запірно-

регулюючого елемента при перехідному процесі; β – коефіцієнт, який урахує нелінійність пружного елемента.

Дістав подальшого розвитку метод розрахунку пружних елементів гідроапаратів, який враховує особливості їх роботи у гідравлічному вібраційному контурі. Він базується на моделі яка урахує реальне навантаження та просторову форму, моменти кручення і згинання, якість прилягання торця до опорної поверхні. За допомогою розробленої програми, проведено аналіз динамічних характеристик пружного елемента гідравлічного вібраційного контуру. Отримані графіки зміни дотичного напруження і перерізуючої сили, які дозволяють розрахувати його міцність та визначити кількість робочих циклів.

Вперше отримана аналітична залежність для визначення приведеної жорсткості пружного елемента гідроапарата, яка, враховує параметри осциляції запірно-регулюючого елемента

де m – маса пружини; k – жорсткість рідинної пружини; F_0 – сила тертя спокою; A – амплітуда зовнішньої сили (у відсотках від тиску живлення); Δp – перепад тиску на торцях запірно-регулюючого елемента.

Відкоригована формула Нікітіна Г.А. для розрахунку витоків у гідроапаратах з осциляцією (другий член формули (2))

де $1,75$ – коефіцієнт, який урахує неконцентричне розміщення запірно-регулюючого елемента у гільзі; d – діаметр шийки запірно-регулюючого елемента; Δp – перепад тиску; η – коефіцієнт кінематичної в'язкості РР; L – довжина нерухомої стінки.

Обґрунтовано правомірність її використання у математичних моделях гідроапаратів з осциляцією.

Узагальнену математичну модель коефіцієнта передачі гідравлічного вібраційного контуру отримано шляхом його декомпозиції на узагальнені структурні елементи – канали і камери, з використанням передаточних функцій трубопроводу, представлено формулою

Коефіцієнт передачі підсилювача пульсацій визначали за формулою

В формулах (3) і (4) коефіцієнти передачі камер та каналів – розраховувалися за однотипними залежностями отриманими з передаточних функцій трубопроводу. Коефіцієнтами – урахувалося відбиття хвиль та відмінність в часі їх проходження в основному і обвідному каналах. Урахування зміни площі прохідного перетину в каналах і камерах підсилювача пульсацій проводилося за допомогою коефіцієнтів втрат – ξ .

Залежності (3) і (4) покладені в основу розробленого методу розрахунку коефіцієнта передачі гідравлічного вібраційного контуру. Обґрунтовано правомірність його використання.

У **четвертому розділі** наведені розроблені математичні моделі гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром (згідно табл. 1). На конкретному прикладі ГП, переливний клапан якого містить гідравлічний вібраційний контур (підсилювач пульсацій з камерою та пружиною, рис. 2), вперше проведена порівняльна оцінка дослідження характеристик гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром та ГП, побудованих на їх базі, по нелінійним і лінеаризованим математичним моделям. При розробці математичної моделі ГП з переливним клапаном з гідравлічним вібраційним контуром приймалось наступне: виконується умова нерозривності РР; кавітація відсутня; втрати тиску в каналах, з за їх малої довжини, незначні; температура та густина РР – сталі, та дорівнюють їх середнім значенням.

Рис. 2. Схема ГП з переливним клапаном з гідравлічним вібраційним контуром (ПП, пружина, камера): Н – насос, z – підсилювач пульсацій; Др – дросель; Нав – навантаження, z

Розроблена математична модель представлена рівняннями:
– руху запірно-регулюючого елемента клапана

- нерозривності
- витрати на виході з насоса
- витрати через клапан
- обмеження переміщення запірно-регулюючого елемента клапана

В рівняннях (5) – (8): – сила рідинної пружини; – сила демпфірування клапана; – витрата стиску РР; – витрата керування клапаном; – коефіцієнт витрат гідроапарата; – площа дроселюючої щілини гідроапарата; i – відповідно провідності гільзи, вхідного і вихідного каналів; – перепад тиску на щілині; – витрата перетоків; – витрата, обумовлена осциляцією запірно-регулюючого елемента; – об’ємний ККД насоса; i – кутова швидкість обертання і кут повороту ведучої шестерні насоса; r_b і e_w – радіус основного кола і ширина шестерні; ; ; – діаметр кола головок шестерні; ; – відстань між центрами шестерень; ; – модуль шестерні; – кількість зубців.

Лінеаризована математична модель ГП з переливним клапаном з гідравлічним вібраційним контуром отримана, шляхом гармонічної лінеаризації сили сухого тертя, лінеаризації гідродинамічної сили і рівняння витрат. Сила, під дією якої відбувається осциляція запірно-регулюючого елемента, розраховувалася за залежністю

де – амплітуда пульсацій тиску в ГП, яка розраховується з рівності енергій імпульсів пульсацій на виході з насоса і гармонічних впливів, які моделюються.

Задавались початкові умови: i . Змінюючи вхідні впливи – , отримали графіки перехідних процесів у ГП і клапані при $f = 200$ Гц (рис. 3).

Похибка кривих, отриманих по лінеаризованій моделі, у порівнянні з кривими нелінійної моделі визначалась за відносною інтегральною оцінкою, (9), де, як приклад, взяті i – відповідно витрата через клапан розрахована за нелінійною і лінеаризованою математичними моделями; – час регулювання.

Характер перехідних процесів у ГП та клапані, розрахованих за лінеаризованою і нелінійною математичною моделлю (рис. 3, табл. 2), показали добрий збіг, що пояснюється використанням гідравлічного вібраційного контуру. Це дозволяє, на попередніх етапах проектування, використовувати для аналізу і синтезу таких гідроапаратів та ГП методи теорії лінійних систем.

Рис. 3. Графіки перехідних процесів у ГП та клапані при – тиску в ГП; б – витрати через клапан, розраховані: 1 – за нелінійною моделлю; 2 – за лінеаризованою

Таблиця 2

При малих відхиленнях змінних від їх усталених значень отримана лінеаризована математична модель ідеального чотирищілинного гідророзподільника з гідравлічним вібраційним контуром, який живиться від джерела постійного тиску і керує двоштоковим гідроциліндром, в рівнянні руху запірно-регулюючого елемента якого враховано третю гармоніку осциляції.

Обґрунтовано використання залежності (1) в математичних моделях гідроапаратів з осциляцією. Проведено оцінку впливу стохастичної сили тертя на точність підтримання тиску в ГП. Доведено, що використання клапана з гідравлічним вібраційним контуром дозволяє підвищити показники технічного рівня ГП. Розрахунковим шляхом установлено, що при високій чутливості до зміни тиску в ГП клапана з гідравлічним вібраційним контуром (на 13,2% менший час наростання по витраті при практично однаковому часі наростання по тиску), у порівнянні з клапаном без гідравлічного вібраційного контуру, покращуються і інші показники його якості. Він також має більшу швидкодію (на 10,3% менший час регулювання по тиску, на 37,2% – по витраті), менше число коливань перехідного процесу.

Установлено, що використання розроблених математичних моделей гідроапаратів з осциляцією, у порівнянні з відомими (розглядалися моделі Коробочкіна Б.Л. і Попова Д.М.), для дослідження їх динамічних характеристик та ГП, побудованих на їх базі, дозволить підвищити точність розрахунку витрати через клапан, що найменш, на 5,7%, перепаду тиску на 12,8%.

В п'ятому розділі наведені результати аналітичних досліджень робочих процесів у гідроапаратах з гідравлічним вібраційним контуром та ГП, побудованих на їх основі. Установлено, що при осциляції запірно-регулюючого елемента гідроапарата його тип та переміщення суттєво впливають на відносну зміну витрати через нього, яка може відрізнятись на (0,1 – 6) % від свого середнього значення, збільшуючись з відкриттям запірно-регулюючого елемента. Кавітація у гідроапаратах з осциляцією, у порівнянні зі звичайними, може виникнути при відкритті дроселюючої щілини менше ніж 0,035 мм. Доведено, що для забезпечення безкавітаційної роботи гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром амплітуда осциляції їх запірно-регулюючих елементів повинна вибиратись з урахуванням частоти осциляції та перепаду тиску на дроселюючий щілині.

Визначено, що при переміщенні запірно-регулюючих елементів типів I, III, IV та VI сумарна жорсткість пружного елемента гідравлічного вібраційного контуру гідророзподільника залишається, практично, постійною. Установлено залежність коефіцієнта підсилення підсилювача пульсацій від його конструктивних параметрів. Доведено, що в області частот більших 250 Гц, значний вплив на коефіцієнт підсилення має процентний вміст повітря у РР.

Динамічні характеристики гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром досліджували розглядаючи клапан прямої дії (рис. 4), який працює у ГП з насосом, з постійною витратою, та постійним навантаженням. Отримали передаточну функцію клапана

де – перетворювач Лапласа; – коефіцієнти, які залежать від параметрів клапана.

Рис. 4. Розрахункова схема клапана прямої дії з гідравлічним вібраційним контуром

Розглядалися рівняння руху запірно-регулюючого елемента клапана з гідравлічним вібраційним контуром та без нього, ввели поняття приведенного коефіцієнта осциляції, який використовується для їх оцінки при проектуванні.

Дослідження впливу типу запірно-регулюючого елемента на динамічних характеристик клапана (діаметр умовного проходу 10 мм;) проводились в пакеті прикладних програм (рис. 5). Проведений аналіз якості перехідних процесів клапана з запірно-регулюючими елементами різних типів дозволив установити, що при коливальному характері перехідних процесів, клапан з запірно-регулюючими елементами типів V і I (рис. 5 а) має на 15 % менший час регулювання, на 5,2 % більший коефіцієнт підсилення. Однак, клапан з цими типами запірно-регулюючих елементів має менший діапазон регулювання (рис. 5 б). Аналіз впливу типу запірно-регулюючого елемента на квадратичну інтегральну оцінку клапана виявив, що вона суттєвим чином залежить від параметрів осциляції та відкриття дроселюючої щілини, і на порядок більша у IV та VII типів.

Рис. 5. Графіки перехідних процесів клапана (); номер кривої відповідає типу запірно-регулюючого елемента:

а – зміна тиску ; б – відносна зміна тиску

За допомогою коефіцієнтів похибок, визначених по передаточним функціям клапана з гідравлічним вібраційним контуром і без нього, знаходили похибку відтворення керуючого сигналу (похибка підтримання клапаном у ГП). Вважали, що збурення на виході клапана відсутнє, і він працює в межах, де його характеристики лінійні, а тиск сигналу керування

змінюється за експонентою. Установлено, що ця похибка для клапанів з гідравлічним вібраційним контуром значно залежить від параметрів осциляції і типу запірно-регулюючого елемента (табл. 3).

Таблиця 3

Результати розрахунку точності клапана

Осциляція запірно-регулюючого елемента дозволила підвищити статичну точність клапана на 30 %.

Імітаційним моделюванням робочих процесів у ГП з переливним клапаном з гідравлічним вібраційним контуром (рис. 2), встановлені особливості і закономірності функціонування гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром. Визначені області стійкості та встановлено вплив на них параметрів клапана. Показано, що при зміні частоти збурень, які виникають внаслідок спрацювання виконавчих механізмів ГП, зміна амплітудно-фазової частотної характеристики по похибці впливу, що задає не перевищує 3 % від свого значення. Тобто відтворення керуючого сигналу відбувається з постійною похибкою, яка не перевищує 5 % і дорівнює похибці системи у статичному режимі. Час регулювання ГП знаходиться в межах (0,0523 – 0,25) с.

Показано, що незалежно від способу реалізації вібраційного контуру надійність гідроапаратів з осциляцією є достатньо високою.

У шостому розділі наведені результати експериментальних досліджень, описані експериментальні установки, методики проведення і обробки результатів досліджень гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром та ГП, збудованих на їх базі. Обґрунтовано вибір приладів та контрольно-вимірювальної апаратури.

За результатами експериментів виявлено характер зміни коефіцієнтів витрати і осьової гідродинамічної сили запобіжного клапана та гідророзподільника з різними типами запірно-регулюючого елемента. Установлено, що виконання напівкруглої канавки на гострій кромці запірно-регулюючого елемента дозволило зменшити осьову гідродинамічну силу більше ніж на 40%. Найменше значення цієї сили отримали при відносному радіусі канавки () 0,16. Підтверджені висновки отримані теоретичним шляхом, що величина кута θ_n залежить від типу запірно-регулюючого елемента.

Установлено, що стохастична сила тертя спокою запірно-регулюючого елемента клапана змінюється в межах 10...15% від свого номінального значення, а закон її розподілення близький до нормального. Експериментально встановлено, що застосування гідравлічного вібраційного контуру у запобіжному клапані дозволило на 25,5% зменшити ступінь нерівномірності підтримання тиску в ГП, на 31 % зменшити його гістерезис, отже, підвищити показники технічного рівня ГП. Установлено, що з збільшенням об'єму камери підсилювача пульсацій його коефіцієнт підсилення зменшується. За даними експериментальних досліджень цей коефіцієнт становить 1,2.

Перехідні процеси зміни тиску в ГП з клапаном з гідравлічним вібраційним контуром та без нього (рис. 6), при однаковій жорсткості регулюючої пружини, мають коливальний характер. Час наростання та досягнення першого максимуму в ГП з клапаном з гідравлічним вібраційним контуром на 22 % менший, ніж без нього, хоча перерегулювання дещо більше. Це свідчить про кращу чутливість клапана з гідравлічним вібраційним контуром до керуючих сигналів.

Рис. 6. Осцилограми перехідних процесів зміни тиску в ГП з клапаном з запірно-регулюючим елементом типу V:

а – з гідравлічним вібраційним контуром; б – без гідравлічного вібраційного контуру; тиск: 1 – в ГП, 2 – на зливі

Експериментальні дослідження статичної точності підтримання тиску в ГП, який проводили на установці типа TP511 фірми FESTO, показали значний вплив на неї частоти осциляції запірно-регулюючого елемента гідроапарата. Похибка між характеристиками

гідроапарата отриманими експериментально, та розрахованими за допомогою розроблених математичних моделей, за критерієм Фішера, не перевищує 7,4 %, що свідчить про їх адекватність.

У цьому розділі наведено методику розрахунку і проектування розроблених гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром у складі систем ГП та концепцію побудови ГП технологічних та мобільних машин, збудованих на їх базі. Проведена оцінка показників їх технічного рівня. Одним з етапів методики розрахунку є багатокритеріальна оптимізація параметрів гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром, яку здійснювали методом дослідження простору параметрів за допомогою розроблених програм.

Оптимізація параметрів підсилювача пульсацій проводилась на базі його математичної моделі при заданих: типу РР і її газовмісті, частоті пульсацій та тиску РР у ГП. За варійовані параметри були прийняті: – радіус трубопроводу, який з'єднує підсилювач пульсацій з проточним каналом; i – радіус і довжина основного каналу; – довжина обвідного каналу; i – радіус і довжина камери підсилювача пульсацій. Приймались параметричні та функціональні обмеження, а саме, обмеження довжини основного каналу і його радіусу. Записували умови працездатності підсилювача пульсацій. Вводили критеріальні обмеження, які виключали з розгляду області резонансу і в якій підсилювач працює як гаситель. Якість підсилювача пульсацій оцінювали за двома критеріями: – величині зворотній коефіцієнту підсилення тиску і – масі підсилювача, які бажано мінімізувати.

Були визначені оптимальні параметри підсилювача пульсацій (табл. 4, при частоті пульсацій тиску РР на виході з насоса 200 Гц та МПа). Установлено, що підсилювач пульсацій ефективно працює в досить широкому діапазоні частот, а вибір його оптимальних параметрів, в значній мірі, залежить від радіусу трубопроводу, який з'єднує його з проточним каналом. Установлено, що маса всіх підсилювачів не перевищувала середню масу гідроапарата, з аналогічним діаметром умовного проходу.

Таблиця 4

Значення оптимальних параметрів підсилювача пульсацій

Багатокритеріальна оптимізація гідроапаратів, у складі ГП, проводилась методом дослідження простору параметрів (див. рис. 4). В якості варійованих параметрів клапана прийняті: – діаметр каналу гідроапарата; – перепад тиску на торцях запірно-регулюючого елемента. Приймались параметричні обмеження. Вводились наступні функціональні обмеження: функція відсутності застою запірно-регулюючого елемента; функції обмеження швидкості та амплітуди осциляції запірно-регулюючого елемента; функції виключення співудару витків та міцності пружного елемента; функція стійкості клапана. Якість клапана оцінювалась наступними критеріями: – похибкою відтворення сигналу керування; – значенням квадратичної інтегральної оцінки; – величиною зворотною коефіцієнту підсилення клапана по витраті; – величиною витоків та перетікань. Критеріальні обмеження вибирали на етапі попереднього дослідження клапана, виходячи з забезпечення непустоти множини допустимих точок в просторі параметрів D .

У результаті розв'язання оптимізаційної задачі установлено, що оптимальні значення переміщень запірно-регулюючого елемента клапана, незалежно від його типу, знаходяться в області його максимального відкриття. Значний розкид оптимальних значень частоти осциляції для різних типів запірно-регулюючих елементів (табл. 5), за результатами досліджень, свідчить про те, що гідроапарати даного класу можуть ефективно працювати з насосами різних типів (пульсація тиску на виході яких становить від 58 до 350 Гц).

Таблиця 5

Значення оптимальних параметрів клапана з запірно-регулюючими елементами різних типів

При проектуванні гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром слід надавати перевагу, запропонованому нами, запірно-регулюючому елементу типу V, який забезпечує в два рази більшу точність при коефіцієнті підсилення 5,2. Запірно-регулюючий елемент типу

VII треба застосовувати у ГП, в яких непотрібна висока швидкість і великий коефіцієнт підсилення.

Розроблена методика розрахунків і проектування гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром у складі ГП подана у вигляді загальної схеми послідовності розрахунку їх конструктивних параметрів, з наступною перевіркою статичних та динамічних властивостей.

На основі проведеного аналізу сформульовано концепцію побудови ГП технологічних та мобільних машин на базі розроблених гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром яка забезпечує підвищення показників їх технічного рівня. Наведені схеми ГП, побудованих на базі розроблених гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром.

Проведені, на розробленій нелінійній математичній моделі, імітаційне моделювання робочих процесів у ГП із змінним навантаженням та переливним клапаном з гідравлічним вібраційним контуром, параметри якого отримані шляхом багатокритеріальної оптимізації, довели його високу ефективність. Час регулювання у ГП з розробленим переливним клапаном з гідравлічним вібраційним контуром становить 0,01 с, що в порівнянні з лінійним електрогідравлічним крокуючим приводом майже в два рази менший, на 14 % менший гістерезис, на 4 % менший коефіцієнт нерівномірності, кращі і інші показники якості.

Розрахунковим шляхом встановлено, що за показниками технічного рівня розроблені гідроапарати з гідравлічним вібраційним контуром в 1,27 перевищують виріб – аналог, і за цим показником відповідають вищій категорії, відносяться до групи С, відповідають за технічним рівнем кращим аналогам. Конкурентоспроможність розробленого клапана з гідравлічним вібраційним контуром становить 1,35. Доведено економічну ефективність від впровадження в виробництво і промисловість розроблених гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром. При застосуванні розроблених гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром у ГП технологічних та мобільних машин, шляхом їхньої модернізації, показники їх технічного рівня збільшується в 1,17 рази.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаних досліджень вирішена важлива проблема, що полягає в розвитку наукових основ проектування апаратів з гідравлічною осциляцією для систем ГП, що дозволило підвищити показники технічного рівня ГП, збудованих на базі розроблених гідроапаратів. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Розроблено концепцію побудови гідроапаратів з осциляцією. Вперше запропоновано для здійснення осциляції запірно-регулюючих елементів гідроапаратів використовувати пульсації тиску робочої рідини на виході із об'ємного насоса, що дозволяє на єдиній енергетичній основі створювати гідроапарати з осциляцією.

2. Дістали подальшого розвитку наукові основи проектування гідроапаратів з осциляцією:

- вперше розроблено узагальнену математичну модель гідравлічного вібраційного контуру, яку покладено в основу методу розрахунку його коефіцієнта передачі. Співставлення результатів розрахунку з експериментом показало, що похибка розрахунків не перевищує 5 %, чим і визначається правомірність його використання;

- вперше розроблено метод розрахунку осьової гідродинамічної сили, що діє на осцилюючий запірно-регулюючий елемент гідроапарата, використання якого дозволяє підвищити точність її розрахунку. Вперше отримана аналітична залежність для її визначення. Уточнено фізичну модель;

- дістали подальшого розвитку, в тій частині, що ураховують параметри осциляції запірно-регулюючих елементів, методи розрахунку: сил тертя та демпфірування, на осцилюючому запірно-регулюючому елементі гідроапарата; витоків у гідроапаратах з осциляцією; пружного елемента гідравлічного вібраційного контуру гідроапарата, використання яких підвищує адекватність математичних моделей гідроапаратів реальному

об'єкту. Отримані нові математичні залежності для їх розрахунку. Уточнено фізичну модель тертя.

3. Вперше отримані математичні моделі гідроапаратів з гідравлічним керуванням та гідравлічним вібраційним контуром, які комплексно (в порівнянні з раніше відомими) ураховують такі фактори, як: параметри осциляції запірно-регулюючих елементів, форму дроселюючої щілини, нестационарність робочих процесів, властивості робочої рідини. Виявлені особливості динаміки функціонування гідроапаратів з осциляцією у ГП дозволили ввести поняття приведенного коефіцієнта осциляції, що зменшило трудомісткість отримання їх математичних моделей. Розроблені математичні моделі гідроапаратів з осциляцією, спричиненою пульсацією тиску робочої рідини, у складі ГП з переливним клапаном з гідравлічним вібраційним контуром та ГП лінійного переміщення. Використання розроблених математичних моделей дозволяє більш докладно визначити вплив конструктивних і робочих параметрів гідроапаратів на характеристики ГП, провести їх раціональний вибір.

4. Вперше установлений взаємозв'язок між параметрами осциляції запірно-регулюючого елемента гідроапарата та його характеристиками:

- для діапазону зміни частоти осциляції запірно-регулюючого елемента клапана від 100 Гц до 300 Гц, при сталому значенні комплексу $f \cdot x_{\text{осц}} = 2,5$ [Гц·см], зміні навантаження (витрати) ГП в межах $\pm 20\%$ від його номінального значення та незмінних інших параметрах, зміна частоти чи амплітуди осциляції запірно-регулюючого елемента клапана не впливає на динамічні характеристики ГП;

- форма дроселюючих кромок запірно-регулюючого елемента та його величина переміщення, суттєво впливають на відносну зміну витрати при його осциляції, причому витрата може відрізнятися на $(0,1 - 6)\%$ від свого середнього значення, збільшуючись з відкриттям запірно-регулюючого елемента;

- при проектуванні гідроапаратів з осциляцією треба віддавати перевагу, запропонованому нами, запірно-регулюючому елементу типу V, який забезпечує високу точність та швидкодію;

- кавітація у гідроапаратах з осциляцією, в порівнянні зі звичайними гідроапаратами, може виникнути при відкритті дроселюючої щілини менш ніж 0,035 мм. Для забезпечення безкавітаційної роботи гідроапарата, амплітуда осциляції його запірно-регулюючого елемента повинна вибиратися з урахуванням частоти осциляції та перепаду тиску на дроселюючій щілині;

- гідроапарати даного класу можуть ефективно працювати у ГП з об'ємними насосами різних типів, частота пульсацій тиску робочої рідини на виході яких змінюється від 58 до 350 Гц.

5. Вперше розроблені принципи побудови ГП на базі гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром, які дозволяють алгоритмізувати процес прийняття рішень про доцільність їх використання у робочому процесі та забезпечують підвищення показників технічного рівня привода.

6. Розроблені науково обґрунтовані ефективні алгоритми та програмні модулі розрахунку та багатокритеріальної оптимізації параметрів гідроапаратів дозволили прискорити створення і впровадження нових і модернізованих зразків гідроапаратів з осциляцією.

Розрахунковим шляхом доведено, що використання у гідроапаратах розробленого гідравлічного вібраційного контуру дозволяє зменшити на 10,3 % час регулювання, на 31,2 % гістерезис, та на 25,5 % ступінь нерівномірності тиску, який підтримується у ГП. Використання в ГП переливного клапана з гідравлічним вібраційним контуром дозволило, у порівнянні з серійним, підвищити майже в два рази точність підтримання тиску в ГП, інші показники його технічного рівня. Доведено економічну доцільність від впровадження в виробництво і промисловість розроблених гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром. Установлено, що за показниками технічного рівня розроблені гідроапарати з гідравлічним вібраційним контуром в 1,3 рази перевищують виріб – аналог, і за цим показником відповідають вищій категорії. Конкурентоспроможність розробленого клапана з гідравлічним вібраційним

контуром становить 1,35, а його використання у ГП більш ніж на 17 % підвищує показники технічного рівня привода.

7. Розроблені наукові положення та отримані результати дозволяють в подальшому:

- оптимізувати конструктивні і робочі параметри гідроапаратів з осциляцією, за більш складними критеріями з урахуванням параметрів осциляції запірно-регулюючих елементів, його типу, нестационарності робочих процесів, що відбуваються у ГП, для їх ефективної роботи у широкій гамі ГП технологічних та мобільних машин;

- створювати нові моделі гідроапаратів з осциляцією, яка здійснюється гідравлічним вібраційним контуром, для ГП технологічних та мобільних машин;

- розв’язувати задачі оптимізації, стосовно до різних типів гідроапаратів і ГП технологічних та мобільних машин, які з конструктивної, технологічної та інформаційної точки зору мають ряд спільних ознак з гідроапаратами з осциляцією і ГП, побудованими на їх базі, що дозволяє скоротити час проектування таких гідроапаратів і ГП.

Основні наукові положення і результати, викладені в дисертаційній роботі, мають практичну цінність при проектуванні та модернізації ГП, побудованих на базі розроблених гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром, та впроваджені на підприємствах України, а також використовуються у навчальному процесі.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Андренко П.Н. Аналитические исследования энергетического КПД гидрораспределителя с прямым пропорциональным электрическим управлением / П.Н. Андренко // Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – 1991. – Вып. 27. – С. 119 – 123.

2. Андренко П.Н. Исследование влияния изменения площади дросселирующей щели гидрораспределителя с прямым пропорциональным электрическим управлением на его статическую точность / П.Н. Андренко, В.В. Клитной // Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – 1992. – Вып. 28. – С. 28 – 34. *Здобувачем розроблена математична модель гідророзподільника, проведено аналіз результатів досліджень, формування висновків.*

3. Андренко П.Н. Экспериментальное исследование преобразователей пульсаций / П.Н. Андренко, О.В. Дмитриенко, Э.В. Белоусов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2000. – Вып. 79. – С. 32 – 33. *Здобувач брав участь у розробленні методик, проведенні експериментів, формулюванні висновків.*

4. Андренко П.Н. Принцип построения гидравлических аппаратов нового класса / П.Н. Андренко // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2001. – № 129, Ч. 2. – С. 102 – 106.

5. Andrenko P.N. Model matematyczny interferencyjnego przemiennika pulsacji ciśnienia w układach hydraulicznych / P.N. Andrenko // Hydraulika i Pneumatyka. – 2001. – № 3. – S. 25 – 27.

6. Андренко П.Н. Расчет гидродинамической силы на осциллирующем золотнике гидроаппарата / П.Н. Андренко // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2002. – № 7, Т. 2. – С. 109 – 116.

7. Andrenko P. Zastosowania interferencyjnych przemienników pulsacji ciśnienia do zmniejszania tarcia w zespołach hydraulicznych / P. Andrenko // Hydraulika i Pneumatyka. – 2002. – № 6. – S. 24 – 25.

8. Андренко П.Н. Способ улучшения эксплуатационных характеристик гидроаппаратов / П.Н. Андренко // Вестник Харьковского Национального автомобильно-дорожного университета. – 2002. – Вып. 18. – С. 31 – 35.

9. Андренко П.Н. Вибрационная линеаризация – эффективный путь улучшения динамических характеристик гидроаппаратов / П.Н. Андренко // Вибрация в технике и технологиях. – 2003. – № 2 (28). – С. 39 – 45.

10. Андренко П.Н. Выбор параметров осцилляции запорно-регулирующего элемента гидроаппарата с гидравлическим вибрационным контуром / П.Н. Андренко // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – № 13(59). – С. 31 – 38.

11. Андренко П.М. Побудова математичних моделей гідроапаратів із гідравлічним вібраційним контуром / П.М. Андренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2004. – № 2 (8). – С. 15 – 20.
12. Андренко П.Н. Построение математических моделей интерференционных преобразователей пульсаций на основе уравнения Навье-Стокса / П.Н. Андренко // Вісник Сумського державного університету. – 2004. – № 2(61). – С. 14–18.
13. Андренко П.М. Енергетичні характеристики процесу вібраційної лінеаризації гідроапаратів / П.М. Андренко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2004. – Вып. 24. – С. 39 – 42.
14. Андренко П.М. Експериментальні дослідження запобіжного клапану з гідравлічним вібраційним контуром / П.М. Андренко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2004. – Вып. 25. – С. 61 –64.
15. Андренко П.М. Про можливість виникнення кавітації у гідроапаратах з вібраційною лінеаризацією / П.М. Андренко // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 28. – С. 17 – 21.
16. Андренко П.Н. Влияние параметров осцилляции запорно-регулирующего элемента гидроаппарата на устойчивость исполнительного поршневого механизма / П.Н. Андренко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2004. – № 7 (77), Ч. 2. – С. 201 – 205.
17. Андренко П.М. Проектування пружин гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром / П.М. Андренко // Вестник Харьковского Национального автомобильно-дорожного университета. – 2004. – Вып.27. – С. 125 – 129.
18. Андренко П.М. Вплив деформації запорно-регулюючого елемента на втрати потужності на витік та рідинне тертя у гідроапаратах із гідравлічним вібраційним контуром / П.М. Андренко // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 44. – С. 72 – 77.
19. Андренко П.М. Обґрунтування вибору методу для математичного опису гідроапаратів із вібраційною лінеаризацією / П.М. Андренко // Вісник Сумського державного університету. – 2004. – № 13(72). – С. 70 – 74.
20. Андренко П.Н. Экспериментальные исследования влияния частоты осцилляции запорно-регулирующего элемента гидроаппарата на статическую точность поддержания давления в системе гидропривода / П.Н. Андренко, В. Меднис, Г.В. Крикун // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 47. – С. 19 – 22. *Здобувач поставив задачу, розробив методику, приймав участь в дослідженнях і аналізі результатів.*
21. Андренко П.М. Розрахункові дослідження параметрів осциляції гідророзподільника з гідравлічним вібраційним контуром / П.М. Андренко, І.П. Гречка // Промислова гідравліка і пневматика. – 2005. – № 1 (7). – С. 68 – 74. *Здобувачем поставлена задача, розроблена математична модель, сформульовані висновки.*
22. Андренко П.М. Динамічні характеристики циліндричних пружин гідравлічного вібраційного контуру / П.М. Андренко, О.Л. Григор'єв, І.П. Гречка // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 23. – С. 3 – 12. *Здобувач поставив задачу, прийняв участь у розробці математичної моделі дослідженнях, аналізі результатів і формулюванні висновків.*
23. Андренко П.М. Визначення кута нахилу вектора швидкості потоку, для розрахунку гідродинамічної сили запорно-регулюючого елемента гідроапарата / П.М. Андренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2005. – № 4/2 (16). – С. 60 – 63.
24. Андренко П.М. Вплив параметрів осциляції запорно -регулюючого елемента на характеристики гідроапарату / П.М. Андренко // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 28. – С. 21 – 28.
25. Андренко П.М. Визначення сили демпфування при дроселюванні потоку робочої рідини у гідроапараті із вібраційною лінеаризацією / П.М. Андренко // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 39. – С. 77 – 83.
26. Андренко П.М. Динаміка гідросистеми збудованої з використанням гідроапаратів із гідравлічним вібраційним контуром / П.М. Андренко // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 43. – С. 55 – 63.

27. Андренко П.М. Визначення витоків в гідроапаратах із вібраційною лінеаризацією / П.М. Андренко // Вісник НТУ "ХПІ". – 2005 – № 57. – С. 100 – 104.
28. Андренко П.М. Вибір раціональних параметрів гідравлічного вібраційного контуру гідроапарату / П.М. Андренко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2005. – № 1. – С. 178 – 182.
29. Андренко П.М. Дослідження динамічних характеристик гідроапаратів із гідравлічним вібраційним контуром / П.М. Андренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2006. – № 1/2 (19). – С. 67 – 74.
30. Андренко П.М. Вибір сумарної жорсткості пружин гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром / П.М. Андренко, І.П. Гречка // Промислова гідравліка і пневматика. – 2006. – № 2 (12). – С. 87 – 91. *Здобувач поставив задачу, прийняв участь у розробці математичної моделі гідроапаратів, аналізі результатів, формулюванні висновків.*
31. Андренко П.М. Метод розрахунку коефіцієнта підсилення інтерференційного підсилювача пульсацій / П.М. Андренко // Вісник НТУ "ХПІ". – 2006 – № 42. – С. 59 – 67.
32. Лур'є З.Я. Обґрунтування правомірності дослідження характеристик гідроапаратів з гідравлічним вібраційним контуром по їх лінеаризованим математичним моделям / З.Я. Лур'є, П.М. Андренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2006. – № 6/3 (24). – С. 15 – 19. *Здобувачем розроблені математичні моделі, проведені розрахункові дослідження, сформульовані висновки.*
33. Лур'є З.Я. Розрахунок сили тертя на запірно-регулюючому елементі гідроапарата з вібраційною лінеаризацією / З.Я. Лур'є, П.М. Андренко // Вісник НТУ "ХПІ". – 2008. – № 4. – С. 129 – 137. *Здобувачем проведено аналіз літературних джерел, уточнено аналітичну залежність для розрахунку сили тертя.*
34. А.с. 1592601 СССР, МКИ F 15 B 13/02. Гидрораспределитель / П.Н. Андренко (СССР), С. Дзехцяж (ПНР), В.В. Клитной (СССР). – №4425571/25–29; заявл. 18.05.88; опубл. 15.09.90, Бюл. № 34. *Здобувач обґрунтував вибір форми дроселюючої кромки.*
35. А.с. 1581876 СССР, МКИ F 15 B 13/02. Регулируемый гидроаппарат / В.В. Клитной, П.Н. Андренко (СССР). – № 4447937/31–29; заявл. 27.06.88; опубл. 30.07.90, Бюл. № 28. *Здобувач запропонував гідравлічний вібраційний контур, брав участь у розробленні конструкції гідроапарата.*
36. Andrenko P. Bestimmung der ventischieberreibung bei der verwendung von ditheroszillationen / P. Andrenko // Innowacje i postep w Hydraulicie i pneumatyce : piate polsko-niemieckie seminarium, 18-19 wrzesnia, 2003 p. – Warszawa, 2003. – S. 348 – 356.
37. Andrenko P. Determining the limits of applicability of process quasisteadiness when designing hydraulic valves with dither linearisation / P. Andrenko // HYDRAULIC AND PNEUMATICS '2005 : international scientific-technical conference, 17-19 maja 2005. – Wroclaw, 2005. – P. 713 – 720.
38. Андренко П.М. Методологія проектування гідроапаратів з осциляцією / П.М. Андренко // Промислова гідравліка і пневматика : IX міжнар. наук.-техніч. конф. АС ППІ, 22-23 квіт., 2008 р. : тези доп. – Кременчук, 2008. – С. 25 – 26.
39. Андренко П.М. Проектування і розрахунок елементів та пристрів гідро-пнеумоавтоматики : нав. посібник [для студ. вищ. навч. закл.]. / П.М. Андренко – К.: УМК ВО, 1990. – 100 с.

АНОТАЦІЇ

Андренко П.М. Розвиток наукових основ проектування апаратів з гідравлічною осциляцією для систем гідроприводів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ, 2009.

У дисертаційній роботі визначена, науково обґрунтована і вирішена проблема підвищення технічного рівня гідроприводів за рахунок розробки та використання принципово нового класу гідроапаратів з осциляцією. Розроблено концепцію побудови гідроапаратів з осциляцією і гідроприводів, побудованих на їх базі. Розвинуті наукові основи проектування створених гідроапаратів: методи розрахунку гідродинамічної сили, коефіцієнта передачі гідралічного вібраційного контуру, сил тертя та демпфірування, пружних елементів, витоків. Розроблені математичні моделі таких гідроапаратів та гідроприводів, методики імітаційного моделювання, розрахунку та проектування, включаючи і багатокритеріальну оптимізацію параметрів. Виявлені особливості робочих процесів у гідроапаратах та гідроприводах. Уточнено фізичні моделі тертя та гідродинамічної сили. Введено поняття приведенного коефіцієнту осциляції. Запропоновано нові форми дроселюючих щілин. Розроблені методи розрахунку гідроапаратів з осциляцією впроваджено у ряді спеціалізованих підприємств України.

Ключові слова: гідроапарат з осциляцією, гідропривод, технічний рівень, методи розрахунку, математична модель, моделювання, оптимізація, робочий процес.

Андренко П.Н. Развитие научных основ проектирования аппаратов с гидравлической осцилляцией для систем гидроприводов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.02 – машиноведение. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, 2009.

В диссертационной работе приведены результаты теоретического обобщения и решена научная проблема повышения технического уровня гидроприводов за счет развитие научных основ проектирования, разработки и применения принципиального нового класса гидроаппаратов с осцилляцией и гидравлическим управлением, которые обеспечивают высокую точность, поддержания в заданных пределах выходную величину и чувствительность к управляющим сигналам.

Разработана концепция построения гидроаппаратов с осцилляцией, осуществляемой гидравлическим вибрационным контуром и гидроприводов, построенных на их базе. Предложено для создания осцилляции запорно-регулирующих элементов гидроаппаратов использовать пульсации давления рабочей жидкости на выходе из объемного насоса, которые усиливаются в гидравлическом вибрационном контуре, что позволяет на единой энергетической основе создавать гидроаппараты с осцилляцией. Использование таких гидроаппаратов в гидроприводах технологических и мобильных машин позволяет легко организовать местные обратные связи, упростить устройство управления исполнительными механизмами, повысить эффективность их функционирования.

Развиты научные основы проектирования гидроаппаратов с гидравлическим вибрационным контуром. Получены новые аналитические зависимости для определения: осевой гидродинамической силы, действующей на осциллирующий запорно-регулирующий элемент гидроаппарата; коэффициента передачи гидравлического вибрационного контура; сил трения и демпфирования; упругих элементов; утечек, которые положены в основу разработанных методов их расчета. Обосновано их применение в математических моделях гидроаппаратов с осцилляцией. Уточнены физические модели трения и гидродинамической силы.

Разработаны математические модели гидроаппаратов с гидравлическим вибрационным контуром, которые комплексно учитывают параметры осцилляции запорно-регулирующего элемента, форму дроселирующей щели, параметры рабочей жидкости, нестационарность рабочих процессов. Разработан комплекс алгоритмов и программ для расчета гидроаппаратов с осцилляцией и гидроприводов. Предложена методика имитационного моделирования рабочих процессов и выполнено исследования влияния параметров осцилляции и формы дроселирующей щели запорно-регулирующего элемента гидроаппарата на показатели качества переходных процессов в гидроаппарате и гидроприводе. Предложены новые формы дроселирующих щелей. Для гидроприводов, построенных на базе гидроаппаратов с

осцилляцией, установлен диапазон изменения параметров осцилляции запорно-регулирующего элемента обеспечивающий наивысшие показатели точности поддержания давления. Обоснована правомерность использования разработанных математических моделей для исследования динамических характеристик гидроаппаратов с гидравлическим вибрационным контуром и гидроприводов, построенных на их базе. Введенный в работе приведенный коэффициент осцилляции используется для их оценки при проектировании.

Экспериментальным путем исследованы: осевая гидродинамическая сила; сила трения; статические и динамические характеристики разработанных гидроаппаратов с осцилляцией и гидроприводов, построенных на их базе. Установлено влияние частоты осцилляции запорно-регулирующего элемента гидроаппарата на точность поддержания давления в гидроприводе.

Разработаны принципы построения гидроприводов на базе гидроаппаратов с гидравлическим вибрационным контуром. Разработана методика многокритериальной оптимизации параметров гидроаппаратов с гидравлическим вибрационным контуром в составе гидропривода, позволяющая, на стадии проектирования, получать гидроаппараты с заданными выходными характеристиками.

Выполнена сравнительная оценка показателей технического уровня гидроприводов, построенных на базе разработанных гидроаппаратов. Теоретическим и экспериментальным путем доказана эффективность использования разработанных гидроаппаратов с гидравлическим вибрационным контуром для повышения показателей технического уровня гидроприводов. Обоснована экономическая эффективность их использования в гидроприводах. Разработанные методы расчета гидроаппаратов с осцилляцией внедрены на ряде специализированных предприятий Украины.

Ключевые слова: гидроаппарат с осцилляцией, гидропривод, технический уровень, методы расчета, математическая модель, моделирование, оптимизация, рабочий процесс.

Andrenko P.N. Development of scientific bases of planning of vehicles with hydraulic oscillation for the systems of gidroprivodov. - Manuscript.

Doctor of Sciences (Engineering) Dissertation in the Speciality 05.02.02 – Machine Sciences. - National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2009.

The dissertation outlines, scientifically substantiates and solves the problem of providing state-of-the-art hydraulic drives by developing an essentially new class of hydraulic valves with oscillation. The concept of designing hydraulic valves with oscillation and hydraulic drives based thereon was developed. The following was developed: the basics of the theory and design of hydraulic valves, and the methods of calculating the hydrodynamic force, the gain of the hydraulic vibration circuit, the friction and damping forces, the elastic elements, and the leakages. The mathematical models of such hydraulic valves and hydraulic drives, the techniques of simulation modelling, and analysis and design, including multicriteria optimisation of parameters were developed. The features of functional processes in hydraulic valves and hydraulic drives were determined. The physical models of friction and of the hydrodynamic force were refined. The concept of the reduced oscillation factor was introduced. New forms of throttling orifices were suggested. The developed methods of designing hydraulic valves with oscillation have been implemented at several specialized enterprises in Ukraine.

Keywords: hydraulic valve with oscillation, hydraulic drive, state-of-the-art, design methods, mathematical model, modelling, optimization, functional process.

Підп. До друку 02.04.2009 р. Формат 60 × 90 1/16. Папір офісний. Riso-друк.

Гарнітура Таймс. Ум. Друк. арк. 1.8. Наклад 100 прим.

Зам. № 93. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідectво про державну реєстрацію ДК № 116 від 11.07.2000 р.

61002. Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХПІ», 61002, Харків. вул. Фрунзе, 21