НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

# Математичні моделі ударно-контактної взаємодії елементів механічних систем: теоретичні основи та промислове впровадження

2015

Кафедра теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин
Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

## Ткачук Микола Миколайович

докторант кафедри
2011: к.т.н. “Динаміка та міцність машин”, НТУ “ХПІ”
2010: магістр “Обчислювальна механіка”, Університет Штутгарта
2005: магістр “Прикладна математика”, ХНУ ім. В.Н. Каразіна
стажувався в Стенфордському та Штутгартському університетах, лауреат конкурсу “Молодий вчений Харківщини”, стипендіат Президента України, автор 62 публікацій

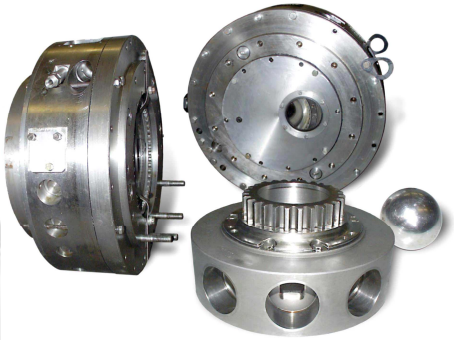
## Грабовський Андрій Володимирович

старший науковий співробітник кафедри
2011: к.т.н. “Динаміка та міцність машин”, НТУ “ХПІ”
2006: магістр “Динаміка та міцність машин”, НТУ “ХПІ”
сертифікований спеціаліст SolidWorks, Pro/Engineer, Autodesk, стажувався в університетах Сент-Етьєна та Магдебурга
лауреат конкурсу “Молодий вчений Харківщини”, автор 52 публікацій

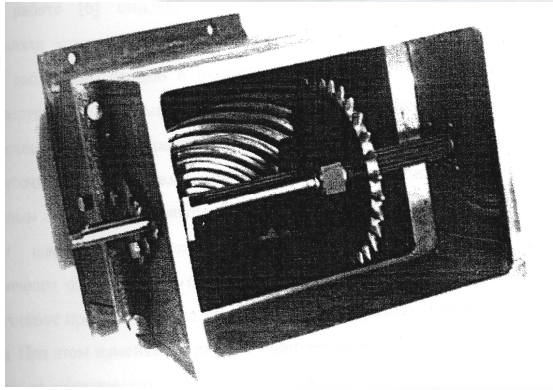
## Скріпченко Наталія Борисівна

аспірантка кафедри
2011: спеціаліст “Інформаційні технології проекування”, НТУ “ХПІ”
сертифікований спеціаліст SolidWorks, стажувалась в Аахенському університеті, автор 23 публікацій

**Мета роботи** полягає у розробці, вдосконаленні та реалізації методів розв’язання зв’язаної задачі аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії і геометричного синтезу складнопрофільних елементів машинобудівних конструкцій з кінематично генерованими поверхнями та динаміки віброударних систем на основі їхнього параметричного опису та інтеграції розрахункових моделей різного рівня задля різкого підвищення технічних і тактико-технічних характеристик машин вітчизняного виробництва.

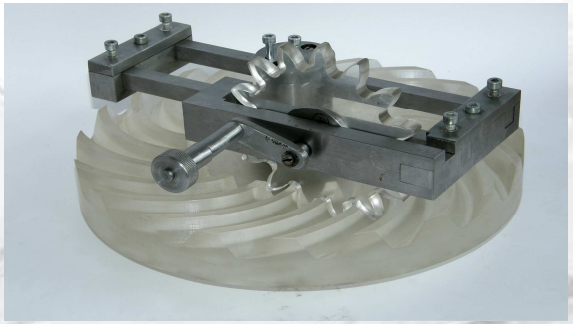


Гідропередачі танкової трансмісії



Варіатор механічний

Віброударна вибивна машина



Двопараметрична зубчаста передача

Шахтовий конвеєр

**Наукова новизна.** Удосконалено метод розв’язання зв’язаної задачі аналізу НДС з урахуванням контактної взаємодії і синтезу спряжених поверхонь тіл; запропоновано і реалізовано інтеграцію розрахункових моделей різного рівня складності в єдиному процесі дослідження контактної взаємодії і синтезу спряжених поверхонь тіл; розроблено новий підхід для визначення сил ударної взаємодії у віброударних дисипативних системах; визначено вплив різних компонент у розкладанні сили ударної взаємодії на її часовий розподіл, максимальні значення та тривалість; установлені особливості форми та якісні зміни топології контактних зон і розподілу контактного тиску у спряженні тіл при зміні їх форми, розмірів та величини навантаження.

**Практична значимість** реалізована в наступному: 1) розроблений і реалізований алгоритм розв’язання практично важливих задач розрахунку міцності при проектуванні елементів конструкцій; 2) на прикладі розв’язання конкретних задач отримані рекомендації з проектування дослідних зразків гідрооб’ємних (ГОП) та двохпараметричних передач, силових ланцюгів, які привели до створення працездатних конструкцій з високими ТХ і ТТХ; 3)створені нові математичні моделі для визначення динамічних характеристик віброударної системи та обчислення внутрішніх зусиль, що дає змогу науково обґрунтовувати параметри з метою вдосконалення віброударних машин; 4)запропонований в роботі підхід володіє достатньою універсальністю і застосовністю для розв’язання задач обґрунтування проектних параметрів широкого класу контактуючих тіл, які здійснюють погоджений рух по поверхнях спряження.

**Актуальність.** При проектуванні нових елементів машин виникають дві зв'язані задачі: I – аналізу напружено-деформованого стану (НДС) складнопрофільних тіл (СПТ) з урахуванням їхньої контактної взаємодії; II – геометричного синтезу їхніх кінематично генерованих поверхонь (КГП). Існуючі методики розв'язання задач I і II не забезпечують *варіативності* при описі форми тіл, мають недосконалі механізми *інтеграції* геометричних і розрахункових моделей і є недостатньо *збалансованими* за точністю та обчислювальними ресурсами на різних етапах досліджень. Суттєве значення дані чинники мають для *важких* вібраційних машин, зокрема, віброударних, тому що при цьому традиційні підходи до моделювання динамічних процесів і НДС не дають адекватних результатів. У зв'язку з цим удосконалення методів аналізу контактної взаємодії і синтезу тіл є *актуальною* науковою і практичною проблемою, яку розв'язано в поданій роботі.

## Промислове впровадження

Результати досліджень упроваджені в ході виконання низки господарських і договорів про співпрацю з підприємствами, а також бюджетних тем в НТУ „ХПІ". Це, зокрема, фундаментальні, прикладні тема та міжнародні гранти.
Економічний ефект від впровадження результатів роботи складає 14,7 млн.грн.

УкрОборонПром
Государственный концерн

RTH
RAILTRANSHOLDING

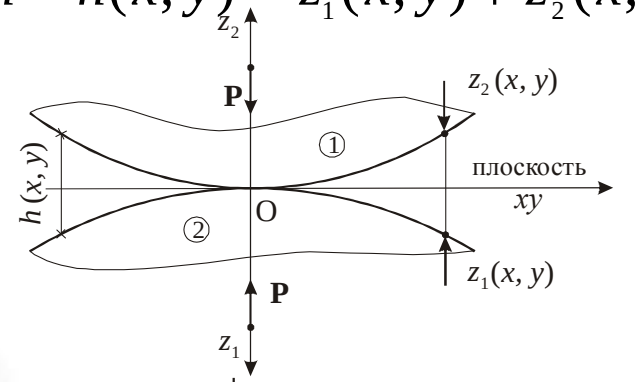
ХКБМ

Азовмаш

# ПРОГРАМНО-МОДЕЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Зазор між тілами

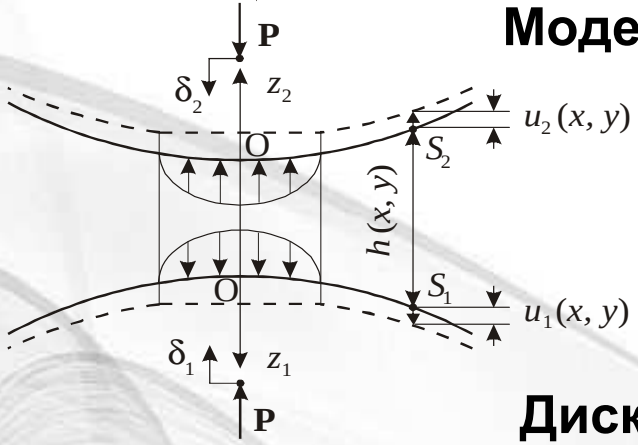
$$h = h(x, y) = z_1(x, y) + z_2(x, y)$$




Умови контакту

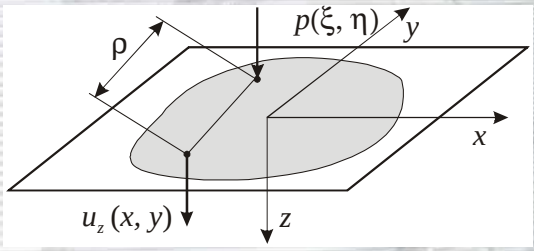
$$\begin{cases} u_{z_1}(x,y) + u_{z2}(x,y) + h(x,y) = \delta_1 + \delta_2, S_1(x,y) \\ \text{та} \quad S_2(x,y) - \text{в контакті;} \\ u_{z_1}(x,y) + u_{z2}(x,y) + h(x,y) > \delta_1 + \delta_2, S_1(x,y) \\ \text{та} \quad S_2(x,y) - \text{поза зоною контакта.} \end{cases}$$

## Модель пружного напівпростору



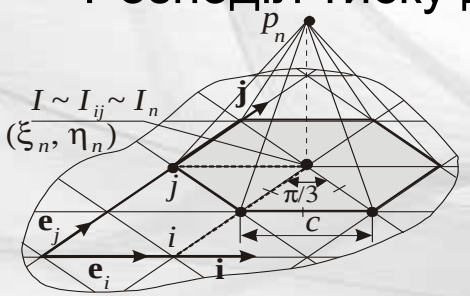

$$u_z(x,y) = \frac{1-\nu^2}{\pi E} \iint_S \frac{p(\xi,\eta)}{\rho} d\xi\, d\eta$$

$$\rho = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$$



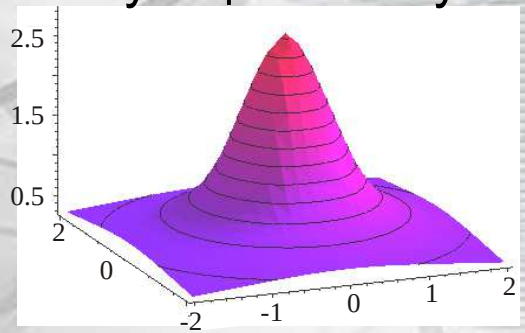

## Дискретизація контактного тиску

Розподіл тиску для одиночного елемента



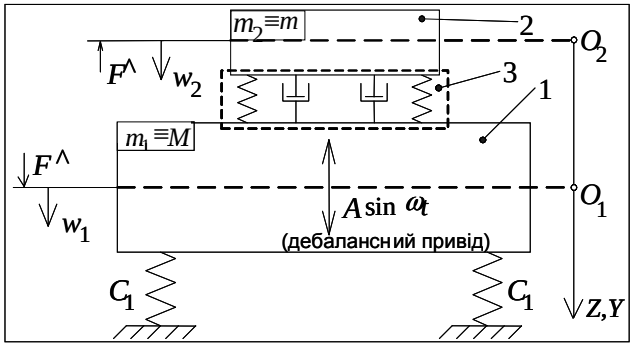

$$p(\xi,\eta) \cong \sum_n \hat{p}(\xi - \xi_n, \eta - \eta_n) \cdot p_n$$

Функція впливу



# УДАРНА ВЗАЄМОДІЯ У ВІБРОУДАРНИХ СИСТЕМАХ

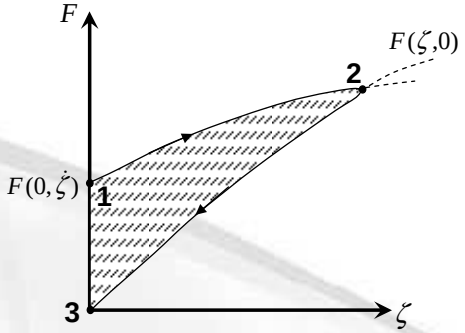
Віброударна система

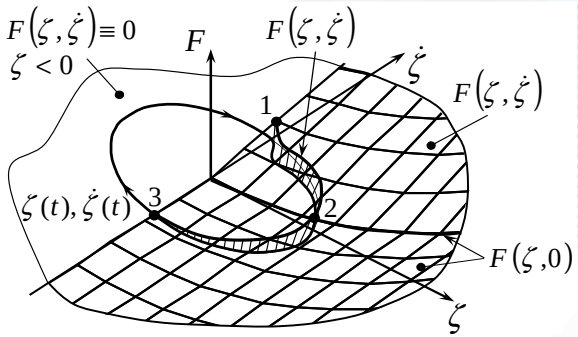


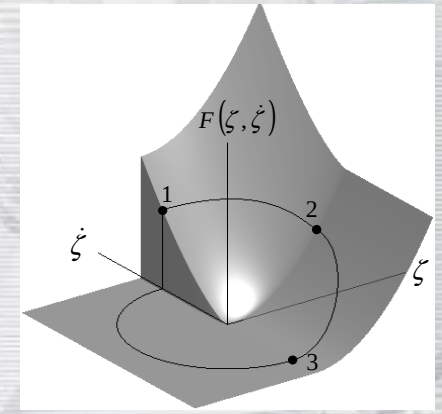

$$\begin{cases} -m_1\ddot{w}_1 + m_1 g + F_N^{\wedge}(\varsigma,\dot{\varsigma},t) - C_1 w_1 - A\omega^2 \sin\omega t = 0, \\ m_2\ddot{w}_2 - m_2 g + F_N^{\wedge}(\varsigma,\dot{\varsigma},t) = 0, \end{cases}$$

$$F(\varsigma,\dot{\varsigma}) = F(0,0) + \frac{\partial F}{\partial \varsigma}\varsigma + \frac{\partial F}{\partial \dot{\varsigma}}\dot{\varsigma} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 F}{\partial \varsigma^2}\varsigma^2 + \frac{\partial^2 F}{\partial \varsigma \dot{\varsigma}}\varsigma\dot{\varsigma} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 F}{\partial \dot{\varsigma}^2}\dot{\varsigma}^2 + \ldots =$$

$$= \alpha_{00} + \alpha_{10}\varsigma + \alpha_{01}\dot{\varsigma} + \alpha_{20}\varsigma^2 + \ldots .$$

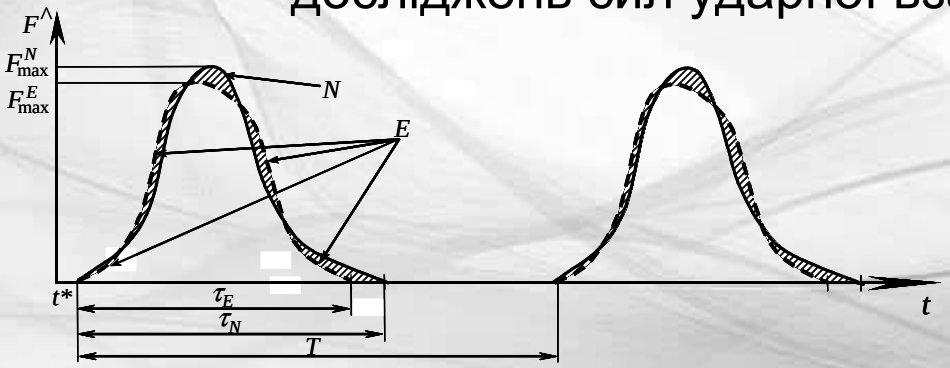



**Вигляд сили ударної взаємодії у фазовому просторі**

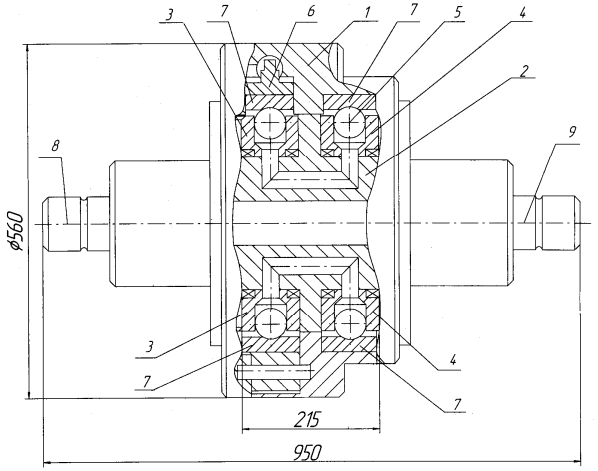
Зіставлення розподілів результатів чисельних (N) і експериментальних (E) досліджень сил ударної взаємодії у віброударній системі

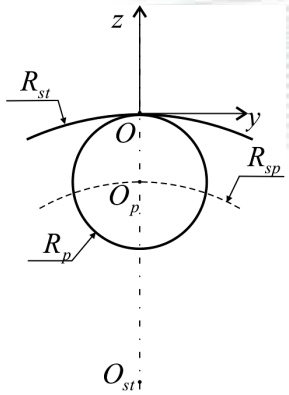


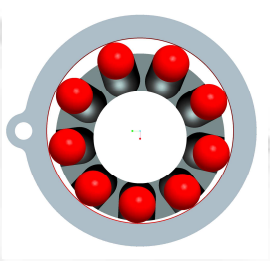

$$I_1 = \frac{\max\left|F_N^{\wedge} - F_E^{\wedge}\right|}{\max\left|F_E^{\wedge}\right|} \qquad I_2 = \frac{\int\left|F_N^{\wedge} - F_E^{\wedge}\right|dt}{\int\left|F_E^{\wedge}\right|dt}$$

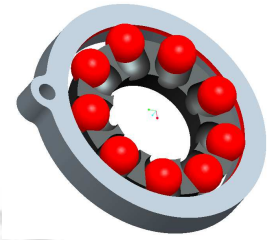
# ПРИКЛАДНІ ЗАДАЧІ
## Гідрооб'ємна передача ГОП-900

### Схема гідрооб'ємної передачі



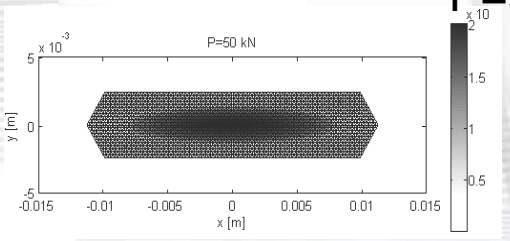


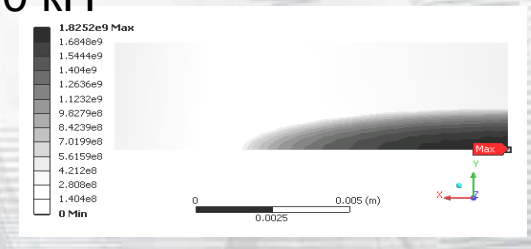
### Порівняльний аналіз моделей

МГЕ

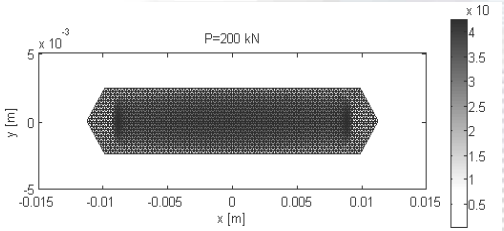
P=50 кН

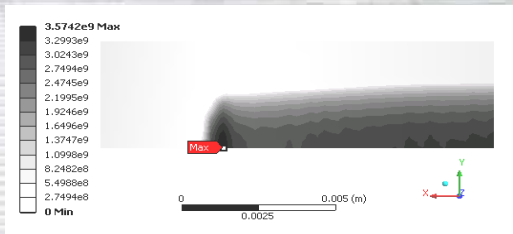
МСЕ



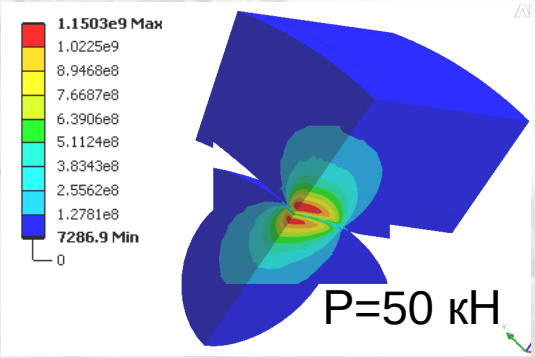



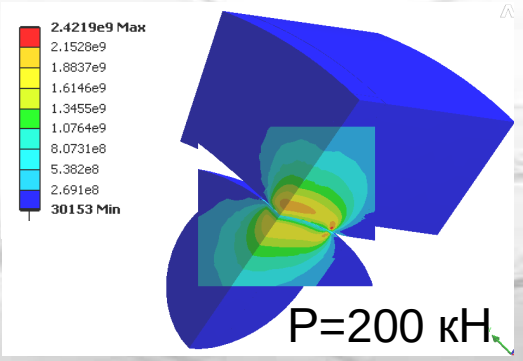

P=200 кН

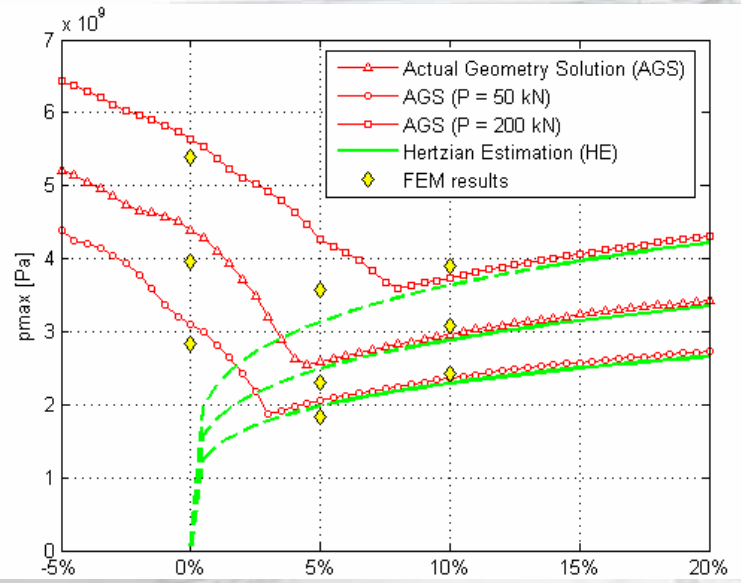



### Еквівалентні напруження



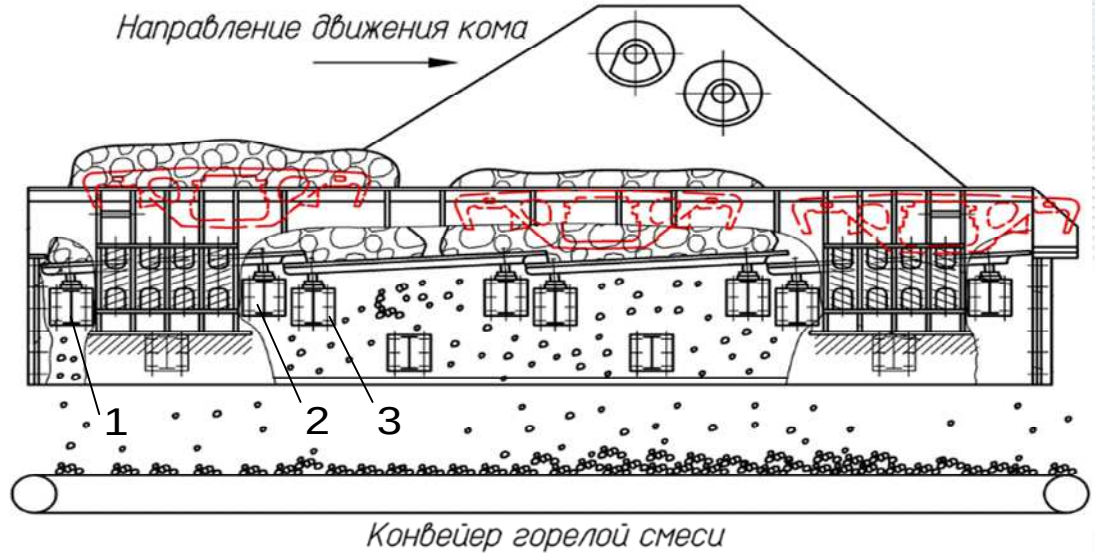



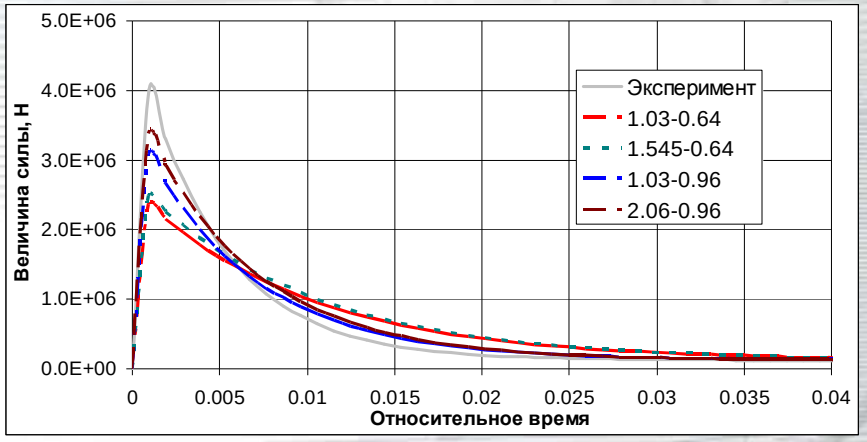
# ПРИКЛАДНІ ЗАДАЧІ

## Унікальна віброударна машина для вибивки крупного вагонного литва

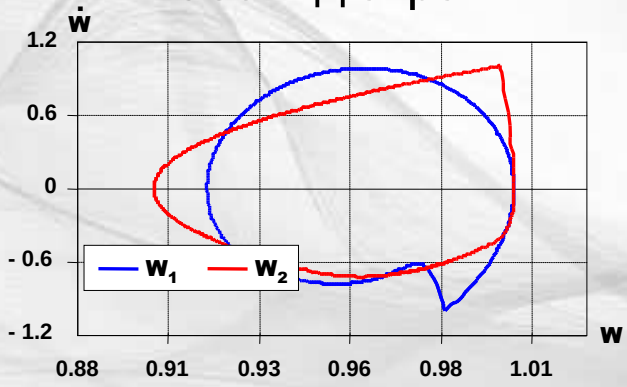
Загальна схема досліджуваної вибивної машини



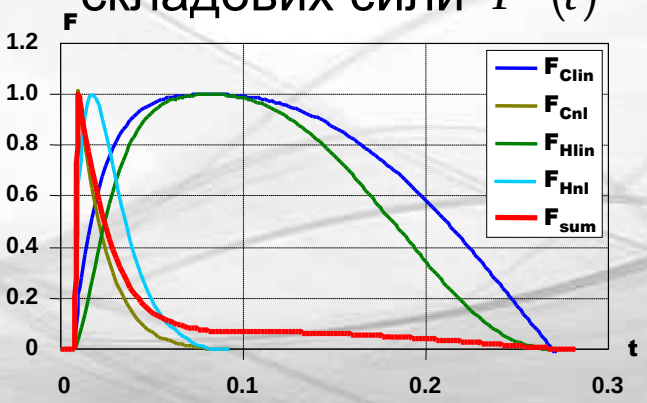

Графіки часових розподілів $I_2$ для різних наборів параметрів



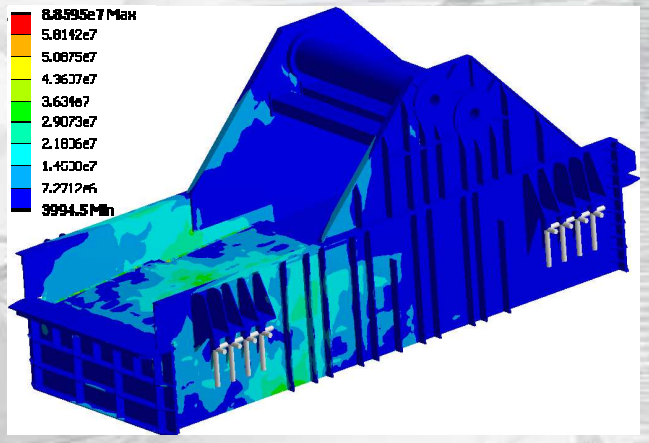

Фазові діаграми




Характер розподілу складових сили $F^{\wedge}(t)$

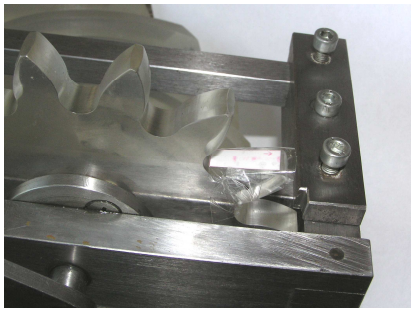


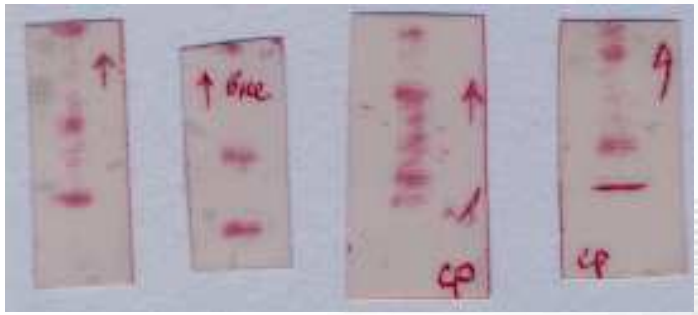

Еквівалентні напруження

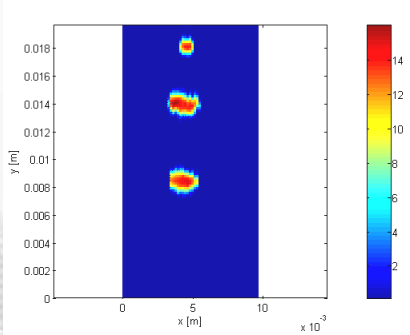


# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

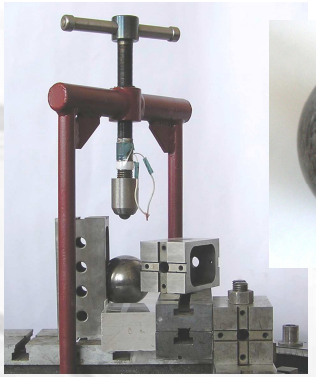
## Контактні відбитки в сполученні двопараметричної передачі

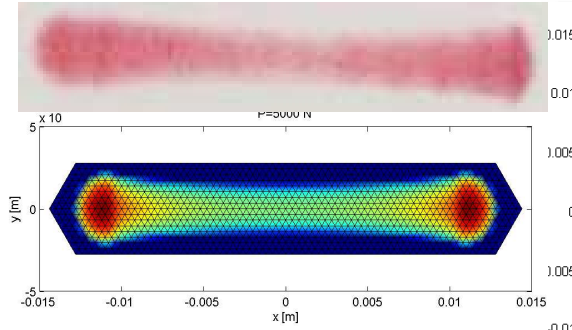


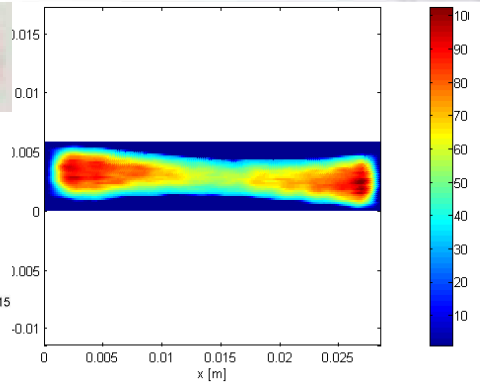


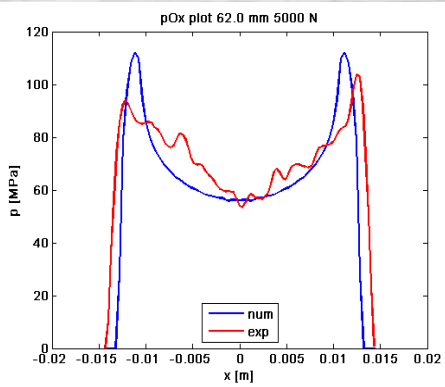



## Визначення контактного тиску ГОП з використанням чутливих плівок Fujifilm

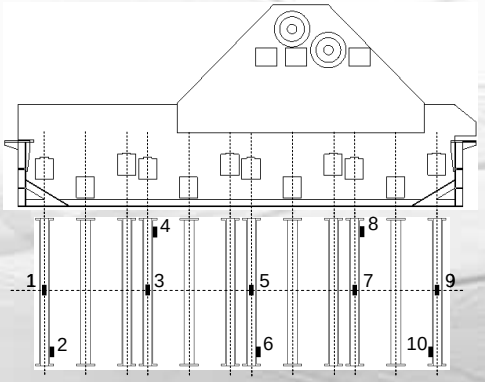


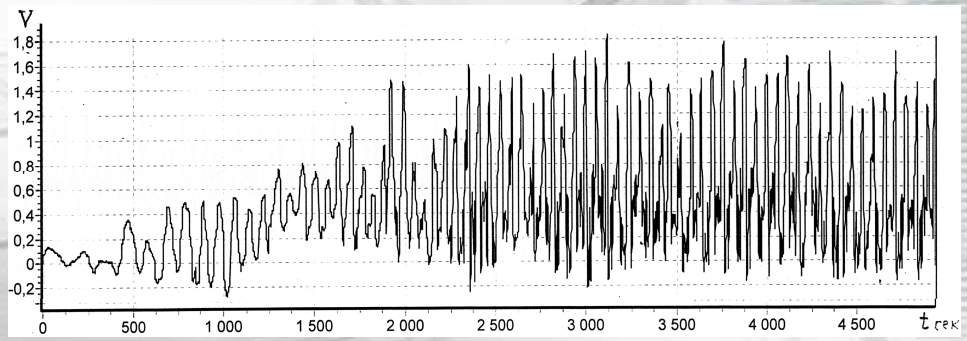



## Дослідження НДС вибивної машини за допомогою тензодатчиків



# ВИСНОВКИ

У роботі поставлена та розв’язана актуальна і важлива науково-практична проблема розробки методів аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл та геометричного синтезу форми їх поверхонь. Отримані наступні принципово нові наукові результати.

- Запропоновано перспективний підхід до розв’язання зв’язаної задачі дослідження НДС з урахуванням контактної взаємодії складнопрофільних тіл і синтезу КГП, що базується на єдиному описі математичної, геометричної і числової моделей. Обгрунтовано використання не одного, а комплексу методів і моделей різного рівня складності. Досліджено контакт тіл, форма яких може бути заздалегідь не визначена, як у традиційному випадку, а встановлюється у ході розв’язання спеціальної задачі їх геометричного синтезу у вигляді хмари зв’язаних точок.
- Вперше розроблено теоретичні основи визначення зусиль у віброударних динамічних системах на основі розрахунково-експериментальної ідентифікації.
- Експериментальні дослідження НДС і контактної взаємодії СПТ проводилися на спеціально розроблених стендах і дослідних зразках зубчастих передач, ланцюгових приводів, вібромашин, гідропередач танкових трансмісій. Відмінність від числових результатів не перевищує 11-16 %. Отримано повне підтвердження адекватності математичних моделей, обґрунтованості вибору методів числових досліджень, відповідності створених моделей, а також достовірність і точність одержаних результатів.

Усі результати впроваджено у виробництво із ефектом 14,7 млн.грн.