

Аналізуючи результати досліджень, можемо зробити наступні висновки:

- запропоноване з'єднання валів відноситься до різьбового з'єднання і може бути використано для з'єднання окремих валів вузлів та механізмів машин між собою, зокрема для з'єднання вала електродвигуна з валом редуктора;
- різьбове з'єднання дозволяє значно зменшити інерційність механічної системи, де воно використовується і, таким чином, зменшити динамічні навантаження, що зумовлює підвищення надійності та довговічності роботи з'єднання;
- запропоноване з'єднання валів працездатне лише при умові нереверсивного їх обертання, що має місце в переважній більшості механізмів і машин;
- навантажувальна здатність запропоновано з'єднання може бути значно підвищена шляхом використання фрикційних шайб, встановлених між торцями валів;
- методика вибору параметрів різьбового з'єднання валів може бути використана при розробці нових перспективних видів з'єднань валів.

### Література

1. Поляков В. С. Справочник по муфтам / Поляков В. С., Барабаш И. Д., Ряховский О. А. – [2-е изд.]. – Л.: Машиностроение, 1979. – 351 с.
2. Піпа Б. Ф. Деталі машин / Піпа Б. Ф., Хомяк О. М., Марченко А. І. – К.: КНУТД, 2011. – 358 с.
3. Гузенков П. Г. Детали машин / Гузенков П. Г. – М.: Высшая школа, 1982. – 351 с.
4. Піпа Б. Ф. Динаміка круглов'язальних машин / Піпа Б. Ф., Хомяк О. М., Павленко Г. І. – К.: КНУТД, 2005. – 294 с.
5. Пат. 27215 на корисну модель. Україна. F 16 B 21/00. З'єднання валів / Б. Ф. Піпа, І. В. Поладич (Україна). – Опубл. 25.10.2007, 2 с.
6. Райко М. В. Расчет деталей и узлов машин / Райко М. В. – К.: Техніка, 1966. – 500 с.

Надійшла 3.3.2011 р.

УДК 678.08

Ю.Б. МИХАЙЛОВСЬКИЙ, В.В. ЗАЯЦЬ  
Хмельницький національний університет

## ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ IMPACT ДЛЯ НЕЛІНІЙНОГО ДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У РОТОРНИХ ДИСКОВИХ ПОДРІБНЮВАЧАХ

*Розглянуто особливості систем що використовують метод кінцевих елементів для вирішення інженерних та наукових задач. Наведено опис принципу роботи та можливості програмного продукту Impact, що використовується для нелінійного динамічного аналізу методом кінцевих елементів процесу подрібнення полімерних матеріалів у роторному дисковому подрібнювачі.*

*The features of the systems that use the method of eventual elements for the decision of engineering and scientific tasks have been considered in the article. Description of work principle and possibilities of Impact (software product) that is used for a nonlinear dynamic analysis by the method of eventual elements of growing process of polymeric materials in the rotor-disk grinder has been introduced in the article.*

Ключові слова: метод кінцевих елементів, динамічний аналіз, подрібнювач, полімерні матеріали, Impact.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями

Будь-яка інженерна розробка повинна задовольняти визначені критерії. Відповідність цим критеріям можлива тільки за комплексної оцінки впливу геометричних параметрів, властивостей використовуваних матеріалів і умов роботи виробу. Проведення такого аналізу з урахуванням всезростаючої складності інженерних розрахунків можливе лише із застосуванням найефективніших сучасних комп'ютерних технологій. Задачі з невеликою кількістю факторів доцільно розв'язувати аналітичним способом. Але що робити зі складними задачами, в яких кількість невідомих дуже велика? Для розв'язання таких задач використовуються чисельні методи, в основу яких покладена заміна розрахункової моделі з безперервним розподілом параметрів і нескінченним числом ступенів свободи дискретною моделлю, що має кінцеве число невідомих. Серед чисельних методів найбільш розповсюдженим є метод кінцевих елементів (МКЕ). Цей метод найзручніший для реалізації на ЕОМ.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми

**Impact** – програмний комплекс для нелінійного динамічного аналізу методом кінцевих елементів. Використовується для виконання інженерного аналізу і допомагає вирішувати багато проблем в області проектування міцних і легких конструкцій, модифікації виробів, що вже випускаються, скоротивши витрати

на виготовлення й випробування дослідних зразків.

Програма розроблена з використанням мови Java і може бути використана в різних операційних системах (Windows, Linux, Solaris, Unix та ін.).

Програмний комплекс **Impact** відноситься до класу програм для виконання нелінійного динамічного аналізу [1– 5], який завжди можна звести до статички (окремий випадок динаміки). Також зручність роботи полягає в тому, що будь-яку кінцево-елементну модель у **Impact** можна вирішити в динамічній постановці, задавши тільки закон зміни діючих навантажень, граничних умов. Комплекс дозволяє знаходити рішення для моделей із пружних і непружних тіл з лінійними і нелінійними характеристиками. Присвоєння властивостей пружних і непружних тіл виконується дуже просто. Процес моделювання теж досить простий і складається з опису геометричної форми з вказуванням властивостей матеріалів і присвоєння закону зміни діючих навантажень, граничних умов. Після розрахунку користувач одержує зміни в часі прискорення, швидкості, переміщень, деформацій, напружень у будь-якій точці створеної моделі. Це дозволяє інженеру проводити аналіз елементів і механізмів досить швидко і точно. Також отримані дані можуть використовуватися і для інших розрахунків, як наприклад, розрахунок втомлюваної міцності, оцінки довговічності конструкції в цілому і в окремих її вузлах і т.д.

Програмний комплекс Impact дозволяє розв'язувати наступні задачі:

- контактні просторові задачі;
- задачі руйнування;
- задачі формування;
- частотний аналіз;
- задачі з великими переміщеннями;
- розрахунок динамічних моделей з пружних, непружних і твердих тіл.

#### Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою нашого дослідження була розробка загальної моделі взаємодії робочих органів (дисків) з матеріалом і перевірка їх для конкретних умов та обладнання. А також визначення основних факторів, що впливають на отримання потрібного нам результату, а саме, одержання потрібної дисперсності подрібнених полімерних матеріалів для подальшої переробки.

#### Виклад основного матеріалу досліджень

Програмний комплекс заснований на основному рівнянні динаміки, в ньому реалізовано наступний алгоритм.

1. Установка початкового стану задачі.
2. Формування матриці мас.
3. Розрахунок внутрішніх зусиль.
4. Корекція значень переміщень за залежністю:

$$\frac{1}{\Delta t^2} \{M\} \{D\}_{n+1} = \{F\}_n^{ext} - \{K\} \{D\}_n + \frac{1}{\Delta t^2} \{M\} \left[ \{D\}_n + \Delta t \dot{D}_{n-\frac{1}{2}} \right], \quad (1)$$

де  $\Delta t$  – величина кроку в часі;

$\{M\}$  – матриця мас;

$\{D\}$  – матриця переміщень;

$\{F\}$  – матриця зовнішніх сил;

$\{K\}$  – матриця жорсткості;

$n$  – номер кроку.

5. Корекція швидкостей відповідно за залежністю:

$$\Delta t \left\{ \dot{D} \right\}_{n+\frac{1}{2}} = \{D\}_{n+1} - \{D\}_n. \quad (2)$$

6. Виконання граничних умов.

7. Зберігання результатів розрахунку потокового кроку.

8. Зміна кроку розрахунку, у разі незавершення розрахунку поставленої задачі – повернення до третього етапу.

**Impact** побудований на модульному принципі і може працювати як цілком в автономному режимі, так й інтегруватися з іншими системами (рис. 1). Для цього він розділений на модулі:

- Pre Processor – використовується для створення геометричної моделі і підготовки вхідного файлу для розрахунку;
- Processor – використовується для коректування і розрахунку моделі;
- Post Processor – використовується для візуалізації результатів розрахунку;
- Graph – використовується для відображення числових даних і графічних залежностей;
- Help – містить опис документації.

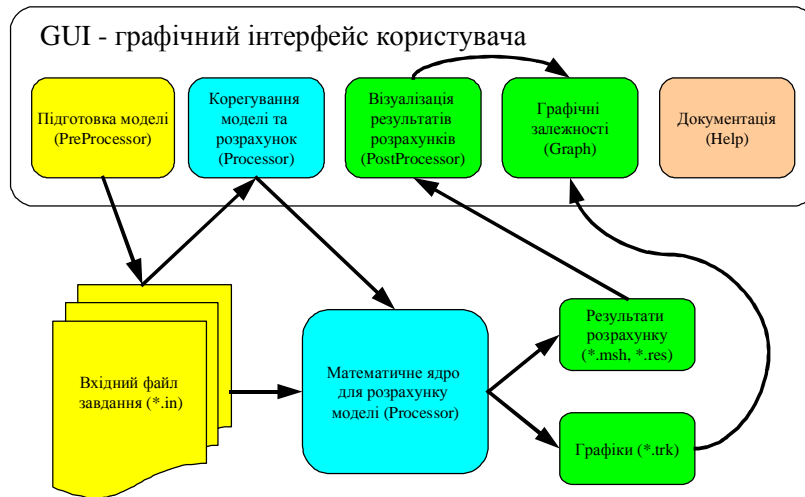



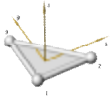
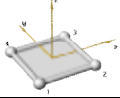

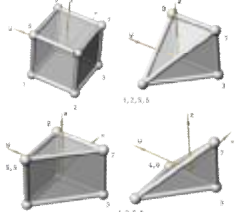
Рис. 1. Структура програмного комплексу Impact

У Impact закладено декілька законів опису властивостей матеріалів. Найпростіший – це пружний закон (**Elastic**). Також є закон, що описує властивості пружно-пластичного матеріалу (**Elastoplastic**). Даний закон дозволяє описати практично будь-який вид матеріалу. Такий опис може відбуватися вказуванням основних параметрів матеріалу або властивості матеріалу можна задавати у вигляді табличних залежностей параметрів. Третій тип матеріалу – пружина (**Spring**). Даний матеріал визначає жорсткість і демфування пружинного елемента і не може бути використаний з іншими типами елементів. Жорсткість і демфування можуть визначатися як функції або константи для всіх напрямків.

На даний момент у програмному комплексі реалізовані основні типи елементів, які дозволяють розв’язувати як двовимірні, так і просторові задачі (табл. 1). Програмний комплекс розроблено з можливістю поповнення бібліотеки новими елементами та матеріалами.

Таблиця 1

**Базові типи елементів**

Елемент	Опис елемента
	<b>Beam_2</b> – Елемент, що передає момент обертвi відносно точок защемлення. <b>Contact_Line</b> – Контактний елемент. <b>Rod_2</b> – Лінійний елемент-стрижень. <b>Beam_Spring_2</b> – Елемент “пружина” із шістьма ступенями свободи.
	<b>Contact_Triangle</b> – Трикутний контактний елемент. <b>Shell_C0_3</b> – Тривузловий плоский елемент, визначений у класичній теорії Belytchko.
	<b>Shell_BT_4</b> – Чотирикутний плоский елемент, описаний Belichko-Tsai.
	<b>Solid_Iso_4</b> – Ізопараметричний об’ємний елемент заснований на Solid_Iso_6 елементі.
	<b>Solid_Iso_6</b> – Ізопараметричний об’ємний елемент.

**Модель задачі формується в текстовому форматі, використовуючи спеціальну структуру даних.**

Вхідні дані для розрахунку записуються в текстовому форматі файлу (\*.in) і для їхнього створення може бути використаний PreProcessor, Processor чи будь-який текстовий редактор.

Структура даних складається з блоків, що можуть бути розташовані в будь-якій послідовності і можуть бути присутніми або відсутніми. Єдиним виключенням є блок Controls, який обов’язково повинен бути. Ключові слова і параметри можуть бути записані як прописними так і малими літерами (тобто регістр не враховується і це не призводить до помилки). Кожен блок має свої ключові слова і повинен починатися з

нового рядка і ключового слова, що визначає назву блоку. Далі представлений опис блоків і команд:

```
# Блок керування, в якому описуються команди контролюючі процес рішення
# і запису результатів. Використовується тільки один блок контролю.
CONTROLS
run from 0.0 to 1.0 step 0.00001
print every 0.01 step

# Блок визначає закон опису матеріалу. У цьому блоці описуються однотипні
# матеріали. При описанні може використовуватися кілька блоків матеріалів.
MATERIALS OF TYPE Elastic
Steel E = 200 NU = 0.3 RHO = 0.0000078
.....

# Блок визначає граничні умови. Реакції зв'язку дозволяють керувати
# переміщенням вузлів у різних напрямках за допомогою прискорень і
# швидкостей вузла. Для визначення цього необхідно вказати тільки ті
# компоненти прискорень і швидкостей, що діють на вузол.
# При цьому інші вказувати не потрібно. Якщо одна зі складових не
# зазначена, то вузол у цьому напрямку вільний. При описі може
# використовуватися кілька блоків граничних умов.
CONSTRAINTS OF TYPE Boundary_Condition
Fixed_All VX = 0 VY = 0 VZ = 0 VRX = 0 VRY = 0 VRZ = 0 AX = 0 AY = 0 AZ = 0 ARX = 0
ARY = 0 ARZ = 0
.....

# Блок опису зусиль, тиску і крутних моментів. Кожне зусилля описується з
# нового рядка і одним рядком. Значення обумовлені в цьому блоці, можуть
# застосовуватися до вузлів та деяких елементів. При описанні може
# використовуватися кілька блоків опису зусиль.
LOADS
Forcel FX = 0.05 FY = 0.05 AX = [0,0,1,1.5,5,off, 6,3,100,3] P = 3.0
.....

# Блок опису вузлів. Кожен рядок повинен визначати вузол (по одному вузлі
# в рядку). Impact розроблений для тривимірних просторових задач. Це
# означає, що для кожного вузла завжди повинні бути визначені три
# просторові координати. Якщо потрібно вирішити двовимірну задачу, кожен
# вузол повинен бути обмежений в русі у напрямку третьої координати.
NODES
1      X = 0.00      Y = 0.00      Z = 0.0      Constraint = FIXED
2      X = 0.00      Y = 50.0     Z = 0.0     Load = Forcel
3      X = 100.0     Y = 0.00      Z = 0.0
.....

# Блок визначає тип кінцевих елементів. Тільки один тип елементів може
# визначатися в цьому блоці. Якщо в моделі використовуються різні типи
# кінцевих елементів, то вони обов'язково описуються в різних блоках.
ELEMENTS OF TYPE Rod_2
1      nodes = [1,2]      D = 10.0      Material = Steel
.....
ELEMENTS OF TYPE Shell_C0_3
323 nodes = [3,6,5] T = 10 material = Steel
.....
ELEMENTS OF TYPE Shell_BT_4
493 nodes = [3,6,5,4] nip = 5 t = 10      Material = Steel
.....
```

Розв'язання проблеми передбачає визначену послідовність дій. Але ця послідовність є лише загальною і може змінюватися відповідно до процесу підготовки моделі. Типова послідовність вирішення проблеми приводиться до наступної послідовності кроків.

Для реалізації нашої мети спочатку опишемо процес подрібнення полімерних відходів в нашому роторному дисковому подрібнювачі. Матеріал подається в зону робочої камери. Тут під впливом профільних дисків, які виконують функцію ножа, та нерухомих пластин, які виконують функцію контр-ножа, матеріал руйнується за рахунок зсувних деформацій. Процес подрібнення відбувається до того часу поки не отримаємо потрібну дисперсність, яка регулюється розміром отворів на ситі. Отже, виходячи з конструктивних обмежень, створюємо загальну модель, яка враховує:

- окружну швидкість руху дисків;
- геометрію елементів як дисків, так і шматків матеріалу;
- властивості матеріалів як дисків, так і подрібнюваного матеріалу;
- сили тертя дисків при обертанні;
- сили тертя при взаємодії дисків з матеріалом;
- матеріал, що може знаходитись як у вільному стані, так і взаємодіяти з іншими шматками.

Після опису загальної моделі реалізуємо її в програмному комплексі Impact.

Отже, на першому етапі – підготовка моделі. Для створення геометричної моделі і підготовки вхідного файлу для розрахунку використовується Pre Processor. Спочатку, як було сказано вище, створюємо геометричний об'єкт. Далі йде розбивка на сітку. Наступним кроком є задавання початкових і граничних умов, властивостей матеріалу та параметрів розрахунку. Все це зберігаємо у файлі та проводимо розрахунок.

На другому етапі коректуємо і розраховуємо модель за допомогою Processor. Після того, як модель створена, вона зберігається у файлі моделі, який можна розрахувати за допомогою Processor.

На третьому етапі, для візуалізації результатів розрахунку використовується Post Processor; за допомогою цього модуля створену модель можна покроково спостерігати в процесі розрахунку і, залежно від результатів, змінювати параметри моделі, а також слідкувати за розподілом навантажень, зміною деформацій і напружень. В результаті розрахунку за заданими параметрами кроку дані зберігаються на твердому диску у вигляді результатів розрахунку. Результати розрахунків представлені нижче.

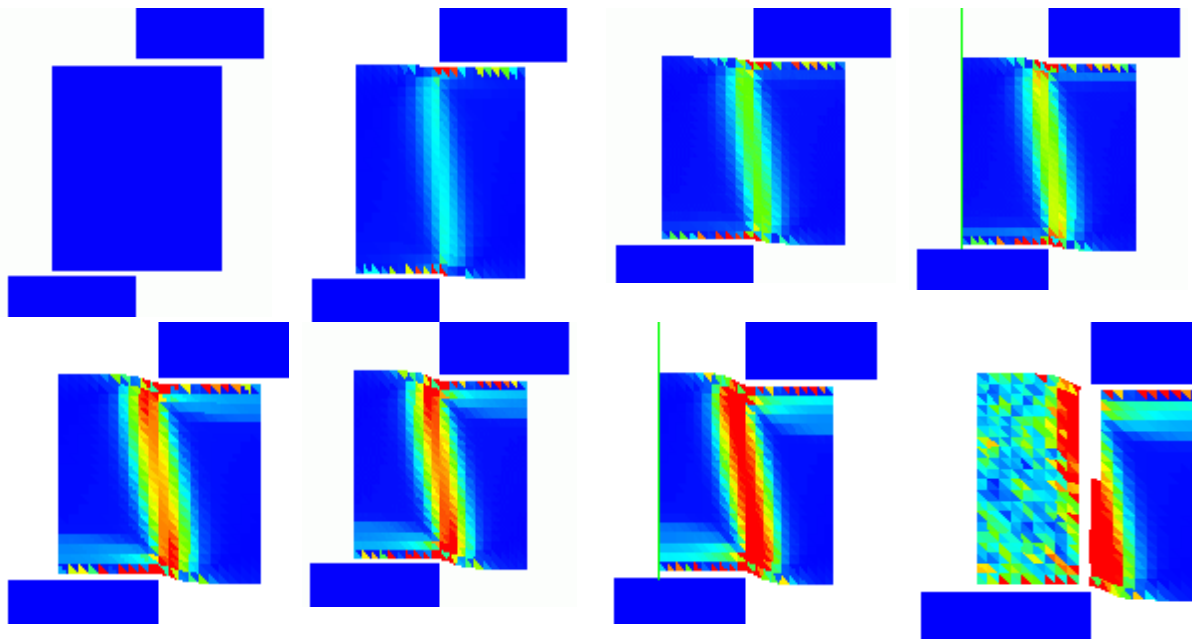


Рис. 2. Результати моделювання в програмному комплексі Impact

### Висновки і перспективи подальшого розвитку даного напрямку

Розроблено модель та методику моделювання, яка дозволяє визначити питому роботу подрібнення залежно від конструктивних та технологічних параметрів. При цьому враховуються матеріал диска та його параметри, а також враховуються властивості матеріалу, що переробляється, та ступінь його дисперсності.

При проектуванні, за допомогою представлені моделі, можна буде визначити всі існуючі параметри і фактори взаємодії інструменту з матеріалом. В подальшому представлена модель може бути використана для загального проектування дискових роторних подрібнювачів.

### Література

1. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures – Ted Belytschko, Wing Kam Liu, Brian Moran., 1989.
2. Explicit Algorithms For The Nonlinear Dynamics Of Shells – Ted Belytschko, Jerry I. Lin, Chen-Shyh Tsay., 1984.
3. Скиба М. Є., Михайловський Ю. Б., Головка Г. С. Моделювання процесу подрібнення композиційних матеріалів з використанням методу скінчених елементів / М. Є. Скиба, Ю. Б. Михайловський, Г. С. Головка // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – № 6. – С. 7– 10.
4. Concepts And Applications Of Finite Element Analysis, Third edition – Robert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha, ISBN 0-471-84788-7
5. The Finite Element Method – Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis – Thomas J. R. Hughes, ISBN 0-484-41181-8
6. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures – Ted Belytschko, Wing Kam Liu, Brian Moran. ISBN 0-471-98773-5
7. Explicit Algorithms For The Nonlinear Dynamics Of Shells – Ted Belytschko, Jerry I. Lin, Chen-Shyh Tsay, Computer methods in applied mechanics and engineering 42 (1984), page 225– 251
8. An Explicit Formulation For An Efficient Triangular Plate-Bending Element – Jean-Louis Batoz, International journal for numerical methods in engineering, Vol. 18, page 1077-1089 (1982)

Надійшла 21.3.2011 р.