



Лавінський Д. В.

Морачковський О. К.

Національний технічний
університет
"Харківський
політехнічний
інститут"

Lavinskii D. V.

Morachkovskii O. K.

National Technical
University "Kharkiv
Polytechnic Institute"

УДК 539.3

НЕСТАЦІОНАРНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

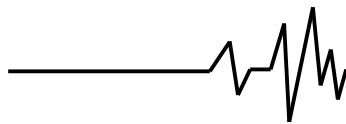
У статті розглядаються проблеми створення ефективного методу аналізу нестационарного деформування елементів конструкцій під дією електромагнітного поля. Розглянуто загальну математичну постановку зв'язаної задачі деформування електропровідних тіл при наявності електромагнітного поля. Зв'язок між процесами деформування здійснюється завдяки електромагнітним силам. Для побудови методу чисельного розв'язку вихідна задача зведена до пошуку мінімуму повної енергії системи. В якості чисельного методу розв'язання використовується метод скінчених елементів. Запропонований метод застосований для аналізу нестационарного деформування системи „індуктор–заготовка” технологічної операції магнітно-імпульсної обробки металів. Представлені деякі результати, які дозволяють робити певні рекомендації щодо проектування та застосування технологічних операцій подібного класу.

Ключові слова: нестационарне деформування, електромагнітне поле, векторний магнітний потенціал, електромагнітні сили, метод скінчений елементів.

Вступ. Велика кількість технічних об'єктів функціонують за наявності змінного у часі електромагнітного поля (ЕМП). При цьому у елементах конструкцій, які виконані із електропровідних матеріалах, виникають значні за величиною електромагнітні сили, які призводять як до руху відповідних елементів конструкцій так і до їх деформування. Проблеми врахування нестационарних процесів при дії ЕМП виникає при проектуванні та експлуатації багатьох об'єктів сучасної техніки: генераторів, резонансних віброекспериментальних систем, технологічних систем для магнітно-імпульсної обробки металів (МІОМ) тощо. У останньому випадку під впливом ЕМП знаходяться як конструктивні елементи, що генерують ЕМП (так звані індуктори), так і заготовки, що обробляються. Урахування динамічних процесів при МІОМ особливо є важливим в тому випадку, коли заготовка є тонкостінною, бо у цьому випадку при імпульсному навантаженні її незворотна формозміна буде обов'язково супроводжуватись коливальними процесами за

рахунок пружних властивостей [1]. Відзначимо, що у переважній більшості досліджень, присвячених аналізу технологічних операцій МІОМ, окремо розглядається задача визначення векторних компонент ЕМП та окремо – задача аналізу НДС. Сучасний погляд на цю проблему, з нашої думки, повинен полягати у спільному аналізі процесів розповсюдження ЕМП та процесів деформування у рамках єдиної розрахункової схеми, подібно до того, як це зроблено у роботі [2]. Таким чином, створення ефективних методів аналізу нестационарного пружно-пластичного деформування елементів конструкцій складної геометрії при дії ЕМП є актуальною науково-практичною проблемою.

Математична постановка задачі. Розглянемо загальну постановку задачі нестационарного деформування електропровідних тіл при наявності ЕМП. Електромагнітні процеси МІОМ при відсутності вільних зарядів описуються наступною системою фундаментальних рівнянь Максвелла:



$$\text{rot } \vec{H} = \epsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}, \text{rot } \vec{E} = -\mu_c \frac{\partial \vec{H}}{\partial t},$$

$$\text{div} \vec{H} = 0, \text{div} \vec{E} = 0, \quad (1)$$

де \vec{j} , \vec{E} , \vec{H} – густина струму, напруженості електричного й магнітного полів у підобласті, μ_c, ϵ_c – магнітна й електрична проникність. Зневажаючи конвекційними струмами, рівняння (1) можна доповнити матеріальними співвідношеннями:

$$\vec{D} = \epsilon_c \vec{E}, \vec{B} = \mu_c \vec{H},$$

$$\vec{j} = \gamma_c \vec{E} + \gamma_c \left[\dot{\vec{u}} \times \vec{B} \right], \quad (2)$$

де \vec{D} , \vec{B} – вектори індукції електричного й магнітного полів у підобласті, γ_c – питома електрична провідність матеріалу.

Повна система рівнянь щодо компонентів тензорів напружень, деформацій і вектора переміщень, при заданих об'ємних і поверхневих силах, запишеться в наступному виді:

Рівняння руху:

$$\sigma_{ij,j} + F_{pi} = \rho \ddot{u}_i, \quad (3)$$

де σ_{ij} – компоненти тензора напружень, F_{pi} – компоненти вектора об'ємних сил, які можуть бути в тому числі є електромагнітними, ρ – густина матеріалу, u_i – компоненти вектора переміщень.

Геометричні співвідношення Коші для малих деформацій:

$$\epsilon_{ij} = 1/2 (u_{j,i} + u_{i,j}), \quad (4)$$

де ϵ_{ij} – компоненти тензора деформацій. Рівняння (1) – доповнюються граничними умовами:

$$\vec{E}_\Gamma \times \vec{n} = 0, \vec{D}_\Gamma \cdot \vec{n} = 0, \vec{H}_\Gamma \times \vec{n} = 0, \vec{B}_\Gamma \cdot \vec{n} = 0; \quad (5)$$

$$\vec{\sigma}_n = \vec{p}_n + \frac{\Xi}{2} \vec{E}_\Gamma + \frac{\mu_c}{2} (\Xi \dot{\vec{u}}_\tau + \vec{i}) \times \vec{H}_\Gamma, \quad (6)$$

де $\vec{\sigma}_n = \sigma \cdot \vec{n}$ – вектор механічних напружень на границі із нормаллю \vec{n} , Ξ, \vec{i} – густини поверхневих зарядів та струмів, $\dot{\vec{u}}_\tau$ – проекція вектора швидкості точки на площину, дотичну до границі тіла.

Узагальнені рівняння стану, що встановлюють зв'язок між напруженнями й

деформаціями в точках тіл, які деформуються пружно, можуть бути представлені тензорно-лінійними співвідношеннями виду:

$$\epsilon_{ij} = A_{ijkl} \sigma_{kl} + \alpha_{ij} \Delta T, \quad (7)$$

де $\epsilon_{ij}, \sigma_{kl}$ – компоненти тензорів деформацій і напружень, A_{ijkl} – компоненти тензора, прийнятого для опису властивостей матеріалу, α_{ij} – компоненти тензора властивостей температурного розширення матеріалу.

Поставлену задачу ефективно розв'язувати чисельними методами, серед яких найбільш універсальним є метод скінчених елементів (МСЕ). У основу конкретного використання МСЕ може бути покладений принцип мінімуму повної енергії системи:

$$\delta E = 0, \quad E = U + W, \quad (8)$$

тут U – механічна енергія деформування, W – енергія ЕМП. Якщо ввести поняття векторного магнітного потенціалу [3]: $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$, тоді енергію ЕМП та механічну енергію можна записати у векторно-матричному вигляді так:

$$W = \frac{1}{2} \{A\}^T [M] \{A\},$$

$$U = \frac{1}{2} \{u\}^T [K] \{u\} + \frac{1}{2} \{\dot{u}\}^T [Mass] \{\dot{u}\}, \quad (9)$$

тут – $[M]$ – „магнітна” матриця матеріалу, яка залежить від властивостей матеріалу, від умов геометрії тіла, що розглядається, та визначається за допомогою фундаментальних рівнянь Максвелла; $[K]$ – матриця жорсткості; $[Mass]$ – матриця мас. Таким чином, після операції варіювання у випадку нехтування ефектами магнітострикції, задача аналізу нестационарного деформування електропровідного тіла за наявності ЕМП зводиться до розв'язання системи двох рівнянь:

$$\begin{cases} [M] \{A\} = 0; \\ [K] \{u\} = [Mass] \{\dot{u}\} + \{F_{em}\}. \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{де } \{F_{em}\} = -\frac{\partial W}{\partial u} = -\frac{1}{2} \{A\}^T \frac{\partial [M]}{\partial u} \{A\} -$$

вектор-стовпець електромагнітних сил. Відзначимо, що подібний підхід до визначення електромагнітних сил реалізовано, наприклад, у роботі [3]. При застосуванні у даному випадку схеми МСЕ вузловими невідомими скінченого елемента будуть виступати компоненти векторного магнітного потенціалу та компоненти вектору переміщень.

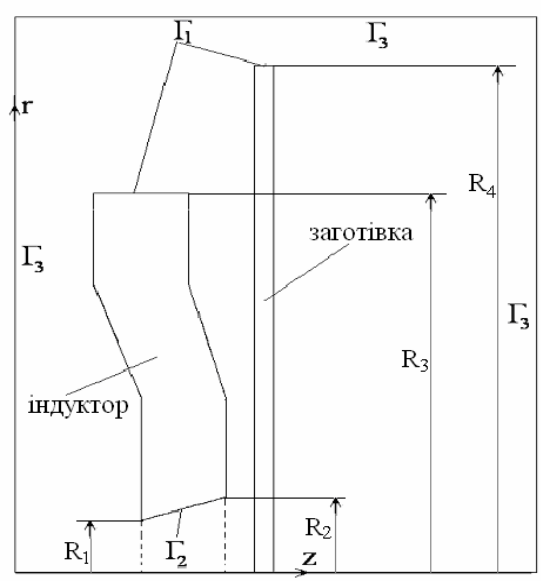


Рис. 1. розрахункова схема

Приклад розрахунку. Розглянемо застосування даного методу до аналізу деформування системи „індуктор-заготівка”, розрахункова схема якої наведена на рис.1. В реальності індуктор являє собою масивне тіло обертання складної форми. Принцип дії та область застосування подібного індуктора докладно описані у роботі [4,5]. Для нас важливим є те, що індуктор може розглядатись

як вісесиметричне тіло, а безпосереднім джерелом ЕМП є струм, який рівномірно розподіляється по лінії Γ_2 . При розв'язанні задачі моделювались меридіональні перерізи індуктора (матеріал мідь: відносна магнітна проникність $\mu_r = 1$, модуль пружності – 180 ГПа, коефіцієнт Пуассона – 0.33, межа текучості порядку 200 – 210 МПа), заготовки (матеріал сталь: відносна магнітна проникність $\mu_r = 1.3$, модуль пружності – 210 ГПа, коефіцієнт Пуассона – 0.28, межа текучості порядку 250 – 280 МПа) також моделювалось проміжне та оточуюче середовище – повітря (відносна магнітна проникність $\mu_r = 1$). Характерні розміри взаємодіючих тіл наступні: менший радіус конічного отвору $R_1 = 10$ мм; більший радіус $R_2 = 20$ мм; габаритний радіус індуктора $R_3 = 60$ мм; радіус заготовки $R_4 = 120$ мм; товщина індуктора – 12 мм; товщина заготовки – 1 мм; найменша відстань між індуктором та заготовкою – 1 мм. Розміри оточуючого повітряного середовища обирались таким чином, щоб змодельувати затухання ЕМП на віддаленні від його джерела. Як відомо [6], при затуханні ЕМП векторний магнітний потенціал прагне до нуля, тому на зовнішній межі Γ_3 (рис.1) задався нульовий магнітний потенціал.

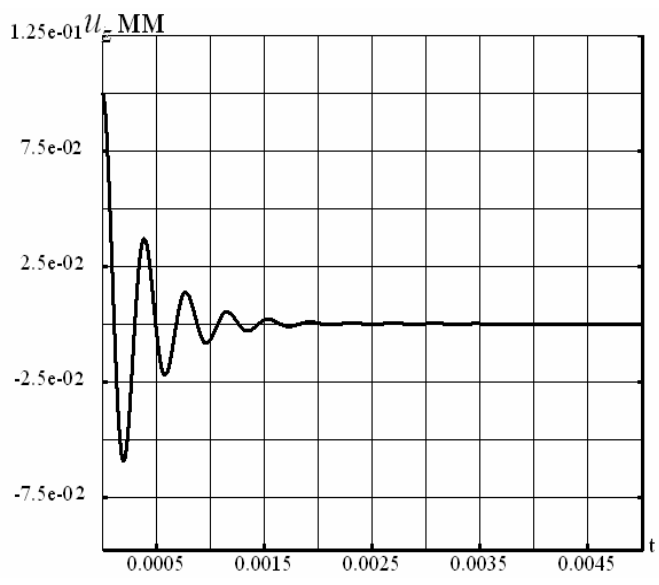


Рис. 2. Зміна у часі переміщень центру заготовки

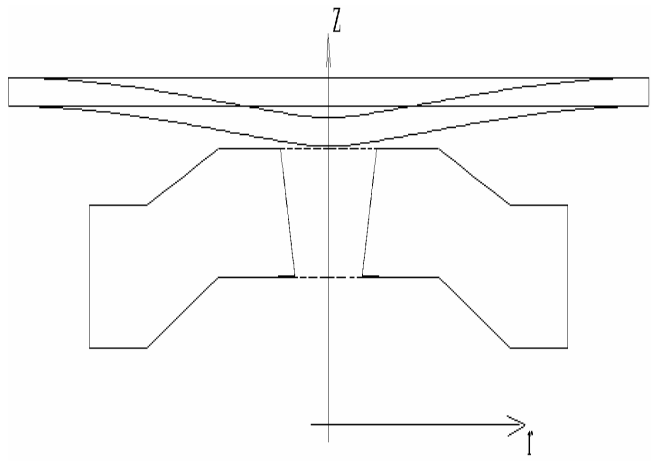
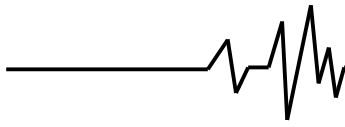


Рис. 3. Деформований стан



На лінії Γ_2 задавався струм, який змінювався у часі за законом:

$$I = I_m e^{-\delta_0 \omega t} \cos(\omega t), \quad \text{тут}$$

$$I_m = 50(\text{кА}), \delta_0 = 0,25,$$

$\omega = 17,9 \cdot 10^3 (\text{с}^{-1})$, довжина імпульсу складає 0,001(с). На першому етапі розв'язку були одержані просторово-часові розподіли векторних складових ЕМП, далі було проаналізовано деформування. На рис.2 наведено графік залежності від часу переміщень центру заготовки (це точка, яка піддана найбільшому у даному випадку впливу ЕМП). З графіка видно, що відбуваються затухаючі коливання, причому вони продовжуються довше, ніж імпульс струму. Цей факт слід враховувати при створенні технологічних систем подібного класу. На рис.3 наведений деформований стан системи, який відповідає максимуму переміщень.

Висновки

У статті сформульовано актуальну науково-практичну проблему нестационарного деформування елементів конструкцій при дії електромагнітного поля, представлено математичну постановку задачі та наведено приклад розв'язку.

Список використаних джерел

1. Вольмир А.С. Задачи магнитоупругости в теории оболочек / А.С.Вольмир // Сб. „Расчеты на прочность”. – М.: Машиностроение, 1975, вып. 16. – С.261-279.

2. Гачкевич О.Р. Несуча здатність електропровідних елементів канонічної форми за дії електромагнетних імпульсів / Гачкевич О.Р., Мусій Р.С. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів. – 2010. – Том 46, №4. – С. 92-97.

3. Ren Z. Calculation of local magnetic forces in magnetized materials / Z.Ren, M.Besbes, S.Boukhtache // Proc. International Workshop on Electric and Magnetic Fields, pp.64.1-64.6, 1992.

4. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Т. 3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография / Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.

5. Батыгин Ю.В. Вихревые токи в плоских листовых металлических заготовках /

Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А. // Электротехника і електромеханіка. – Харків. – 2006. – №5. – С.54-59.

Список джерел в транслітерації

1. Volmir A.S. Zadachi magnitouprugosty v teorii obolochek / A.S.Vol'mir // Sb. "Raschety na prochnost". – М.: Mashinostroyeniye, 1975, vyp. 16 – S. 261–279.

2. Hachkevych O.R. Nesuchykh zdatnist elektroprovodnikh elementiv kanonichnoyi formy za diy elektromagnetnykh impulsiv / Hachkevych O.R., Musiy R.S. // Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv. – Lviv. – 2010. – Tom 46, №4. – S. 92–97.

3. Ren Z. Calculation of local magnetic forces in magnetized materials / Z.Ren, M.Besbes, S.Boukhtache // Proc. International Workshop on Electric and Magnetic Fields, pp.64.1–64.6, 1992.

4. Turenko A.N. Impulsnyye magnitnyye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. – Т. 3: Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impulsnym magnitnymi polyami: Monografiya / Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. – Kharkov: KHNADU, 2009 – 240 s.

5. Batygin Yu.V. Vikhrevyye toki v ploskikh listovykh metallicheskiykh zagotovkakh / Batygin Yu.V., Chaplygin Ye.A. // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – Kharkov. – 2006. – №5. – С.54–59.

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы создания эффективного метода анализа нестационарного деформирования элементов конструкций под действием электромагнитного поля. Рассмотрена общая математическая постановка связанной задачи деформирования электропроводных тел при наличии электромагнитного поля. Связь между процессами распространения электромагнитного поля и процессами деформирования осуществляется посредством рассмотрения электромагнитных сил. Для построения численного решения исходная задача сводится к поиску минимума полной энергии системы. В качестве численного метода решения используется метод конечных элементов. Предложенный метод использован для анализа нестационарного деформирования системы «индуктор–



заготовка» технологической операции магнитно-импульсной обработки металлов. Представлены некоторые результаты, позволяющие давать определенные рекомендации для разработки и использования технологических операций подобного класса.

Ключевые слова: нестационарное деформирование, электромагнитное поле, векторный магнитный потенциал, электромагнитные силы, метод конечных элементов.

THE VIBRATION DIAGNOSTIC OF DETERIORATION FOR PUMP'S CYLINDER- PISTON COUPLES OF HYDROVOLUMETRIC TRANSMISSION WITH BALL-PLUNGERS

Annotation. The method of pump's cylinder-piston couples diagnostics for radial-piston hydromachine is stated. As diagnostic parameters were taken experimental data from

pump stator vibrations that have high self-descriptiveness, simplicity of receipt and treatment. Method is based on universal mathematical model of dynamic processes in the pump of radial-piston hydromachine with ball-pistols. The model takes into account inertial properties of piston balls, stator, elastic properties of liquid in the control cylinder, eccentricity, replenishment pressure and pressure in forcing cavity, rotor rotation frequency. The rule of pressure change that takes into account castings in pump barrels is determined. In the rule of pump stator movement the mechanism of forming of essential ninth and eighteenth harmonics with nominal parameters is found. The reasons of appearance of substantial harmonics in the rule of stator movement are settled. Results of design-experimental researches are cited.

Key words: vibration diagnostic, hydrovolumetric transmission, rotary-plunger hydromashine, pressure abandoning, stator oscillation.