

Ю.В. Батигін, С.О. Шиндерук, Є.О. Чаплигін

Взаємний вплив струмів в плоскій індукторній системі з соленоїдом між двох масивних провідників

В роботі розглянута плоска індукторна система з круговим соленоїдом, розташованим між масивними добре провідними об'єктами. Така конструкція спрямована не тільки на підвищення ефективності інструменту магнітно-імпульсних технологій, та на зниження енергетичних витрат на виконання заданої виробничої операції. Інтегруванням рівнянь Максвелла з використанням інтегральних перетворень Лапласа і Фур'є-Бесселя в наближенні ідеальної провідності металевих об'єктів, що підлягають обробці, аналітично отримано математичну модель системи. В рамках поставленої мети отримано розрахункові співвідношення і проведено теоретичний аналіз електромагнітних процесів в плоскій індукторній системі з круговим соленоїдом, що розміщений між масивними добре провідними об'єктами, а також проведено чисельні оцінки взаємного впливу збуджуючих і індуктованих струмів. Результати аналізу електромагнітних процесів показали, що для незмінності силових показників запропонованого інструменту магнітно-імпульсного штампування необхідна відповідна корекція амплітуди збуджуючого струму в обмотці соленоїда – джерела діючих електромагнітних полів. Бібл. 19, рис. 2.

Ключові слова: магнітно-імпульсне штампування, листові метали, електромагнітні поля, індукторні системи, круговий соленоїд, масивний провідник.

В работе рассмотрена плоская индукторная система с круговым соленоидом, расположенным между массивными хорошо проводящими объектами. Такая конструкция направлена не только на повышение эффективности инструмента магнитно-импульсных технологий, но и снижение энергетических затрат на выполнение заданной производственной операции. Интегрированием уравнений Максвелла с использованием интегральных преобразований Лапласа и Фурье-Бесселя в приближении идеальной проводимости подлежащих обработке металлических объектов аналитически получена математическая модель системы. В рамках поставленной цели получены расчётные соотношения и проведён теоретический анализ электромагнитных процессов в плоской индукторной системе с круговым соленоидом, размещённым между массивными хорошо проводящими объектами, а также проведены численные оценки взаимного влияния возбуждающих и индуцированных токов. Результаты анализа электромагнитных процессов показали, что для неизменности силовых показателей предложенного инструмента магнитно-импульсной штамповки необходима соответствующая коррекция амплитуды возбуждающего тока в обмотке соленоида – источника действующих электромагнитных полей. Библ. 19, рис. 2.

Ключевые слова: магнитно-импульсная штамповка, листовые металлы, электромагнитные поля, индукторные системы, круговой соленоид, массивный проводник.

Вступ. Постановка проблеми в загальному вигляді. Індукторні системи, як інструменти обробки металів, знаходять широке поширення в промислових технологіях з використанням енергії потужних імпульсних електромагнітних полів. Конструктивне виконання індукторних систем визначається видом заданої виробничої операції (наприклад, «роздавання», «обтискання», «плоске штампування» та ін.). Відзначимо, що їх успішна практична реалізація, як описано в сучасній спеціальній літературі, здійснена в рамках, так званої, «традиційної» магнітно-імпульсної обробки металів (MIOM) або в західній термінології Electromagnetic Metals Forming (EMF). Як показала практика, дієвість цієї технології можлива лише в діапазоні досить високих робочих частот діючих полів і високих значень електропровідності оброблюваних об'єктів. З фізичної точки зору тут використовується природне Лоренцівське відштовхування провідника від інструменту методу, що отримало назву «магнітного тиску» [1-4].

Розвиток електромагнітних технологій і підвищення вимог до їх ефективності призвело до створення нових типів індукторних систем. Так, цілий ряд виробничих операцій ініціював новий напрямок магнітно-імпульсної обробки металів, заснований на трансформації природного Лоренцевського відштовхування в притягання оброблюваного об'єкта [5-9]. В рамках же «традиційної» магнітно-імпульсної обробки металів, як видається априорі, збільшення продуктивності операцій плоского штампування виробів з листових металів можливо за допомогою, так званих

«двосторонніх індукторних систем», де соленоїд розміщений між об'єктами силового впливу. Розробки нових інструментів вимагають дослідження процесів електромагнітного впливу збуджуючих і індуктованих струмів. Актуальність таких робіт не викликає сумнівів. Отримані результати дозволять по новому підійти до проблем дієвості, підвищення ефективності індукторних систем і розширення номенклатури оброблюваних об'єктів.

Огляд літератури. Аналіз основних досліджень і публікацій та постановка проблеми. Двостороннє розташування листових металів по відношенню до джерела магнітного поля (соленоїда) має місце в індукторних системах, де природне Лоренцівське відштовхування трансформується в притягання заданої ділянки оброблюваного об'єкта. Конструктивно такі інструменти складаються з плоских пошарово розташованих: допоміжного екрану, який проводить електричний струм, кругового соленоїда і, власне, листового металу, що підлягає деформації. Струми, індуктовані в екрані і металі, що обробляється, є односпрямованими. Відповідно до закону Ампера, певну ділянку листового металу буде притягнуто до площини жорстко фіксованого екрану [10]. Такий принцип дії також використаний в системах автоматизованої подачі алюмінієвих листів в робочу зону штампувального обладнання автомобілебудівних заводів США [11]. Практичні аспекти розвитку MIOM в напрямку притягання заданих ділянок листових металів і створення відповідних інструментів для

© Ю.В. Батигін, С.О. Шиндерук, Є.О. Чаплигін

усунення вм'ятин описані авторами робіт в [2, 3, 12]. Відзначимо, що, в основному, магнітно-імпульсне притягання знайшло застосування в прогресивних технологіях відновлення пошкоджених покриттів автомобільних кузовів [9, 10, 12, 13].

Об'єкт дослідження. Розглянемо індукційні ефекти в інструментах для плоского магнітно-імпульсного штампування виробів з масивних листових металів з високою питомою електропровідністю, де соленоїд розміщується між двома об'єктами силового впливу. Фізична ідея такої конструкції індукторної системи передбачає концентрацію енергії збуджуючого поля в просторі між двома провідниками. На відміну від відомих інструментів для «традиційного» плоского магнітно-імпульсного штампування, де соленоїд розміщується над одним об'єктом силового впливу, дана пропозиція дозволяє знизити розсіювання енергії, що генерується в навколишній простір.

Загальним недоліком відомих робіт зі створення інструментів силового магнітно-імпульсного впливу на провідні об'єкти (як притягання, так і відштовхування) є використання фізико-математичних моделей, в яких збуджуючі струми приймаються заданими і незалежними від електромагнітних процесів, що протікають. Так, в [9] в індукторних системах було розглянуто механічні зусилля у вигляді сил притягання та їх розподіл в системі, проте взаємний вплив струмів в індукторній системі залишився не дослідженим. Також слід згадати і класичну аналітику [14, 15], і сучасні чисельні моделі, наприклад, в роботах [16, 17].

З феноменологічних міркувань, очевидно, що таке припущення в постановці розв'язуваних електродинамічних задач спотворює картину реальної енергетики в робочій зоні індукторної системи.

Метою статті є отримання розрахункових співвідношень і теоретичний аналіз електромагнітних процесів в плоскій індукторній системі з круговим соленоїдом, розміщеним між масивними добре провідними об'єктами, а також чисельні оцінки взаємного впливу збуджуючих і індуктованих струмів. Підкреслимо актуальність поставленої мети яка спрямована не тільки на підвищення ефективності інструменту магнітно-імпульсних технологій, але і зниження енергетичних витрат на виконання заданої виробничої операції.

Викладення основного матеріалу. Аналітичні залежності, чисельні оцінки. Торкаючись задач в індукторних системах МІОМ, розгляд почнемо з постановки задач, яка є однаковою для всіх досліджень електродинамічних процесів, що протікають [2, 8-12].

Припущення до вирішення поставленої задачі:

- фізико-математична модель індукторної системи є симетричною відносно площини збуджуючого соленоїда (рис. 1);

- прийнята циліндрична система координат;

- індукторна система приймається аксіально-симетричною, тобто $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$, де φ – азимутальний кут;

- соленоїд приймається настільки тонким, що його метал не впливає на електромагнітні процеси, що протікають в системі ($\Delta \rightarrow 0$);

- в обмотці соленоїда протікає азимутальний гармонічний струм $J(t) = J_m \sin(\omega t)$, де J_m – амплітуда, ω – циклічна частота, t – час;

- листові метали (пластини, що проводять електричний струм) є достатньо масивними і мають високу питому електропровідність;

- в системі збуджуються азимутальна компонента напруженості електричного поля $E_\varphi(t, r, z) \neq 0$, а також радіальна r та нормальна z складові вектора напруженості магнітного поля $H_r(t, r, z) \neq 0$ та $H_z(t, r, z) \neq 0$ відповідно;

- електромагнітні процеси приймаються квазістаціонарними, так що $(\omega l / c) \ll 1$, де c – швидкість світла у вакуумі, l – найбільший характерний розмір системи.

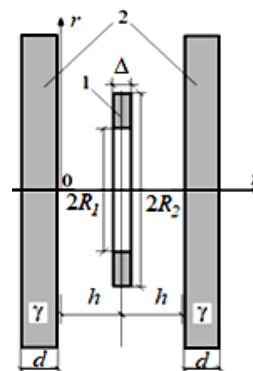


Рис. 1. Розрахункова модель плоскої індукторної системи: 1 – круговий соленоїд (Δ – товщина, $R_{1,2}$ – внутрішній і зовнішній радіуси); 2 – листові метали (d – товщина, γ – питома електропровідність)

Оцінку характеристик взаємного впливу індуктованих і збуджуючих струмів можна провести, виходячи з рівності середніх значень нормальних компонент індукції магнітного поля у внутрішньому вікні соленоїда при різних відстанях між ним і пластинами.

На додаток до прийнятих припущень необхідно відзначити, що на практиці масивність і висока електропровідність листових металів означає роботу індукторної системи в високочастотному часовому режимі, коли відсутнє проникнення полів крізь оброблювані об'єкти. В межах цих досліджень їх можна розглядати як ідеальні провідники, для яких $\omega \tau \gg 1$, де $\omega \tau$ – «електродинамічна» товщина (введення терміну обґрунтовано в роботі [9, 10]), $\tau = \mu_0 \gamma d^2$ – характерний час проникнення поля в немагнітний шар, що проводить, μ_0 – магнітна проникність вакууму, γ – питома електропровідність і d – геометрична товщина.

Ап'орі очевидно, що вплив індуктованих струмів на електромагнітні процеси повинен зменшуватись при видаленні листових металів і зростати при їх наближенні до збуджуючого соленоїда. У зв'язку з цим для опису досліджуваного впливу можна виділити і запропонувати дві основні характеристики електромагнітних процесів, що протікають. Перша – це відношення індуктивності системи при різних відстанях між соленоїдом і листовими металами до індуктивності при нескінченному віддаленні останніх. Друга – це відповідне відношення результуючого струму в обмотці соленоїда до струму, що збуджує під час

відсутності листових металів. Відзначимо, що останню характеристику можна прийняти в якості кількісного показника впливу індукованих струмів на струм в обмотці соленоїда.

Виходячи із прийнятого припущення про рівність середніх значень нормальних компонент індукції магнітного поля у внутрішньому вікні соленоїда при різній віддаленості листових металів, можна отримати наступні залежності для оцінки взаємного впливу збуджуючого і індукованого струмів [14]:

$$\begin{cases} \bar{B}_h = \bar{B}_\infty; \\ \frac{J_h}{J_\infty} = \frac{L_\infty}{L_h}; \end{cases} \quad (1)$$

де \bar{B}_h , J_h , L_h – середня величина нормальної складової індукції, струму в обмотці соленоїда і індуктивності системи при кінцевій відстані h між соленоїдом і листовими металами, відповідно; \bar{B}_∞ , J_∞ , L_∞ – середня величина нормальної складової індукції, струму в обмотці соленоїда і індуктивності системи під час відсутності листових металів (при $h \rightarrow \infty$), відповідно.

Слід зазначити, що результативно співвідношення (1) узгоджуються з відомими залежностями [14]. Дійсно, амплітуди струмів в обмотках обернено пропорційні їх індуктивності.

Відповідно до поставленої мети звернемося до розрахункової моделі на рис. 1, для якої запишемо систему рівнянь Максвелла в просторі L-зображень за Лапласом [9, 10, 18, 19].

$$\begin{cases} \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 p H_r(p, r, z); \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 p H_z(p, r, z); \\ \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_{\varphi 0}(p, r, z), \end{cases} \quad (2)$$

де $E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\}$, $H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\}$, $j_{\varphi 0}(p, r, z) = \{j_{\varphi 0}(t, r, z)\}$, $j_{\varphi 0}(t, r, z)$ – густина струму в соленоїді, $j_{\varphi 0}(p, r, z) = j_m \cdot g(t) \cdot f(r) \cdot \delta(z-h)$, $g(t)$ – часова залежність, $f(r)$ – радіальна залежність, $\delta(z-h)$ – функція Дірака [18].

Інтегрування системи рівнянь (1) проведемо аналогічно тому, як це було зроблено раніше в [2, 9, 10].

Геометрія індукторної системи і прийняті припущення дозволяють застосувати інтегральне перетворення Фур'є-Бесселя [18, 19].

Для L-зображень напруженості збудженого електричного поля $E_\varphi(p, r, z)$ запишемо, що

$$\begin{cases} E_\varphi(p, r, z) = \int_0^\infty E_\varphi(p, \lambda, z) \cdot \lambda \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \\ E_\varphi(p, \lambda, z) = \int_0^\infty E_\varphi(p, r, z) \cdot r \cdot J_1(\lambda r) dr, \end{cases} \quad (3)$$

де $E_\varphi(p, \lambda, z)$ – зображення електричної напруженості в просторі Фур'є-Бесселя, λ – параметр інтегрального перетворення, $J_1(\lambda r)$ – функція Бесселя першого порядку.

Опускаючи проміжні математичні перетворення, з системи (1) з використанням інтегрального зображення (2) запишемо диференціальне рівняння для азимутальної компоненти напруженості збудженого електричного поля у внутрішній порожнині розглянутої індукторної системи [18]

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p, \lambda, z)}{\partial z^2} - \lambda^2 \cdot E_\varphi(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \cdot \delta(z-h), \quad (4)$$

де $K(p, \lambda) = \mu_0 p \cdot j_m \cdot g(p) \cdot f(\lambda)$; $j_m = \frac{J_m}{(R_2 - R_1)}$ –

густина збуджуючого струму;

$$g(p) = L\{g(t)\}; f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} f(r) \cdot r \cdot J_1(\lambda r) dr.$$

Загальний інтеграл звичайного диференціального рівняння (4) має вигляд [18]:

$$E_\varphi(p, \lambda, z) = C_1 \cdot e^{\lambda z} + C_2 \cdot e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \eta(z-h) \cdot \text{sh}(\lambda \cdot (z-h)), \quad (5)$$

де $C_{1,2}$ – довільні сталі інтегрування, $\eta(z-h)$ – ступінчаста функція Хевісайда.

Прийняте допущення про відсутність проникнення полів крізь листові метали, як вже було зазначено, описується нерівністю $-\omega \cdot \tau \gg 1$ [2, 6], що відповідає їх «ідеальній» провідності. Задовольняючи граничним умовам безперервності тангенціальних компонент вектора напруженості електромагнітного поля на поверхнях ідеальних провідників при $z=0$ ($E_\varphi(p, \lambda, z=0)=0$) і $z=2h$ ($E_\varphi(p, \lambda, z=2h)=0$) [14], знаходимо частинний розв'язок рівняння (3). Підставляючи в отриманий вираз координату $z=h$, отримуємо зображення напруженості збуджуваного високочастотного електричного поля у внутрішньому вікні плоского кругового соленоїда розглянутої індукторної системи

$$E_\varphi(p, \lambda, z=h) = -\frac{K(p, \lambda)}{2\lambda} \cdot \text{th}(\lambda h). \quad (6)$$

Інтегральне зображення (2) з урахуванням (5) приймає вигляд:

$$E_\varphi(p, r, z) = -\int_0^\infty \frac{K(p, \lambda)}{2} \cdot \text{th}(\lambda h) \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (7)$$

Зв'язок L-зображення нормальної компоненти напруженості збуджуваного магнітного поля з φ -складовою напруженості електричного поля у внутрішньому вікні соленоїда знаходиться за допомогою другого рівняння з системи (1) підстановкою $z=h$

$$H_z(p, r, z=h) = -\frac{1}{\mu_0 p} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r \cdot E_\varphi(p, r, z=h)). \quad (8)$$

Інтегруванням виразу (8) за площиною внутрішнього вікна соленоїда визначаємо зв'язок магнітного потоку з $E_\varphi(p, r, z=h)$

$$\begin{aligned} \Phi_h(p) &= 2\pi\mu_0 \cdot \int_0^{R_1} H_z(p, r, z=h) r dr = \\ &= -\frac{2\pi}{p} \cdot (r \cdot E_\varphi(p, r, z=h)) \Big|_0^{R_1} \end{aligned} \quad (9)$$

З урахуванням формул (7) і (9) після переходу в простір оригіналів знаходимо амплітудну залежність $-\Phi_{hm}$ для магнітного потоку в вікні соленоїда індукторної системи. Опускаючи проміжні тотожні перетворення, отримуємо, що

$$\Phi_{hm} = J_m \cdot \frac{\mu_0 \pi R_1}{(R_2 - R_1)} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda h) \cdot \text{th}(\lambda h) \cdot J_1(\lambda R_1) d\lambda. \quad (10)$$

Індуктивність даної системи знаходиться як відношення магнітного потоку до збуджуючого струму [14].

Після введення нової змінної інтегрування $y = \lambda R_1$ і виконання необхідних тотожних перетворень отримуємо зручну формулу для розрахунку індуктивності при довільній відстані від соленоїда до листових металів

$$L_h = \frac{\mu_0 \pi R_1^2}{(R_2 - R_1)} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(y, R_{1,2})}{y^2} \cdot \text{th}(\lambda h) \cdot J_1(y) dy, \quad (11)$$

$$\text{де } f(y, R_{1,2}) = \int_y^{\frac{R_2}{R_1}} x \cdot J_1(x) dx.$$

Граничний перехід в (11) при $h \rightarrow \infty$ дає вираз для індуктивності власне обмотки соленоїда за відсутності листових металів

$$L_{\infty} = \lim_{h \rightarrow \infty} L_h = \frac{\mu_0 \pi R_1^2}{(R_2 - R_1)} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(y, R_{1,2})}{y^2} \cdot J_1(y) dy. \quad (12)$$

В кінцевому підсумку, використання співвідношень (1), (11) і (12) дозволяє перейти до чисельних оцінок впливу індукційних ефектів на характеристики електромагнітних процесів в досліджуваній індукторній системі. Результати розрахунків представлені на рис. 2.

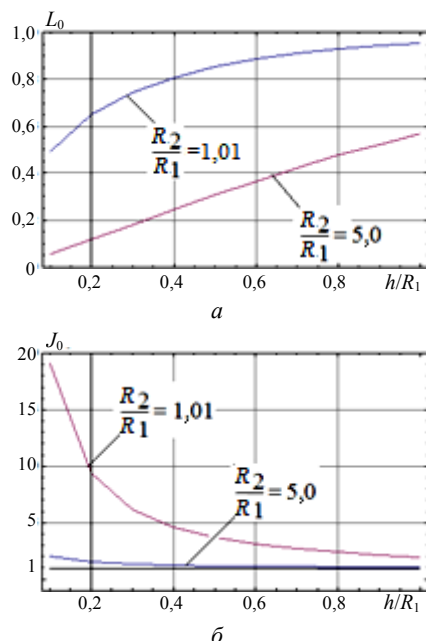


Рис. 2. Відносна індуктивність (а) і відносний струм (б) в обмотці соленоїда індукторної системи

Основні результати обчислень сформульовані в нижченаведених положеннях:

- вплив індукційних ефектів на електромагнітні процеси в високочастотному режимі досліджуваної індукторної системи показали, що її індуктивність

зростає при віддаленні масивних провідників і зменшується при їх наближенні до соленоїда, а також при збільшенні його радіальних розмірів (рис. 2,а);

- зазначене зниження індуктивності вимагає збільшення струму в обмотці соленоїда для підтримки постійної величини індукції магнітного поля, що збуджується, і незмінних силових показників (рис. 2,б);

- як впливає з розрахункових даних, для підтримання характеристик досліджуваної індукторної системи, в середньому, потрібно можливе збільшення збуджуючого струму в ~ 20 разів (рис. 2,б).

Висновки та перспективи подальшого розвитку. Вперше для плоского магнітно-імпульсного штампування запропонована конструкція інструменту з круговим соленоїдом, розміщеним між масивними добре провідними металевими об'єктами, що підлягають обробці.

У наближенні високочастотних електромагнітних процесів отримані розрахункові співвідношення, за допомогою яких виконано теоретичний аналіз і чисельні оцінки характеристик плоскої індукторної системи при варіації робочого зазору між соленоїдом – джерелом поля і об'єктами, що обробляються.

Показано, що індуктивність, як основна характеристика дослідженої системи, падає при наближенні оброблюваних об'єктів до соленоїда і росте при віддаленні від нього, що фізично, пояснюється взаємодією електромагнітних полів збуджуючих і індуктованих струмів.

Отримано, що для збереження незмінними силових показників запропонованого інструменту магнітно-імпульсного штампування необхідна відповідна і обов'язкова корекція амплітуди збуджуючого струму в обмотці соленоїда – джерела діючих електромагнітних полів.

На закінчення хотілося б відзначити міркування, що розширює область практичного застосування результатів виконаної роботи. Як видається апіорі, подібне конструктивне виконання плоского повітряного трансформатора струму (узгоджувального пристрою в МІОМ), де багатовитковий круговий соленоїд, підключений до джерела потужності, слід розмістити між одновитковими соленоїдами з електрично паралельним виходом на навантаження, чим можливо істотно знизити розсіювання енергії в навколишній простір. Такий пристрій може стати елементом енергозберігаючих технологій у сучасній перетворювальній техніці.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Benenson W., Harris J.W., Stöcker H., Lutz H. *Handbook of Physics*. Springer Nature Switzerland AG, 2002. 1190 p. doi: <https://doi.org/10.1007/0-387-21632-4>.
2. Gnatov A., Argun S. New Method of Car Body Panel External Straightening: Tools of Method. *International Journal of Vehicular Technology*, 2015, vol. 2015, pp. 1-7. doi: <https://doi.org/10.1155/2015/192958>.
3. Kudasov Y.B., Surdin O.M., Platonov V.V., Kozabaranov R.V., Maslov D.A., Makarov I.V., Svetlov A.S., Popov E.Y. Metal plate deformation under magnetic field pulse of complex

- shape. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, no. 8, p. 084901. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5108823>.
4. Du L., Li X., Xia L., Zhang X., Lai Z., Han X., Li L., Cao Q. Numerical and experimental verification of an iterative coupling method for analyzing the Lorentz-force-driven sheet metal stamping process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 115, no. 7-8, pp. 2161-2173. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07268-z>.
5. Bay F., Jeanson A.-C., Zapata J.A. Electromagnetic Forming Processes: Material Behaviour and Computational Modelling. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 793-800. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.078>.
6. Ouyang S., Li C., Du L., Li X., Lai Z., Peng T., Han X., Cao Q., Li L. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet metal utilizing a low-frequency discharge: A new method for attractive forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 291, p. 117001. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.117001>.
7. Ouyang S., Du L., Cao Q., Li L. Electromagnetic attractive forming of aluminum alloy sheets utilizing a low-frequency half-wave current. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1944197>.
8. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А. Вихревые токи в плоских листовых металлических заготовках. *Электротехника і електромеханіка*, 2006, № 5, С. 54-59. Режим доступа: <http://eie.khpi.edu.ua/issue/view/6513/2466> (Дата звернення: 25.06.2021).
9. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Т. 3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.*
10. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham, Springer International Publ. AG, 2018. 93 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74570-1>.
11. Golovashchenko S.F., Batygin Yu.V. *Sheet metal blank de-stacker*. Patent US 2018/105373 A1, 04/19/2018. Режим доступа: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6e/5d/a1/6b72cee7043054/US20180105373A1.pdf> (Дата звернення: 14.03.2021).
12. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 3, pp. 43-52. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.3.06>.
13. Kudasov Y.B., Makarov I.V., Platonov V.V., Surdin O.M., Maslov D.A., Voronov S.L., Malyshev A.Y., Korshunov A.S., Popov E.Y., Svetlov A.S. An Experimental Setup for Studying the Deformation Dynamics of Metal Samples under Pulsed Magnetic Field. *Instruments and Experimental Techniques*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 88-92. doi: <https://doi.org/10.1134/s0020441219010135>.
14. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. *Теоретические основы электротехники. 4-е издание. Том 3. – СПб.: «Питер», 2006. – 318 с.*
15. Исаев Ю., Васильева О. *Методы расчёта электромагнитных полей*. LAP Lambert Academic Publ., 2012. – 172 с.
16. Altenbach H., Konkin V., Lavinsky D., Morachkovsky O., Naumenko K. Verformungsanalyse elektrisch leitender metallischer Bauteile bei Magnetimpulsbearbeitung. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2018, vol. 82, no. 4, pp. 371-377. (Ger). doi: <https://doi.org/10.1007/s10010-018-0285-x>.
17. Lavinskii D.V., Morachkovskii O. K. Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. *Strength of Materials*, 2016, vol. 48, no. 6, pp. 760-767. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9822-3>.
18. Kantorovich L. *Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics*. Springer Nature Switzerland AG, 2016. 526 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2785-2>.
19. Weber H., Ulrich H. *Laplace-, Fourier- und z- Transformation*. Springer Nature Switzerland AG, 2012. 236 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8291-2>.

REFERENCES

1. Benenson W., Harris J.W., Stöcker H., Lutz H. *Handbook of Physics*. Springer Nature Switzerland AG, 2002. 1190 p. doi: <https://doi.org/10.1007/0-387-21632-4>.
2. Gnatov A., Argun S. New Method of Car Body Panel External Straightening: Tools of Method. *International Journal of Vehicular Technology*, 2015, vol. 2015, pp. 1-7. doi: <https://doi.org/10.1155/2015/192958>.
3. Kudasov Y.B., Surdin O.M., Platonov V.V., Kozabaranov R.V., Maslov D.A., Makarov I.V., Svetlov A.S., Popov E.Y. Metal plate deformation under magnetic field pulse of complex shape. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, no. 8, p. 084901. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5108823>.
4. Du L., Li X., Xia L., Zhang X., Lai Z., Han X., Li L., Cao Q. Numerical and experimental verification of an iterative coupling method for analyzing the Lorentz-force-driven sheet metal stamping process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 115, no. 7-8, pp. 2161-2173. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07268-z>.
5. Bay F., Jeanson A.-C., Zapata J.A. Electromagnetic Forming Processes: Material Behaviour and Computational Modelling. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 793-800. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.078>.
6. Ouyang S., Li C., Du L., Li X., Lai Z., Peng T., Han X., Cao Q., Li L. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet metal utilizing a low-frequency discharge: A new method for attractive forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 291, p. 117001. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.117001>.
7. Ouyang S., Du L., Cao Q., Li L. Electromagnetic attractive forming of aluminum alloy sheets utilizing a low-frequency half-wave current. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1944197>.
8. Batygin Y.V., Chaplygin E.A. Vortical currents in flat metallic sheet. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2006, no. 5, pp. 54-59. (Rus). Available at: <http://eie.khpi.edu.ua/issue/view/6513/2466> (accessed 25 June 2021).
9. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impul'snye magnitnye polia dlia progressivnykh tekhnologii. T. 3. Teoriia i eksperiment pritiasheniia tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi poliiami* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol. 3. Theory and experiment of the attraction of thin-walled metals by pulsed magnetic fields]. Kharkiv, KhNAHU Publ., 2009. 240 p. (Rus).
10. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham, Springer International Publ. AG, 2018. 93 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74570-1>.
11. Golovashchenko S.F., Batygin Yu.V. *Sheet metal blank de-stacker*. Patent US 2018/105373 A1, 04/19/2018. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6e/5d/a1/6b72cee7043054/US20180105373A1.pdf> (accessed 14 March 2021).
12. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 3, pp. 43-52. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.3.06>.
13. Kudasov Y.B., Makarov I.V., Platonov V.V., Surdin O.M., Maslov D.A., Voronov S.L., Malyshev A.Y., Korshunov A.S., Popov E.Y., Svetlov A.S. An Experimental Setup for Studying the Deformation Dynamics of Metal Samples under Pulsed

Magnetic Field. *Instruments and Experimental Techniques*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 88-92. doi: <https://doi.org/10.1134/s0020441219010135>.

14. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. 4 izd. T. 3* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering, 4th ed., Vol. 3]. St. Petersburg, Peter Publ., 2006. 318 p. (Rus).

15. Isaev Yu., Vasilieva O. *Metody rascheta elektromagnitnykh polei* [Methods for calculating electromagnetic fields]. LAP Lambert Academic Publ., 2012. 172 p. (Rus).

16. Altenbach H., Konkin V., Lavinsky D., Morachkovsky O., Naumenko K. Verformungsanalyse elektrisch leitender metallischer Bauteile bei Magnetimpulsbearbeitung. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2018, vol. 82, no. 4, pp. 371-377. (Ger). doi: <https://doi.org/10.1007/s10010-018-0285-x>.

17. Lavinskii D.V., Morachkovskii O. K. Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. *Strength of Materials*, 2016, vol. 48, no. 6, pp. 760-767. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9822-3>.

18. Kantorovich L. *Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics*. Springer Nature Switzerland AG, 2016. 526 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2785-2>.

19. Weber H., Ulrich H. *Laplace-, Fourier- und z- Transformation*. Springer Nature Switzerland AG, 2012. 236 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8291-2>.

Надійшла (Received) 21.10.2021

Прийнята (Accepted) 26.11.2021

Опублікована (Published) 03.12.2021

Батигін Юрій Вікторович¹, д.т.н., проф.,

Шиндерук Світлана Олександрівна¹, к.т.н., доц.,

Чаплигін Євген Олександрович¹, к.т.н., доц.,

¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25,

e-mail: yu.v.batygin@gmail.com,

s.shinderuk.2016102@ukr.net (Corresponding author),

chaplygin.e.a@gmail.com

Yu.V. Batygin¹, S.O. Shinderuk¹, E.O. Chaplygin¹

¹ Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Mutual influence of currents in plane inductor system with solenoid between two massive conductors.

Introduction. Inductor systems, as tools for metal processing, widely used in industrial technologies using the energy of powerful pulsed electromagnetic fields. **Problem.** A common disadvantage of the known works on the creation of tools for magnetic-pulse impact on conductive objects has the use of physical and mathematical models, in which the exciting currents do not depend on the ongoing electromagnetic processes. Such the assumption, have distorts the picture of the real energy in the working area of the inductor system. **Goal.** To obtain design ratios and numerical estimates of the mutual influence of exciting and induced currents of a flat inductor system with a circular solenoid located between massive well-conducting objects, moreover to carry out a theoretical analysis of electromagnetic processes in this system. **Methodology.** Have applied integrating Maxwell's equations using the Laplace and Fourier-Bessel integral transformations in the approximation of the ideal conductivity of the metal objects to be processed. **Results.** The calculated relations for the theoretical analysis of electromagnetic processes have obtained in the high-frequency approximation. It shown that the inductance of the studied system decreases as the objects being processed approach the solenoid and increases as they move away from it. It found that for the invariability of the power indicators, of the proposed tool, a corresponding correction of the amplitude (on average up to 20 times) of the exciting current has necessary in the solenoid winding. **Originality.** For the first time, the tool design with a circular solenoid located between the massive metal objects has proposed for flat magnetic-pulse stamping. As a result of the theoretical analysis, the influence of electromagnetic processes on the currents flowing in the system has confirmed. **Practical significance.** The use of the results obtained will allow to increase the efficiency of the tool of magnetic-pulse technologies, and to reduce the energy costs for performing the specified production operations. References 19, figures 2.

Key words: magnetic-pulse stamping, sheet metals, electromagnetic fields, inductor systems, circular solenoid, massive conductor.