

Ю.В. Батигін, О.Ф. Єр'оміна, С.О. Шиндерук, Є.О. Чаплигін

Взаємний вплив збуджуючих та індукованих струмів у системі «круговий соленоїд – масивний провідник»

В роботі одержано аналітичні вирази для кількісного аналізу результатів взаємного впливу збуджуючих та індукованих струмів і числові оцінки їх співвідношення в залежності від геометричних характеристик індукторної системи. Аналіз результатів взаємного впливу проведено на прикладі широко поширеної індукторної системи, де плоский круговий соленоїд є розташованим над поверхнею ідеалізованого масивного провідника, що подається моделлю з нескінченною електропровідністю. Показано, що вплив індукованого струму на струм у соленоїді зростає при зменшенні відстані між соленоїдом та поверхнею масивного провідника і збільшенні ширини обмотки соленоїда, що вимагає підвищення амплітуди збуджуючого струму для збереження заданої величини магнітного потоку в системі. Бібл. 20, рис. 3.

Ключові слова: круговий соленоїд, масивний провідник, індукторна система, вихрові струми, індуктивність.

Вступ. Загальним для всіх відомих електротехнічних систем, незалежно від їх конструктивного виконання, є наявність провідних елементів, протікання струмів у яких супроводжується збудженням відповідних електромагнітних полів. Останні, з фізичної точки зору, є матеріальною субстанцією, за допомогою якої відбувається енергообмін між провідними елементами, де протікають струми. Слід наголосити, що зазначений процес – це процес взаємного впливу, зумовлений відомим законом електромагнітної індукції М. Фарадея. Трактують цього закону щодо процесу взаємного впливу свідчить, що поля індукованих струмів призводять до зміни параметрів власне збуджуючих струмів. З іншого боку, фізично, взаємний вплив і пов'язані з ним відповідні зміни електродинамічних характеристик процесів, що протікають, також можна пояснити принципами закону збереження енергії [1-3].

Постановка проблеми. Сучасні вимоги енергозбереження потребують обов'язкових числових оцінок параметрів процесів, які протікають, з урахуванням взаємного впливу збуджуючих та індукованих струмів, що необхідно для проектування електротехнічних пристроїв будь-якого призначення.

Огляд літератури. Як об'єкт дослідження можна розглянути інструменти електромагнітних технологій обробки металів, названих у спеціальній літературі «індукторними системами» [4, 5]. Останні – це конструкції з кругових соленоїдів, розміщених над провідними об'єктами [6, 7].

Так, багатовиткові індукторні системи в класичній магнітно-імпульсній обробці металів, що набули широкого поширення в другій половині минулого століття, здійснювали ефективно деформування масивних металевих заготовок. У разі різкого поверхневого ефекту (високі частоти діючих полів) успішно реалізовані виробничі операції типу «обжим», «роздача» і «плоске штампування» [8-10]. Слід наголосити, що принцип дії представлених електромагнітних технологій базується на природному відштовхуванні провідників від джерел зовнішнього магнітного поля, що проявляється як так званий «магнітний тиск» [4, 11].

Інструментами магнітно-імпульсного притягання стали одновиткові індукторні системи, принцип дії яких заснований на придушенні сил лоренцівського відштовхування в низькочастотних режимах полів, що збуджуються, використанні магнітних властивостей оброблюваних металів і закону Ампера про силу взаємодії паралельних струмів [5, 12, 13]. Авторами [14] представлені різноманітні конструкції інструментів, джерел потужності та технологічного оснащення систем магнітно-імпульсного притягання, захищені патентами України.

Індукторним системам для індукційного нагрівання металевих зразків присвячено роботу [5]. Тут проведено аналіз процесів збудження електромагнітних полів циліндричним соленоїдом, у внутрішній порожнині якого розміщений масивний провідний об'єкт.

Відокремлення задач, що потрібно вирішити. Загальним недоліком цитованих робіт, а також останніх публікацій за методами розрахунку наприклад, [11, 15-17], слід вважати рішення поставлених завдань у наближенні «заданого струму», коли збуджені електромагнітні поля не впливають на характеристики джерел, які вважаються постійними. Це дозволяє виділити значну частину задач, які потребують свого рішення і присвячені дослідженням формування збуджуючих струмів та напруг з урахуванням дії збуджених полів [3, 7, 18].

Метою роботи є одержання аналітичних виразів для кількісного аналізу результатів взаємного впливу збуджуючих та індукованих струмів і обчислення їх співвідношення в залежності від геометричних характеристик індукторних систем.

Основні співвідношення, аналітичні залежності. Розрахункова модель індукторної системи наведена на рис. 1.

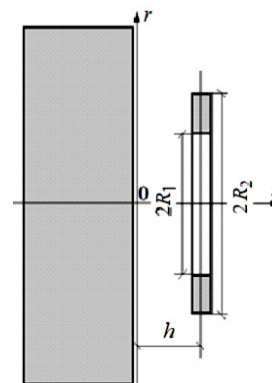


Рис. 1. Модель індукторної системи з плоским круговим соленоїдом, розміщеним паралельно поверхні масивного провідника

Постановка задачі та допущення до вирішення поставленого завдання:

1. Прийнятною є циліндрична система координат.
2. Масивний провідник вважаємо таким, що ідеально проводить, що практично допустимо при досить високих частотах діючих полів, і які можна реально оцінити аналогічно широко звисним роботам [1, 4, 16, 17].
3. Геометричні розміри масивного провідника у вимірах $r \in [0, \infty)$ і $z \in (-\infty, 0)$ є нескінченими.
4. Соленоїд покладається аксіально-симетричним, тобто $\partial/\partial\varphi = 0$, де φ – азимутальний кут.

© Ю.В. Батигін, О.Ф. Єр'оміна, С.О. Шиндерук, Є.О. Чаплигін

5. В обмотці соленоїда протікає азимутальний гармонічний струм $J(t) = J_m \sin(\omega t)$ з циклічною частотою ω , що не порушує прийняту ідеалізацію провідника, та довільною амплітудою J_m .

Примітка. Оскільки згідно п.2 прийнята ідеалізована модель, всі характеристики електромагнітних процесів будуть гармонічними у часі [16, 17].

6. Згідно прийнятій геометричній формі збуджуючого струму в системі збуджуються азимутальна компонента напруженості електричного поля $E_\varphi(t, r, z) \neq 0$, а також радіальна r та нормальна z складові вектору напруженості магнітного поля $H_r(t, r, z) \neq 0$, $H_z(t, r, z) \neq 0$ відповідно [1, 2, 16, 17].

7. Оцінку характеристик взаємного впливу індукованих та збуджуючих струмів можна провести, вважаючи, що при варіації відстані між соленоїдом та поверхнею провідника середні значення нормальних компонентів індукції магнітного поля, що збуджуються у внутрішньому вікні соленоїда, залишаються незмінними.

Спочатку співвідношення загального характеру.

Середня величина нормальної складової вектору індукції у внутрішньому вікні соленоїда, розташованого на відстані h від поверхні масивного провідника, описується відомою залежністю [18]:

$$\bar{B}_h = \Phi_h / S = (J_h \cdot L_h) / S, \quad (1)$$

де Φ_h – магнітний потік, S – площа внутрішнього вікна, J_h – струм в обмотці, L_h – індуктивність обмотки соленоїда, що враховує наявність масивного провідника.

Відповідно до прийнятої постановки задачі, вплив індукваного струму на процеси збудження електромагнітного поля можна визначити за величиною середньої індукції із співвідношення (1). Очевидним є твердження, згідно з яким індукований струм не має жодного впливу, якщо масивний провідник «умовно видаляється в нескінченність». У цьому випадку середня індукція у внутрішньому вікні власне соленоїда залежить від (1) при $h \rightarrow \infty$

$$\bar{B}_\infty = \Phi_\infty / S = (J_\infty \cdot L_\infty) / S, \quad (2)$$

де Φ_∞ і L_∞ – магнітний потік та індуктивність обмотки соленоїда без масивного провідника, J_∞ – струм в обмотці.

Тепер рівність усереднених величин індукцій у формулах (1) і (2) дозволяє знайти співвідношення між струмами в обмотці соленоїда за наявності провідного об'єкта та за відсутності такого. Фактично, це співвідношення визначає вплив індукваного струму на струм в обмотці соленоїда.

Отже,

$$\bar{B}_h = \bar{B}_\infty; \quad J_h / J_\infty = L_\infty / L_h; \quad J_0 = (L_\infty / L_h) - 1, \quad (3)$$

де $J_0 = \Delta J / J_\infty$ і $\Delta J = J_\infty - J_h$ – відносна та абсолютна варіації струму в обмотці соленоїда, обумовлені впливом індукваного струму.

Результати у співвідношеннях (3) узгоджуються з відомими залежностями. Дійсно, амплітуди струмів в обмотках обернено пропорційні їх індуктивностям [16].

Відповідно до поставленої мети звернемося до розрахункової моделі на рис.1, для якої запишемо систему рівнянь Максвелла у просторі зображень по Лапласу [1, 2, 16, 17]:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 p H_r(p, r, z); \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 p H_z(p, r, z); \\ \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_{\varphi 0}(p, r, z), \end{cases} \quad (4)$$

де $E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(g(t), t, r, z)\}$; $H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\}$; $j_{\varphi 0}(p, r, z) = \{j_{\varphi 0}(t, r, z)\}$, $j_{\varphi 0}(t, r, z)$ – густина струму в соленоїді, $j_{\varphi 0}(t, r, z) = j_m \cdot g(t) \cdot f(r) \cdot \delta(z-h)$, $g(t)$ – часова залежність, $f(r)$ – радіальна залежність, $\delta(z-h)$ – функція Дірака [19].

Примітка. Система рівнянь Максвелла (4) є фундаментальною як базова основа задач з прикладної електродинаміки, але у сукупності з теж добре звідними співвідношеннями (1 – 3) вона дає можливість дослідити взаємний вплив збуджуючих та індукованих струмів в елементах індукторних систем, що є необхідним для проектування ефективних інструментів у МІОМ.

Подальше рішення поставленого завдання проведемо згідно з прийнятою розрахунковою моделлю. Геометрія індукторної системи та прийняті припущення дозволяють застосувати інтегральне перетворення Фур'є-Бесселя [19, 20]. Для L -зображення напруженості збуджуваного електричного поля $E_\varphi(p, r, z)$ запишемо, що

$$\begin{cases} E_\varphi(p, r, z) = \int_0^\infty E_\varphi(p, \lambda, z) \cdot \lambda \cdot J_1(\lambda r) d\lambda; \\ E_\varphi(p, \lambda, z) = \int_0^\infty E_\varphi(p, r, z) \cdot r \cdot J_1(\lambda r) dr; \end{cases} \quad (5)$$

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

Опускаючи проміжні математичні перетворення, із системи (4), із використанням інтегрального подання (5), запишемо диференціальне рівняння для азимутальної компоненти напруженості електричного поля, що збуджується [19, 20]:

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p, \lambda, z)}{\partial z^2} - \lambda^2 \cdot E_\varphi(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \cdot \delta(z-h), \quad (6)$$

де $K(p, \lambda) = \mu_0 p j_m g(p) f(\lambda)$; $j_m = J_m / (R_2 - R_1)$ – густина збуджуючого струму;

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

Загальне рішення звичайного диференціального рівняння (6) можна представити виразом виду [19, 20]:

$$E_\varphi(p, \lambda, z) = C_1 \cdot e^{\lambda z} + C_2 \cdot e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \eta(z-h) \cdot \text{sh}(\lambda \cdot (z-h)), \quad (7)$$

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

Задовольняючи граничним умовам при $z = 0$ ($E_\varphi(p, \lambda, z = 0) = 0$) і $z \rightarrow \infty$ ($E_\varphi(p, \lambda, z \rightarrow \infty) = 0$), знаходимо часткове рішення рівняння (6). Підставляючи в отриманий вираз координату $z = h$, отримуємо зображення напруженості електричного поля, що збуджується у внутрішньому вікні плоского кругового соленоїда:

$$E_\varphi(p, \lambda, z = h) = -\frac{K(p, \lambda)}{2\lambda} \cdot (1 - e^{-2\lambda h}). \quad (8)$$

Інтегральне уявлення (5) з урахуванням (8) набуває вигляду:

$$E_\varphi(p, r, z) = -\int_0^\infty \frac{K(p, \lambda)}{2} \cdot (1 - e^{-2\lambda h}) \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (9)$$

Зв'язок L -зображення нормальної компоненти напруженості магнітного поля, що збуджується, у внутрішньому вікні соленоїда за наявності масивного провідника з напруженістю $E_\varphi(p, \lambda, z)$ знаходиться за допомогою другого рівняння із системи (4):

$$H_z(p, r, z = h) = -\frac{1}{\mu_0 p} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r \cdot E_\varphi(p, r, z = h)). \quad (10)$$

Інтегруванням виразу (10) визначаємо залежність для L -образу магнітного потоку:

$$\begin{aligned} \Phi_h(p) &= 2\pi\mu_0 \cdot \int_0^{R_1} H_z(p, r, z = h) r dr = \\ &= -\frac{2\pi}{p} \cdot (r \cdot E_\varphi(p, r, z = h)) \Big|_0^{R_1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Підставляючи (9) в (11) і розкриваючи $K(p, \lambda)$ з (6), отримуємо, що

$$\begin{aligned} \Phi_h(p) &= J_m \cdot \frac{\mu_0 \pi R_1}{(R_2 - R_1)} \cdot g(p) \times \\ &\times \int_0^\infty f(\lambda) \cdot (1 - e^{-2\lambda \cdot h}) \cdot J_1(\lambda R_1) d\lambda. \end{aligned} \quad (12)$$

Оскільки часова залежність магнітного потоку, як це випливає з (12), визначається функцією $g(p) = L \{g(t) = \sin(\omega t)\}$, то $\Phi_h(t) \sim \sin(\omega t)$. І, отже, вираз (12) можна трактувати як зв'язок між амплітудними величинами збуджуючого струму і магнітного потоку, що збуджується. Тобто,

$$\Phi_h = J_m \frac{\mu_0 \pi R_1}{(R_2 - R_1)} \int_0^\infty f(\lambda) (1 - e^{-2\lambda \cdot h}) J_1(\lambda R_1) d\lambda. \quad (13)$$

Індуктивність аналізованої системи визначається як відношення магнітного потоку до збуджуючого струму [16].

Після введення нової змінної інтегрування $y = \lambda R_1$ та необхідних тотожних перетворень отримуємо формулу для індуктивності при довільній відстані від індуктора до масивного провідника:

$$L_h = \frac{\mu_0 \pi R_1^2}{(R_2 - R_1)} \int_0^\infty f(y, R_{1,2}) \frac{1 - e^{-y \cdot \left(\frac{2h}{R_1}\right)}}{y^2} J_1(y) dy, \quad (14)$$

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

Граничний перехід (14) при $h \rightarrow \infty$ дає вираз для індуктивності власне обмотки індуктора без масивного провідника:

$$L_\infty \approx \frac{\mu_0 \pi R_1^2}{(R_2 - R_1)} \int_0^\infty \frac{f(y, R_{1,2})}{y^2} J_1(y) dy. \quad (15)$$

Повернемося до відносної величини зміни струму в обмотці соленоїда під впливом індукційних ефектів у масивному провіднику. У відповідну формулу із сукупності співвідношень (3) підставимо залежності (14) та (15). Отримаємо вираз, що кількісно визначає вплив індукovanого струму на збуджуючий струм в обмотці соленоїда:

$$J_0 = \frac{\Delta J}{J_\infty} = \left(\frac{L_\infty}{L_h} - 1 \right), \quad (16)$$

$$\text{де } \frac{L_\infty}{L_h} = \frac{\int_0^\infty \frac{f(y, R_{1,2})}{y^2} \cdot J_1(y) dy}{\int_0^\infty \frac{f(y, R_{1,2})}{y^2} \cdot \left(1 - e^{-y \cdot \frac{2h}{R_1}} \right) \cdot J_1(y) dy}.$$

Аналіз впливу індукovanого струму на збуджуючий струм у соленоїді. Числові оцінки за знайденими аналітичними виразами були отримані за допомогою стандартних програм (зокрема, NIntegrate) з пакету «Wolfram Mathematica – 7,10».

Графіки, що ілюструють функціональну залежність (16), наведено на рис. 2.

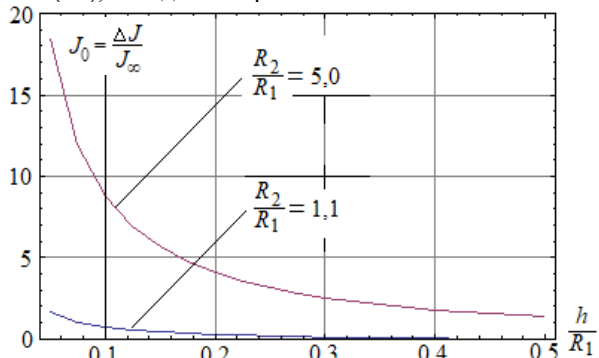


Рис. 2. Залежність збільшення струму в соленоїді від відстані між ним і поверхнею масивного провідника

Результати обчислень показали, що вплив індукovanого струму на величину струму в обмотці соленоїда в основному визначається наступними факторами:

- вплив на збуджуючий струм зростає при зменшенні відстані між соленоїдом і масивним провідником і падає при збільшенні останнього, що цілком узгоджується з якісним фізичним уявленням про електромагнітні процеси, що протікають;
- вплив збуджуючого струму значною мірою залежить від геометрії соленоїда, тобто від співвідношення між його зовнішнім і внутрішнім розмірами;
- для досить тонкого соленоїда ($R_2/R_1 \approx 1,1$) при $h/R_1 > 0,3$ вплив індукovanого струму дуже незначний, але при $h/R_1 < 0,05$ вплив індукovanого струму призводить до майже двохразового збільшення струму в соленоїді;
- збільшення ширини обмотки соленоїда призводить до значного зростання впливу індукovanого струму на збуджуючий струм;
- порівняння результатів обчислень для «тонкого» і «широкого» соленоїда показує, що збільшення ширини обмотки призводить до значного спотворення збуджуючого струму для досить малих і практично найбільш цікавих співвідношень відстані між соленоїдом і його внутрішнім розміром.

На закінчення наведемо результати чисельних оцінок індуктивності системи «круговий соленоїд – масивний провідник» з нормуванням на величину індуктивності одиночного ізоляваного соленоїда. Дані оцінки, як і результати безпосередніх обчислень для струмів, також є кількісними показниками впливу індукційних ефектів на електромагнітні процеси, що протікають.

Результати розрахунків індуктивності системи «круговий соленоїд – масивний провідник» подано на рис. 3.

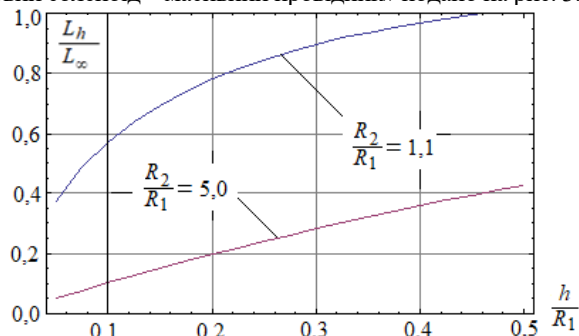


Рис. 3. Індуктивність системи «круговий соленоїд – масивний провідник»

З обчислень випливає, що індуктивність, як коефіцієнт пропорційності між магнітним потоком, що збуджується, і збуджуючим його струмом, падає при зменшенні відстані між соленоїдом і масивним провідником. Її найбільша величина має місце при $h/R_1 \rightarrow \infty$ (одиначний соленоїд). Також слід зазначити зростання індуктивності зі збільшенням його ширини.

Як наслідок, ці факти означають необхідність збільшення амплітуди струму, що живить обмотку соленоїда, для збереження незмінної величини магнітного потоку при зменшенні відстані між соленоїдом і масивним провідником.

З фізичної точки зору отримані результати можна пояснити суперпозицією полів протилежно спрямованих струму джерела і струму, індукваного в ідеальному провіднику. Причому величина «протиструму» в обмотці соленоїда в порівнянні зі струмом джерела природно падає, що обумовлено наявністю відстані між соленоїдом і металом h . Очевидно, коли $h \rightarrow 0$, суперпозиція струму джерела і «протиструму» дає нульовий результат і індуктивність досліджуваної системи $L_{(h \rightarrow 0)} \rightarrow 0$. Останнє означає необхідність значного збільшення струму джерела для підтримки постійної величини збуджуваного магнітного потоку.

Висновки. Проведено теоретичний аналіз процесів збудження вихрових струмів у масивному провіднику полем плоского кругового соленоїда, виконано числові оцінки впливу індукваних струмів на збуджуючі струми в соленоїді.

Показано, що вплив індукваного струму на струм у соленоїді дуже істотний при малих величинах відстаней між соленоїдом і поверхнею масивного провідника.

Отримано, що збільшення ширини обмотки соленоїда призводить до значного зростання впливу індукваного струму на збуджуючий струм в соленоїді.

Показано, що індуктивність системи «круговий соленоїд – масивний провідник» знижується при зменшенні відстані між соленоїдом і масивним провідником і збільшенні радіальних розмірів соленоїда, що вимагає збільшення амплітуди збуджуючого струму для збереження заданої величини магнітного потоку в системі.

Перспективним напрямом подальших досліджень бачиться проведення експериментів з вимірами кількісних характеристик взаємного впливу збуджуючих та індукваних струмів у різних конструкціях електротехнічних систем.

Фінансування. Роботу виконано та профінансовано в межах науково-дослідної роботи за держбюджетною темою, № держреєстрації 0121U109610,

КПКВК 2201040: «Розробка енергоефективного машинного комплексу для транспортного забезпечення збройних сил та національної гвардії України».

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. *Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов*. М.: ООО «Издательство Оникс», 2006. 1056 с.
2. 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>.
3. Gray Dwight E. (Ed.) *American Institute of Physics Handbook*. McGraw-Hill Book Company Inc., 1957. 1541 p.
4. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. *Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов*. Х.: Вища школа, 1977. 189 с.
5. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, no. 5, pp. 787-829. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>.
6. Батигін Ю.В., Шиндерук С.О., Чаплигін Є.О., Єрьоміна О.Ф. Електромагнітні процеси в плоскій круговій системі з індуктором між тонкими котушками біфіляра. *Технічна електродинаміка*, 2020, № 4, с. 19-24. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.019>.
7. Batygin Y.V., Shinderuk S.O., Chaplygin E.O. Mutual influence of currents in plane inductor system with solenoid between two massive conductors. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 6, pp. 25-30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.04>.
8. Bay F., Jeanson A.-C., Zapata J.A. Electromagnetic Forming Processes: Material Behaviour and Computational Modelling. *Procedia Engineering*, 2014, no. 81, pp. 793-800. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.078>.
9. 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, art. no. 117001. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.11.7001>.
10. 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>.
11. 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>.
12. 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>.
13. 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>.
14. Batygin Y.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>.
15. Fireteanu V., Tudorache T. Electromagnetic forces in transverse flux induction heating. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, vol. 36, no. 4, pp. 1792-1795. doi: <https://doi.org/10.1109/20.877791>.
16. 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.
17. Muller-Kirsten H.J.W. *Electrodynamics. 2nd Ed.* World Scientific Publishing Company, 2011. 632 p.

18. Исаев Ю., Васильева О. *Методы расчёта электромагнитных полей*. LAP Lambert Academic Publ., 2012. 172 с.
 19. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике*. М.: «Наука», 1973. 831 с.
 20. Kreyszig E. *Advanced Engineering Mathematics. 10th ed.* Wiley Publ., 2011. 1283 p.

REFERENCES

1. Yavorskii B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. *Physics handbook for engineers and students of universities*. Moscow, Oniks Publ., 2006. 1056 p. (Rus).
 2. 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>.
 3. Gray Dwight E. (Ed.) *American Institute of Physics Handbook*. McGraw-Hill Book Company Inc., 1957. 1541 p.
 4. Belyi I.V., Fertik S.M., Khimenko L.T. *Handbook of magnetic-pulse processing of metals*. Kharkiv, Vyshcha Shkola Publ., 1977. 189 p. (Rus).
 5. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, no. 5, pp. 787-829. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>.
 6. Batygin Y.V., Shinderuk S.O., Chaplygin E.O., Yeryomina O.F. Electromagnetic processes in a flat circular system with an inductor between thin bifilar coils. *Technical Electrodynamic*, 2020, no. 4, pp. 19-24. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.019>.
 7. Batygin Y.V., Shinderuk S.O., Chaplygin E.O. Mutual influence of currents in plane inductor system with solenoid between two massive conductors. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 6, pp. 25-30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.04>.
 8. Bay F., Jeanson A.-C., Zapata J.A. Electromagnetic Forming Processes: Material Behaviour and Computational Modelling. *Procedia Engineering*, 2014, no. 81, pp. 793-800. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.078>.
 9. 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, art. no. 117001. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.11.7001>.
 10. 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>.
 11. 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>.
 12. 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>.
 13. 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>.
 14. Batygin Y.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>.
 15. Fireteanu V., Tudorache T. Electromagnetic forces in transverse flux induction heating. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, vol. 36, no. 4, pp. 1792-1795. doi: <https://doi.org/10.1109/20.877791>.

How to cite this article:

Batygin Yu.V., Yeryomina O.F., Shinderuk S.O., Chaplygin E.O. The mutual influence of exciting and induced currents in the circular solenoid – massive conductor system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 6, pp. 67-71. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.6.12>

16. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Theoretical foundations of electrical engineering. 4th ed. vol. 3*. St. Petersburg, Peter Publ., 2006. 318 p. (Rus).
 17. Muller-Kirsten H.J.W. *Electrodynamics. 2nd Ed.* World Scientific Publishing Company, 2011. 632 p.
 18. Isaev Yu., Vasilieva O. *Methods for calculating electromagnetic fields*. LAP Lambert Academic Publ., 2012. 172 p. (Rus).
 19. Korn H., Korn T. *Mathematical Handbook*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 831 p. (Rus).
 20. Kreyszig E. *Advanced Engineering Mathematics. 10th ed.* Wiley Publ., 2011. 1283 p.

Надійшла (Received) 05.03.2023
 Прийнята (Accepted) 09.05.2023
 Опублікована (Published) 02.11.2023

Батюгін Юрій Вікторович¹, д.т.н., проф.,
 Єрьоміна Олена Федорівна¹, к.т.н., доц.,
 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;
 elena.yeryomina@gmail.com (Corresponding Author);
 s.shinderuk.2016102@ukr.net; chaplygin.e.a@gmail.com

Yu.V. Batygin¹, O.F. Yeryomina¹, S.O. Shinderuk¹, E.O. Chaplygin¹
¹ Kharkiv National Automobile and Highway University,
 25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The mutual influence of exciting and induced currents in the circular solenoid – massive conductor system.

Problem. The flow of currents in the conductive elements of electrical systems is accompanied by the excitation of electromagnetic fields and the occurrence of induced currents. The excitation of the induced signals, in turn, leads to a change in the parameters of the actual exciting currents. The purpose of the work is to obtain analytical expressions for the quantitative analysis of the results of the mutual influence of the exciting and induced currents and to calculate their ratio depending on the geometric characteristics of the inductor systems. **Methodology.** The analysis of the processes of mutual influence is carried out on the example of a widespread inductor system, where a flat circular solenoid is placed above the surface of a massive conductor. Analytical expressions for eddy currents excited in a massive conductor and numerical estimates of the effect of induced currents on exciting currents in a solenoid are obtained. **Results.** It is shown that the influence of the induced current on the current in the solenoid is very significant at small distances between the solenoid and the surface of the massive solenoid. It has been found that an increase in the width of the solenoid winding leads to a significant increase in the influence of the induced current on the excitation current in the solenoid. It is shown that the inductance of the "circular solenoid - massive conductor" system drops with a decrease in the distance between the solenoid and the massive conductor and an increase in the radial dimensions of the solenoid, which requires an increase in the amplitude of the exciting current to maintain a given value of the magnetic flux in the system. **Originality.** The scientific novelty of this work lies in the proposal of an analytical approach and obtaining numerical estimates of the mutual influence of conductors with exciting and induced currents. **Practical value.** Estimates of the mutual influence of conductors with currents are of interest for the practice of designing structures of electrical systems for various purposes. Very promising in the direction further research is seen as carrying out experiments with measurements of the quantitative characteristics of the mutual influence of exciting and induced currents in various designs of electrical systems. References 20, figures 3.

Key words: circular solenoid, massive conductor, inductor system, eddy currents, inductance.