

УДК 621.3:539.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.052>

ТОРЦЕВИЙ ЦИЛІНДРИЧНИЙ ІНДУКТОР З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОЇ СТРУМОВОЇ ОБРОБКИ ПЛОЩИННОГО ПРОКАТУ МЕТАЛУ

А.П. Ращепкін, докт. техн. наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
 e-mail: anatoly_raschepkin@ukr.net

Розроблено метод аналізу електромагнітних процесів у торцевому циліндричному індукторі з феромагнітним осердям для безконтактного збудження в оброблюваному металі імпульсів струму високої густини шляхом використання електропластичного ефекту в методах пластичної деформації, заснованих на додатковому впливі на матеріал струмом високої густини. Визначення електричних параметрів індуктора виконано комп'ютерним моделюванням з використанням методу скінченних елементів. Збудження імпульсу струму в індукторі досягалось шляхом розряду конденсатора з використанням керованого тиристора та за наявності шунтуючого конденсатор діода. Нестационарні, нелінійні електромагнітні процеси розряду в колі розглянуто з використанням відомих у теоретичній електротехніці залежностей шляхом чисельного вирішення нелінійних рівнянь, а розподіл густини струму в металі – методом скінченних елементів. Бібл. 5, рис. 8.

Ключові слова: електропластична деформація, нелінійні та нестационарні електророзрядні процеси, однополярні імпульси струму.

У процесах деформування металів з використанням електропластичного або магнітопластичного ефектів для їхньої реалізації необхідно збуджувати в оброблюваній металевій смузі, як встановлено експериментально, однополярні імпульси густини струму порядку 10^9 А/м² [1] або магнітне поле напруженістю близько 10^5 А/м і тривалістю імпульсів 100–500 мкс [2]. Імпульси струму мають тривалість 10^{-5} – 10^{-4} с, що на кілька порядків менше тривалості стимульованих ними стрибків деформації в кристалах. Тому вказаний вплив ϵ , по суті, поштовхами в електронній та фононній підсистемах кристалів, що викликають подолання окремими дислокаціями і групами перешкод, тобто інтенсифікує пластичну деформацію металу. Настільки значні електромагнітні навантаження в індукційній системі викликають великі радіальні зусилля в обмотці індуктора, а також силову електродинамічну взаємодію між індуктором і оброблюваною смугою. Для пошуку шляхів послаблення цих сил розглянуто виконання такого індуктора з феромагнітним осердям. З метою розширення області великих індуктованих густин струму в осьовій зоні індуктора передбачається також використання центрального, наприклад, конічного феромагнітного осердя.

Метою роботи є розробка безконтактного, індукційного методу збудження в металевій смузі коротких імпульсів струму великої густини і визначення доцільності застосування феромагнітного осердя в торцевому циліндричному індукторі в процесах електропластичної деформації плоского прокату металів.

Зважаючи на безперервний технологічний процес з багаторазовим повторенням імпульсів, для запобігання перегріву багатовиткова обмотка індуктора виконується водоохолоджуваною,

з положо прямокутного мідного дроту ДПРХМ 5,0×5,0×1,0 БР М1 з електропровідністю $5 \cdot 10^7$ См/м. Перетин дроту індуктора дорівнює $16 \cdot 10^{-6}$ м².

Розташування плоского циліндричного індуктора над провідною смугою наведено на рис. 1. Відстань між витками і шарами індуктора з урахуванням величини виткової ізоляції становить $\Delta i = 1$ мм. Внутрішній r_1 і зовнішній r_2 радіуси обмотки індуктора складають відповідно 10 і 33 мм. Число

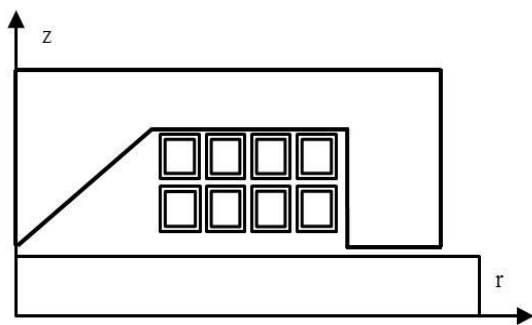


Рис. 1

витків $w = 8$, число шарів індуктора $n = 2$.

Під час визначення електромагнітних параметрів індуктора в такій системі припускалось, що товщина алюмінієвої смуги з електропровідністю $3,3 \cdot 10^7$ См/м приймає значення $c = (2, 4, 6, 8)$ мм, відстань між індуктором і пластиною з огляду на величину виткової ізоляції становить $d = (1, 2, 4, 6, 8)$ мм. Електричні параметри індуктора (рис. 1) визначалися комп'ютерним моделюванням методом скінченних елементів [3] при живленні обмотки синусоїдальним струмом заданої амплітуди I_e і різної частоти (від 500 до 10000 Гц) для оцінки впливу тривалості імпульсу або еквівалентній їй частоті струму індуктора за різних величин c і d .

Виконані за наведеними даними розрахунки за наявності в системі середовищ з нелінійними електрофізичними властивостями показали, що індуктивність індуктора має значну залежність від величини струму індуктора, а внесений активний опір слабо змінюється зі зміною струму. Електричні параметри індуктора залежать від тривалості імпульсу і величини зазора між оброблюваною пластиною та індуктором. Внесений активний опір індуктора зростає зі збільшенням резонансної частоти струму, але на нього майже не впливає величина зазора між індуктором і пластиною. У свою чергу індуктивність індуктора практично не залежить від частоти струму і товщини алюмінієвої смуги, але значною мірою залежить від величини зазора між індуктором і пластиною. Зокрема, при $I_e = 11200$ А, $f = 1000$ Гц, $d = 4$ і $c = 8$ мм сумарна амплітудна величина напруги обмотки становить $u = 14,44 + 192i$. Тоді активний опір індуктора дорівнює

$$r = \frac{Re(u)}{I_e} + \frac{w \cdot \pi \cdot (r_1 + r_2)}{5 \cdot 10^7 \cdot 16 \cdot 10^{-6}} kr = 0,01. \quad (1)$$

Тут коефіцієнт додаткових втрат за [4] дорівнює

$$kr = 1 + \frac{h^4}{\delta^4} \left(\frac{w \cdot b}{(b + \Delta i) \cdot w + r_1} \right)^2 \frac{n^2 - 0,2}{9} = 3,1, \quad \delta = 10^3 \sqrt{2 / \mu \sigma 2 \pi f}, \quad (2)$$

де h і b – висота і ширина дротів обмотки індуктора.

У такий же спосіб визначаються електричний опір обмотки індуктора за інших конструктивних виконань, величин I_e , f , d , c і електрофізичних властивостей складових матеріалів індукційної системи.

Імпульси електричного струму в індукторі, як і в провідній смугі, отримують шляхом розряду, попередньо зарядженого до напруги U_c конденсатора ємністю C на електричне коло (рис. 2), що має визначений вище опір і якусь поки ще не визначену індуктивність.

Для визначення струму в цьому ланцюзі виходимо з основного диференціального рівняння [5]:

$$\frac{d\psi}{dt} + r \cdot i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt + U_c(0) = 0, \quad (3)$$

після диференціювання якого за часом приходимо до рівняння другого порядку:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + r \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0. \quad (4)$$

Оскільки за наявності феромагнітного осердя потокозчеплення індуктора нелінійно залежить від струму, рівняння (4) доцільно представити у вигляді:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + r \cdot \frac{di}{d\psi} \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C} \frac{i}{\psi} \psi = 0. \quad (5)$$

Величини $\frac{d\psi}{di} = Ld$ і $\frac{\psi}{i} = Ls$ – відповідно динамічна і статична індуктивності, які є

функціями потокозчеплення, обумовленими кривою намагнічування електромагнітної системи в результаті рішення крайової задачі про розподіл магнітного поля в області відповідно

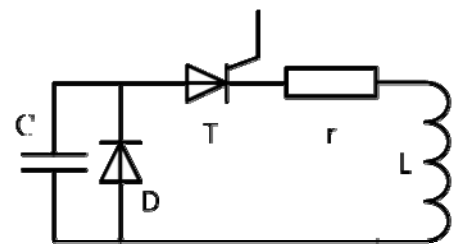


Рис. 2

до рис. 1 методом скінченних елементів. Маємо принаймні три можливості визначення індуктивностей, задаючи ряд значень струму в обмотці:

- визначати потікочеплення індуктора за припущення, що смуга має надпровідність, і таким чином, поле є зосередженим у верхній півплощині, над провідною смугою;
- визначати потікочеплення з огляду на те, що частина потоку замикається в смугі, на глибині проникнення поля в смугу δ , припускаючи, що смуга має надпровідність, і таким чином, поле є зосередженим у верхній півплощині, над провідною смугою, віддаленою від індуктора на відстань $d + \delta$;
- визначати потікочеплення для реального виконання електромагнітної системи, беручи до уваги реакції струмів у провідній смугі відповідно до рис. 1, що і приймається в цьому аналізі.

Хоча відмінність між ними максимально не перевищує 7,5 %, остаточної величини індуктивності можна визначити лише експериментальним шляхом. На рис. 3 наведено знайдені в результаті розв'язку крайової задачі залежності статичної (L_s) 1 і динамічної (L_d) 2 індуктивностей індукційної системи з феромагнітним осердям від потікочеплення обмотки.

Їхні аналітичні залежності, необхідні для вирішення рівняння (5), можна представити у вигляді:

$$L_s = 2,73 \cdot 10^{-6} + 0,18 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-100 \cdot \psi); \quad (6)$$

$$L_d = 2,73 \cdot 10^{-6} + 0,18 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-50 \cdot \psi) \cdot \cos(\pi \cdot \psi \cdot 50 - \pi/6),$$

Наведена аналітична апроксимація залежностей індуктивностей від потікочеплення вносить також деяку похибку в їхні величини, але в підсумку це майже не позначається на аналізі електромагнітних процесів у індукційній системі. Визначення індуктивностей тут виконано за наявності провідної смуги і частоти струму індуктора, рівної 1000 Гц. Тому ємність конденсатора можна наближено оцінити за формулою:

$$C = 1 / ((2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L_s) \approx 0,0093, \quad (7)$$

де $L_s = 2,73 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Якщо визначати індуктивності по кривій намагнічування індуктора з рішення крайової задачі у верхній області, над надпровідною смугою в обох вище зазначених випадках, то ємність конденсатора може прийматися довільною, а частота струму індуктора вибиратися, виходячи з необхідної величини тривалості імпульсу струму в індукторі $T = 1 / (2f)$. Однак для визначення активного опору обмотки слід попередньо вважати відомою очікувану частоту струму індуктора, що знову-таки призводить до необхідності визначати криву намагнічування індуктора за наявності провідної смуги.

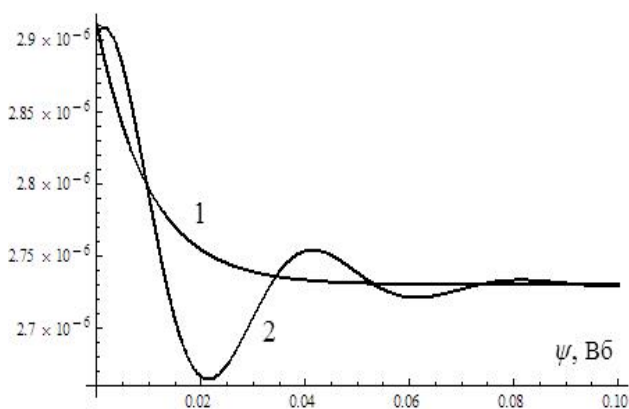


Рис. 3

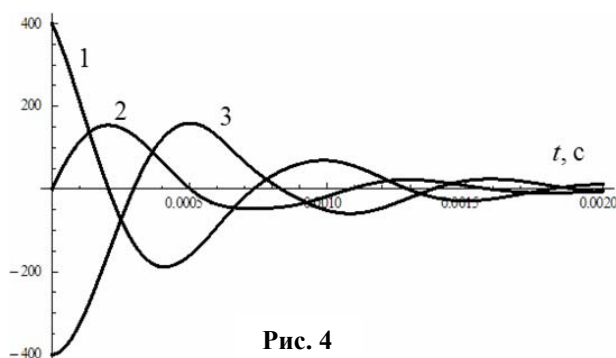


Рис. 4

У результаті вирішення рівняння (5) з початковими умовами, виходячи з припущення, що при $t = 0$ потікочеплення дорівнює нулю, а конденсатор заряджений до напруги -400 В, відповідно до рівняння (3)

$$\frac{d\psi}{dt} = 400, \quad \psi = 0. \quad (8)$$

Процес розряду конденсатора на ланцюг має вигляд котушки з феромагнітним осердям і активного опору (рис. 4). Тут 1 – напруга на індуктивності, 2 – зміна струму

в індукторі ($I \times 10^{-2} \text{A}$) і 3 – напруга на конденсаторі, що приймає в першому напівперіоді нульове значення при $t = 0,000296 \text{ c}$.

При розряді конденсатора за схемою рис. 2 з керованим тиристором останній закривається за досягнення струмом нульового значення, таким чином, обмоткою протікає однополярний імпульс струму (крива 1 на рис. 5). За наявності діода після досягнення напруги конденсатора нульового значення діод відкривається, що призводить до аперіодичного перехідного процесу тільки в ланцюзі індуктора, у результаті чого струм в індукторі (I_e, A) змінюється згідно з кривою 2, після чого електромагнітний процес в індукторі відповідно до (3) описується рівнянням для r - L ланцюга

$$\frac{d\psi}{dt} + r \cdot \frac{i}{\psi} \cdot \psi = 0 \quad (8)$$

з початковою умовою, отриманою шляхом вирішення рівняння (5), $\psi(0,000296) = 0,03574$. Зміна струму в індукторі в цьому разі описується кривою 2 (рис. 5) у результаті вирішення рівняння (8):

$$i = \psi / L_s \quad (9)$$

Крива 1 (рис. 5) з використанням одиничної узагальненої функції $\theta(x)$, що дорівнює нулю за негативного і одиниці за позитивного аргументу, добре апроксимується аналітичною залежністю

$$I = 22000 \sin(2\pi 1000t) \exp(-1550t) \theta(0,0005 - t), \quad (10)$$

а крива 2 –

$$I = 22000 \sin(2\pi 1000t) \exp(-1550t) \theta(0,0003 - t) + 13300 \exp(-3600(t - 0,0003)) \theta(t - 0,0003). \quad (11)$$

Нестационарні електромагнітні процеси в індукційній системі з феромагнітним осердям розраховуються методом скінчених елементів з використанням отриманої часової залежності струмів (10), (11) в обмотці індуктора. На рис. 6 кривою 1 позначено зміну на поверхні оброблюваної смуги амплітуди густини струму в часі за струму в індукторі відповідно до (11), тобто за наявності шунтуючого конденсатора діода. Розряд з однополярним імпульсом струму індуктора (10) (крива 1, рис. 5) призводить до помітної зміни картини розподілу густини струму в смугі, викликаючи знакозмінні збудження густини струму практично однакової амплітуди відповідно до кривої 2 (рис.6). Змінюючи ємність конденсатора, можна керувати величиною резонансної частоти контуру і відповідно тривалістю імпульсу. Однак зі збільшенням резонансної за основною гармонікою частоти струму контуру до більше ніж 5000 Гц для всіх розмірів прийнятого конструктивного виконання індукційної системи розряд конденсатора переходить в аперіодичний з істотним зменшенням максимального струму.

Втім, навіть у разі періодичного згасаючого розряду за постійної початкової напруги

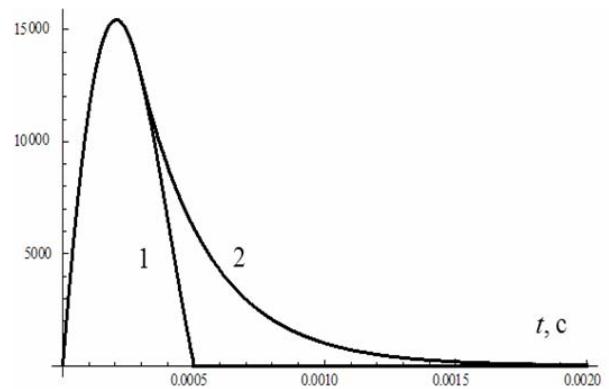


Рис. 5

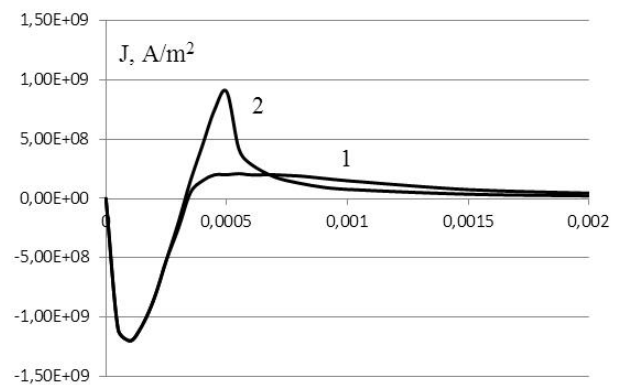


Рис. 6

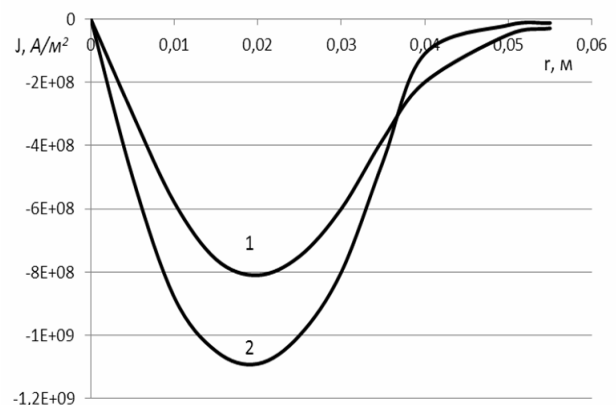


Рис. 7

конденсатора зі зростанням частоти безперервно зменшується амплітуда імпульсу струму, що не дає змогу досягти необхідної тривалості імпульсу і величини густини струму в оброблюваній смузі. Амплітуда імпульсу струму в будь-якому режимі розряду, а отже, і рівень індукованої в смузі густини струму регулюються величиною початкової напруги конденсатора U_c .

Застосування в індукційній системі центрального феромагнітного осердя сприяє за інших рівних умов збільшенню густини струму в осевій зоні смуги (крива 2), розширенню зони підвищеної густини струму вздовж радіуса і загальному підвищенню густини струму в смузі (рис. 7) у порівнянні (за інших рівних умов) з індукційною системою без феромагнітного осердя (крива 1). Таким чином, видається обґрунтованим застосування феромагнітного осердя в індукційних системах для магнітопластичної деформації металів. Важливо в цьому разі зазначити, що максимум густини струму в смузі збуджується за максимуму наростання імпульсу струму в обмотці (у даному випадку на 0,0001 секунди), а не за максимального струму в обмотці (при 0,0002 секунди). Водночас наведені на рис. 8 електродинамічні сили взаємодії обмотки зі смугою (1), сили впливу на смугу (3), представлену на рисунку з протилежним знаком, і радіальні зусилля в обмотці (2) приймають максимальні значення за максимального струму в обмотці.

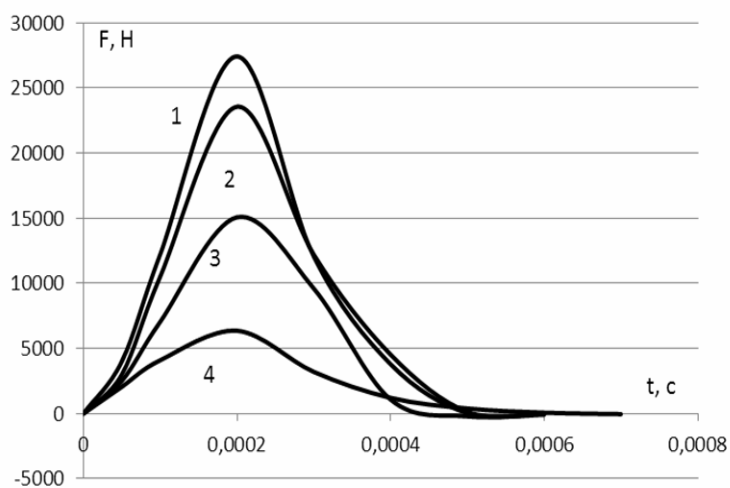


Рис. 8

Як видно, діюча на обмотку сила набагато перевищує силу взаємодії індуктора з металевією смугою. Пояснюється це взаємодією струмів обмотки з власним полем розсіювання в пазовій частині осердя. Для порівняння на рис. 8 зображена крива (4) аксіальної сили зі зворотним знаком, що діє на смугу за таких же струмів у обмотці в беззалізному індукторі. Таким чином, виконаний аналіз вказує на помітне зростання силової взаємодії між оброблюваною смугою та індуктором з феромагнітним осердем порівняно з беззалізними виконаннями.

Висновки. Використання індуктора з феромагнітним осердем дає змогу збільшити за інших рівних умов силову взаємодію між оброблюваною смугою та індуктором, підвищити густину індукованих у смузі струмів і за наявності центрального феромагнітного осердя розширити за радіусом область розподілу необхідної густини струму. Таким чином, видається доцільним застосування феромагнітних осердь в індукційних системах для магнітопластичної деформації металів.

Фінансується за рахунок держбюджетної теми «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електрофізичної обробки електропровідних середовищ» (шифр «Бар'єр 2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України 04.07.2017 р., протокол №2. Державний реєстраційний номер теми 0117U007714.

1. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. Москва: МГИУ. 2001. 844 с.
2. Васильев М.А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. Обзор. Успехи физики металлов. 2007. Т. 8. С. 65–105.
3. Comsol multiphysics. <http://www.comsol.com/> (дата звернення: 10.07.2019)
4. Постников И.М. Проектирование электрических машин. Киев: Гос. Изд. Тех. Лит. УССР. 1962. 736 с.
5. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 2. Москва-Ленинград: Энергия. 1966. 407 с.

УДК 621.3:539.3

ТОРЦЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ИНДУКТОР С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОГО ПРОКАТА МЕТАЛЛОВ**А.П. Ращепкин**, докт. техн. наукИнститут электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Разработан метод анализа электромагнитных процессов в торцевом цилиндрическом индукторе с ферромагнитным сердечником для бесконтактного возбуждения в обрабатываемом металле импульсов тока высокой плотности применительно к использованию электропластического эффекта в специальных методах пластической деформации, основанных на дополнительном воздействии на материал током высокой плотности. Определение электрических параметров индуктора выполнено компьютерным моделированием с использованием метода конечных элементов. Возбуждение импульса тока в индукторе осуществлялось путем разряда конденсатора с использованием управляемого тиристора и при наличии шунтирующего конденсатор диода. Нестационарные, нелинейные электромагнитные процессы разряда в цепи рассмотрены с использованием известных в теоретической электротехнике зависимостей путем численного решения нелинейных уравнений, а распределение плотности тока в металле – методом конечных элементов. Библ. 5, рис. 8.

Ключевые слова: электропластическая деформация, нелинейные и нестационарные электроразрядные процессы в индукторе, однополярные импульсы тока.

THRESHOLD CYLINDRICAL INDUCTOR WITH FERROMAGNETIC CORE FOR PULSE CURRENT PROCESSING OF FLAT ROLLING OF METALS**A. P. Rashchepkin**Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

A method is developed for analyzing electromagnetic processes in an end cylindrical inductor with a ferromagnetic core for contactless excitation of high-density current pulses in a processed metal with respect to the use of the electroplastic effect in special methods of plastic deformation based on additional exposure to high-density current. Determination of the electrical parameters of the inductor is performed by computer simulation using the finite element method. The current pulse in the inductor was excited by discharging the capacitor using a controlled thyristor and in the presence of a diode shunt capacitor. Nonstationary, nonlinear electromagnetic discharge processes in the circuit are considered using the known in theoretical electrical engineering dependencies by numerical solution of nonlinear equations, and the current density distribution in the metal by the finite element method. References 5, figures 8.

Key words: electroplastic deformation, nonlinear and non-stationary electric-discharge processes in the inductor, unipolar current pulses.

1. Baranov Yu.V., Troitsky O.A., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. Physical principles of electropulse and electroplastic treatments and new materials. Moskva: MGIU. 2001. 844 p. (Rus)
2. Vasiliev M.A. Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Overview. Successes in the physics of metals. 2007. Vol. 8. Pp. 65–105. (Rus)
3. Comsol multiphysics. <http://www.comsol.com/> (accessed 10.07.2019).
4. Postnikov I.M. Designing of electrical machines. Kiev, 1962. 736 p. (Rus)
5. Neiman L.R., Demirchyan K.S. Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol. 2. Moskva-Leningrad: Energia Publishing House. 1966. 407 p. (Rus)

Надійшла 02.12.2019

Received 02.12.2019