

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ТОНКОСТЕННОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКЕ ПРИ НИЗКИХ ЗНАЧЕНИЯХ РАБОЧИХ ЧАСТОТ

Чаплыгин Е.А.,

Харьковский Национальный автомобильно-дорожный университет

Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, кафедра "Автомобильная электроника"

тел. (057) 700-38-52, email: chaplygin_e_a@mail.ru

Проведено розрахунок характеристики поля, збуджуваного у металі тонкостінної листової заготовки при низьких значеннях робочих частот струмового імпульсу. Встановлено, що збуджується потужна нормальна складова напруженості магнітного поля, розподілення якої не обмежено шириною витка індуктора.

Проведен расчет характеристики поля, возбуждаемого в металле тонкостенной листовой заготовки при низких значениях рабочих частот токового импульса. Установлено, что возбуждается мощная нормальная составляющая напряженности магнитного поля, распределение которой не ограничено шириной витка индуктора.

Электродинамические процессы в индукторных системах с плоскими тонкостенными заготовками представляют практический интерес для магнитно-импульсной обработки металлов при воздействии низкочастотных полей. В данном временном режиме имеет место их интенсивное проникновение сквозь обрабатываемую заготовку и, как следствие, искажение всей картины пространственного распределения вектора напряжённости [1].

Исследованию вихревых токов в проводящих листах, возбуждаемых низкочастотным полем одновиткового индуктора для физической идеализации, в которой заготовка является "абсолютно прозрачной", проведено в работе [2]. Для более полного представления о протекающих электродинамических процессах необходимы также соответствующие оценки компонент вектора магнитной напряжённости.

Цель настоящей работы - расчёт характеристик поля, возбуждаемого в металле тонкостенной листовой заготовки при низких значениях рабочих частот токового импульса в цепи плоского одновиткового индуктора.

Расчётная модель исследуемой системы представлена на рис. 1.

Так же как и в работе [2], принятая модель максимально соответствует реальной конструкции, содержащей одновитковый соленоид, как источник импульсного магнитного поля, и расположенную поверх него тонкостенную листовую заготовку.

В цилиндрической системе координат, связанной с рассматриваемой индукторной системой, перечислим допущения, обеспечивающие математическую строгость в решении задачи.

- Виток индуктора достаточно тонок и "прозрачен" для действующих полей ($\Delta \rightarrow 0$), так что его металл не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы.
- Система обладает аксиальной симметрией, так что

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0 \quad (\varphi - \text{полярный угол}).$$

- Поперечные размеры индукторной системы настолько велики, что в рамках поставленной задачи их можно считать бесконечными.

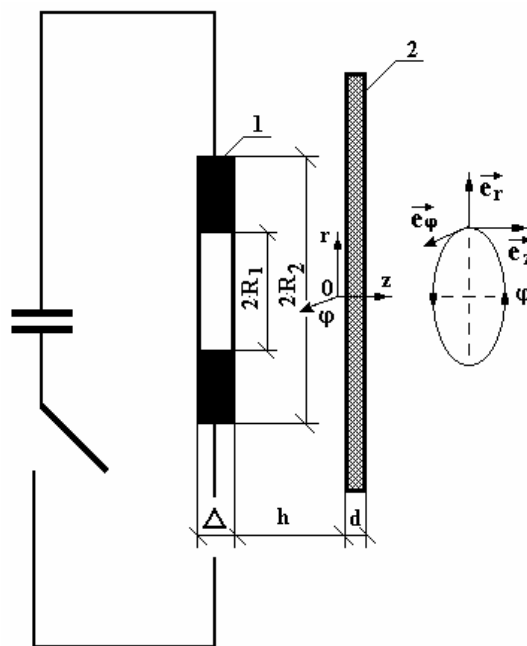


Рис. 1. Схема индукторной системы с одновитковым соленоидом (1) и плоской листовой заготовкой (2),

→ → →

(e_r, e_φ, e_z - направляющие орты цилиндрической системы координат)

- В индукторе течёт ток $I(t)$, временные параметры которого таковы, что в расчётах вполне приемлемо известное условие квазистационарности происходящих электромагнитных процессов, так что $\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1$

(здесь ω - циклическая частота процесса, c - скорость света в вакууме, l - наибольший характерный геометрический размер системы, в данном случае - это поперечный размер, $l \gg 2 \cdot R_2$).

- Листовая заготовка является достаточно тонкостенной с геометрической - $\frac{d}{R_{1,2}} \ll 1$ и электродинамической - $\omega \cdot \tau \ll 1$ точек зрения (в последнем неравенстве: $\tau = \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$, μ_0 - магнитная проницаемость вакуума, γ - удельная электропроводность металла)

заготовки, d - её толщина).

В соответствии с допущением о тонкостенности обрабатываемой заготовки для продольного волнового числа её металла приемлемо оценка:

$$|p \cdot \mu_0 \cdot \gamma| \ll \lambda^2 \text{ и } q(p, \lambda) \approx \lambda. \quad (1)$$

С помощью выражения для напряжённости электрического поля (19), полученного в работе [2], и уравнений Максвелла (2) и (3), найдём компоненты вектора напряжённости магнитного поля.

После выполнения необходимых обратных переходов в интегральных преобразованиях получаем:

а) радиальная (тангенциальная) составляющая напряжённости:

$$H_r(r, z, t) \approx 0.5 \cdot j(t) \cdot \int_0^\infty f(\lambda) \cdot e^{-\lambda(h+z)} \cdot \lambda \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda, \quad (2)$$

б) нормальная (к поверхности листа) составляющая напряжённости:

$$H_z(r, z, t) \approx 0.5 \cdot j(t) \cdot \int_0^\infty f(\lambda) \cdot e^{-\lambda(h+z)} \cdot \lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) d\lambda, \quad (3)$$

где $j(t)$ - плотность тока в индукторе, $j(t) = j_m \cdot \varphi(t)$, j_m - амплитуда, $\varphi(t)$ - временная зависимость,

$f(\lambda) = \int_0^\infty f(r) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot r \cdot dr$, $f(r)$ - функция радиально-

го распределения плотности тока в индукторе, $J_{0,1}(x)$ - функции Бесселя нулевого и первого порядка, соответственно.

Численные оценки пространственного распределение компонент возбуждаемого магнитного поля проведём для витка достаточно малой ширины. В этом случае можно считать, что ток индуктора распределён по радиусу практически равномерно

$$(f(r) \approx \eta(r-R_1) - \eta(r-R_2) \text{ и } f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda r) dr).$$

Конкретные вычисления проводились для индукторной системы, исследованной ранее при анализе процессов возбуждения вихревых токов авторами работы [2]: $h=d=0.0005\text{ м}$, $R_1=0.05\text{ м}$, $R_2=1.25 \cdot R_1 \approx 0.0625\text{ м}$, $\varphi(t) = e^{-\delta_0 \cdot \omega t} \cdot \sin(\omega \cdot t)$, $\delta_0=0.25$, $\omega=2 \cdot \pi \cdot 2.85\text{ кГц}$.

На рис. 2 представлены результаты вычислений компонент напряжённости магнитного поля (нормировка на величину $0.5 \cdot j(t)$) на граничных поверхностях листовой заготовки.

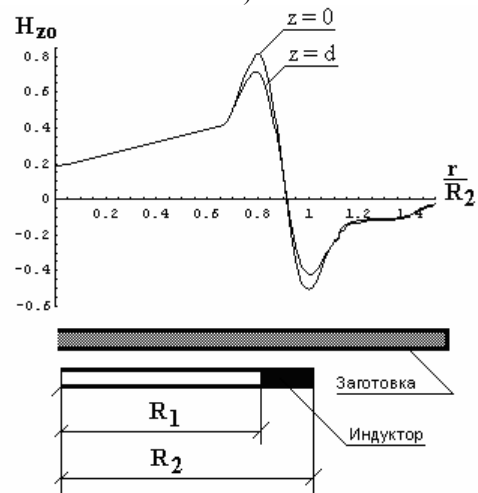
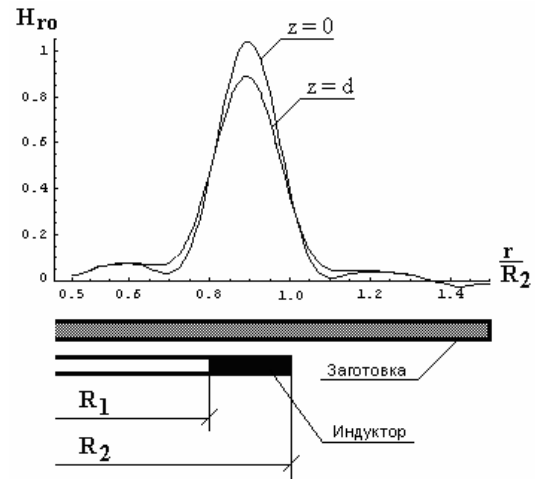


Рис. 2. Радиальные распределения нормальной (а) и радиальной (б) составляющих вектора напряжённости магнитного поля в тонкостенной листовой заготовке

Для наглядности в сопоставлении картин распределения напряжённости магнитного поля в тонкостенной листовой заготовке совместим графики на рис. 2а и рис. 2б.

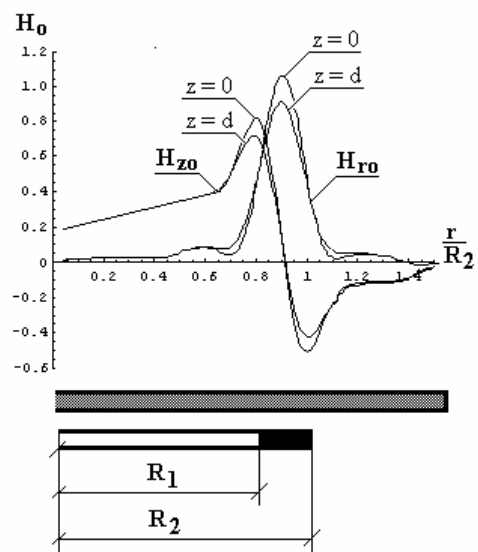


Рис. 3

Наконец, заканчивая графическое иллюстрирование электромагнитных процессов в низкочастотном режиме одновитковой индукторной системы с тонкостенной листовой заготовкой, приведём результаты расчётов, выполненных в абсолютных единицах измерения для амплитуды возбуждающего тока $I_m=100$ кА.

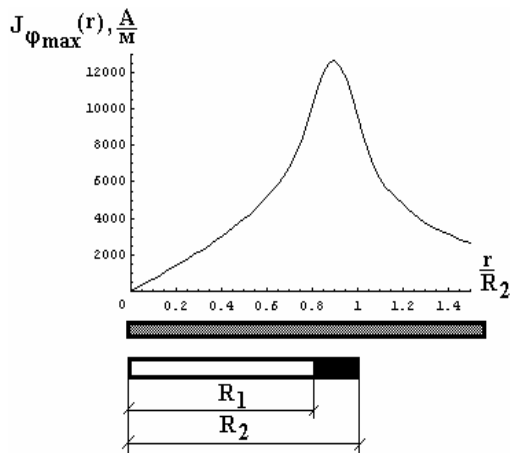
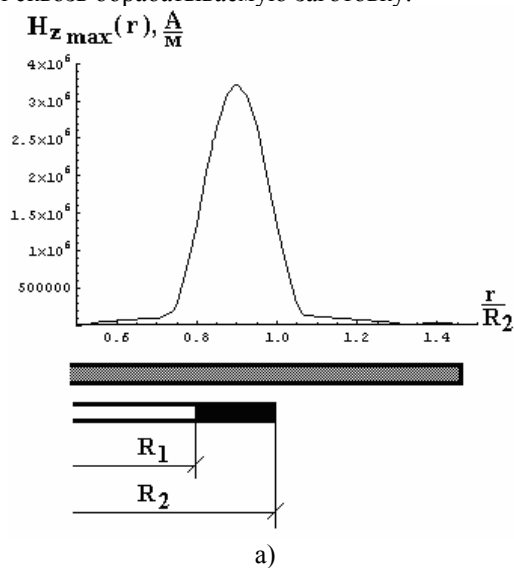


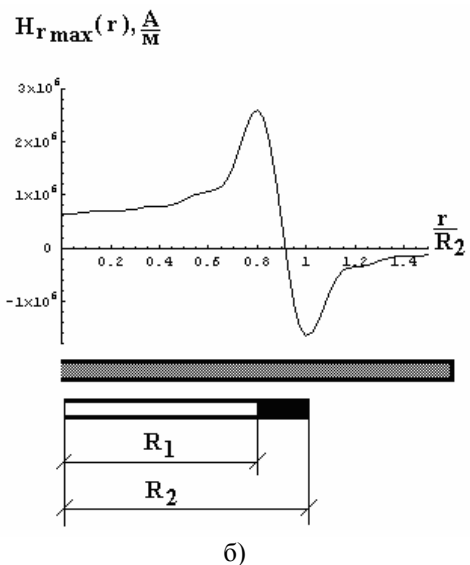
Рис. 4. Радиальное распределение тока в листовой заготовке в максимуме временной амплитуды (расчёт по формулам (25) и (26) в работе [2])

Основные результаты проведенных вычислений сводятся к следующим положениям.

- Радиальное распределение касательной компоненты вектора напряжённости магнитного поля сосредоточено в области витка индуктора так же, как и в случае резкого поверхностного эффекта, когда отсутствует проникновение поля сквозь заготовку.
- В низкочастотном режиме возбуждается мощная нормальная составляющая напряжённости магнитного поля. При резком поверхностном эффекте (достаточно высокие частоты действующих полей) она отсутствует. Появление нормальной компоненты напряжённости обусловлено диффузионными процессами сквозь обрабатываемую заготовку.



а)



б)

Рис. 5. Радиальное распределение тангенциальной (а) и нормальной (б) компонент напряжённости магнитного поля в максимуме временной амплитуды на поверхности листовой заготовки со стороны индуктора

- В отличие от тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля радиальное распределение нормальной составляющей не ограничено шириной витка индуктора. В его центре нормальная компонента имеет достаточно высокое не нулевое значение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 2. Харьков: Изд. МОСТ-Торнадо. 2002. - 288 с.
- [2] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Чаплыгин Е.А., Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах. // Электротехніка і електромеханіка. Харків. 2005, №3, С. 69-73.

Поступила 1.03.2006