

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВНОГО ИНДУКТОРА ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

*У статті проведена порівняльна оцінка параметрів двошарового індуктора, що складається з зовнішнього тонкого провідного шару і масивної підкладки, з параметрами суцільного індуктора.*

*В статье проведена сравнительная оценка параметров двухслойного индуктора, состоящего из внешнего тонкого проводящего слоя и массивной подложки, с параметрами сплошного индуктора.*

При магнитно-импульсной обработке материалов одним из важнейших параметров является электрическая проводимость индуктора. В то же время силы, действующие на деформируемую заготовку согласно третьему закону Ньютона, действуют и на индуктор. Кроме того, процессы, магнитно-импульсной обработки материала кратковременны и протекают при явно выраженном поверхностном эффекте. Следовательно, материал индуктора должен быть хорошим проводником, а сам индуктор – массивным и прочным. Наиболее подходящим материалом для индуктора является медь, которая обладая малым значением удельного электрического сопротивления, является достаточно прочным материалом. Тем не менее, использование медного индуктора нерационально, так как за счет поверхностного эффекта его эффективное сечение будет на порядок меньше фактического сечения.

Цель данной статьи заключается в сравнительной оценке параметров составного индуктора (состоящего из внешнего тонкого проводящего слоя и массивной подложки) с параметрами сплошного индуктора. Вид расчетной модели в цилиндрической системе координат и граничные условия для деформируемой заготовки показаны на рис. 1.

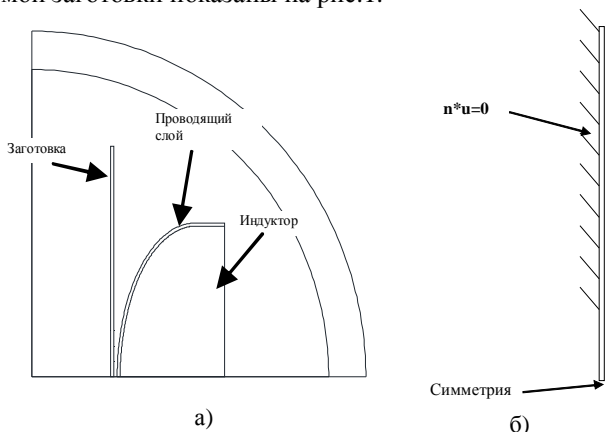


Рис. 1. Расчетная модель, где а) расчетная модель в цилиндрической системе координат; б) граничные условия для деформируемой заготовки

Допущения, принятые для расчетной модели: напряжение разрядного конденсатора приложено к сечению индуктора;

не учитывается сопротивление токоподводящих проводов и переходное контактное сопротивление;

при деформации заготовки не учитывались пластические деформации;

не учитывались потери энергии, и связанные с ними дополнительные деформации заготовки.

Такие допущения не оказывают влияние на сопоставляемые характеристики. Форма индуктора принималась такой же как и в работе [1].

Расчетные уравнения с учетом возможного изменения объема деформируемой заготовки для каждой из под областей определяется уравнениями [2-4]:

$$\sigma_k \cdot \frac{dA_k}{dt} + \text{rot} \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \text{rot} \times A_k) = \left( \sigma_k \cdot \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot r} \right) \cdot e_\varphi, \quad (1)$$

$$(\lambda + G) \cdot \nabla \cdot \text{div}(\mathbf{u}) + G \cdot \nabla^2 \mathbf{u} - \rho \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \mathbf{f} = 0$$

где  $\sigma$  – проводимость;  $A$  – векторный магнитный потенциал;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $U$  – напряжение приложенное к индуктору;  $r$  – радиальная координата;  $e_\varphi$  – орт;  $\mathbf{u}$  – вектор перемещений;  $\rho$  – плотность;  $\mathbf{f}$  – вектор объемных сил.

В (1) записана полная производная, так как движение заготовки оказывает влияние на распределение поля.

Система (1) записана в общем виде, но для каждой из областей уравнение будет соответствовать физическим параметрам области и должна быть дополнена граничными условиями симметричности, а также условиями внешней границы, имитирующей бесконечное пространство. Начальные условия нулевые.

Напряжение, приложенное к индуктору, определяется напряжением на ёмкости:

$$U = U_0 - \frac{1}{C} \cdot \int_i i \cdot dt, \quad (2)$$

где  $U_0$  – начальное напряжение на конденсаторе;  $C$  – ёмкость;  $i$  – ток индуктора.

Силы Лоренца в (1) определялись по формуле:

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{f}$  – сила на единицу объема;  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{B}$  – плотность тока и магнитная индукция в деформируемой заготовке.

Суммарная сила Лоренца определялась по формуле:

$$F_L = \iiint_S \{ \mathbf{j} \times \mathbf{B} \} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot dz. \quad (4)$$

Рассматривались два варианта индуктора: 1) сплошной медный; 2) составной – медь и немагнитная сталь.

Расчеты проводились для следующих параметров.

Геометрия заготовки и индуктора:

– заготовка – алюминиевый цилиндр с толщиной стенки 2 мм;

– индуктор – материал медь в случае сплошного индуктора;

- для составного индуктора – толщина слоя равна 2,0 мм, материал медь;
- материал подложки – немагнитная сталь с проводимостью  $4.032 \cdot 10^6$  [S/m].

Параметры разрядного контура:

- вид разряда – апериодический;
- начальное напряжение на конденсаторе – 400 В;
- емкость 10000 мкФ.

Результаты расчетов показывают, что при используемых материалах и принятых параметрах разрядного контура значения электромагнитных сил, действующих на заготовку одинаковы (рис. 2) и не отличаются ни по величине, ни по форме.

На рис. 3 приведены значения токов для сплошного и составного индукторов.

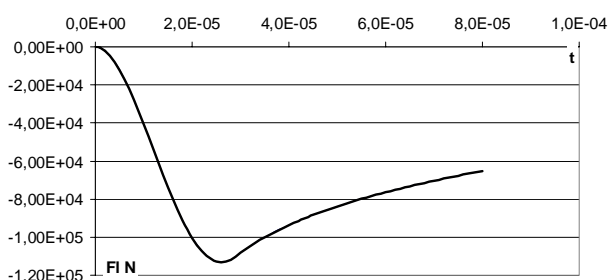


Рис. 2 Значения электромагнитных сил для первого и второго расчетного вариантов

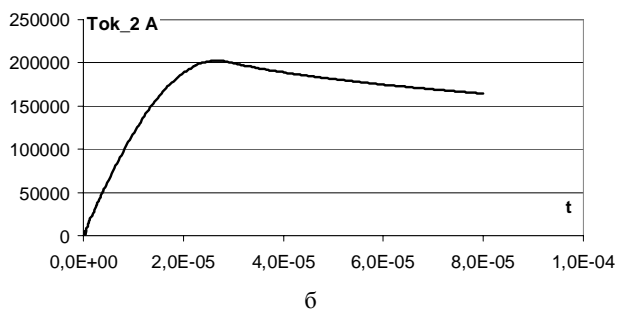
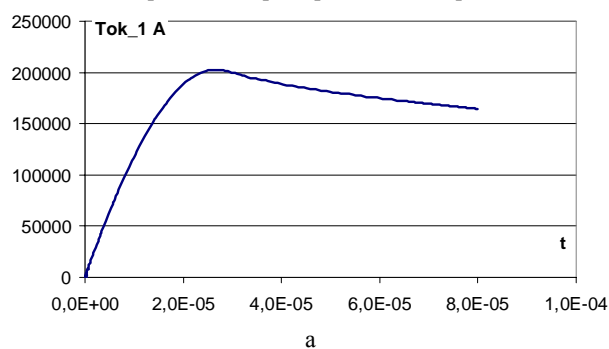


Рис. 3 Значения суммарных токов индуктора: а) сплошной; б) составной

Как следует из рис.3, значения токов в индукторах практически идентичны, что и определяет идентичность электромагнитных сил. Т.е. силы, действующие на заготовку в случае сплошного медного индуктора и индуктора, у которого медный слой имеет толщину 2,0 мм, одинаковы. Это подтверждает положение о том, что в индукторе имеет место явно выраженный поверхностный эффект и основная часть сечения индуктора не оказывает влияние на происходящие процессы.

На рис. 4 показана картина магнитного поля.

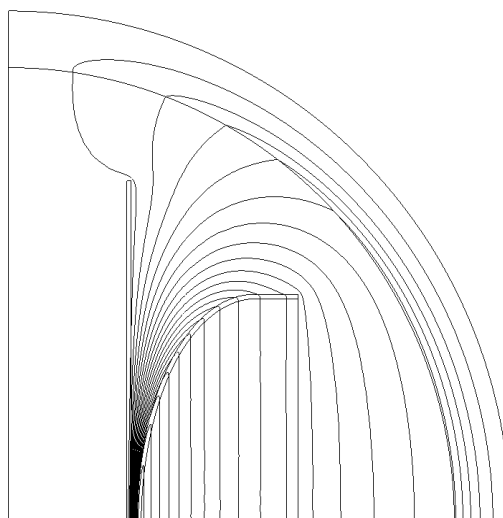


Рис. 4 Картина поля (момент  $t = 3 \cdot 10^{-5}$  с)

На рис. 5 показаны значения токов в составном индукторе.

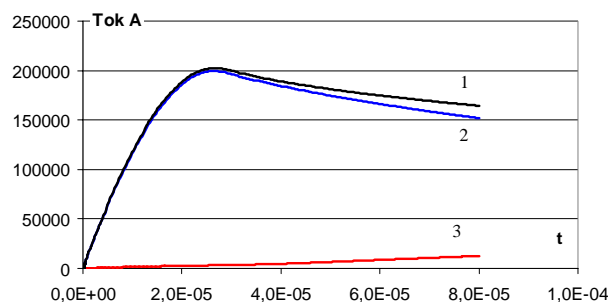


Рис. 5 Значения тока составного индуктора:

1 – ток индуктора; 2 – ток проводящего слоя; 3 – ток подложки

Как следует из рис. 5 ток проводящего слоя много больше тока подложки и именно он определяет силовое воздействие поля на заготовку.

На рис. 6 показано значение максимальной деформации и напряжения в материале, которые так же идентичны.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что за счет поверхностного эффекта в создании электромагнитной силы принимает участие тонкий поверхностный слой материала индуктора, в котором сосредоточено практически все значение тока, как показывают расчеты 92%.

Следовательно, в качестве подложки может быть использован практически любой, даже непроводящий материал.

На рис. 7 приведено распределение плотности тока по толщине слоя в момент  $t = 3 \cdot 10^{-5}$  с (максимальное значение электромагнитной силы Лоренца).

В заключении необходимо отметить, что тепловая удельная мощность, выделяемая в поверхностном слое индуктора и заготовке достаточно велики. На рис. 8 показаны значения удельной мощности в среднем сечении системы, однако, за счет кратковременности процесса температура деформируемой заготовки и индуктора увеличивается незначительно.

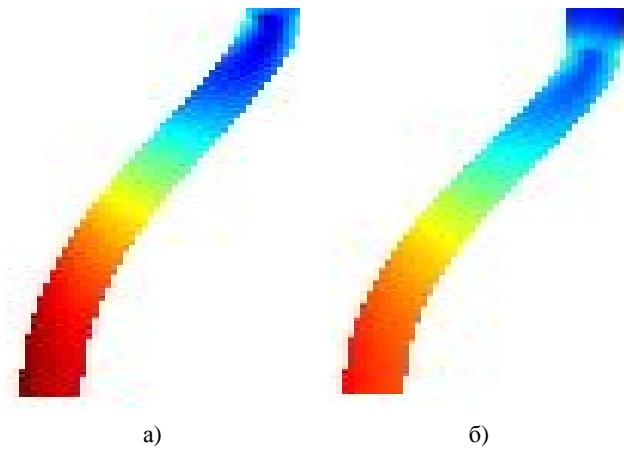


Рис. 6 Деформация и распределение напряжений по Мизесу в материале заготовки: а) сплошной индуктор; б) составной

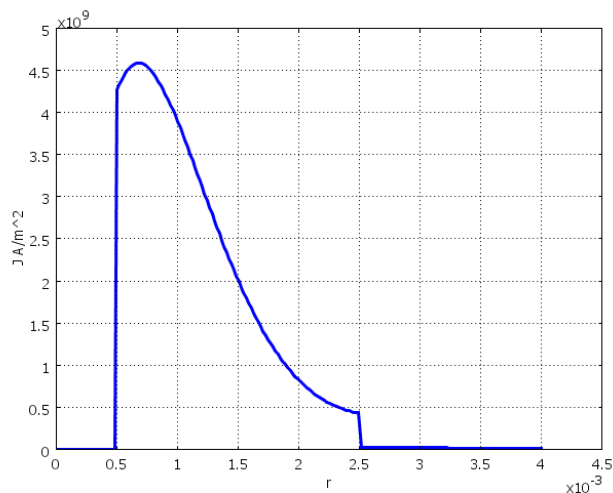


Рис. 7 Распределение плотности тока по толщине проводящего слоя в среднем сечении индуктора

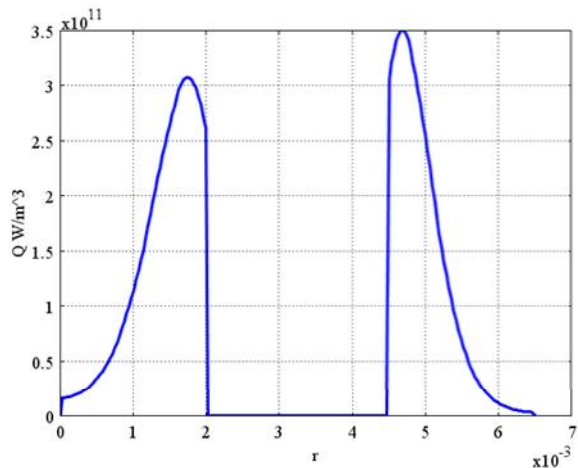


Рис.8 – Значение удельной тепловой мощности, выделяемой в заготовке и индукторе в момент максимума тока

Рассчитанное значение магнитной индукции в пространстве между деталью и индуктором в плоскости  $z=0$  показано на рис. 9.

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- ток, протекающий по тонкому внешнему проводящему слою составляет величину порядка 92% от общего тока системы;

- деформация заготовки практически одинакова в случае целого и составного индуктора;

- тепловая мощность, выделяемая в заготовке достаточно велика, но ее влияние на деформацию заготовки можно не учитывать за счет кратковременности процесса.

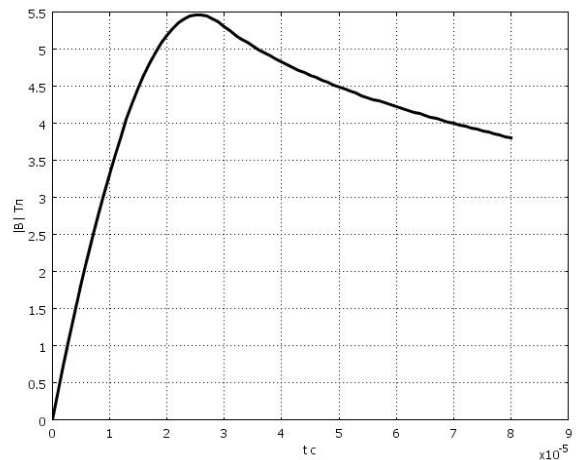


Рис.9 Значения магнитной индукции в системе

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байда Е.И. Динамика деформации объекта при магнитно-импульсной обработке материала // *Электротехника і електромеханіка*. – 2010. – № 6. – С. 56-59.
2. Рамо С., Уиннери Д. Поля и волны в современной радиотехнике. – М. – Л-д.:ОГИЗ. Главная редакция технико-теоретической литературы, 1948. – 631 с.
3. Френкель Я.И. Курс теоретической механики. – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с.
4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. / Под редакцией Шапиро Г.С. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bajda E.I. Dinamika deformacij ob'ekta pri magnitno-impul'snoj obrabotke materiala // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2010. - № 6. - S. 56-59. 2. Ramo S., Uinneri D. Polya i volny v sovremennoj radiotekhnike. - M. - L-d.:OGIZ. Glavnaya redakciya tehniko-teoreticheskoy literatury, 1948. - 631 s. 3. Frenkel' Ya.I. Kurs teoreticheskoy mehaniki. - Leningrad: Tipografiya "Krasnyj pechatnik", 1939. - 386 s. 4. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti: Per. s angl. / Pod redakciej Shapiro G.S. - M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. - 560 s.

Поступила 06.11.2012

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.

Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра "Электрические аппараты"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21

тел. (057) 7076976, e-mail: baida\_kpi@mail.ru

Bayda E.I.

#### Comparative analysis of parameters of a composite coil for magnetic pulse material working.

The article presents evaluation of parameters of a two-layer coil consisting of a thin outer layer and a conductive solid substrate as compared with parameters of a solid inductor.

**Key words** – magnetic pulse metal working, inductor, electromagnetic processes, comparative evaluation.