

УДК 621.318.4

ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В СИСТЕМЕ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ВИТКОМ И ДВУМЯ ИДЕНТИЧНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Ю.В. Батыгин, проф., д.т.н., Е.А. Чаплыгин, доц. к.т.н., Е.Ф. Ерёмкина доц. к.т.н.,
С.А. Шиндерук, ассистент, ХНАДУ

Аннотация. В статье проведены численные оценки пространственного распределения вихревых токов в индукционной индукторной системе с двумя идентичными плоскими металлами и прямоугольным витком из двух ветвей при интенсивном проникновении действующих полей. Показано, что при сближении параллельных токопроводов одинаковое направление возбуждающих токов в ветвях по сравнению с противоположным обеспечивает увеличение сил притяжения в ~ 3 раза.

Ключевые слова: прямоугольный индуктор, одновитковый индуктор, низкочастотное поле, массивный проводник, вихревые токи.

ЧИСЕЛЬНІ ОЦІНКИ РОЗПОДІЛУ ВИХРОВИХ СТРУМІВ У СИСТЕМІ З ПРЯМОКУТНИМ ВИТКОМ І ДВОМА ІДЕНТИЧНИМИ МЕТАЛАМИ

Ю. В. Батигін, проф., д.т.н., Є. О. Чаплигін, доц. к.т.н., О. Ф. Єрьоміна доц. к.т.н.,
С. О. Шиндерук, асистент, ХНАДУ

Анотація. У статті проведено чисельні оцінки просторового розподілу вихрових струмів в індукційній індукторній системі з двома ідентичними плоскими металами і прямокутним витком з двох гілок при інтенсивному проникненні діючих полів. Показано, що при зближенні паралельних струмопроводів однаковий напрямок збуджуючих струмів в гілках порівняно з протилежним забезпечує збільшення сил притягання у ~ 3 рази.

Ключові слова: прямокутний індуктор, одновитковий індуктор, низькочастотне поле, масивний провідник, вихрові струми.

NUMERICAL ESTIMATES OF DISTRIBUTION OF EDDY CURRENTS IN THE SYSTEM WITH A RECTANGULAR COIL AND TWO IDENTICAL METALS

Yu.V. Batygin, professor, dr. eng. sc., E.A. Chaplygin, assistant professor, cand. eng. sc.,
O.F. Yeryomina, assistant professor, cand. eng. sc., S.A. Shinderuk, Assistant, KhNAHU

Abstract. The numerical estimates of a spatial distribution of the eddy currents in induction inductor system with two identical flat metals and a rectangular coil consisted two branches with intensive penetration of existing fields were done in article. The same direction of the exciting currents in the branches compared to the opposite provides an increase of attractive forces in ~ 3 times when the parallel conductors were approaching has been shown.

Key words: rectangular coil, single-turn inductor, low frequency field, solid conductor, eddy currents.

Введение

Возбуждение вихревых токов в системе инструмент-заготовка определяет действенность магнитно-импульсных технологий, [1].

В том случае, когда рабочим режимом является режим резкого поверхностного эффекта, напряжённость внешнего магнитного поля и плотность индуцированного тока на его поверхности будут равны между собой, и магнитное давление на объект обработки будет

пропорционально квадрату плотности вихревых токов [2].

Авторами работы [3] в приближении резкого поверхностного эффекта решена трёхмерная электродинамическая задача о возбуждении индукторной системы высокочастотным полем. Полученные выражения для вихревых токов позволяют провести численные оценки особенностей электромагнитных процессов с учётом неоднородности возбуждающего поля.

Создание действенных индукторных систем – инструментов магнитно-импульсных технологий требует представлений о характере происходящих электродинамических процессов.

Анализ публикаций

Расчеты круговых витков над поверхностью металлической заготовки и расчеты других конструктивных решений приведено в работах авторов [4, 5].

Для проведения численных оценок полей создаваемых прямоугольными индукторами запишем аналитические зависимости в конкретных наиболее интересных случаях из работы [6].

Цель и постановка задачи

Цель настоящего рассмотрения – численные оценки пространственного распределения вихревых токов в индукционной индукторной системе с двумя идентичными плоскими металлами и прямоугольным витком из двух ветвей при интенсивном проникновении действующих полей.

Численные оценки

Многочисленные расчеты круговых витков над поверхностью металлической заготовки приведено в работах авторов [4, 5].

Для проведения численных оценок полей создаваемых прямоугольными индукторами запишем аналитические зависимости в конкретных наиболее интересных случаях из работы [6].

Расчетная модель приведена на рис 1.

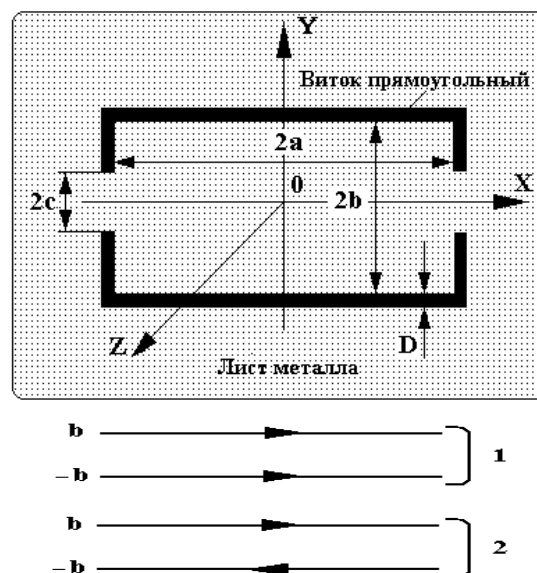


Рис. 1. Расчетная модель

Токи в ветвях прямоугольного витка равны и направлены одинаково, позиция 2 Рис. 1, $j_1 = j_2 = j$.

После выполнения необходимых тождественных преобразований получаем следующие выражения для компонент вектора индукцированного тока.

$$J_y^{omni}(x, y) = \frac{J_y(t, x, y)}{J_m} = - \left(\frac{dj(t)}{dt} \frac{\tau}{2d^2} \right) \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\alpha A(\alpha, \beta)}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} e^{-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot h} \times (1 - e^{-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot d}) \sin(\alpha x) \cos(\beta y) d\alpha d\beta, \quad (1)$$

где $A(\alpha, \beta) = \frac{8}{\pi^2} \cdot j \times$

$$\times \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \sin\left(\alpha \left(a + \frac{D}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\beta \left(b + \frac{D}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\beta \cdot \frac{D}{2}\right) + \frac{2}{\beta} \cdot \cos\left(\beta \cdot \frac{(b + D + c)}{2}\right) \cdot \sin\left(\beta \cdot \frac{(b + D - c)}{2}\right) \times \sin\left(\alpha \cdot \left(a + \frac{D}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{D}{2}\right) \right].$$

$$J_x^{omni}(x, y) = \frac{J_x(t, x, y)}{J_m} = \left(\frac{dj(t)}{dt} \frac{\tau}{2d^2} \right) \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\beta A(\alpha, \beta)}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} e^{-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot h} \times$$

$$\left(1 - e^{-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot d}\right) \cos(\alpha x) \sin(\beta y) d\alpha d\beta. \quad (2)$$

Токи в ветвях прямоугольного витка равны, но направлены противоположно, позиция 1 рис.1, $j_1 = -j_2 = j$.

Аналогично предыдущему, после необходимых тождественных преобразований, приходим к следующим зависимостям.

Запишем с нормировкой на амплитудные множители перед интегралами (с учётом размерности). Для удобства в дальнейших оценках положим, что, $\left|\frac{dj(t)}{dt} \cdot \tau\right| \leq \omega \cdot \tau$. Так же как и ранее, раскроем q в терминах переменных интегрирования – α, β .

$$J_y^{omni}(x, y) = \frac{J_y(t, x, y)}{j_m} = -\left(\frac{dj(t)}{dt} \frac{\tau}{2d^2}\right) \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\alpha B(\alpha, \beta)}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} e^{-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot h} \times \left(1 - e^{-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot d}\right) \sin(\alpha x) \sin(\beta y) d\alpha d\beta, \quad (3)$$

где $B(\alpha, \beta) = \frac{8}{\pi^2} j \left[\frac{2}{\beta} \sin\left(\beta \frac{(b+D+c)}{2}\right) \times \sin\left(\beta \frac{(b+D-c)}{2}\right) \sin\left(\alpha \left(a + \frac{D}{2}\right)\right) \sin\left(\alpha \frac{D}{2}\right) - \frac{1}{\alpha} \cdot \sin(\alpha \cdot (\alpha + d)) \times \cos\left(\beta \cdot \left(b + \frac{d}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\beta \cdot \frac{d}{2}\right) \right]$.

$$J_x^{omni}(x, y) = \frac{J_x(t, x, y)}{j_m} = -\left(\frac{dj(t)}{dt} \frac{\tau}{2d^2}\right) \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\beta B(\alpha, \beta)}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} e^{-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot h} \times \left(1 - e^{-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot d}\right) \cos(\alpha x) \cos(\beta y) d\alpha d\beta. \quad (4)$$

Силы взаимного притяжения тонкостенных листовых металлов

Простейшую оценку сил взаимного притяжения в индукционных индукторных системах, соответствующих математической мо-

дели рис. 1 можно выполнить с помощью закона Ампера. В соответствии с ним, сила взаимодействия проводников с одинаковыми токами, протекающими по линейным проводникам одной длины, с точностью до множителя системы единиц измерения пропорциональна квадрату тока, помноженному на отношение длины проводников к расстоянию между ними.

Линейные составляющие индуцированных токов J_y^{omni}, J_x^{omni} , нормированные на максимум, определяются выражениями либо (1), (2), либо (3), (4) в зависимости от способа подключения ветвей прямоугольного витка к источнику мощности.

Силы притяжения согласно закону Ампера будут описываться соотношением:

а) взаимодействие x – компонент индуцированных токов во внутренней области прямоугольного витка:

$$F_x(x, y) = J_m^2 \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{a}{h} \cdot J_x^2(x, y). \quad (5)$$

б) взаимодействие y – компонент индуцированных токов во внутренней области прямоугольного витка:

$$F_y(x, y) = J_m^2 \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{b}{h} \cdot J_y^2(x, y). \quad (6)$$

в) суммарная сила притяжения во внутренней области прямоугольного витка с нормировкой на максимум:

$$F_{attr}^{omni}(x, y) = \frac{(F_x(x, y) + F_y(x, y))}{\left(J_m^2 \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{(a+b)}{h}\right)} = J^2(x, y), \quad (7)$$

где $J^2(x, y) = J_y^2(x, y) + J_x^2(x, y)$ – квадрат полного индуцированного тока.

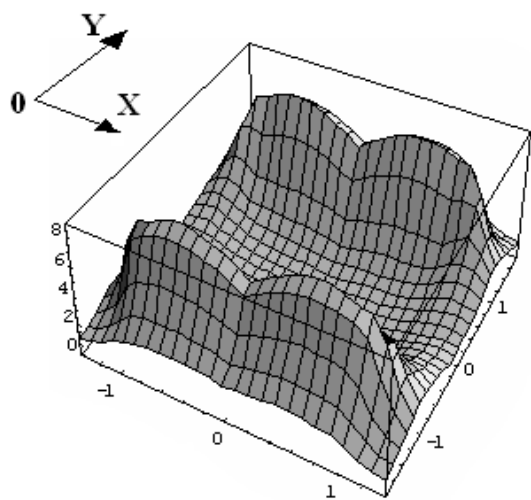
В вычислениях примем те же данные, что и в случае системы – «прямоугольный виток из двух ветвей над тонкостенным листовым металлом».

Вариант №1: $a = 0,05$ м, $b = c = 0,025$ м, $D = 0,01$ м, $h = 0,0025$ м, $d = 0,001$ м, $\omega \cdot \tau \approx 0,03$ (соответствует, например, частоте

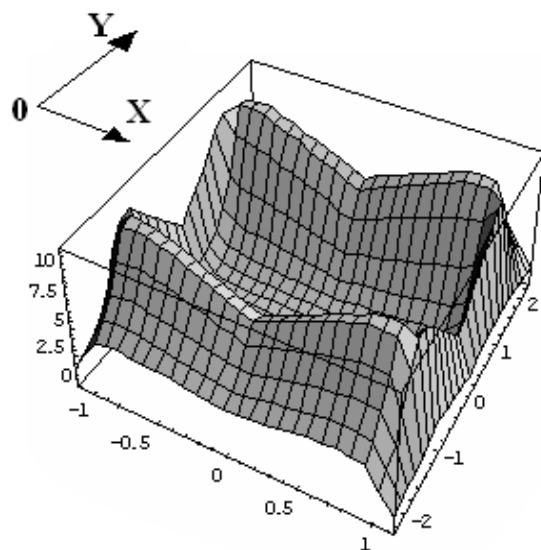
1 кГц и стали $c\gamma = 0,4 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$).

Вариант №2: $a = 0,15$ м, $b = 0,015$, $c = 0,0025$ м (изоляция между ветвями сокращён до практически реального минимума).

Расчёты проведены для одинаковых по амплитуде токов в ветвях индуктора: $j_1 = j_2 = j$ (позиция 2 рис. 1) и $j_1 = -j_2 = j$ (позиция 1 рис. 1).



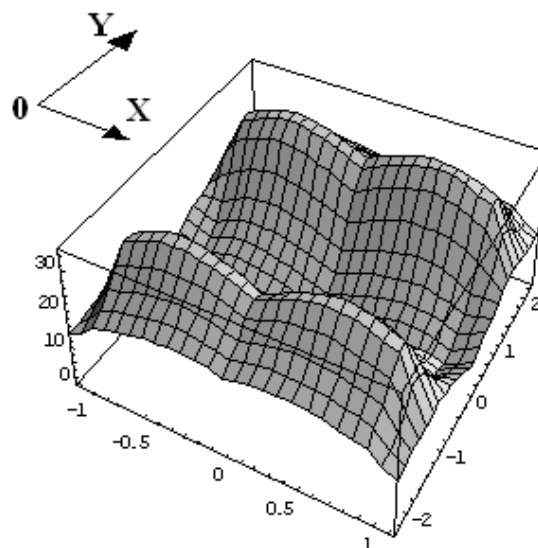
а)



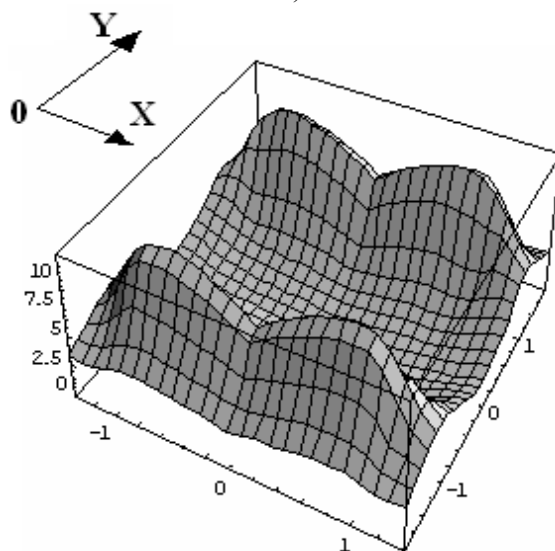
б)

а – конструктивный вариант №1,
б – конструктивный вариант №2

Рис. 2. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения сил притяжения, возбуждаемых полем витка с противоположно направленными токами в ветвях



а)



б)

а – конструктивный вариант №1,
б – конструктивный вариант №2

Рис. 3. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения сил притяжения, возбуждаемых полем витка с одинаково направленными токами в ветвях

В заключение приведём оценки абсолютных величин сил притяжения.

Амплитудный множитель силы – $F_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot j_m$, где плотность возбуждающего тока – $j_m = \frac{I_m}{d}$, а I_m – амплитуда тока [А], d – ширина токопровода [м].

Так, для принятой ширины токопроводов и амплитуде возбуждающего тока $I_m = 10$ кА

получаем, что $F = 0,2 \text{ МПа} = 2 \text{ Атм}$. Если ориентироваться на зависимости для относительной величины то абсолютная величина развиваемого силового воздействия будет составлять $\sim 60 \text{ Атм}$. Естественно, при увеличении возбуждающего тока имеет место квадратичный рост возбуждаемого усилия.

Выводы

Проведенные вычисления показали:

1. Конструкция индукционной индукторной системы с прямоугольным витком из двух отдельных ветвей обладает обширными возможностями с точки зрения эффективности силового воздействия на обрабатываемый объект.
2. Подключение к источнику мощности, при котором токи в ветвях направлены одинаково, выгодно реализует суперпозицию однополярных сигналов.
3. При достаточно большом расстоянии между параллельными токопроводами (вариант №1) одинаковое направление возбуждающих токов в ветвях по сравнению с противоположным обеспечивает увеличение сил притяжения в ~ 1.35 раз.
4. При сближении параллельных токопроводов (вариант №2) одинаковое направление возбуждающих токов в ветвях по сравнению с противоположным обеспечивает увеличение сил притяжения в ~ 3 раза.

Литература

1. Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хищенко Л. Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю. В. – Харьков: изд. МОСТ-Торнадо. 2003. – 284 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред. – М: Наука. 1982. – 620 с.
3. Шнейерсон Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М: Энергоатомиздат, 1992. – 423 с.
4. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov, Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2013. № 213 (3), pp. 444–452.
5. Батыгин Ю. В. Экспериментальные исследования индукторной системы со спаренными токопроводами для штамповки печатных плат / Ю. В. Батыгин, Л. Д. Горкин, В. И. Лавинский и др. // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - Вып. №56. - С. 3-8.
6. Батыгин Ю. В., Головащенко С. Ф., Чаплыгин Е. А. Магнитно-импульсное притяжение немагнитных металлов. // Электричество. – М: 2014. – №2. – с. 40-52.

Рецензент: А.В. Гнатов, д.т.н., профессор ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 3 июня 2016 г.