

УДК 621.318

С. А. ШИНДЕРУК, асп. ХНАДУ, Харьков

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ В НИЗКОЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ ПОЛЕЙ**

В статье проведено исследование электромагнитных процессов в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки – индукционной индукторной системе при работе в низкочастотном режиме действующих полей. Получены аналитические зависимости для расчета линейной плотности тока, индуцированного в листовых металлах вспомогательного экрана и заготовки рассматриваемого инструмента. Построены графические зависимости радиального распределения индуцированных токов.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная рихтовка, индукторная система, электромагнитные процессы, тонкостенная листовая заготовка, индуцированные токи.

**Введение.** Индукционные индукторные системы – универсальные инструменты магнитно-импульсной рихтовки впервые были предложены и описаны авторами работы [1]. Их первоначальное назначение состояло в создании сил магнитно-импульсного притяжения немагнитных металлов. Принцип действия был основан на взаимодействии проводников с одинаково направленными токами (закон Ампера). Таковыми являются собственно объект обработки – тонкий металлический лист и дополнительный конструктивный элемент индукторной системы – проводящий вспомогательный экран. Исходя из общих физических соображений, очевидно, что в индукционной индукторной системе с ферромагнитными элементами помимо сил притяжения, обусловленных законом Ампера, обрабатываемая заготовка будет испытывать также и притяжение, обусловленное магнитными свойствами её металла [2, 3].

Во-первых, отмеченное обстоятельство, должно существенно повысить силовую действенность индукционных индукторных систем при обработке ферромагнетиков. Во-вторых, возможность возбуждения сил различной физической природы позволяет говорить об универсальности индукционных индукторных систем, как инструментов для деформирования магнитных и немагнитных металлов [4].

**Анализ основных достижений и литературы.** Электромагнитные процессы в индукционных индукторных системах с вспомогательным экраном и листовой заготовкой из нержавеющей стали были исследованы авторами работ [2, 5]. Очевидно, что системы с ферромагнитными составляющими представляют не меньший интерес в практике создания действенных инструментов для выполнения производственных операций, где требуется притяжение заданных участков листовых металлов.

Наиболее простой конструктивно и достаточно эффективной представляется индукционная индукторная система с идентичными тонкостенными листовыми экраном и заготовкой [3]. Геометрическая и электродинамическая симметрия такой конструкции инструмента должна обеспечить квадратичную зависимость его силовых характеристик от параметров тока, возбуждающего систему.

**Постановка задачи. Цель исследования** – исследование электромагнитных процессов в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки – индукционной индукторной системе при работе в низкочастотном режиме действующих полей.

**Результаты исследований.** Для исследования электромагнитных процессов в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки зададимся расчётной

© С. А. Шиндерук, 2013

моделью в цилиндрической системе координат, рис. 1.

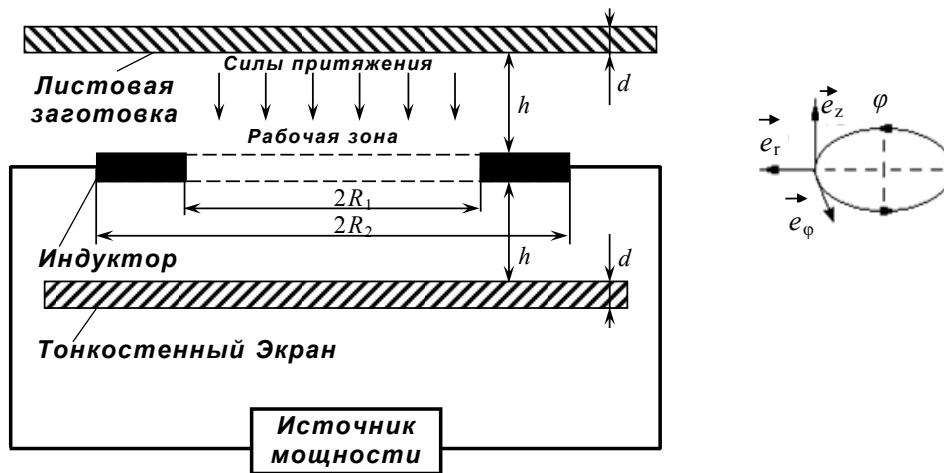


Рисунок 1 – Расчётная модель универсального инструмента магнитно-импульсной рихтовки

При решении примем допущения, аналогичные публикации [3].

В соответствии с расчётной моделью (рис. 1) составляются уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ( $E_\varphi \neq 0, H_{r,z} \neq 0$ ).

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

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;

$$E_\varphi(p,r,z) = L\{E_\varphi(t,r,z)\}; \quad H_{r,z}(p,r,z) = L\{H_{r,z}(t,r,z)\};$$

$$j_\varphi(p,r,z) = L\{j_\varphi(t,r,z)\}.$$

Обратимся к физической идеализации, низкочастотного режима, когда листовые металлы прозрачны для действующих полей [1, 2, 6, 7]:

$$\omega \cdot \tau \ll 1 \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота возбуждающего сигнала;

$\tau = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$  – характерное время диффузии поля в магнитный проводящий слой;

$\gamma$  – удельная электропроводность;

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость.

Заметим, что данная идеализация представляется весьма интересной именно для практики, несмотря на невозможность её строгой реализации. В первую очередь она интересна тем, что позволяет получить простые и наглядные математические иллюстрации протекающих электродинамических процессов и выработать ориентиры, к которым следует стремиться при создании реальных индукторных систем для

магнитно-импульсного притяжения металлов с разными электрофизическими свойствами.

Решая составленные уравнения Максвелла (1) известными математическими методами [2, 6, 7], во избежание громоздкости в изложении, опустим промежуточные выкладки, и запишем окончательное выражение для напряжённости электромагнитного поля.

Выполнение неравенства (2) допускает упрощение зависимости для продольного волнового числа в металле  $q(p, \lambda)$ .

$$|p \cdot \mu \cdot \gamma| \ll \lambda^2 \Rightarrow q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p \cdot \mu \cdot \gamma} \approx \lambda^2. \quad (3)$$

С учётом (3) выражения для компонент вектора напряжённости электромагнитного поля, возбуждаемого в листовых металлах, принимают вид:

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, r, \zeta) \approx \frac{(\mu_r \cdot \mu_0)}{2} \cdot (p \cdot j(p)) \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot J_1(\lambda r) \cdot \frac{(\mu_r \cdot sh(\lambda \cdot (\zeta - d)) - ch(\lambda \cdot (\zeta - d)))}{sh(\lambda d) \cdot [\mu_r^2 \cdot sh(\lambda h) + ch(\lambda h)] + \mu_r \cdot e^{\lambda h} \cdot ch(\lambda d)} \cdot d\lambda. \quad (4)$$

$$H_r^{(2)}(p, r, \zeta) = \frac{j(p)}{2} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot \lambda \cdot J_1(\lambda r) \cdot \frac{(\mu_r \cdot ch(\lambda \cdot (\zeta - d)) - sh(\lambda \cdot (\zeta - d)))}{sh(\lambda d) \cdot [\mu_r^2 \cdot sh(\lambda h) + ch(\lambda h)] + \mu_r \cdot e^{\lambda h} \cdot ch(\lambda d)} \cdot d\lambda. \quad (5)$$

$$H_z^{(2)}(p, r, \zeta) = -\frac{j(p)}{2} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot \lambda \cdot J_0(\lambda r) \cdot \frac{(\mu_r \cdot sh(\lambda \cdot (\zeta - d)) - ch(\lambda \cdot (\zeta - d)))}{sh(\lambda d) \cdot [\mu_r^2 \cdot sh(\lambda h) + ch(\lambda h)] + \mu_r \cdot e^{\lambda h} \cdot ch(\lambda d)} \cdot d\lambda. \quad (6)$$

где  $J_1(\lambda r)$ ,  $J_0(\lambda r)$  – функции Бесселя первого и второго порядка соответственно;

$j(p)$  – изображение плотности тока;

$$f(\lambda) = \int_0^{\infty} f(r) \cdot J_1(\lambda r) \cdot r \cdot dr.$$

Выражение (4) помножим на удельную электропроводность металла –  $\gamma$  и проинтегрируем по переменной  $\zeta \in [0, d]$ .

После обратного преобразования Лапласа и выполнения необходимых тождественных преобразований находим линейную плотность тока, индуцированного в листовых металлах вспомогательного экрана и заготовки.

$$J_{\varphi}(\varphi, r) = \frac{(\mu_r \cdot \mu_0 \cdot \gamma)}{2} \cdot j_m \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda) \cdot J_1(\lambda r)}{\lambda} \cdot d\lambda.$$

$$\frac{(\mu_r \cdot (1 - ch(\lambda d)) - sh(\lambda d))}{sh(\lambda d) \cdot [\mu_r^2 \cdot sh(\lambda h) + ch(\lambda h)] + \mu_r \cdot e^{\lambda h} \cdot ch(\lambda d)} \cdot d\lambda, \quad (7)$$

где  $j_m$  и  $j(t)$  – амплитуда и временная зависимость линейной плотности тока в индукторе.

**Результаты исследований.** Достоверность полученных расчетных соотношений подтверждается предельными переходами к хорошо известным состояниям электродинамических характеристик, описанных в [2, 8].

Проанализируем полученные результаты.

Пусть  $\mu_r = 1$ . Из выражения (7) получаем, что

$$J_\varphi(\varphi, r) \approx -\frac{\mu_0 \cdot \gamma}{2} \cdot j_m \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^\infty f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (8)$$

Интересно отметить, что результат (8) полностью совпадает с аналогичной зависимостью для индуцированного тока в системе из кругового витка и одиночного проводящего немагнитного тонкостенного листа, полученной в [8].

Физически, это совпадение легко объяснимо. Как в случае индуктор – листовой металл [8], так и в рассматриваемом случае листовой металл – индуктор – листовой металл, имеет место интенсивное проникновение, и листовые металлы прозрачны для действующих полей. Их влияние на протекающие электромагнитные процессы несущественно, поэтому и индуцированные токи одинаковы.

Из выражений (5), (6) после перехода в пространство оригиналов находим соотношения для  $r$  – и  $z$  – компонент напряжённости магнитного поля.

$$H_r^{(2)}(t, r, \zeta) = \frac{j_m}{2} \cdot j(t) \cdot \int_0^\infty f(\lambda) \cdot e^{-\lambda(h+\zeta)} \cdot \lambda \cdot J_1(\lambda r) \cdot d\lambda. \quad (9)$$

$$H_z^{(2)}(p, r, \zeta) = \frac{j_m}{2} \cdot j(t) \cdot \int_0^\infty f(\lambda) \cdot e^{-\lambda(h+\zeta)} \cdot \lambda \cdot J_0(\lambda r) \cdot d\lambda. \quad (10)$$

Формулы (9), (10) также совпадают аналогами в работе [8].

Основным результатом проведенного анализа полученных результатов для  $\mu_r \rightarrow 1$  является вывод об их достоверности (подтверждается предельным переходом к немагнитным металлам).

Теперь, экран и заготовка – ферромагнитные листовые металлы, пусть  $\mu_r \gg 1$ .

Из формулы (7) находим линейную плотность индуцированного тока.

$$J_\varphi(t, r) \approx -\frac{\mu_0 \cdot \gamma}{2} \cdot j_m \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^\infty \frac{f(\lambda)}{\lambda \cdot sh(\lambda h)} \cdot th\left(\frac{\lambda d}{2}\right) \cdot J_1(\lambda r) \cdot d\lambda. \quad (11)$$

Пусть  $(\lambda \cdot h) \gg 1$ , то есть, листовые ферромагнетики расположены достаточно далеко от индуктора (и соответственно, далеко друг от друга).

Из (11) предельным переходом получаем, что

$$J_\varphi(t, r) \approx -\mu_0 \cdot \gamma \cdot j_m \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^\infty \frac{f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot th\left(\frac{\lambda d}{2}\right) \cdot J_1(\lambda r) \cdot d\lambda. \quad (12)$$

Зависимость (12) совпадает с результатом, полученным в [2, 8] для индукторной системы из соленоида над тонкостенным листовым ферромагнетиком.

Физически, это означает, что при удалении листовых экрана и заготовки их влияние на процессы возбуждения индуцированных токов не существенно. Оно идентично ситуации, когда имеет место один листовой, но ферромагнитный металл.

Опять же, при достаточной тонкостенности экрана и заготовки, когда  $(\lambda \cdot d) \ll 1$ , и достаточной удалённости, когда  $(\lambda \cdot h) \gg 1$ , формула (11) переходит в зависимость (8). Здесь нет влияния ни магнитных свойств, ни листовых металлов вообще на возбуждение индукционной индукторной системы.

Если  $(\lambda \cdot h) \ll 1$ , листовые ферромагнетики расположены достаточно близко к индуктору и друг к другу.

В этом случае из (11) получаем, что

$$J_{\varphi}(t, r) \approx \frac{1}{h} \cdot \left( -\frac{\mu_0 \cdot \gamma}{2} \cdot j_m \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\lambda^2} \cdot th\left(\frac{\lambda d}{2}\right) \cdot J_1(\lambda r) \cdot d\lambda \right). \quad (13)$$

Как видно из (13), при существенной значимости магнитных свойств листовых экрана и заготовки величина индуцированного тока будет обратно пропорциональна расстоянию между ними.

В количественном плане отношение амплитуд индуцированных токов как функция расстояния до витка индуктора для листовых металлов экрана и заготовки в рассмотренных предельных физических ситуациях ( $\mu_r \gg 1$  и  $\mu_r = 1$ ) иллюстрируется кривой на рис. 2.

Вычисления проведены для радиальной координаты в центре витка индуктора –  $r = (R_1 + R_2)/2 \cdot R_2$  при  $R_1 = 0,025$  м,  $R_2 = 0,035$  м,  $h = 0,001$  м,  $d = 0,001$  м,  $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$  1/Ом·м (сталь).

Физически, рост индуцированных токов в рассмотренной конструкции индукторной системы можно объяснить тем, что при больших  $\mu_r$  и малых  $h$  возбуждаемое поле пусть слабо (ведь металлы «прозрачны»), но всё же должно концентрироваться во внутренней полости между листовыми ферромагнетиками.

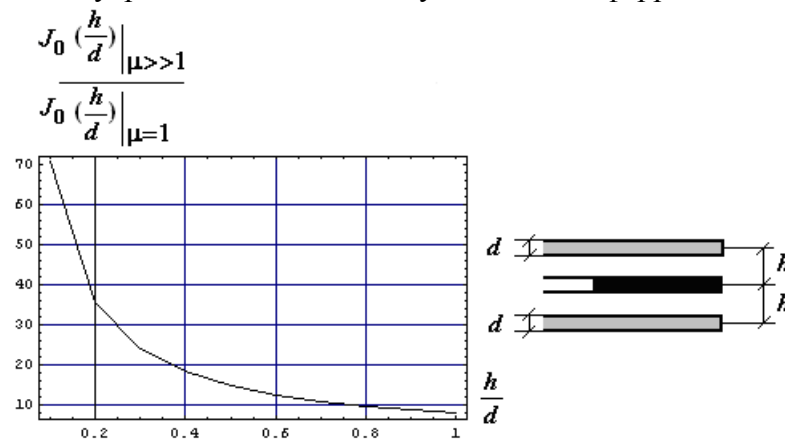


Рисунок 2 – Отношение амплитуд индуцированных токов.

Для систем с одиночным листовым ферромагнетиком величина индуцированных токов не должна зависеть от численного значения магнитной проницаемости металла листа [2]. Физически, этот результат и его отличие от предыдущего вывода можно

объяснить рассеянием (а не концентрацией, как в случае двух ферромагнетиков) энергии возбуждаемого поля в свободном полупространстве.

Практически же, отмеченная особенность в возбуждении индуцированных токов для систем с двумя листовыми ферромагнетиками позволяет ожидать более высокие силовые показатели в сравнении с системами, где листовые металлы не обладают магнитными свойствами.

Графическими зависимостями радиального распределения индуцированных токов на рис. 3 завершается анализ процессов их возбуждения.

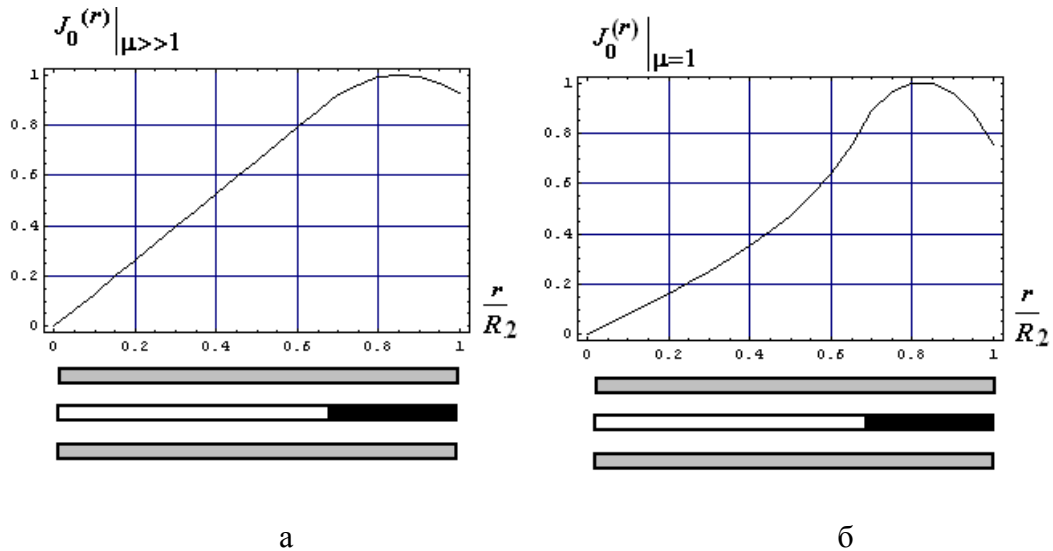


Рисунок 3 – Радиальное распределение амплитуд индуцированных токов: а – ферромагнитные экран и заготовка, б – немагнитные экран и заготовка

**Выводы.** Основные результаты проведенных вычислений сводятся к следующим положениям:

1. Проведено исследование электромагнитных процессов в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки – индукционной индукторной системы при работе в низкочастотном режиме действующих полей.

2. Получены аналитические зависимости для расчета линейной плотности тока, индуцированного в листовых металлах вспомогательного экрана и заготовки рассматриваемого инструмента.

3. Построены графические зависимости радиального распределения индуцированных токов для ферромагнитного и ферромагнитного экрана и заготовки рассматриваемого инструмента.

4. В низкочастотном режиме индукционной индукторной системы с идентичными ферромагнитными конструктивными составляющими за счёт их магнитных свойств возможно повышение эффективности силового взаимодействия вспомогательного экрана и обрабатываемого объекта в целом.

**Список литературы.** 1. Батыгин Ю. В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко // Электротехніка і електромеханіка. – Харків, 2004. – № 2. – С. 80-84. 2. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных

технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / Туренко А. Н., Батыгин Ю. В., Гнатов А. В. ; монография. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 240 с. **3.** Батыгин Ю. В. Электромагнитные процессы в симметричных индукционных системах с идентичными ферромагнитными тонкостенными экраном и листовой заготовкой / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, Щ. В. Арğun [и др.] // Электротехника і електромеханіка. – Х. : НТУ "ХП". – № 4 – С. 50–53. **4.** Пат. 78243 України, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих заготовок індукторною системою з двома прямокутними витками та тонким екраном / Батыгин Ю. В., Гнатов А. В., Чаплыгин С. О., Шиндерук С. О., Щіголева С. О., Сабокар О. С. ; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u 2012 11043 заявл. 24.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5. **5.** Батыгин Ю. В. Цилиндрическая индукционная индукторная система для притяжения тонкостенных листовых металлов / Батыгин Ю. В., Бондаренко А. Ю., Чаплыгин Е. А. // Авиационно-космическая техника и технология. – Х., 2007. – №11 (47), – С.109–117. **6.** Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсное притяжение/отталкивание тонкостенных листовых ферромагнетиков / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов // Электричество. – М., 2012. – № 8. – С. 58–65. **7.** Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications / Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2013. – № 213 (3). – P. 444–452. **8.** Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хищенко Л. Т. – Т. 1.; под ред. проф. Ю. В. Батыгина. – [2-е изд.] – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.

*Поступила в редколлегию 10.05.2013*

УДК 621.318

**Универсальный инструмент магнитно-импульсной рихтовки в низкочастотном режиме действующих полей / С. А. Шиндерук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2013. – № 29 (1002). – С. 86–92. – Бібліогр.: 8 назв.**

У статті проведено дослідження електромагнітних процесів в універсальному інструменті магнітно-імпульсного рихтування - індукційній індукторній системі при роботі в низькочастотному режимі діючих полів. Отримані аналітичні залежності для розрахунку лінійної щільності струму, індукованого в листових металах допоміжного екрану і заготовки даного інструменту. Побудовані графічні залежності радіального розподілу індукованих струмів.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсне рихтування, індукторна система, електромагнітні процеси, тонкостінна листова заготовка, індуквані струми.

Conducted a research of electromagnetic processes in the universal tool of magnetic-pulse straightening - induction inductor the system. It works in the low-frequency regime of effective fields. The analytical dependence received for calculation of the linear current density induced in sheet metals subsidiary of the screen and workpiece of this tool. A graph dependence of radial distribution of induced currents constructed.

**Key words:** magnetic-pulse straightening, inductor system, electromagnetic processes, thin-walled sheet workpiece, induced currents.