

**ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА І РЕМОНТУ ЗАСОБІВ  
ТРАНСПОРТУ. СЕРВІСНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ І ТЕХНІЧНИЙ  
ОГЛЯД АВТОМОБІЛІВ**

УДК 621.318.4

**ОБОСНОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ «ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЫ  
С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ», ВОЗБУЖДАЕМОЙ ВНЕШНИМ  
ПЛОСКИМ КРУГОВЫМ СОЛЕНОИДОМ**

**Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., Е.А. Чаплыгин, доцент, к.т.н.,  
Е.Ф. Еремина, доцент, к.т.н., А.Р. Вакуленко, студент, ХНАДУ**

*Аннотация.* Приведены обоснование и теоретические расчеты работоспособности индукторной системы с притягивающим экраном, а также результаты модельных экспериментов. Показано, что для эффективной работы рассматриваемой системы необходим оптимальный выбор рабочих частот.

*Ключевые слова:* магнитно-импульсная обработка, индукторная система, тонкостенная заготовка, индуцированные токи

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ «ИНДУКТОРНОЇ СИСТЕМИ  
З ЕКРАНОМ, ЩО ПРИТЯГУЄ», ЯКА ЗБУДЖУЄТЬСЯ ЗОВНІШНІМ  
ПЛОСКИМ КРУГОВИМ СОЛЕНОЇДОМ**

**Ю.В. Батигін, професор, д.т.н., Е.А. Чаплигін, доцент, к.т.н.,  
О.Ф. Єрьоміна, доцент, к.т.н., А.Р. Вакуленко, студент, ХНАДУ**

*Анотація.* Наведено обґрунтування і теоретичні розрахунки працездатності індукторної системи з екраном, що притягає, а також результати модельних експериментів. Показано, що для ефективної роботи даної системи необхідний оптимальний вибір робочих частот.

*Ключові слова:* магнітно-імпульсна обробка, індукторна система, тонкостінна заготовка, індуквані струми

**THE SUBSTANTIATION OF THE OPERABILITY OF THE "INDUCTIVE SYSTEM  
WITH A PULL-WAY SCREEN" EXCITED EXTERNAL FLAT CIRCULAR  
SOLENOID**

**Yu.V. Batygin, professor, dr. eng. sc., E.O. Chaplygin, assistant professor, cand. eng. sc.,  
E.F. Yeryomina, assistant professor, cand. eng. sc., A.R. Vakulenko, student, KhNADU**

*Annotation.* Substantiation and theoretical calculations of the operability of an inductor system with an attractive screen are presented, as well as the results of model experiments. It is shown that for the effective operation of the system in question, an optimal choice of operating frequencies is required.

*Keywords:* magnetic-pulse processing, inductor system, thin-walled billet, induced currents

**Введение**

«Индукторная система с притягивающим экраном» (ИСПЭ) оказывается дееспособной даже в отсутствие витка во внутренней полости между экраном и листовой заготовкой, то

есть, при наличии только внешнего источника магнитного поля. Данный вывод позволяет предложить новый вариант её исполнения, а именно, ИСПЭ может включать в качестве источника магнитного поля только плоскую многovitkovую катушку над дополнитель-

ным вспомогательным экраном. В этом случае взаимодействие индуцированных токов в экране и заготовке должно возбудить силы их взаимного притяжения. Следует отметить, что данный вариант ИСПЭ может подключаться к магнитно-импульсной установке без согласующего устройства, поскольку конструктивная составляющая – «многовитковая катушка – вспомогательный экран» уже представляет собой импульсный трансформатор тока (дискового типа).

### Анализ публикаций

Для практики магнитно-импульсной обработки металлов несомненный интерес представляет описанный авторами [1-3] эффект притяжения тонкостенных металлов низкочастотным магнитным полем. Качественное объяснение явления смены отталкивания тонкостенных образцов притяжением при понижении рабочих частот действующих полей предложено в [3]. Магнитно-импульсное притяжение тонкостенных листовых металлов может осуществляться с использованием различных индукторных систем. В [4,5] для этой цели предлагается использовать цилиндрические конструкции, основным достоинством которых является аксиальная симметрия развиваемых сил притяжения. Принцип действия инструментов, описанных в [5-7] позволяет осуществлять притяжение как ферромагнитных, так и неферромагнитных листовых материалов. В данной работе предлагается рассмотреть вариант исполнения индукторной системы с притягивающим экраном и плоской многовитковой катушкой.

### Теоретическое обоснование работоспособности, низкочастотный режим действующих полей

Обоснование дееспособности любой технической идеи предполагает наглядную иллюстрацию принципа её действия с помощью по возможности достаточно простой и очевидной физической модели.

Безусловно, выбранная идеализация должна быть адекватна реальной системе и достоверно отображать её свойства. Последние условия требуют теоретического и экспериментального подтверждения.

Принцип действия ИСПЭ, возбуждаемой внешним источником магнитного поля, по-

ясним с привлечением наиболее иллюстративной физической идеализации, имеющей место при интенсивном проникновении действующих полей.

Из априорных феноменологических соображений следует, что в случае достаточно «прозрачных» экрана и заготовки в металле каждого из них индуцируются токи с временными зависимостями, пропорциональными производной  $\sim \frac{dJ(t)}{dt}$ , где  $J(t)$  – ток индуктора. В свою очередь из закона Ампера следует, что сила притяжения будет прямо пропорциональна квадрату производной  $\sim \left(\frac{dJ(t)}{dt}\right)^2$ . Силы отталкивания, обусловленные взаимодействием индуцированных токов с возбуждаемыми магнитными полями, пропорциональны произведению  $\sim J(t) \cdot \frac{dJ(t)}{dt}$ .

Интеграл по времени действия сил от этого произведения представляет собой их интегральный импульс. Очевидно, что для  $t \in [0; \infty)$  величина этого импульса, определяющего результирующую действенность сил отталкивания, стремится к нулю [5].

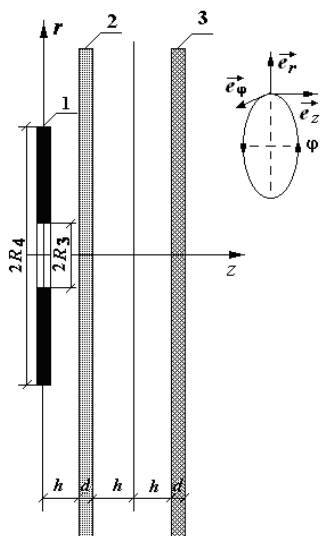
Таким образом, в предложенной «индукторной системе с притягивающим экраном» должны возбуждаться только силы притяжения, силы отталкивания будут отсутствовать.

Следует отметить, что несомненным преимуществом ИСПЭ с многовитковой катушкой, размещённой вне вспомогательного экрана, является также дальнейшее увеличение однородности пространственного распределения возбуждаемых сил притяжения.

В обосновании практической дееспособности предложенного инструмента магнитно-импульсного притяжения ограничимся рассмотрением цилиндрической конструкции индукторной системы с одинаковыми тонкостенными листовыми немагнитными металлами (напомним, что реально, один из них – вспомогательный экран, второй – объект обработки) и плоской многовитковой катушкой, расположенной над поверхностью вспомогательного экрана. Межвитковые расстояния – пренебрежимо малы.

В цилиндрических координатах схематическое изображение предлагаемого инструмента

представлено на рис. 1.



1 – многovitковый индуктор ( $R_3, R_4$  – внутренний и внешний радиусы); 2 – экран ( $d$  – толщина); 3 – заготовка ( $d$  – толщина);  $h$  – расстояние от индуктора до экрана,  $2h$  – расстояние между экраном и листовой заготовкой.

Рис. 1. – Расчётная модель в цилиндрической системе координат ( $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$  – направляющие орты)

Рассматриваемая система работает в низкочастотном режиме действующих полей.

Для проведения численных оценок основных характеристик протекающих процессов воспользуемся ранее полученными выражениями для индуцированных токов [3].

Перепишем их в виде, соответствующем рассматриваемой системе.

В металле вспомогательного экрана возбуждается ток:

$$J_\phi^{(3)}(\psi, r) = -J_m \times \int_0^\infty f(x) \cdot \frac{e^{-x\frac{h}{d}}(1-e^{-x})}{x} J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx, \quad (1)$$

где  $J_m = \left( \frac{I_m \cdot W}{R_4 - R_3} \right) \cdot \frac{\omega \tau}{2} \cdot \frac{dg(\psi)}{d\psi}$  – «условная»

амплитуда индуцированного сигнала,

$I_m$  – амплитуда тока в индукторе,

$W$  – число витков катушки,

$\omega$  – циклическая частота,

$\tau = \mu_0 \gamma d^2$  – характерное время проникновения поля,

$$g(\psi) = e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi),$$

$\psi = \omega \cdot t$  – фаза,  $t$  – время,

$$f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x\frac{R_3}{d}}^{x\frac{R_4}{d}} y \cdot J_1(y) dy.$$

В металле листовой заготовки протекает ток:

$$J_\phi^{(3)}(\psi, r) = -J_m \times \int_0^\infty f(x) \cdot e^{-x\left(\frac{3h}{d}+1\right)} \cdot \frac{(1-e^{-x})}{x} J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx. \quad (2)$$

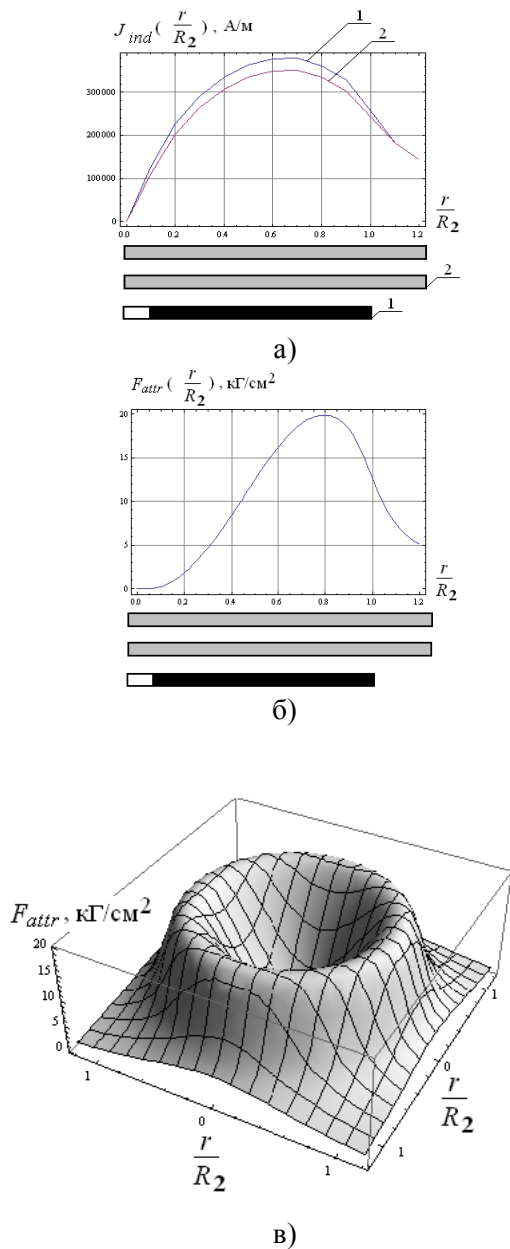
В рассматриваемом низкочастотном режиме, как было ранее указано, интегральная действительность сил отталкивания стремится к нулю. При жёстко фиксированном вспомогательном экране на заготовку будет действовать только сила притяжения. Зависимость для силы притяжения (Ампера) запишем в терминах фазы возбуждающего тока индуктора.

$$F_{attr}(\psi, r) = \mu_0 \cdot J_\phi^{(3)}(\psi, r) \cdot J_\phi^{(3)}(\psi, r) \cdot \frac{r}{(2h)}. \quad (3)$$

Численные оценки проведём для  $I_m=10$  кА,  $W=12$ ,  $\omega=2\pi \cdot 1500$  Гц,  $R_3=0,005$  м,  $R_4=0,05$  м,  $d=0,001$  м,  $h=0,005$  м. Результаты вычислений представлены на рис. 2.

Основным результатом проведенных вычислений является вывод о практической дееспособности «индукторной системы с притягивающим экраном», возбуждаемой низкочастотным полем внешней многovitковой катушки.

При реальных значениях исходных величин амплитуды сил притяжения достигают  $\sim 20$  Атм. Усреднение по площади силового воздействия даёт величину  $\sim 10$  Атм. Следует отметить, что незначительное и вполне реальное для практики увеличение тока индуктора, например, до  $\sim 15$  кА, даёт рост сил притяжения более чем в  $\sim 2$  раза.



а) токи, индуцированные в металле вспомогательного экрана – 1 и листовой заготовки – 2; б) радиальное распределение силы притяжения; в) объёмная эпюра пространственного распределения силы притяжения

Рис. 2. – Пространственные распределения возбуждаемых токов и сил притяжения

### Модельные эксперименты

Численное обоснование работоспособности предложенной конструкции ИСПЭ с внешним источником магнитного поля следует дополнить модельными экспериментами.

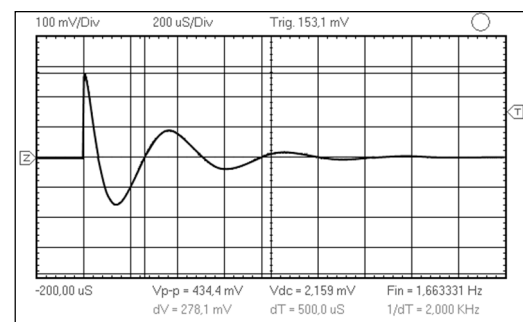
В качестве источника мощности был взят низковольтный генератор токовых импуль-

сов [8]. Источником магнитного поля служил одновитковый индуктор с внутренним и внешним радиусами, соответственно,  $R_1=0,07$  м и  $R_2=0,075$  м, подключённый к генератору через согласующее устройство, обеспечивающее рабочую частоту  $f \approx 2$  кГц [6].

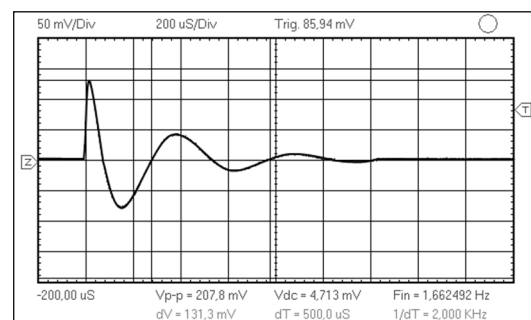
Листовые металлы – образцы из немагнитной стали с удельной электропроводностью  $\gamma=0,4 \cdot 10^7$  1/Ом·м и толщиной  $d=0,001$  м. Расстояние от витка до экрана составляло  $h=0,00015$  м, расстояние между листовыми металлами, соответственно,  $2h=0,0003$  м.

Радиальное распределение индуцированных токов измерялось по методике, подробно описанной авторами научного издания [6]. Согласно цитируемой работе, с двух сторон вдоль диаметра витка в листовые металлы попарно впаивались электроды, сигналы с каждой пары которых подавались на вход осциллографа. Поскольку прямолинейные участки листовых металлов между электродами можно рассматривать как активные сопротивления, измеряемые сигналы будут пропорциональны индуцированному току.

Типичные осциллограммы, иллюстрирующие временные зависимости индуцированных токов –  $j_{ind}(t)$ , даны на рис.3.



а)



б)

а) вспомогательный экран, б) заготовка  
Рис. 3. – Типичные осциллограммы токов, индуцированных в листовых металлах

Их вид для экспоненциально затухающей формы возбуждающего тока –  $j_{coil}(t)$  означает существование дифференциальной связи типа  $j(t) \sim \frac{dj(t)}{dt}$ , что весьма характерно для электромагнитных процессов при интенсивном проникновении действующих полей [4-7].

Результаты измерений в сравнении с расчётными данными приведены на рис. 4.

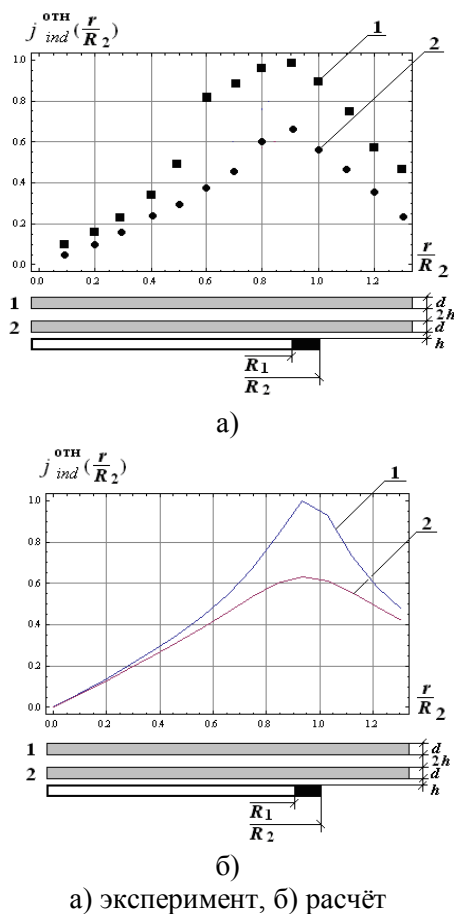


Рис. 4. – Пространственные распределения токов, индуцированных в металле вспомогательного экрана – 1 и листовой заготовки – 2

Говорить о погрешностях в совпадении численных оценок с измеренными аналогами в данном случае не имеет смысла, поскольку формулы для вычислений были получены для «идеализации», где имеет место «абсолютная прозрачность» листовых металлов для действующих полей. Поэтому совпадение или не совпадение теории и эксперимента здесь должна определяться, в первую очередь, тем, насколько реальность адекватна

принятой «идеализации». Но достаточно явное качественное соответствие картин радиального распределения индуцированных токов на рис. 4а и рис. 4б позволяет сделать вывод о достоверности выполненного теоретического обоснования работоспособности предложенного варианта конструкции инструмента для притяжения тонкостенных металлов.

## Выводы

В целом, результаты вычислений и экспериментов свидетельствуют о практической перспективности «индукторных систем с притягивающим экраном» и внешним возбуждением магнитного поля. Тем не менее, для конструирования инструментов данного типа необходимы обязательные оценки в реальном временном режиме действующих полей. Речь идёт о частотном диапазоне, в котором представленная идеализация «абсолютно прозрачных» экрана и заготовки максимально соответствует реальным электромагнитным процессам. Априори, исходя из физических соображений, можно предположить, что с увеличением рабочих частот будут изменяться временные зависимости индуцированных токов. Это обстоятельство повлечёт за собой снижение действенности сил притяжения и рост сил отталкивания.

Так, в случае «прозрачного» экрана и идеально проводящей заготовки последняя должна испытывать превалирующее действие сил отталкивания. В случае идеально проводящего экрана заготовка вообще не должна испытывать никакого силового воздействия. Данные рассуждения подчёркивают значимость правильного выбора рабочих частот для обеспечения не только реальной, но и эффективной действенности ИСПЭ с внешним источником возбуждающего магнитного поля.

## Литература

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов.// Электротехника і електромеханіка. Харків. 2004, №2, с.80-84.
2. Yu.V.Batygin, V.I.Lavinsky, L.T.Khimenko, Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. Proceedings of

- the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P.157-160.
3. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Т.3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями./ Под ред. проф. Ю.В.Батыгина. – Харьков: Изд. ХНАДУ, 2009. – 249 с.
  4. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплигин Е.А., Цилиндрическая индукционная индукторная система для притяжения тонкостенных листовых металлов.//Авиационно-космическая техника и технология. Харьков:2007. №11 (47), с.109-117.
  5. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Аргун Щ.В., Чаплигин С.О., Гопко А.В., Дробинин О.М., Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів одновитковою індукторною системою з тонким екраном. Патент України №70055 (заявл.14.11.2011). Бюл. №10. 25.05.2012.
  6. 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.
  7. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov, Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. //Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2014. – № 214 (2). – pp. 390–401. 621.318.4.
  8. Пат. 73733 України, В21 Д 26/14. Генератор багаторазових уніполярних імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів / Батыгин Ю. В., Гнатов А. В., Аргун Щ. В, Чаплигин С. О., Дзюбенко О. А., Дробинин О. М; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2012 02178 заявл. 24.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. №19.
- Рецензент: А.В. Гнатов, профессор, д.т.н., ХНАДУ
- Статья поступила в редакцию 3 июня 2017 г.