

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ ПРИ ВВЕДЕНИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВИТКА

Стаття присвячена експериментальному дослідженню впливу додаткового кругового витка, введеного у внутрішню область індукторної системи з екраном, що притягає на розподіл індуктованих струмів, а також визначення коефіцієнта трансформації струму у обмотці соленоїда.

Статья посвящена экспериментальному исследованию влияния дополнительного кругового витка, введенного во внутреннюю область индукторной системы с притягивающим экраном, на распределение индуцированных токов в заготовке, а также определению коэффициента трансформации тока в обмотке соленоида.

Постановка проблемы. Магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) в настоящее время получает все большее распространение в металлообрабатывающей промышленности [1]. Кроме классического применения, МИОМ получает распространение в отраслях, которые до недавнего времени использовали классические инструменты для выполнения необходимых производственных операций. К таким операциям относятся магнитно-импульсная рихтовка корпусов самолетов компании Boeing, Electroimpackt, Fluxtronic, а также магнитно-импульсная рихтовка кузовов автомобилей фирмы Beulentechnik AG [2]. На современном этапе технического развития практическое использование энергии импульсных электромагнитных полей открывает большие перспективы для создания и внедрения прогрессивных технологий. Особый интерес представляют системы и устройства, повышающие эффективность работы существующих и создание принципиально новых инструментов для МИОМ [1, 2].

Анализ основных достижений и публикаций. Способ магнитно-импульсного притяжения металлических объектов двухвитковой круговой индукторной системой с тонким экраном предложенный авторами работы [3], представляет интерес для практического исследования процессов проходящих в данных системах. Первоначальное авторское название – индукционно индукторная система (ИИС). В дальнейшем инструменты данного типа получили название – индукторные системы с притягивающим экраном (ИСПЭ).

Теоретическому анализу электромагнитных процессов в индукторных системах с притягивающим экраном посвящены работы [4-5]. В них классическим методом выполнено аналитическое решение соответствующих электродинамических задач, проведены численные оценки, построены наглядные графические зависимости, иллюстрирующие влияние экранов различной физической природы на распределение возбуждаемых полей и токов.

Однако любые теоретические исследования должны апробироваться на предмет адекватности описываемым процессам. Достоверность полученных результатов устанавливается измерениями основных характеристик исследуемых явлений.

Цель работы – измерение пространственного распределения индуцированных токов и коэффициента трансформации энергии в ИСПЭ при введении

в конструкцию дополнительного витка с внешней стороны вспомогательного экрана.

Оборудование. Перечень оборудования в проведенных экспериментах включает следующее:

1. Источник мощности в модельных экспериментах – низковольтный генератор токовых импульсов [7] (поз. 1 на рис. 1).

2. Силовой источник мощности – магнитно-импульсная установка МИУС-2 с запасаемой энергией до ~2 кДж и максимумом напряжения ~2000 В [8].

3. Модельные варианты "индукторной системы с притягивающим экраном" (ИСПЭ) представленный на рис. 2,а.

4. Согласующие устройства, обеспечивающие реализацию низкочастотного режима до ~1,8...2 кГц (рис. 2,б).

5. Образцы листовой немагнитной стали с одинаковой толщиной ~1 мм (рис. 2,в).

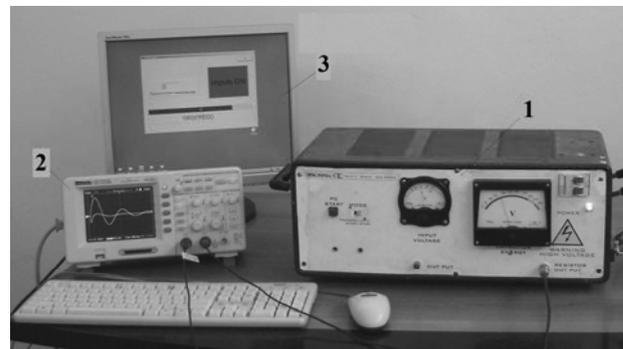


Рис. 1. Комплекс для проведения модельных экспериментов: 1 – низковольтный генератор токовых импульсов, 2 – осциллограф, 3 – компьютер

Модельные измерения. Реализация поставленной цели предполагает следующие измерения:

- распределение индуцированных токов;
- коэффициент трансформации тока непосредственно в обмотке соленоидов – K , количественно определяющий уровень передачи энергии в обмотку ИСПЭ.

Распределение индуцированных токов формирует представление о характере распределения возбуждаемых сил притяжения, а их амплитуды устанавливаются величиной коэффициента – K .

Эксперименты осуществлялись при различных вариантах электрического подключения 2-х возбуж-

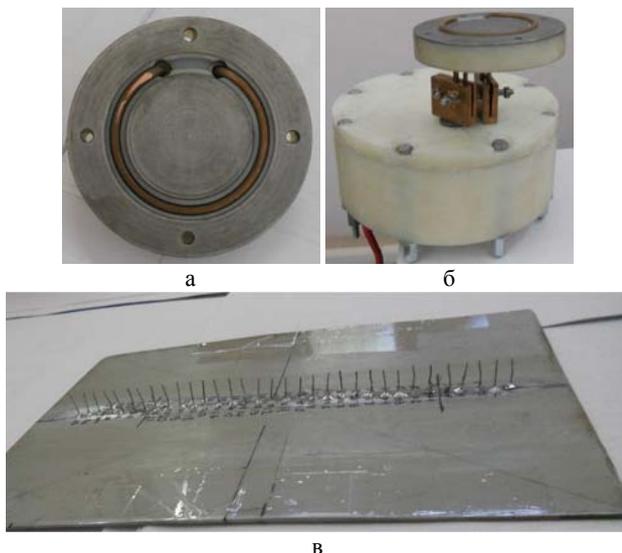


Рис. 2. Объект экспериментальных исследований: а – "индукторная система с притягивающим экраном" (со стороны внутреннего витка в пазу на плоскости экрана), б – согласующее устройство (внизу) с подключённой ИСПЭ (вверху), в – листовая немагнитная сталь с выводами для измерения распределения плотности индуцированного тока

дающих соленоидов ("включён – выключен", "выключен – включён", "оба включены").

Для получения максимальной эффективности запланированных измерений выбраны два конструктивных исполнения образцов возбуждающих соленоидов: начальные измерения проводились при подключении внешнего соленоида представленного одним круговым витком (рис. 3,а), а завершающие – при подключении внешнего соленоида представленного 4-мя параллельными ветвями (рис. 3,б).

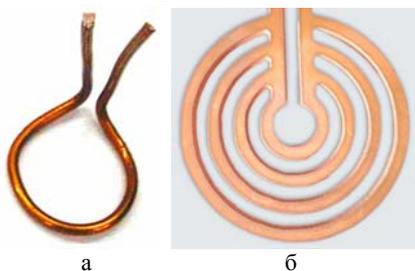


Рис. 3. Образцы возбуждающих соленоидов: а – одновитковый круговой соленоид, б – круговой соленоид из 4-х параллельных витков

Распределение индуцированных токов. Для определения характера влияния дополнительного источника поля на радиальное распределение индуцированных токов достаточно ограничиться измерениями лишь в одном из элементов притяжения ИСПЭ, например, в металле листовой заготовки.

Экспериментальные результаты проведенных измерений представлены на графиках рис. 4.

Результаты измерений на графике рис. 4 показывают, что подключение дополнительного соленоидов с внешней стороны вспомогательного экрана позволяет сформировать более равномерное пространственное распределение индуцированных токов и, как следствие, более равномерное пространственное распределение возбуждаемых сил притяжения.

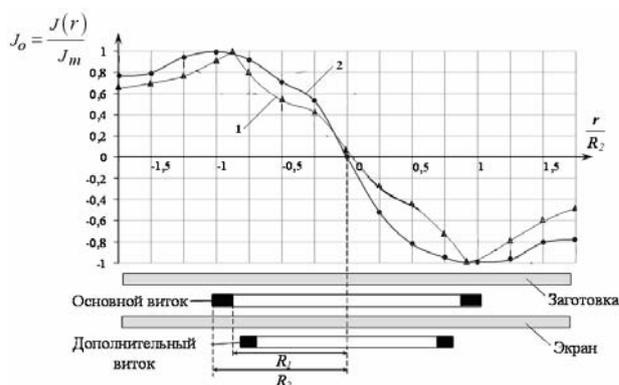


Рис. 4. Радиальные распределения относительной плотности индуцированного тока в листовой заготовке (нормировка на максимум): 1 – "основной индуктор – включён, дополнительный индуктор – отключён", 2 – "основной и дополнительный индукторы – включены"

Иллюстрацией положительного влияния дополнительного соленоидов на характер протекающих электромагнитных процессов являются также расчётные зависимости на рис. 5, полученные аналогично работе [2].

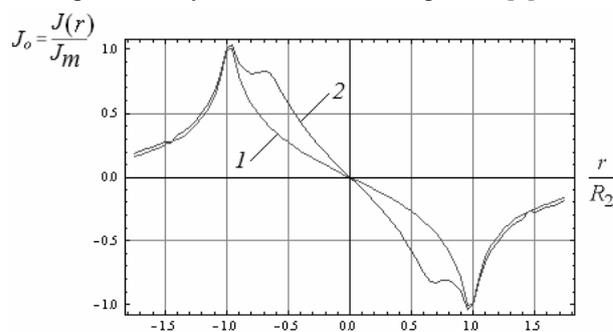


Рис. 5. Расчётные зависимости радиальных распределений линейной плотности индуцированного тока в металле листовой заготовки (в относительных единицах, нормировка на максимум): 1 – "основной индуктор – включён, дополнительный индуктор – отключён", 2 – "основной и дополнительный индукторы – включены"

Хотелось бы отметить, что при введении дополнительного витка "выравнивание" пространственного распределения индуцированного тока в листовой заготовке сопровождалось снижением его амплитуды на ~35%. Отмеченное обстоятельство становится понятным, если учесть, что дополнительный виток экранировался металлом вспомогательного экрана. Как следствие, ослаблялось суммарное магнитное поле, возбуждаемое двумя витками, по сравнению с включением только одного из них – основного индуктора.

Коэффициент трансформации тока в обмотки соленоидов. Измерение "коэффициента трансформации в обмотки соленоидов" позволяет оценить амплитуды возбуждаемых сил притяжения в соответствии с уровнем энергии, передаваемой непосредственно в ИСПЭ.

Пояснения по поводу последнего утверждения можно дать с помощью схемы на рис. 6.

Как было ранее указано, исследуемая индукторная система подключается к согласующему устройству (СУ), обеспечивающему требуемый низкочастотный режим возбуждения и повышение амплитуд действующих магнитных полей. Конструкция согласующего устройства, работающего по принципу действия

повышающего трансформатора тока, предполагает различные варианты замкнутых контуров для протекания вторичных (индуцированных) токов. Например, это контуры (1-2) и (2-3) на рис. 6, в соответствии с которыми возбуждаемые вихревые токи частично замыкаются собственно во вторичной обмотке (контур (1-2)) и частично протекают в рабочей обмотке ИСПЭ (контур (2-3)). Очевидно, что эффективность её действенности тем выше, чем выше уровень передачи энергии и, соответственно, большая часть индуцированных токов попадает в рабочую обмотку инструмента.

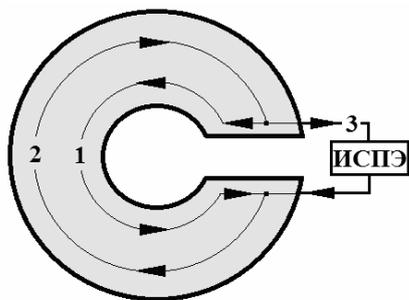


Рис. 6. Возможные контуры протекания вихревых токов, индуцированных во вторичной обмотке согласующего устройства (диск с радиальным разрезом): (1-2), (2-3)

Количественно, данный фактор можно зафиксировать вышеуказанным "коэффициентом трансформации в обмотку ИСПЭ" – K , определяемым как отношение амплитуды тока на входе в обмотку ИСПЭ (выход вторичной обмотки согласующего устройства) – $J_{ИСПЭ}$ к амплитуде тока на входе в первичную обмотку согласующего устройства – $J_{ВХ}$, то есть, $K = J_{ИСПЭ} / J_{ВХ}$.

Источник мощности – магнитно-импульсная установка МИУС-2 в режиме с пониженным напряжением $U = 450$ В, "характерной" рабочей частотой $f \approx 2000$ Гц, относительным декрементом затухания $\delta_0 \approx 0,3$. Амплитуда тока на входе согласующего устройства $\sim J_{ВХ} \approx 3600 \dots 4800$ А.

Рис. 7 иллюстрирует проведенные измерения исследованных индукторных систем, а именно – типичные осциллограммы токовых импульсов.

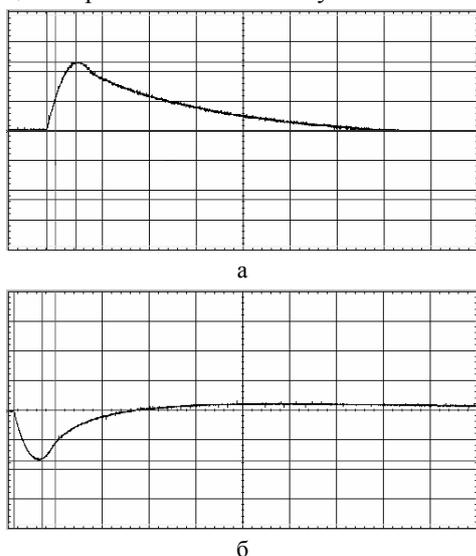


Рис. 7. Осциллограммы токовых импульсов, а – $J_{ВХ}$ – электрический вход СУ, б – $J_{ИСПЭ}$ – электрический вход ИСПЭ

Результаты измерений при различных вариантах включения и конструкциях возбуждающих индукторов в исследуемой ИСПЭ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений			
Возбуждающие индукторы	Вход СУ, $J_{ВХ}$, А	Вход ИСПЭ, $J_{ИСПЭ}$, А	K
Основной	4678,1	14095,8	3,01
Одновитковый дополнительный	3656,9	10156,9	2,78
Основной и одновитковый дополнительный	4469,4	13000	2,91
Основной и дополнительный круговой соленоид из 4-х параллельных ветвей	4504,5	18075,2	4,01

Из данных табл. 1 следует, что дополнительный одновитковый индуктор, практически, не влияет на коэффициент трансформации. Отклонение его величины от наибольшего значения не превышает $\sim 8\%$.

Введение в схему ИСПЭ дополнительного кругового соленоида из 4-х параллельных ветвей приводит к повышению уровня энергии, трансформируемой в обмотку, на $\sim 25\%$. Физически, данное обстоятельство объясняется достаточно значимым уменьшением полного сопротивления обмотки ИСПЭ, представленной несколькими параллельными ветвями, в сравнении с возможными путями замыкания индуцированного тока в металле вторичной обмотки СУ.

Проведя оценку видно, что при $K \approx 4$ в обмотке ИСПЭ при напряжении на емкостном накопителе $U = 1800$ В, $C = 1200$ мкФ, частоте $f \approx 2000$ Гц и относительном декременте $\delta \approx 0,3$ в обмотке ИСПЭ можно получить ток с амплитудой $\sim J_{ИСПЭ} \approx 67770$ А.

Выводы.

1. Подключение дополнительного соленоида с внешней стороны вспомогательного экрана в "индукторной системе с притягивающим экраном" позволяет сформировать более равномерное распределение индуцированных токов и, как следствие, более равномерное пространственное распределение возбуждаемых сил притяжения. Очевидно, данный эффект является результатом суперпозиции двух пространственно разнесенных источников магнитного поля.

2. Введение дополнительного витка сопровождается снижением амплитуды индуцированного тока. Это обстоятельство обусловлено экранированием части возбуждаемого магнитного поля металлом вспомогательного экрана.

3. Конструкция дополнительного источника магнитного поля с внешней стороны вспомогательного экрана существенно влияет на величину коэффициента трансформации тока в ИСПЭ. Выполнение его в виде кругового соленоида из 4-х параллельных ветвей позволяет увеличить уровень энергии, трансформируемой в обмотку инструмента притяжения, на $\sim 25\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.1. под ред. проф. Батыгина Ю.В. [2-е изд.]. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
- 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: монография. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.

3. Пат. 70734 Україна, МПК В 21 D 26/14 Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою круговою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Шіголева С.О., Чаплигін Є.О., Гопко А.В., Дробінін О.М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201114018; заявл. 28.11.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
4. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Сериков Г.С. Расчет усилий в индукционной индукторной системе прямоугольной геометрии с неферромагнитным массивным экраном и заготовкой // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – №3. – С. 61-64.
5. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с неферромагнитным массивным экраном и листовой заготовкой // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – №4. – С. 56-59.
6. Гнатов А.В. Расчет электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с массивным экраном конечной толщины // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – №5. – С. 59-62.
7. Бондаренко А.Ю., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2007. – №6. – С. 66-69.
8. Пат. 73733 Україна, МПК В 21 D 26/14 Генератор багаторазових уніполярних імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Чаплигін Є.О., Дзюбенко О.А., Аргун Ш.В., Дробінін О.М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201202178; заявл. 24.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.

REFERENCES: 1. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Himenko L.T. *Impul'snyie magnitnyie polya dlya progressivnyih tehnologiy. Tom 1* [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Vol.1]. Kharkov, MOST-Tornado Publ., 2003. 288 p. 2. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impul'snyie magnitnyie polya dlya progressivnyih tehnologiy. Tom 3. Teoriia i eksperiment pritiazheniia tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi poliami* [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Vol.3. Theory and experiment of thin-walled metals attraction by the pulse magnetic fields]. Kharkov, KhNAHU Publ., 2009. 240 p. 3. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Y.A., Gopko A.V., Shigoleva S.A., Drobinin A.M. *Sposib magnitno-*

impul'snogo prytjagannja metalovyh ob'ektiv dvovytkovoju krugovuju induktornuju systemoju z tonkym ekranom [The method of magnetic-pulse attraction of metal objects by double-turn circular inductor system with a thin screen]. Patent UA, no.70734, 2012. 4. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Serikov G.S. Calculation of forces in a rectangular-geometry induction inductor system with a non-ferromagnetic massive screen and a work-piece. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.3, pp. 61-64. 5. Batygin Yu.V., Gnatov A.V. Calculation of electrodynamic forces in an induction inductor system with a non-ferromagnetic massive screen and a sheet work-piece. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.4, pp. 56-59. 6. Gnatov A.V. Calculation of electromagnetic processes in an induction inductor system with a massive screen of finite thickness. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.5, pp. 59-62. 7. Bondarenko A.Yu., Serikov G.S., Chaplygin Y.A. A low-voltage current pulse generator with a wide frequency range for physical simulation. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.6, pp. 66-69. 8. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Argun Sh.V., Chaplygin Y.A., Dzubenko A.A., Drobinin A.M. *Generator bagatorazovyh unipoljarnykh impul'siv strumu dlja magnitno-impul'snoi obrobky metaliv* [The generator of multiple unipolar current pulses for magnetic-pulse metal working]. Patent UA, no.73733, 2012.

Postupnula (received) 14.04.2014

*Батыгин Юрий Викторович¹, д.т.н., проф.,
Чаплыгин Евгений Александрович¹, к.т.н., доцент,
Шиндерук Светлана Александровна¹, аспирант,
¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
тел/phone +38 057 7073653, e-mail: batygin48@mail.ru;
chaplygin_e_a@mail.ru; svetlana11177@rambler.ru*

*Yu.V. Batygin¹, E.A. Chaplygin¹, S.A. Shinderuk¹
¹Kharkov National Automobile and Highway University
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine*

Experimental study of processes in an attractive-screen inductor system under additional coil insertion.

The article is devoted to experimental investigations of action of an additional coil inserted inside an inductor system with an attractive screen on induced current distribution in the work-piece and to determination of the coefficient of the solenoid winding current transformation.

Key words – inductor system, additional coil, attractive screen, inductor, electromagnetic process.