

Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин, С.А. Шиндерук

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ В ЛИНЕЙНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ**

*Метою роботи є експериментальне визначення характеристик поперечного розподілу щільності імпульсних струмів різної частоти на поверхні листового немагнітного металу між точковими контактами джерела потужності при різній геометрії їх підключення. Методика. Виміри проводилися за допомогою методів, заснованих на відомих положеннях електромагнетизму. Використовувалося модельне низьковольтне обладнання, а також високовольтні джерела потужності з високим рівнем енергії, що запасається. Чисельна обробка результатів вимірювань проводилася за допомогою стандартних програм з пакету «Wolfram Mathematica». Результати. Отримано і проаналізовано просторово-часові форми поперечного розподілу щільності імпульсного струму на поверхні листової заготовки. Наукова новизна. Вперше отримано чисельні оцінки ступеня поперечної концентрації струму і встановлено залежність даного параметру від часових характеристик струму, а також від способу підключення контактів джерела потужності. Практичне значення. Результати досліджень дозволяють створювати нові більш ефективні лінійні інструменти магнітно-імпульсного притягання листових металів, що засновані на силовій взаємодії провідників з односпрямованими струмами. Бібл. 10, табл. 1, рис. 7.*

*Ключові слова:* вимірювання просторово-часового розподілу струмів, листовий метал, лінійний інструмент, магнітно-імпульсне притягання, пояс Роговського.

*Целью работы является экспериментальное определение характеристик поперечного распределения плотности импульсных токов разной частоты на поверхности листового немагнитного металла между точечными контактами источника мощности при различной геометрии их подключения. Методика. Измерения проводились с помощью методов, основанных на известных положениях электромагнетизма. Использовалось модельное низковольтное оборудование, а также высоковольтные источники мощности с высоким уровнем запасаемой энергии. Численная обработка результатов измерений проводилась с помощью стандартных программ из пакета «Wolfram Mathematica». Результаты. Получены и проанализированы пространственно-временные формы поперечного распределения плотности импульсного тока на поверхности листовой заготовки. Научная новизна. Впервые получены численные оценки степени поперечной концентрации тока и установлена зависимость данного параметра от временных характеристик тока, а также от способа подключения контактов источника мощности. Практическое значение. Результаты исследований позволяют создавать новые более эффективные линейные инструменты магнитно-импульсного притяжения листовых металлов, основанные на силовом взаимодействии проводников с однонаправленными токами. Библ. 10, табл. 1, рис. 7.*

*Ключевые слова:* измерение пространственно-временного распределения токов, листовая металл, линейный инструмент, магнитно-импульсное притяжение, пояс Роговского.

**Введение.** Техника сильных импульсных токов и их магнитных полей находит всё более широкое применение в современных промышленных технологиях обработки металлов давлением [1]. Данный факт обусловлен появлением новых сплавов, обладающих высокими прочностными показателями и малым удельным весом. Как следует из производственной практики, наработанные традиционные схемы и соответствующее оборудование не позволяют, например, осуществить формовку изделий из многих сплавов на основе алюминия. Препятствием к успешной реализации традиционной технологии является разрушение формируемых образцов, поскольку требуемые усилия существенно превышают предел текучести их материалов. Использование методов магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) решает эту проблему, поскольку при кратковременном силовом воздействии допустимые относительные деформации значительно возрастают [1, 2]. Инструменты технологического такого типа позволяют практически реализовать эффективную штамповку изделий из плоских листовых проводников. Очевидно, что амплитуды возбуждаемых электродинамических усилий существенным образом зависят от пространственно-временного распределения токов, протекающих в металле обрабаты-

ваемого объекта [1]. Данный факт определяет актуальность темы исследований.

**Краткий обзор литературы.** Отдельные попытки практической апробации линейных инструментов магнитно-импульсного притяжения заданных участков листовых металлов для удаления вмятин в кузовных покрытиях автомобилей впервые были представлены авторами публикаций [2, 3]. Продолжение работ в данном направлении описано в научных изданиях [4-6]. Здесь впервые заложены теоретические основы действенности инструментов подобного типа [4] и защищённые патентами технические решения их конструктивного исполнения [5]. Авторами публикации [6] выполнены численные оценки характеристик магнитно-импульсного притяжения металлов с низкой удельной электропроводностью.

Для ясности дальнейшего изложения следует остановиться на физике процессов в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии проводников с однонаправленными токами [7]. Конструктивно, инструменты подобного типа содержат два геометрически параллельных проводника, включаемых в цепь разрядного контура высоковольт-

© Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин, С.А. Шиндерук

ного источника мощности. Один из проводников – это основной токопровод (аналог индуктора в магнитно-импульсной обработке металлов [1, 4]), второй – это участок листового металла, подлежащий деформированию. Согласно закону Ампера, между параллельными проводниками с однонаправленными токами возникают силы электродинамического притяжения [7]. При жёсткой механической фиксации основного токопровода металл вмятины будет притягиваться к его рабочей поверхности [2, 3].

Отличительной особенностью представленных инструментов притяжения является наличие контактного электрического включения участка листового металла, подлежащего деформированию, непосредственно в цепь разрядного контура высоковольтного источника мощности. В этой связи особое значение приобретает вопрос о поперечном распределении токов, протекающих между контактами подсоединения, на поверхности объекта силового воздействия.

Первые количественные оценки характеристик функции распределения плотности тока на поверхности листового металлического образца между контактами подключения высоковольтного источника мощности были описаны в авторских патентах [5]. Результаты исследований аналогичных вопросов, направленных на создание эффективных инструментов прогрессивных магнитно-импульсных технологий силовой обработки металлов с разными электрофизическими характеристиками представлены также в работах [8, 9].

В целом, анализ известных публикаций показывает, что результаты всех предшествующих работ требуют дальнейшего развития.

Конкретизируем задачу исследования. Так, главным показателем, определяющим эффективность силового взаимодействия параллельных токов (один в основном токопроводе, второй металл с вмятиной), является степень их «растекания» в поперечном направлении. Очевидно, если «растекание» отсутствует, имеет место максимальная сила притяжения. В противном случае её интегральное значение падает. В этой связи решение задачи оценки характеристик пространственно-временного распределения токов в проводниках необходимо для определения, в первую очередь, возможностей собственно метода, основанного на силовом взаимодействии магнитных полей однонаправленных параллельных токов.

Решение указанной задачи возможно путем экспериментальной оценки с помощью 2-х различных подходов. Первый предполагает непосредственное измерение поверхностного распределения линейной плотности тока, протекающего между контактами подключённого источника. Второй – измерение токов, протекающих в выделенных зонах поперечного распределения. Совокупность результатов первого и второго экспериментальных подходов позволяет установить уровень достоверности теоретических оценок.

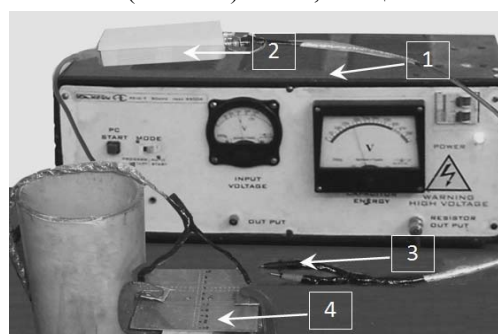
**Целью работы** является экспериментальное определение характеристик поперечного распределения плотности импульсных токов разной частоты на поверхности листового немагнитного металла между

точечными контактами источника мощности при различной геометрии их подключения.

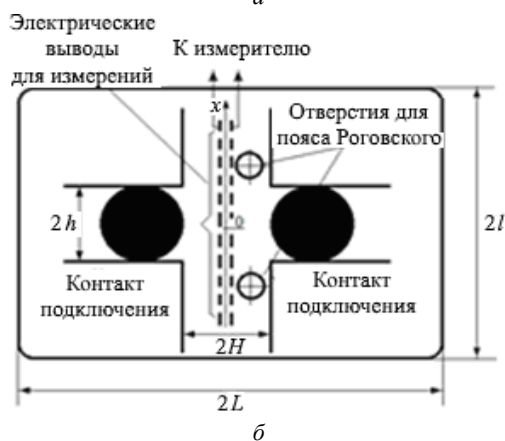
Отметим, что методология проведения настоящих экспериментов, методы измерений, численная обработка полученных результатов с использованием пакета стандартных программ «Wolfram Mathematica» выполнены в соответствии с методологией и алгоритмам вычислений, описанными в [2, 3, 7, 10].

**Оборудование и объект исследования** показаны на рис. 1:

1. Источник мощности – низковольтный генератор токовых импульсов.
2. Цифровой осциллограф – PV6501.
3. Согласующее устройство цилиндрического типа, обеспечивающее понижение рабочих частот возбуждающего тока до значений  $\sim 1,5 \dots 2$  кГц.
4. Объект исследования – образец листового немагнитной стали  $\sim (150 \times 150) \cdot 10^{-3}$  м, толщиной  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$  м.



а



б

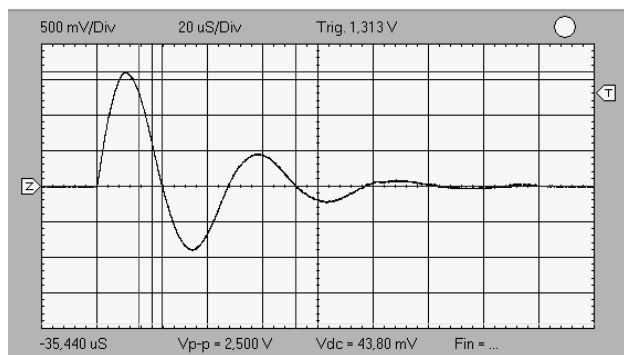
Рис. 1. Экспериментальное оборудование и объект исследования: а – комплекс для моделирования электромагнитных процессов в МИОМ: 1 – низковольтный генератор токовых импульсов, 2 – осциллограф, 3 – измерительные щупы, 4 – образец листового немагнитной стали; б – стальной образец как объект исследования в принятой схеме эксперимента

Измерение поперечного распределения линейной плотности тока проводилось в центральной части листового металла при вариации рабочих частот протекающего тока и различных расстояниях между контактами подключения источника.

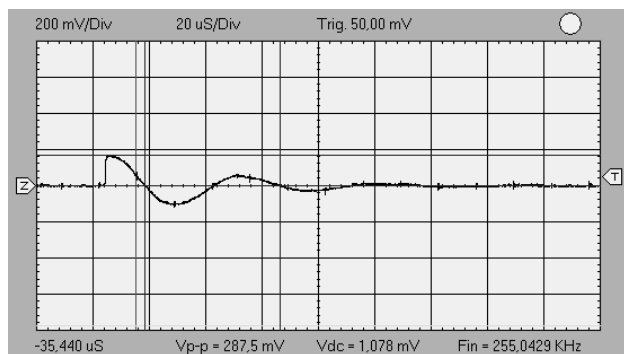
*Вариант № 1, высокочастотный сигнал.* Рабочая частота в импульсе  $\sim 20$  кГц. Расстояния между контактами  $2H = 0,1$  м и  $2H = 0,02$  м.

*Вариант № 2, низкочастотный сигнал.* Рабочая частота в импульсе  $\sim 1,5 \dots 2$  кГц. Расстояния между контактами  $2H = 0,1$  м и  $2H = 0,02$  м. Диаметр контактов подключения  $\sim \varnothing 0,005$  м.

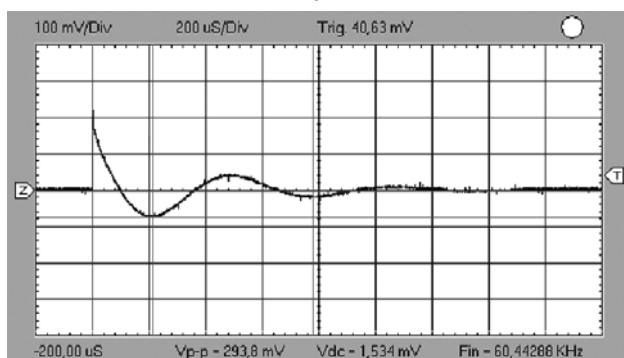
Результаты измерений представляют осциллограммы токовых импульсов (рис. 2).



а



б



в

Рис. 2. Осциллограммы токовых импульсов в эксперименте: а – сигнал, подаваемый на контакты, частота  $\sim 21,1$  кГц; б – сигнал, снимаемый с электрических выводов, частота  $\sim 21,1$  кГц; в – сигнал, подаваемый на контакты, частота  $\sim 1,8$  кГц

Первое, что следует отметить, как особенность в реализации эксперимента, это изменение временной формы токового импульса при понижении рабочей частоты ( $\sim 1,8$  кГц, рис. 2,в) в сравнении с частотой сигнала непосредственно от источника ( $\sim 21,1$  кГц, рис. 2,а). Данное обстоятельство обусловлено влиянием согласующего устройства, которое, фактически, представляет собой импульсный трансформатор с первичной многовитковой проволочной обмоткой и вторичной одновитковой обмоткой в виде тонкостенного алюминиевого цилиндра с продольным разрезом. Ток, индуцированный в тонкостенном металле, как показано авторами [4], имеет вид производной по времени от тока в первичной обмотке, что собственно и иллюстрируется осциллограммами на рис. 2,а и рис. 2,в.

Добавим, что измерение тока, подаваемого на контакты, производилось осциллографированием напряжения на малоиндуктивном омическом шунте, включённом последовательно в цепи источника с нагрузкой в виде образца листового металла. Здесь имела место активная, то есть, прямо пропорциональная, связь между снимаемым напряжением и протекающим током.

**Поперечное распределение линейной плотности тока.** Измеряемый сигнал снимался с электрических выводов, впаянных в металл листа соответственной геометрии на рис. 2,б. Результаты измерений в различных точках нормировались на центральный максимум. Конечные данные экспериментов оформлены в относительных единицах (ось аппликат) и представлены как графические зависимости по осевой линии между контактами подключения источника (ось абсцисс). Абсолютная координата абсциссы – « $X$ » нормируется на расстояние между контактами подключения источника, относительная координата абсциссы –  $x_0 = (x / 2H)$  (рис. 3-6).

Вариант № 1, высокочастотный сигнал,  $f = 21,1$  кГц.

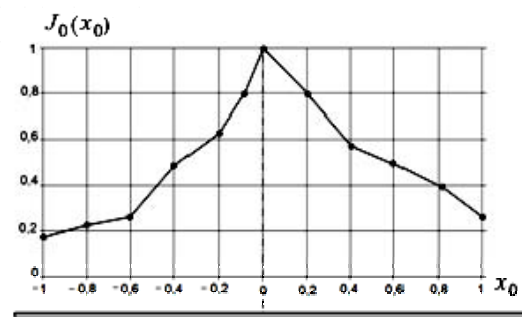


Рис. 3. Распределение линейной плотности тока в относительных единицах (нормировка на максимум) при  $f = 21,1$  кГц,  $2H = 0,1$  м

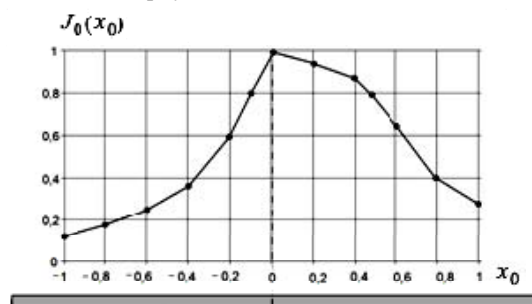


Рис. 4. Распределение линейной плотности тока в относительных единицах (нормировка на максимум) при  $f = 21,1$  кГц,  $2H = 0,02$  м

Вариант № 2, низкочастотный сигнал,  $f = 1,8$  кГц.

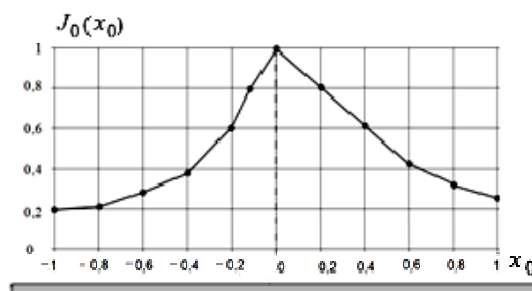


Рис. 5. Распределение линейной плотности тока в относительных единицах (нормировка на максимум) при  $f = 1,8$  кГц,  $2H = 0,1$  м

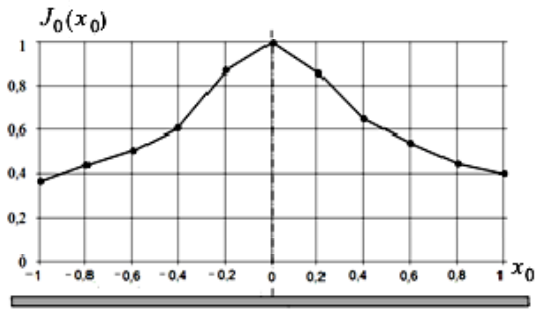


Рис. 6. Распределение линейной плотности тока в относительных единицах (нормировка на максимум) при  $f = 1,8$  кГц,  $2H = 0,02$  м

Графические иллюстрации исследованных электромагнитных процессов следует дополнить численными оценками степени концентрации тока в поперечном измерении. Данный показатель обозначим  $\eta$  и определим как отношение соответствующих площадей криволинейных трапеций (определённых интегралов),

$$\eta = \frac{S_l}{S_L} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $S_l$  – площадь криволинейной трапеции с основанием, равным  $l$  ( $l$  – длина выделенной зоны, где определяется концентрация тока),  $S_L$  – площадь криволинейной трапеции с наибольшим основанием  $L = 2H$ .

Результаты вычислений сведены в табл. 1.

Таблица 1

№		Степень концентрации тока в выделенной зоне			
		Частота, $f = 21$ кГц		Частота, $f = 1,8$ кГц	
Характеристики процесса		Выделенная зона, $0,1(2H)$	Выделенная зона, $0,5(2H)$	Выделенная зона, $0,1(2H)$	Выделенная зона, $0,5(2H)$
Расстояние между контактами					
1	$2H = 0,1$ м	$\eta = 11\%$	$\eta = 65\%$	$\eta = 12\%$	$\eta = 56\%$
2	$2H = 0,02$ м	$\eta = 9\%$	$\eta = 71\%$	$\eta = 8\%$	$\eta = 63\%$

Выделенная зона – это участок, центр которого совпадает с началом отсчёта на оси абсцисс в графике поперечного распределения линейной плотности тока.

Обобщение данных приведенных в табл. 1 показывает, что в исследованной системе степень поперечной концентрации тока определяется, в основном, длиной выделенной зоны  $l$ . Так, в зоне с  $l = 0,1(2H)$ , что в первом приближении много меньше расстояния между контактами, в среднем и вне зависимости от частоты концентрируется  $\sim 10\%$  протекающего тока. В зоне с  $l = 1,0(2H)$ , равной расстоянию между контактами, опять же в среднем и вне зависимости от частоты концентрируется  $\sim 60\dots 65\%$  протекающего тока, вне данной зоны протекает  $30\dots 35\%$  его интегральной величины.

В целом, анализ результатов измерений поперечного распределения плотности тока выявил следующие закономерности:

1. Вне зависимости от временных параметров электромагнитных процессов, расстояние между контактами оказывает существенное влияние на форму поперечного распределения линейной плотности тока, протекающего между ними.

2. При уменьшении расстояния распределение становится более «пологим» (ближе к «прямоугольному»), величина максимума в центре не ярко выражена.

3. При увеличении расстояния между контактами распределение приобретает «треугольную» форму с ярко выраженным центральным максимумом.

4. При понижении частоты сигнала в импульсе (вне зависимости от расстояния между контактами подключения источника питания) имеет место более интенсивное растекание тока по ширине листового образца. Данный факт можно объяснить сравнением токораспределения по поперечному сечению проводника в двух предельных физических идеализациях. В случае скин-эффекта (сверхвысокие частоты) ток стремится вытянуться в линию между контактами. Для постоянного тока (сверхнизкие частоты) имеет место равномерное распределение по всему объёму проводника.

5. Степень концентрации протекающего тока относительно центра системы слабо зависит от его временных характеристик и определяется, в основном, поперечными размерами зоны, где рассматривается собственно его концентрация. Вне зоны с длиной, равной расстоянию между контактами подключения источника, протекает около трети величины всего тока, поступающего в систему.

Полученные результаты дополним измерениями интегральных характеристик токораспределения в условиях подключения реального источника мощности – высоковольтной магнитно-импульсной установки.

Модельные измерения линейной плотности тока на поверхности листового образца проиллюстрировали функциональные соотношения степени концентрации протекающего тока и размера зоны на поперечной оси между контактами. Однако, конечные количественные оценки, полученные численной обработкой результатов модельных экспериментов, требуют подтверждения в реальных условиях работы инструмента магнитно-импульсного притяжения, когда рабочие величины токов составляют десятки тысяч ампер.

#### Измерительный комплекс и его особенности:

1. Измерения проводились с помощью пояса Роговского, охватывающего проводник (листовой образец) с измеряемым током.

2. Основная характеристика пояса Роговского – это его, так называемая, постоянная (позволяет пересчитывать э.д.с., индуцируемую в витках пояса, в реальный ток, протекающий по проводнику) составляла –  $G = 13$  кА/В.

3. Через интегрирующую цепочку (интегратор) пояс Роговского подключается к импульсному осциллографу. Схематически, проведение измерений иллюстрируется графикой на рис. 7.

4. По осциллограммам измерялась э.д.с. в поясе Роговского, после чего с помощью постоянной пояса определялся ток в проводнике.

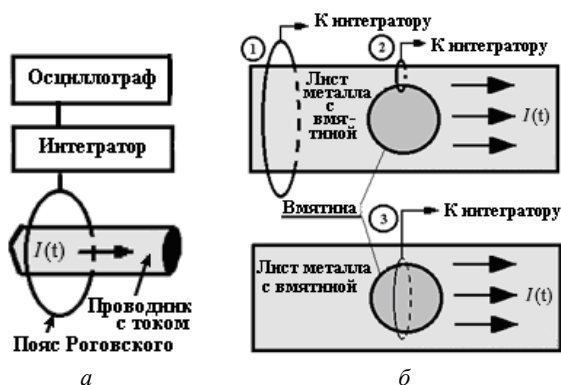


Рис. 7. Схемы измерения токов в эксперименте: *а* – измерение тока в произвольном проводнике с помощью пояса Роговского; *б* – измерения токов в листовом металле с вмятиной

Эксперименты проводились на базе силового оборудования кафедры инженерной электрофизики НТУ «ХПИ» в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между кафедрой физики ХНАДУ и кафедрой инженерной электрофизики НТУ «ХПИ».

#### Измерения. Результаты:

1. Измерения проводились в рабочем режиме магнитно-импульсной установки с запасаемой энергией 10 кДж – МИУ-10 (разработка НТУ «ХПИ») с рабочим напряжением на емкостном накопителе –  $U = 5,5$  кВ и рабочей частотой тока в импульсе  $\sim 6,75$  кГц.

2. Расстояние между контактами подключения источника мощности к листовому образцу составляла  $\sim 0,1$  м.

3. Листовой образец в поперечном направлении разделён на равные по ширине участки: 1 – образец в целом, 2 – участки вне вмятины ( $\sim 1/3$  ширины образца), 3 – участок с вмятиной ( $\sim 1/3$  ширины образца).

4. Токи в листовом металле (по участкам) –  $I_1, I_2, I_3$  измерялись с помощью пояса Роговского согласно схеме на рис. 7,а.

**Результаты измерений.** Согласно выделенным участкам на листовом металле –  $I_1 = 32,5$  кА,  $I_2 = 14,3$  кА,  $I_3 = 7,8$  кА.

Суммарный ток в листовом образце:

– суммирование результатов измерений:

$$I_{1\text{-calc}} = 2I_2 + I_3 = 36,4 \text{ кА};$$

– непосредственное измерение:

$$I_{1\text{-meas}} \approx 32,5 \text{ кА}.$$

Уровень достоверности результатов измерений, определяемый величиной расхождения между данными расчёта и измерений ( $I_{1\text{-calc}}$  и  $I_{1\text{-meas}}$ ), не превышает  $\sim 12$  %, что вполне приемлемо для практики МИОМ [1, 4].

Отношение токов во вмятине и в заготовке (показатель концентрации):  $\eta = I_3/I_1 = 7,8/32,5 = 24$  %.

Отметим, что аналогичная величина в модельных экспериментах, усреднённая по частотам, не превышает 30 %.

В целом, измерения токораспределения на поверхности листового образца, проведенные в реальных условиях подключения к высоковольтному источнику мощности, не выявили существенных отклонений в оценке степени концентрации протекающего

тока как функции выделенной величины участка вдоль поперечной оси между контактами от результатов модельных экспериментов.

#### Выводы.

1. Установлено, что степень поперечной концентрации тока в листовом металле относительно центра системы в диапазоне рабочих частот  $\sim 1,8 \dots 22$  кГц весьма слабо зависит от его временных характеристик.

2. Обосновано, что уровень поперечной концентрации тока в условно выделенной полосе, связывающей контакты подключения, существенным образом зависит от соотношения ширины этой полосы и поперечных размеров контактного подключения. Причём наименьший ток концентрируется в полосе, ширина которой много меньше расстояния между контактами ( $\leq 11 \dots 16$  %).

3. Показано, что при уменьшении расстояния между контактами подключения источника растёт степень поперечной концентрации протекающего тока. При достаточно малом расстоянии (приблизённо равным ширине собственно контактов) уровень концентрации может достигать значений  $\sim 65 \dots 80$  %.

4. Впервые получены экспериментально обоснованные результаты численной оценки степени поперечной концентрации тока на поверхности листовой заготовки в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения, установлена зависимость данного параметра от временных характеристик тока, а также от способа подключения контактов источника мощности, что позволяет создавать новые более эффективные линейные инструменты магнитно-импульсного притяжения листовых металлов, основанные на силовом взаимодействии проводников с однонаправленными токами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, no. 5, pp. 787-829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
2. Бондаренко А.Ю., Финкельштейн В.Б., Степанов А.А., Экспериментальная апробация электродинамической системы с прямым пропуском тока для внешней рихтовки автомобильных кузовов. *Электротехника і електро механіка*, 2014, № 4, С. 50-52. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.09.
3. Бондаренко А.Ю. Финкельштейн В.Б., Гаврилова Т.В. Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропуске импульсного тока. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування*, 2014, № 9 (1052), С. 66-72.
4. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic metal forming for advanced processing technologies. – Springer International Publ. AG, 2018. – 93 p. doi: 10.1007/978-3-319-74570-1.
5. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no. 3, pp. 43-52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.06.
6. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: Low electrical conductance metals. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 40-44. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07.

7. Griffiths D.J. *Introduction to Electrodynamics*. 4th Edition. Cambridge University Press. United Kingdom, 2017. – 620 p.
8. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Calculation of fields and currents in the induction system with the attractive screen and the additional coil as a tool for the straightening. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no. 1, pp. 57-62. (Rus). doi: [10.20998/2074-272X.2015.1.11](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.1.11).
9. Imbert J.M., Winkler S.L., Worswick M.J., Olivera D.A., Golovashchenko S. The effect of tool-sheet interaction on damage evolution in electromagnetic forming of aluminum alloy sheet. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2005, vol. 127, no.1, pp. 145-153. doi: [10.1115/1.1839212](https://doi.org/10.1115/1.1839212).
10. Gnatov A., Argun S., Ulyanets O. Joint innovative double degree master program «Energy-saving technologies in transport». *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, May 2017. doi: [10.1109/ukrcon.2017.8100442](https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100442).

#### REFERENCES

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, no. 5, pp. 787-829. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012).
2. Bondarenko A.Y., Finkelshtein V.B., Stepanov A.A. Experimental approbation of an electrodynamic direct electric system for external automobile body repair. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no. 4, pp. 50-52. (Rus). doi: [10.20998/2074-272X.2014.4.09](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2014.4.09).
3. Bondarenko A.Yu., Finkelishteyn V.B., Gavrilova T.V. External straightening basket of the motor transport by means of electro dynamic of the systems at direct drive pulsed current. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Car- and tractorbuilding*, 2014, no. 9 (1052), pp. 66-72. (Rus).
4. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic metal forming for advanced processing technologies*. Springer International Publ. AG, 2018. 93 p. doi: [10.1007/978-3-319-74570-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74570-1).
5. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no. 3, pp. 43-52. doi: [10.20998/2074-272X.2018.3.06](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.3.06).
6. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: Low electrical conductance metals. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 40-44. doi: [10.20998/2074-272X.2019.5.07](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.5.07).
7. Griffiths D.J. *Introduction to Electrodynamics*. 4th Edition. Cambridge University Press. United Kingdom, 2017. 620 p.
8. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Calculation of fields and currents in the induction system with the attractive screen and the additional coil as a tool for the straightening. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no. 1, pp. 57-62. (Rus). doi: [10.20998/2074-272X.2015.1.11](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.1.11).
9. Imbert J.M., Winkler S.L., Worswick M.J., Olivera D.A., Golovashchenko S. The effect of tool-sheet interaction on damage evolution in electromagnetic forming of aluminum alloy sheet. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2005, vol. 127, no.1, pp. 145-153. doi: [10.1115/1.1839212](https://doi.org/10.1115/1.1839212).
10. Gnatov A., Argun S., Ulyanets O. Joint innovative double degree master program «Energy-saving technologies in transport». *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, May 2017. doi: [10.1109/ukrcon.2017.8100442](https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100442).

Поступила (received) 04.07.2019

Батыгин Юрий Викторович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Чаплыгин Евгений Александрович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
 Шиндерук Светлана Александровна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
<sup>1</sup> Харьковський національний автомобільно-дорожній  
 університет,  
 61002, Харків, ул. Ярослава Мудрого, 25,  
 тел/phone +380 57 7003852,  
 e-mail: yu.v.batygin@gmail.com; chaplygin.e.a@gmail.com;  
 s.shinderuk.2016102@ukr.net

Yu.V. Batygin<sup>1</sup>, E.A. Chaplygin<sup>1</sup>, S.A. Shinderuk<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University,  
 25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

**Experimental investigation of the current distribution on the sheet blank surface in linear tools of magnetic-pulsed attraction.**

**Purpose.** The purpose of the present work consists in the characteristics experimental determination of the pulsed current transverse distribution on the surface of a sheet non-magnetic metal between the point contacts of the power source with different geometry of their connection under operating frequencies variation. **Methodology.** The measurements were carried out using methods based on the known positions of electromagnetism. The simulating low-voltage equipment was used, as well as high-voltage power sources with a high level of the stored energy. Numerical processing of the measurement results was carried out using standard programs from the «Wolfram Mathematica» package. **Results.** The space-temporal shapes of the pulsed current density transverse distribution on the surface of the sheet blank were obtained and analyzed. It is established that the degree of transverse current concentration in sheet metal relative to the center of the system in the operating frequency range of ~ 1.8...22 kHz depends very little on its temporal characteristics. It was found that the level of the transverse current concentration in the conditionally allocated band connecting the contacts of connection depends significantly on the ratio of the width of this band and the transverse dimensions of the contact connection. Moreover, the smallest current is concentrated in a strip whose width is much less than the distance between the contacts ( $\leq 11...16\%$ ). **Originality.** For the first time, the numerical estimates degree of the current transverse concentration are obtained and the dependence of this parameter on the temporal characteristics of the current, as well as on the method of connecting the power source contacts, is established. **Practical value.** The research results will allow creating the new more efficient linear tools of magnetic-pulsed attraction of sheet metals, based on the force interaction of conductors with unidirectional currents. References 10, tables 1, figures 7.  
**Key words:** measurement of the current space-temporal distribution, sheet metal, linear tool, magnetic-pulsed attraction, Rogowski coil.