

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ «ПРЯМОГО ПРОПУСКАНИЯ ТОКА» МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Чаплыгин Е. А.<sup>1</sup>, Ерёмкина Е. Ф.<sup>1</sup>, Шиндерук С. А.<sup>1</sup>, Коряк А. А.<sup>1</sup>, Черный Е. Е.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

***Анотация.** Приведены результаты измерения распределения линейной плотности импульсного тока между точечными контактами источника мощности при различной геометрии их подключения. Показано, что степень поперечной концентрации протекающего тока относительно центра системы весьма слабо зависит от его временных характеристик и растёт в случае уменьшения расстояния между контактами подключения.*

***Ключевые слова:** прямое пропускание тока, линейная плотность, поперечная концентрация, временные характеристики, магнитно-импульсное притяжение, электродинамические усилия.*

### Введение

Методы притяжения заданных участков листовых металлов с использованием энергии импульсных магнитных полей для разного рода обрабатываемых технологий приобретают всё большую актуальность в различных отраслях промышленного производства. Особое внимание привлекают разработки технологий удаления вмятин и выравнивания поверхностей листовых металлов при реставрации корпусов самолётов и автомобильных кузовов. В первом случае необходимость такой операции обусловлена нарушением аэродинамических характеристик летательного аппарата, вплоть до потери устойчивости в полёте, во втором - не только эстетическими соображениями, но зачастую и просто невозможностью дальнейшей эксплуатации транспортного средства с повреждённым кузовом. Как показывает практика, более 50 % повреждений представляют собой вмятины в зонах с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. Это различные корпусные элементы, крылья, фюзеляжи самолётов, двери, капоты, крыши, пороги, бампера автомобилей и т.д. [1-8].

### Анализ публикаций

Существенный недостаток рихтовки с помощью механических вытяжных устройств – это крайне низкая надёжность выполняемой операции. Сохранность не гарантируется, ремонтируемый элемент может быть разрушен.

Наиболее перспективной технологией, позволяющей реставрацию с внешней стороны корпусов транспортных средств, является технология магнитно-импульсного притяжения

заданных участков листовых металлов. Следует выделить теоретически и экспериментально обоснованные предложения, сформулированные авторами работ [9, 10].

Первая из них представляет способ, основанный на экспериментально обнаруженном эффекте притяжения тонкостенных ферромагнетиков при достаточно низких рабочих частотах действующих полей [9]. Вторая посвящена инструментам магнитно-импульсного притяжения, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии проводников с однонаправленными токами [10]. Несмотря на целый ряд неоспоримых достоинств, недостатком вышеуказанных предложений является ограниченность силовых возможностей. Величины возбуждаемых усилий обусловлены индукционными эффектами, которым, как правило, сопутствуют значительные потери электромагнитной энергии [11-13].

### Цель и постановка задачи

Цель экспериментов – измерение поперечного распределения линейной плотности импульсного тока на поверхности листового металла между точечными контактами источника мощности при различной геометрии их подключения.

Для достижения поставленной цели необходимо провести измерение интегральных характеристик поперечного токораспределения по поверхности листового металла между контактами подключения реального источника мощности – низковольтной и высоковольтной магнитно-импульсной установки, что требуется для сравнения модельных и

реальных характеристик.

### Интегральные характеристики поперечного токораспределения

Способом магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов, который может быть положен в основу создания эффективного инструмента внешней рихтовки автомобильных кузовов, является способ «прямого пропускания тока» через обрабатываемый металл. Его привлекательность обусловлена простотой технической реализации и довольно высокими энергетическими показателями.

Численное подтверждение выводов априорного анализа при сравнении амплитуд экспоненциально затухающей синусоиды (ток) и её производной, равной напряжению. Действительно, расхождение сравниваемых величин зависит от значения относительного декремента затухания –  $\delta_0$ . Для строго гармонических процессов, когда  $\delta_0 = 0,0$  средние амплитуды и среднеквадратические отклонения совпадают между собой. При приближении временной функции тока к форме апериодического сигнала, когда  $\delta_0 = 1,0$  расхождения средних амплитуд и среднеквадратических отклонений между амплитудами тока и напряжения существенно возрастают. Отклонения между первыми достигает 23 %, между вторыми – 51 %.

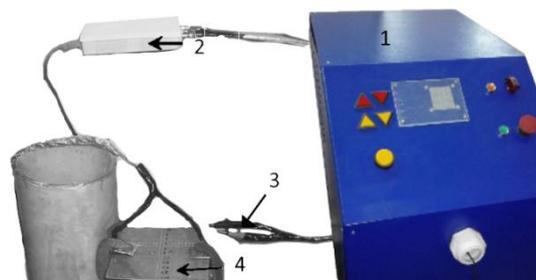
В интервале изменений относительного декремента затухания  $\delta_0 \in [0,1, 0,3]$ , характерного для магнитно-импульсной обработки металлов, расхождения между средними значениями амплитуд тока и напряжения не превышает  $\sim 2,36$  %. Относительная разность между отклонениями от средних составляет  $\sim 8,4$  %. Очевидно, что в указанном диапазоне временных функций тока имеет место вполне допустимое соответствие его амплитуд и амплитуд напряжения, равного производной его временной функции.

Расхождения между амплитудами сравниваемых величин определяются значениями относительного декремента затухания токового сигнала.

В диапазоне гармонических временных функций тока с относительным декрементом затухания, не превышающим  $\sim 0,3$ , пропорциональность между относительными амплитудами индуктивно связанных тока и напряжения сохраняется с точностью, не ниже  $\sim 10$  %, что позволяет исследовать электромагнитные процессы с помощью нормиро-

ванных амплитуд осциллографируемых напряжений без использования аналоговых или численных методов интегрирования.

Экспериментальный комплекс для моделирования электромагнитных процессов в индукторных системах представлен на рис. 1.



1 – источник мощности; 2 – осциллограф; 3 – измерительные щупы; 4 – образец стали

Рис. 1. Экспериментальный комплекс для моделирования электромагнитных процессов в индукторных системах

Перечень оборудования, представленного на рис. 1, включает следующие компоненты: источник мощности – генератор токовых импульсов (1); цифровой осциллограф – PV6501 (2); измерительные щупы (3); образец листовой немагнитной стали  $\sim 150 \times 150$  мм, толщиной  $\sim 2$  мм (4); согласующее устройство цилиндрического типа, обеспечивающее понижение рабочих частот возбуждающего тока до значений  $\sim 1,5 \dots 2$  кГц.

Образец листовой немагнитной стали, как объект исследования в принятой схеме эксперимента, представлен на рис. 2.

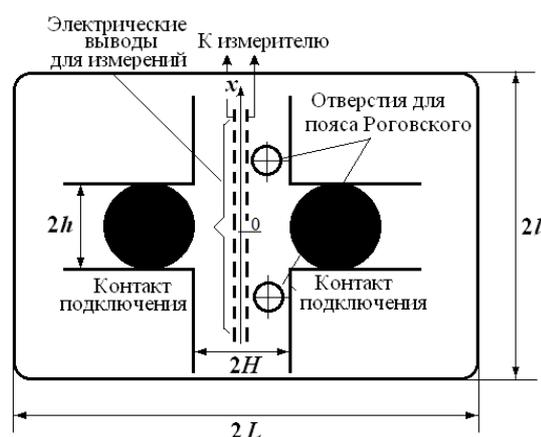


Рис. 2. Схема измерений на поверхности экспериментального образца листовой немагнитной стали, собственно образец с контактами подключения источника и электрическими выводами для измерений

Измерение поперечного распределения

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

Рабочая частота в импульсе 1,5...2 кГц. Расстояния между контактами  $2H = 100$  мм и  $2h = 20$  мм. Диаметр контактов подключения  $\sim 5$  мм.

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 килоампер.

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

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

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



Рис. 3. Схема измерения тока в проводнике с помощью пояса Роговского

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

Измерения проводились в рабочем режиме магнитно-импульсной установки (МИУС) с запасаемой энергией 2 кДж – МИУС-2.

Листовой образец в поперечном направлении разделён на равные по ширине участки:

образец в целом, участки вне вмятины, участок с вмятиной. Токи в листовом металле (по участкам) –  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  измерялись с помощью пояса Роговского согласно схеме на рис. 4.

Результаты измерений:  $I_1 = 32$ , кА;  $I_2 = 14,3$  кА;  $I_3 = 7,8$  кА.

Суммарный ток в листовом образце: суммирование результатов измерений  $I_{1-расчет} = 2I_2 + I_3 = 36,4$  кА, непосредственное измерение  $I_{1-измерение} \approx 32,5$  кА.

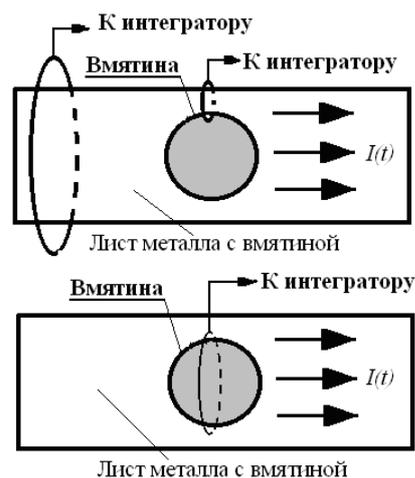


Рис. 4. Схема измерения токов в листовом металле с вмятиной

Величина относительной погрешности, определяющая уровень достоверности результатов измерений, не превышает  $\sim 12$  %.

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

Данная величина концентрации в модельных экспериментах, усреднённая по частотам, не превышает 30 %.

Измерения токораспределения на поверхности листового образца, проведенные в реальных условиях подключения высоковольтного источника 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.

Измеряемый сигнал снимался с электрических выводов, впаянных в металл листа соответственно геометрии на рис. 2. Результаты измерений в различных точках нормировались на центральный максимум. Конечные данные экспериментов оформлены в относительных единицах (ось аппликата) 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  $x_0 = x/(2H)$ . Наиболее значимые результаты измерений представлены на рис. 5, 6.

Сопоставляя результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований, выявив согласия и расхождения, обобщили и, в конечном итоге, пришли к выводам и оценкам, определяющим связь конструктивных и силовых показателей магнитно-импульсной системы «с прямым пропусканием тока» через металл деформируемого объекта.

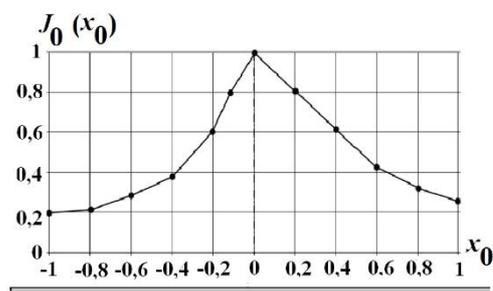


Рис. 5. Распределение линейной плотности тока в относительных единицах при  $f=1,8$  кГц,  $2H=100$  мм

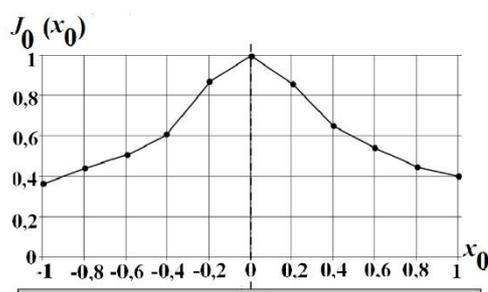


Рис. 6. Распределение линейной плотности тока в относительных единицах при  $f=1,8$  кГц,  $2H=20$  мм

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.

### Выводы

Уровень поперечной концентрации тока в условно выделенной полосе, связывающей контакты подключения, существенным образом зависит от соотношения ширины этой полосы и поперечных размеров контактного

подключения.

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных показывает, что наименьший ток концентрируется в полосе, ширина которой много меньше расстояния между контактами ( $\leq 11...16\%$ ). Таким образом, оценка минимально возможных сил притяжения с помощью соотношения из закона Ампера должна осуществляться с усреднённым поправочным множителем  $\sim 0,143$ .

Сопоставление теории и эксперимента показывает, что в случае уменьшения 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  $65...80\%$ . В таких конструкциях систем магнитно-импульсного притяжения оценка амплитуд электродинамических усилий должна проводиться с усреднённым поправочным множителем  $\sim 0,73$ .

Работа проводилась кафедрой физики ХНАДУ в рамках Научного исследования: «Энергосберегающие малозатратные технологии питания и ремонта транспортных средств» 08-53-19, финансируемого Министерством образования и науки Украины.

### Література

- Eguia I., Mangas A., Iturbe R., Gutierrez M. A. Electromagnetic forming of longitudinal strengthening ribs in roll formed automotive profiles. ICHSF Proceedings of 4th International Conference on High Speed Forming (COLUMBUS 9 – 10 March 2010). 2010. pp.198-207.
- Batygin Y., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Springer International Publishing AG. 2018. 93 p.
- Welcome to BETAG Innovation. (2012). URL: <http://www.betaginnovation.com> (дата обращения 2.05.2019).
- Mamalis A. G., Manolakos D. E., Kladas A. G., Koumoutsos A. K. Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments. *Applied Mechanics Reviews*. 2004. №57(4). P. 299-324.
- Савич А. С., Ивашко В. С., Савич Е. Л. Ремонт кузовов легковых автомобилей. Учебное пособие. Инфра-М. 2014. 320 с.
- Thaddeus M. How to restore Classic Car Bodywork: New Updated & Revised Edition. Veloce publ. 2015. 128 p.
- Porter L. Classic Car Bodywork Manual: The complete, illustrated step-by-step guide. 5th edition. Porter Pub. Ltd. 2018. 300 p.
- Psyk V., Risch, D., Kinsey B. L., Tekkaya A. E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Material Process Technology*. 2011.

- №211, P. 787-829.
9. Batygin Yu.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. № 213 (3). P. 444–452.
  10. Batygin Yu. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. № 214 (2). P. 390-401.
  11. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Справочник по физике: для инженеров и студентов вузов. 8-е изд., переработанное и исправленное. ООО «Издательство Ониск». 2006. 1056 с.
  12. Imbert J. M., Winkler S. L., Worswick M. J., Oliveira 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. №127(1). P. 369-379.
  13. Бондаренко А. Ю., Финкельштейн В. Б., Гаврилова Т. В. Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропускании импульсного тока. Вісник НТУ «ХП». Харків. 2014. №9(1052). С. 66-72.

### References

1. Eguia I., Mangas, A., Iturbe R., Gutierrez M. A. (2010). Electromagnetic forming of longitudinal strengthening ribs in roll formed automotive profiles. ICHSF Proceedings of 4th International Conference on High Speed Forming (COLUMBUS 9 –10 March 2010), 198-207.
2. Batygin Y., Barbashova M., Sabokar O. (2018) *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham: Springer International Publishing AG.
3. Welcome to BETAG Innovation. Retrived from: <http://www.betaginnovation.com> (accessed: 02.05.2019).
4. Mamalis A. G., Manolakos D. E., Kladas A. G., Koumoutsos A. K. (2004) Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments. *Applied Mechanics Reviews*, 57(4), 299-324.
5. Savich A. S., Ivashko V. S., Savich E. L. (2014) *Remont kuzovov legkovykh avtomobilej. Uchebnoe posobie* [Car body repair. Tutorial.] Kiev: Infra-M [in Russian].
6. Thaddeus M. (2015) *How to restore Classic Car Bodywork*. New Updated & Revised Edition. Dorchester: Veloce publ.
7. Porter L. (2018) *Classic Car Bodywork Manual*. The complete, illustrated step-by-step guide. 5th edition. London: Porter Pub. Ltd.
8. Psyk V., Risch, D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. (2011) Electromagnetic forming – A review. *Journal of Material Process Technology*, 211, 787-829.
9. Batygin Yu. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A.V. (2013) Pulsed electromagnetic at-

- traction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (3), 444–452.
10. Batygin Yu. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. (2014) Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 214 (2), 390-401.
  11. Javorskij B. M., Detlaf A. A., Lebedev A. K. (2006) *Spravochnik po fizike: dlja inzhenerov i studentov vuzov* [Physics handbook for engineers and students of universities]. 8-e izd., pererabotannoe i ispravlennoe. Moskva: OOO «Izdatel'stvo Oniks» [in Russian].
  12. Imbert J.M., Winkler S.L., Worswick M.J., Oliveira D.A., Golovashchenko S. (2005) The effect of tool-sheet interaction on damage evolution in electromagnetic forming of aluminum alloy sheet. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 127(1), 369-379.
  13. Bondarenko A.Ju., Finkel'shtejn V.B., Gavrilova T.V. (2014) Vneshnjaja rihтовka kuzovov avtotransporta s pomoshh'ju jelektrodinamicheskikh sistem pri prjamom propuskании impul'snogo toka [External straightening basket of the motor transport by means of electro dynamic of the systems at direct drive pulsed current] *Visnik NTU «HPI»*, 9(1052), 66-72 [in Russian].

**Чаплыгин Евгений Александрович**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. физики, тел. +38-057-707-37-27; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

**Еремина Елена Федоровна**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. физики, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

**Шиндерук Светлана Александровна**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. физики, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

**Коряк Александр Алексеевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. деталей машин и теории механизмов и машин, тел.: +38-057-707-37-10; e-mail: alexanderalexkor@gmail.com.

**Черный Евгений Евгеньевич**<sup>1</sup>, студент, тел. +38-067-430-14-64; e-mail: e.cherniy@ukr.net, <sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, м. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

### Experimental Study of “Direct Current Passage” Tools by Magnetic-Pulse Metal Processing

**Abstract. Problem.** Theoretical calculations of the “direct current passage” tools characteristics of the magnetic-pulse metal processing technology should be compared with actual results. To do this, it is necessary to measure the characteristics of the transverse current distribution over the surface of the sheet metal between the contacts connecting the real power source, as well as measure the integral values of this signal at a low-voltage and high-voltage magnetic-pulse installation. **Goal.** The goal is measuring the transverse distribution of the pulsed current linear density on the surface of the sheet metal between the point contacts of the power source with different geometry of their connection. **Methodology.** Measuring the transverse current distribution over the sur-

face integral characteristics of the sheet metal is carried out between the contacts of the connection of a real power source - a low-voltage and high-voltage magnetic-pulse installation; the integral values are determined by the Rogowsky belt around the area under investigation followed by integrating the received signal. **Results.** Comparison of theory and experiment shows that in the case of reducing the distance between the contacts of the source connection, the degree of transverse concentration of the flowing current increases. With a sufficiently small distance the concentration level can reach the values of 65...80%. **Originality.** The degree of transverse concentration of the flowing current relative to the center of the system in the operating frequency range of 1,8...22 kHz depends very little on its temporal characteristics. The level of the transverse current concentration in the conditionally allocated band connecting the contacts depends significantly on the ratio of the width of this band and the transverse dimensions of the contact connection. **Practical value.** Using the obtained results will make possible to create new, more efficient tools of "direct current passage".

**Key words:** direct current passage, linear density, transverse concentration, temporal characteristics, magnetic impulse attraction, electrodynamic forces.

**Chaplygin Evgen**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof. of Physics Chair, tel. +38-057-707-37-27; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

**Yeryomina Olena**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof. of Physics Chair, tel. +38-057-707-37-27; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

**Shinderuk Svetlana**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof. of Physics Chair, tel. +38-057-707-37-27; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

**Koryak Olexandr**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof. of Machine Parts and the Theory of Mechanisms and Machines Chair, tel. +38-057-707-37-10; e-mail: alexanderalexkor@gmail.com.

**Cherniy Evgeniy**<sup>1</sup>, student, +380674301464, e-mail: e.cherniy@ukr.net.

<sup>1</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Експериментальне дослідження інструментів «прямого пропускання струму» магнітно-імпульсної обробки металів**

**Анотація. Постановка проблеми.** Для порівняння теоретично отриманих результатів, модельних і реальних характеристик інструментів «прямого пропускання струму» технології магнітно-імпульсної обробки металів необхідно провести вимірювання характеристик поперечного розподілу струму по поверхні листового металу між контактами підключення реального джерела потужності, а також виміряти інтегральні величини даного сигналу на низьковольтній і високовольтній магнітно-імпульсній установці. **Мета.** Вимірювання поперечного розподілу лінійної густини імпульсного струму на поверхні листового металу між точковими контактами джерела потужності при різній геометрії їх під-

ключення. **Методика.** Вимірювання інтегральних характеристик поперечного розподілу струму по поверхні листового металу проводиться між контактами підключення реального джерела потужності - низьковольтної та високовольтної магнітно-імпульсної установки, інтегральні величини визначаються за допомогою обхвату досліджуваної зони поясом Роговського з подальшою інтеграцією отриманого сигналу. **Результати** Порівняння розрахункових і експериментальних даних показує, що найменший струм концентрується в смузі, ширина якої багато менше відстані між контактами. Таким чином, оцінка мінімально можливих сил притягання за допомогою співвідношення із закону Ампера повинна здійснюватися з усередненим поправковим множником  $\sim 0,143$ . Порівняння теорії і експерименту показує, що в разі зменшення відстані між контактами підключення джерела зростає ступінь поперечної концентрації струму, що протікає. При досить малій відстані (що приблизно дорівнює ширині власне контактів) рівень концентрації може досягати значень 65...80%. **Наукова новизна.** Ступінь поперечної концентрації струму, що протікає, щодо центру системи в діапазоні робочих частот 1,8...22 кГц достатньо слабо залежить від його тимчасових характеристик. Рівень поперечної концентрації струму в умовно виділеній смузі, що зв'язує контакти підключення, істотно залежить від співвідношення ширини цієї смуги і поперечних розмірів контактного підключення. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить створювати нові більш ефективні інструменти «прямого пропускання струму», що працюють в умовах інтенсивного проникнення діючих електромагнітних полів з металами, що мають різні магнітні властивості.

**Ключові слова:** пряме пропускання струму, лінійна густина, поперечна концентрація, часові характеристики, магнітно-імпульсне притягання, електродинамічні зусилля.

**Чаплігін Євген Олександрович**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. фізики, тел. +380-57-707-37-27; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

**Єрьоміна Олена Федорівна**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. фізики, тел. +38-057-707-37-27; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

**Шиндерук Світлана Олександрівна**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. фізики, тел. +38-057-707-37-27; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

**Коряк Олександр Олексійович**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. деталей машин і теорії механізмів і машин, тел. +38-057-707-37-10; e-mail: alexanderalexkor@gmail.com.

**Чорний Євген Євгенович**<sup>1</sup>, студент, тел.: +38-067-430-14-64, e-mail: e.cherniy@ukr.net. <sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.