

УДК 621.3 : 538.3

**А.В. БОРЦОВ, Н.П. ПЕТРЕНКО****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ МАССИВНОГО СОЛЕНОИДА, ОСНОВАННОГО НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ КОЛЬЦЕВЫХ ПРОВОДНИКОВ**

Экспериментально проверен метод определения контура профиля массивных соленоидов для магнитно-импульсного обжима металлических цилиндрических заготовок, основанный на использовании системы элементарных кольцевых проводников бесконечно малого поперечного сечения и использовании соответствующей функции Грина. Профиль соленоида, ограниченный криволинейным контуром, аппроксимировали многоугольником. Для проведения экспериментов через соленоид пропускали импульсы тока, имеющие форму экспоненциально затухающей синусоиды. Индукцию магнитного поля измеряли индукционным преобразователем, а ток регистрировали при помощи бифилярного шунта, встроенного в низковольтный генератор импульсных токов. Установлено, что при вариации частоты импульса в диапазоне (40...225) кГц расхождения измеренных значений индукции магнитного поля от заданных не превышают 6 %, чем подтверждается правильность метода определения профиля соленоида при допущения идеального поверхностного эффекта

**Ключевые слова:** магнитное поле, магнитно-импульсный обжим, массивный соленоид, измерение магнитной индукции, кольцевой проводник, экспериментальная проверка.

**О.В. БОРЦОВ, М.П. ПЕТРЕНКО****ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОФІЛЮ МАСИВНОГО СОЛЕНОЇДА, ЗАСНОВАНОГО НА ВИКОРИСТАННІ СИСТЕМИ КІЛЬЦЕВИХ ПРОВІДНИКІВ**

Експериментально перевірено метод визначення контуру профілю масивних соленоїдів для магнітно-імпульсного обтиску металевих циліндричних заготовок, що базується на застосуванні системи елементарних кільцевих провідників нескінченно малого поперечного перерізу та використанні відповідної функції Гріна. Профіль соленоїда, обмежений криволінійним контуром, апроксимували багатокутником. Для проведення експериментів через соленоїд пропускали імпульси струму, що мали форму експоненціально згасаючої синусоїди. Індукцію магнітного поля вимірювали індукційним перетворювачем, а струм реєстрували за допомогою біфілярного шунта, який вбудовано в низьковольтний генератор імпульсних струмів. Встановлено, що при варіації частоти імпульсу в діапазоні (40...225) кГц відхилення вимірних значень індукції магнітного поля від заданих не перевищують 6 %, чим підтверджуються правильність методу визначення профілю соленоїду при допущенні ідеального поверхневого ефекту.

**Ключові слова:** магнітне поле, магнітно-імпульсний обтиск, масивний соленоїд, вимірювання магнітної індукції, кільцевий провідник, експериментальна перевірка.

**A.V. BORTSOV, M.P. PETRENKO****EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE METHOD FOR DETERMINATION A MASSIVE SOLENOID PROFILE BASED ON USING A SYSTEM OF ANNULAR CONDUCTORS**

The method for determining a contour of massive solenoid profile for magnetic-pulse crimping of metal cylindrical workpieces which based on using a system of elementary annular conductors with infinitesimal cross sectional area and corresponding Green's function is experimentally verified. Solenoid profile which bounded by curvilinear contour is approximated by polygon. During the experiments, electric current pulses which have a shape of exponentially damped sine are flow through the solenoid. Frequency of the pulses are vary in range (40...225) kHz. Magnetic induction is measured by induction sensor. Electrical current is measured using bifilar shunt that is placed inside the pulsed current generator. It is stated that deviation of measured magnetic induction from given values does not exceed 6 % on the all range of pulse frequency, which confirms the method for determining a profile of massive solenoid, with ideal skin effect approximation.

**Keywords:** magnetic field, magnetic pulse crimping, massive solenoid, magnetic induction measurement, annular conductor, experimental verification.

**Введение.** Магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) [1] основывается на взаимодействии сильного импульсного магнитного поля, создаваемого соленоидом, и вихревых токов, индуцированных в заготовке, и является эффективной технологией, при которой инструмент не имеет прямого контакта с обрабатываемой заготовкой. Одно из преимуществ МИОМ заключается в возможности изготавливать детали различной формы одним универсальным индуктором.

В случае промышленного производства имеет смысл создание индукторных систем, обеспечивающих рациональное распределение электродинамических усилий, деформирующих заготовку. На практике возникает необходимость создания индукторных систем обеспечивающих распределение электродинамических усилий, состоящее из двух и более зон с различным уровнем воздействия. Такие системы менее универсальны, однако могут использоваться для изготов-

© А.В. Борцов, Н.П. Петренко, 2018

ления деталей ряда подобных форм и размеров.

Надежным способом получения таких распределений является использование массивных соленоидов специальной формы. Один из методов определения формы таких соленоидов [2] основывается на замене массивного соленоида системой соосных бесконечно тонких кольцевых проводников с токами, а также использовании функции Грина. Положение проводников (точки на рис. 1, а) и токи, которые в них протекают, подбираются для обеспечения заданного распределения индукции магнитного поля (рис 1. б, кривая 1) на поверхности цилиндрической заготовки 1 (рис. 1, а). При этом максимальное отклонение получаемого распределения индукции магнитного поля (рис. 1, б, кривая 2) отличается от заданного на величину менее 5% (рис. 1, б, кривая 3). Профиль массивного соленоида определяется по одной из силовых линий магнитного поля 2 (рис. 1. а), охватывающей все элементарные кольцевые источники [3].

Цель работы – экспериментальная проверка метода [2] определения профиля массивного соленоида для создания заданного распределения индукции магнитного поля на цилиндрической поверхности заготовки.

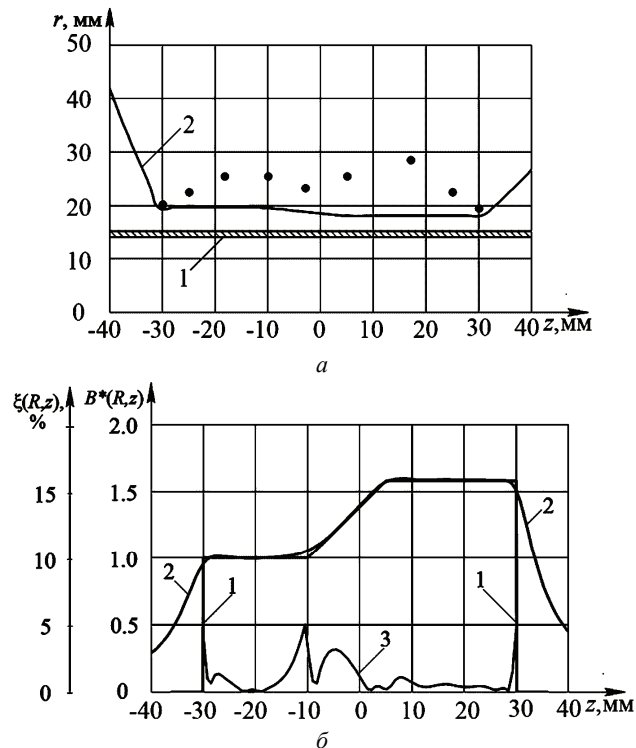


Рисунок 1 – Система массивный соленоид – заготовка (а) и распределения индукции магнитного поля (1 – заданное; 2 – получаемое при помощи системы элементарных кольцевых проводников, 3 – относительное расхождение между ними, б)

**Описание стенда.** Для экспериментальной проверки метода был изготовлен массивный соленоид из латуни (рис. 2).

Полученный расчетным путем криволинейный контур его профиля был аппроксимирован шестиугольником [4]. Соленоид имеет радиальный разрез шириной 1 мм и, вблизи него, с обеих сторон по два

глухих резьбовых отверстия с резьбой М10 для крепления токоподводящих выводов прижимной планкой. Внутри соленоида, который устанавливался на специальном стенде (рис. 3), расположена медная цилиндрическая оболочка 2 диаметром 30 мм, имитирующая заготовку. На медную оболочку надета втулка 3 из оргстекла. Внешний и внутренний радиусы втулки плотно подогнаны к элементам системы для обеспечения соосности. Втулка имеет разрез для перемещения индукционного преобразователя 4 вдоль поверхности трубы.

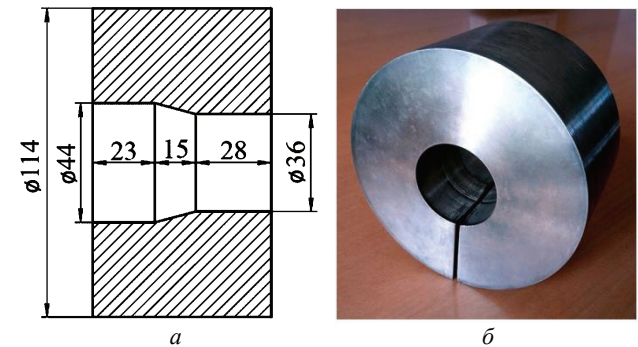


Рисунок 2 – Массивный одновитковый соленоид: а – чертеж, б – фото

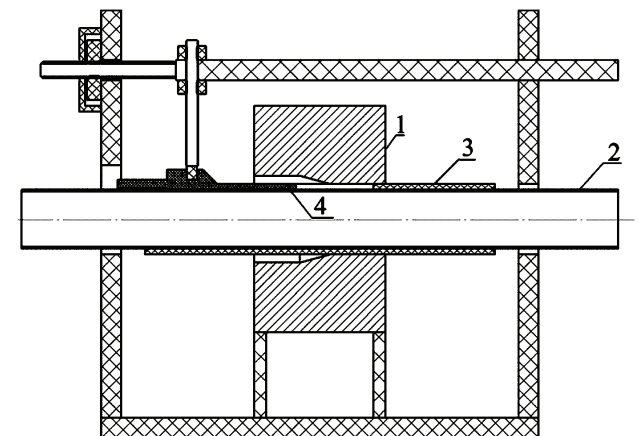


Рисунок 3 – Экспериментальный стенд для измерения распределения индукции магнитного поля на поверхности оболочки: 1 – массивный соленоид, 2 – медная оболочка, 3 – диэлектрическая втулка, 4 – индукционный преобразователь

Индукционный преобразователь (рис. 4) представляет собой катушку из 75 витков медного провода ПЭВ-1 0.05 мм, намотанную на каркас из поликарбоната.

Для измерения удельного электрического сопротивления материала соленоида было изготовлено кольцо с разрезом, имеющее внутренний диаметр 144 мм и сечение  $1.8 \times 6$  мм. Сопротивление кольца измерили при помощи микроомметра Ф415, а затем рассчитали искомое удельное электрическое сопротивление материала соленоида:  $\rho = 1,06 \cdot 10^7$  Ом·м.

**Методика и результаты измерений.** Импульсы тока, протекающего по соленоиду, имели форму экспоненциально затухающей синусоиды и формировались при помощи низковольтного генератора им-

пульсных токов (ГИТ) [5]. Частота импульсов варьировалась в диапазоне (40...225) кГц изменением емкости батареи конденсаторов ГИТ (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры импульсов и глубина проникновения магнитного поля в соленоид и оболочку

| № | C, мкФ | T, мкс | f, кГц | Δ <sub>C</sub> , мм | Δ <sub>O</sub> , мм |
|---|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|
| 1 | 1      | 4,43   | 225,73 | 0,34                | 0,14                |
| 2 | 2      | 6,40   | 156,19 | 0,41                | 0,17                |
| 3 | 5      | 9,82   | 101,86 | 0,51                | 0,21                |
| 4 | 10     | 16,83  | 59,41  | 0,67                | 0,28                |
| 5 | 27     | 24,49  | 40,84  | 0,81                | 0,33                |

ЭДС, наведенная в индукционном датчике, и падение напряжения на бифилярном шунте в цепи соленоида регистрировалось при помощи цифрового осциллографа Rigol DS1102E.

Использовали методику измерений [6,7], согласно которой относительное значение индукции магнитного поля определяются по формуле

$$B_{\Phi}(R, z) = \frac{e(R, z, t_{\Phi})}{e(R, z_0, t_{\Phi})}, \quad (1)$$

где  $e(R, z, t_{\Phi})$ ,  $e(R, z_0, t_{\Phi})$  – значения ЭДС, наводимой в индукционном преобразователе при измерениях индукции в точках  $z$  и  $z_0$ ;  $z$  – осевая координата центра индукционного датчика;  $z_0$  – осевая координата фиксированной точки на распределении;  $t_{\Phi}$  – некоторый фиксированный момент времени.

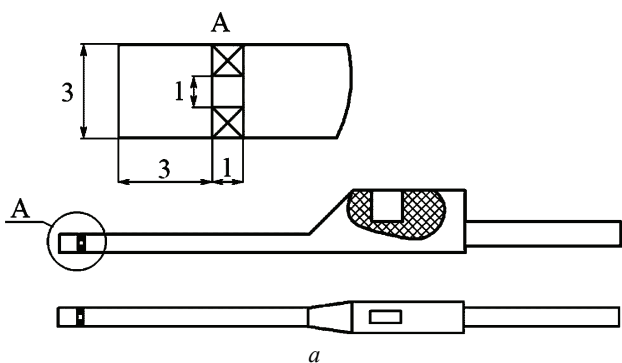


Рисунок 4 – Индукционный преобразователь: а – чертеж, б – фотография

В качестве момента времени  $t_{\Phi}$  был выбран момент, соответствующий максимуму первой полу волны ЭДС,  $z_0$  выбрано равным -15 мм.

Используемое оборудование не обеспечивает идеальную повторяемость импульсов. Из-за этого, в частности, амплитудное значение тока, протекающего в соленоиде, имеет разброс, который можно учесть

при помощи поправочного коэффициента

$$k(z) = \frac{l_{m1}(z_0)}{l_{m1}(z)},$$

где  $l_{m1}(z)$ ,  $l_{m1}(z_0)$  – амплитудные значения тока в соленоиде при измерении индукции в точках  $z$  и  $z_0$ .

При этом

$$B_{\Phi}(R, z) = \frac{k(z) \cdot e(R, z, t_{\Phi})}{e(R, z_0, t_{\Phi})}, \quad (2)$$

На рис. 5. и в табл. 2 приведены относительные значения индукции магнитного поля на поверхности металлической заготовки ( $B_0(R, z)$  – заданное,  $B_{\Phi}(R, z)$  – измеренные в зазоре между соленоидом и заготовкой), а также относительные расхождения  $\xi(R, z)$  между  $B_0(R, z)$  и  $B_{\Phi}(R, z)$ .

Приборная погрешность косвенных измерений индукции магнитного поля  $B_{\Phi}(R, z)$ , вычисленная согласно рекомендациям [8], составляет ~11 %. Относительные расхождения  $\xi(R, z)$  не превышают 6 % процентов по всей длине обрабатываемой поверхности при всех вариантах импульса, что соизмеримо с погрешностью измерений. Зависимость погрешности от частоты разрядного контура в исследуемом диапазоне частот не прослеживается.

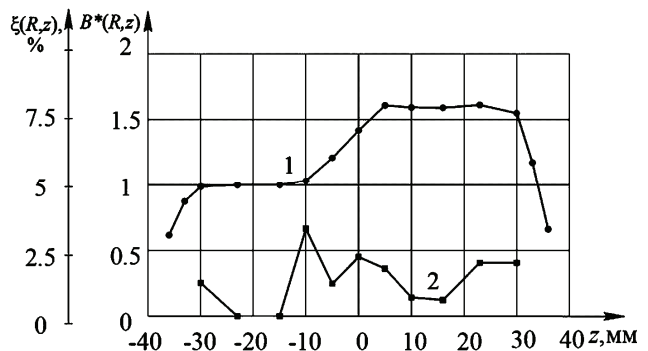


Рисунок 5 – Результаты измерений: 1 – распределение индукции магнитного поля при  $C = 27$  мкФ; 2 – относительные расхождения  $\xi(R, z)$

**Выводы.** 1. Относительные расхождения измеренных значений индукции магнитного поля от заданных при резком проявлении поверхностного эффекта не превышают 6% по всей поверхности обрабатываемой заготовки. Это экспериментально подтверждает правильность метода определения профиля массивного соленоида, обеспечивающего заданное распределение индукции на цилиндрической поверхности заготовки, который основан на замене соленоида системой элементарных кольцевых проводников и использовании соответствующей функции Грина, а также аппроксимации профиля сложной формы многоугольником.

2. Проникновение электромагнитного поля в соленоид и оболочку при изменении частоты импульса в диапазоне (40...225) кГц несущественно повлияло на расхождения экспериментальных данных и результатов расчета, полученных при допущении идеального поверхностного эффекта.

Таблица 2 – Результаты измерений и их расхождения от заданных значений.

| z, мм | $B_0(R,z)$ | Номер импульса (таб. 1) |                |                 |                |                 |                |                 |                |                 |                |
|-------|------------|-------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
|       |            | 1                       |                | 2               |                | 3               |                | 4               |                | 5               |                |
|       |            | $B_{\Phi}(R,z)$         | $\xi(R,z), \%$ | $B_{\Phi}(R,z)$ | $\xi(R,z), \%$ | $B_{\Phi}(R,z)$ | $\xi(R,z), \%$ | $B_{\Phi}(R,z)$ | $\xi(R,z), \%$ | $B_{\Phi}(R,z)$ | $\xi(R,z), \%$ |
| -30   | 1,00       | 0,98                    | 2,43           | 0,98            | 2,17           | 0,97            | 2,84           | 0,97            | 2,83           | 0,99            | 1,27           |
| -23   | 1,00       | 1,00                    | 0,00           | 1,00            | 0,00           | 1,00            | 0,00           | 1,00            | 0,00           | 1,00            | 0,00           |
| -15   | 1,00       | 1,00                    | 0,00           | 0,98            | 2,28           | 1,00            | 0,00           | 0,97            | 3,11           | 1,00            | 0,00           |
| -10   | 1,00       | 1,04                    | 4,26           | 1,00            | 0,38           | 1,02            | 2,38           | 1,02            | 2,11           | 1,03            | 3,33           |
| -5    | 1,19       | 1,20                    | 0,31           | 1,18            | 1,13           | 1,16            | 2,65           | 1,16            | 3,13           | 1,21            | 1,23           |
| 0     | 1,39       | 1,37                    | 1,59           | 1,42            | 2,20           | 1,42            | 2,22           | 1,40            | 0,73           | 1,42            | 2,25           |
| 5     | 1,58       | 1,62                    | 2,27           | 1,65            | 4,10           | 1,62            | 2,38           | 1,61            | 1,73           | 1,61            | 1,81           |
| 10    | 1,58       | 1,62                    | 2,27           | 1,63            | 3,21           | 1,67            | 5,48           | 1,58            | 0,03           | 1,59            | 0,72           |
| 16    | 1,58       | 1,55                    | 1,83           | 1,63            | 3,21           | 1,60            | 1,37           | 1,60            | 1,18           | 1,59            | 0,61           |
| 23    | 1,58       | 1,57                    | 0,82           | 1,63            | 3,02           | 1,61            | 1,55           | 1,56            | 1,54           | 1,61            | 2,03           |
| 30    | 1,58       | 1,60                    | 1,36           | 1,59            | 0,42           | 1,60            | 1,37           | 1,54            | 2,83           | 1,55            | 2,03           |

### Список литературы

1. Бельгий И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Бельгий, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Х.: Вища школа, 1977. – 168 с.
2. Коновалов О.Я. Решение задачи продолжения магнитного поля с цилиндрической поверхности при помощи функций Грина / О.Я. Коновалов, В.М. Михайлов, Н.П. Петренко // Техническая электродинамика. – 2016. – № 5. – С. 11-13.
3. Фукс Б.А. Функции комплексного переменного и некоторые их приложения / Б.А. Фукс, Б.В. Шабат. – М.: Наука. 1964. – 388 с.
4. Mikhailov V.M. Approximation of exact massive solenoid profile for generating pulsed magnetic field / V.M. Mikhailov, M.P. Petrenko // Техническая электродинамика. – 2018. – № 1. – С. 13-16.
5. Борцов А.В. Генератор для физического моделирования импульсных электромагнитных полей / А.В. Борцов // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 1. – С. 63-66.
6. Коновалов О.Я. Экспериментальная проверка решения задачи определения формы одновиткового соленоида для магнитно-импульсной сборки / О.Я. Коновалов // Электротехніка та електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 61-65.
7. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля / В.М. Михайлов. – Х.: Вища школа, 1988. – 88 с.
8. Тойберг П. Оценка точности результатов измерений / П. Тойберг. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 88 с.

### References (transliterated)

1. Belyi I.V., Fertik S.M., Khimenko L.T. Spravochnik po magnitno-impul'snoy obrabotke metallov. Kharkiv: Vyscha shkola, 1977. 168 p.
2. Konovalov O.Ya., Mikhaylov V.M., Petrenko N.P. Reshenie zadachi prodolzheniya magnitnogo polya s tsilindricheskoy poverkhnosti pri pomoshchi funktsiy Grina. Tekhnicheskaya elektrodinamika. 2016. no. 5. pp. 11-13.
3. Fuks B.A. i Shabat B.V. Funktsii kompleksnogo peremennogo i nekotorye ikh prilozheniya. Moscow: Nauka. 1964. 388 p.
4. Mikhaylov V.M., Petrenko N. Approksimatsiya tochnogo profilya massivnogo solenoida dlya sozdaniya impul'snogo magnitnogo polya. Tekhnicheskaya elektrodinamika. 2018. no. 1. pp. 13-16.
5. Bortsov A.V. Generator dlya fizicheskogo modelirovaniya impul'snykh elektromagnitnykh poley. Elektrotehnika i elektromekhanika. 2008. No 1. pp. 63-66.
6. Konovalov O.Ya. Eksperimental'naya proverka resheniya zadachi opredeleniya formy odnovitkovogo solenoida dlya magnitno-impul'snoy sborki. Elektrotehnika ta elektromekhanika. 2009. No 2. pp. 61-65.
7. Mikhaylov V.M. Impul'snye elektromagnitnye polya. Kharkiv: Vyscha shkola, 1988. 88 p.
8. Toyberg P. Otsenka tochnosti rezul'tatov izmereniy. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 88 p.

Поступила (received) 31.10.2018

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Борцов Олександр Васильович (Борцов Александр Васильевич, Bortsov Aleksandr Vasil'evich)** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра інженерної електрофізики; НТУ «ХПІ»; email: avbortsov@gmail.com.

**Петренко Микита Павлович (Петренко Микита Павлович, Petrenko Mykyta Pavlovych)** – аспірант, кафедра інженерної електрофізики; НТУ «ХПІ»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7413-9908>; email: mykyta.petrenko@gmail.com.