

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ ОДНОВИТКОВОГО СОЛЕНОИДА ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СБОРКИ

*Описано стенд для фізичного моделювання розподілу імпульсного магнітного поля системи масивний одновитковий соленоїд – трубчатая заготовка. Проведено порівняння результатів вимірювань відносного розподілу індукції магнітного поля на поверхні заготовки з розрахунковими даними, за якими визначена форма профілю соленоїда.*

*Описан стенд для физического моделирования распределения импульсного магнитного поля системы массивный одновитковый соленоид – трубчатая заготовка. Результаты измерений относительного распределения индукции магнитного поля на поверхности заготовки сравниваются с расчетными данными, на основании которых была определена форма профиля соленоида.*

### ЦЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Магнитно-импульсная обработка металлов давлением (МИОМ), основанная на взаимодействии сильного импульсного магнитного поля, создаваемого соленоидом-инструментом, и вихревых токов, индуцированных этим полем в обрабатываемой заготовке, является одной из прогрессивных и активно развиваемых технологий [1, 2]. Рентабельность её промышленного применения напрямую зависит от рационального использования электрической энергии, затрачиваемой на деформацию заготовки, которое может быть достигнуто выбором формы соленоида, создающего заданное распределение электромагнитного поля на обрабатываемой поверхности.

Примером реализации подобной концепции является решение задачи определения профиля массивного одновиткового соленоида для магнитно-импульсной сборки двух металлических труб радиуса  $R$  при помощи соединительной детали (рис. 1) [3]. В последней протачиваются пазы, заполняемые при выполнении технологической операции деформируемыми участками соединяемых труб. Исходя из целесообразности концентрации на этих участках электродинамических усилий (их поверхностную плотность  $p(R, z)$  называют давлением магнитного поля [1]), было выбрано пространственное распределение осевой составляющей индукции магнитного поля на поверхности трубы  $B_z(R, z)$ , имеющее следующий безразмерный вид (рис. 1, кривая 5):

$$B_z(R, z) = \frac{b}{b^2 + (a - z)^2} + \frac{b}{b^2 + (a + z)^2}, \quad (1)$$

где  $a, b$  – постоянные,  $z$  – осевая координата.

Соответствующее (1) распределение  $p(R, z)$  показано на рис. 1 (кривая 6).

Поскольку магнитно-импульсное сжатие трубчатой заготовки с помощью внешнего индуктора наиболее эффективно при резком поверхностном эффекте [1], для упрощения расчетов решение задачи [3] было получено при допущении идеального поверхностного эффекта, т.е. проникновение электромагнитного поля в соленоид и заготовку не учитывалось. В действительности же оно всегда имеет место. К погрешностям воспроизведения заданного распределения поля могут приводить и другие причины, например, дост-

раивание периферийных участков контура профиля и неточности изготовления. Целью экспериментов является проверка соответствия получаемого и заданного распределений магнитного поля на поверхности трубы с помощью физического моделирования магнитного поля системы.

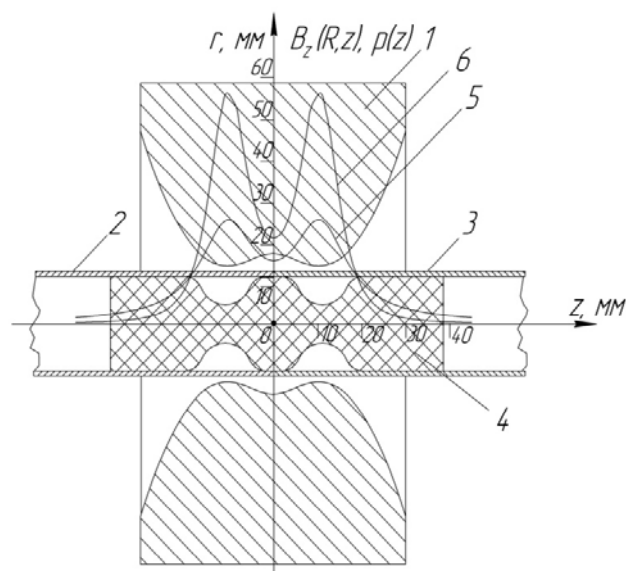


Рис. 1. Система для магнитно-импульсной сборки: 1 – соленоид рассчитанной формы [3]; 2, 3 – соединяемые трубы; 4 – соединительная деталь и заданные пространственные распределения  $B_z(R, z)$  – кривая 5,  $p(R, z)$  – кривая 6;  $a = 0,7, b = 0,5$

### МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Соленоид (рис. 2), профиль которого показан на рис. 1, был изготовлен точением на токарном станке из фосфористой бронзы  $BrO\Phi 65-04$ . Внешний диаметр соленоида 115 мм, минимальный внутренний диаметр – 36,4 мм, длина – 60 мм. Для подключения к источнику энергии в соленоиде выполнен радиальный разрез шириной 1 мм, а также изготовлены медные выводы, обеспечивающие равномерный токоподвод к его наружным кромкам. С помощью вспомогательного эксперимента было определено удельное электро-сопротивление материала соленоида. Для этого в процессе изготовления от соленоида отрезали сектор

кольца прямоугольного сечения, к внешней стороне которого были припаяны клеммы для подвода постоянного тока. Падение напряжения на участке этого сектора измеряли вольтметром В7–27, ток – цифровым мультиметром М–838, а затем определили электросопротивление этого участка и удельное электросопротивление материала  $\rho = 17,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

Экспериментальный стенд для физического моделирования (рис. 3) состоит из низковольтного генератора импульсных токов 1 (конструкция описана в работе [4]), к которому посредством выводов 2 подключается соленоид 3. Для обеспечения соосности медной трубы 4 (внешний радиус  $R = 15$  мм, толщина стенки 1 мм), имитирующей обрабатываемую заготовку, и соленоида 3 используется изоляционная трубчатая втулка 5, выполненная из оргстекла.

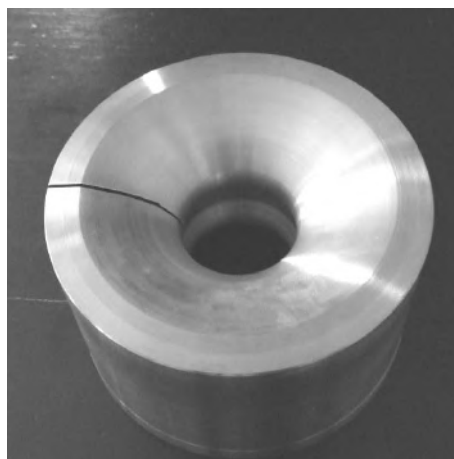


Рис. 2. Массивный одновитковый соленоид рассчитанной формы

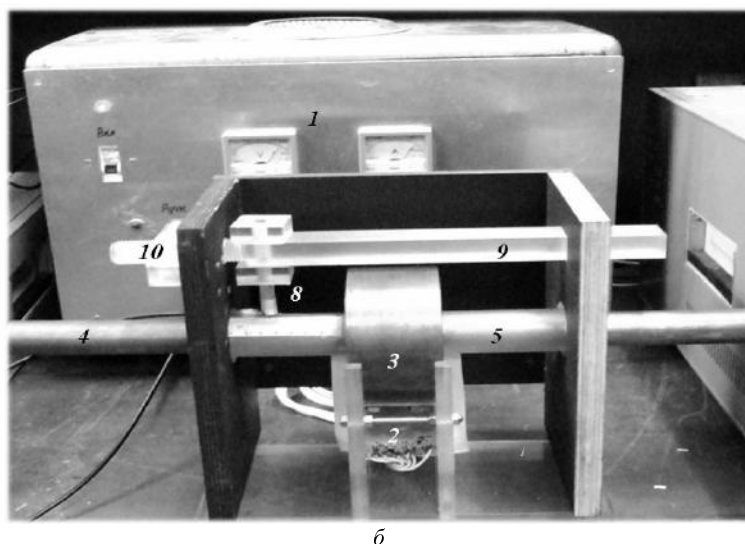
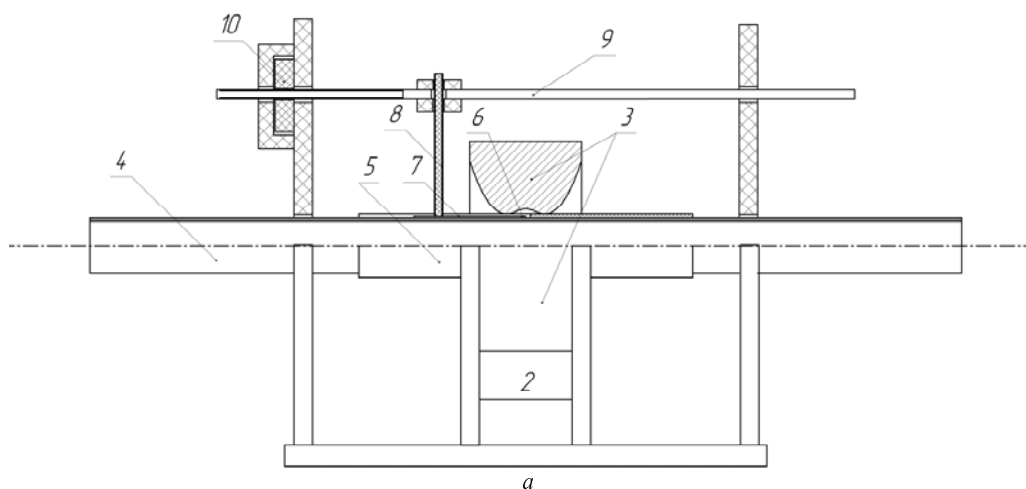


Рис. 3. Конструкция (а) и фотография (б) модели системы соленоид – труба с устройством для перемещения индукционного преобразователя (на заднем плане – низковольтный генератор импульсных токов)

Во втулке 5 имеется разрез для перемещения индукционного преобразователя 6 вдоль образующей трубы 4. Индукционный преобразователь представляет собой катушку из 50 витков медного провода диаметром 0,1 мм, намотанную на оргстеклянный стержень 7 сечением 0,5×0,7 мм. Стержень 7 соединен посредством прижимного винта 8 с оргстеклянной балкой 9, приводимой вместе с индукционным преобразователем в поступательное движение вращением

гайки 10. Текущее значение осевой координаты места расположения центра преобразователя определяется по специальной шкале на внешней поверхности втулки 5. Для минимизации искажений результатов измерений преобразователь перемещался вдоль участка трубы, диаметрально противоположного радиальному разрезу. Выводы индукционного преобразователя присоединены отрезком кабеля РК-50 к аналоговому электронному осциллографу С1–65 А. Запуск осцил-

логафа осуществляется синхронизирующими импульсами, поступающими от генератора.

Осциллографировали э.д.с., наводимую в индукционном преобразователе. Форму и параметры импульса тока, протекающего через соленоид, определяли путем обработки осциллограмм падения напряжения на бифилярном шунте, встроенном в разрядный контур. Одна из таких осциллограмм представлена на рис. 4. Видим, что ток в разрядном контуре имеет форму, близкую к экспоненциально затухающей синусоиде. Частоту импульса разрядного тока изменяли вариацией емкости генератора  $C$  в интервале (1...27) мкФ. В табл. 1 представлены измеренные значения периода колебаний тока  $T$ , а также соответствующие им частота  $f$ , круговая частота  $\omega$ , глубины проникновения поля [5] в заготовку  $\Delta_z$  и в соленоид  $\Delta_c$ .

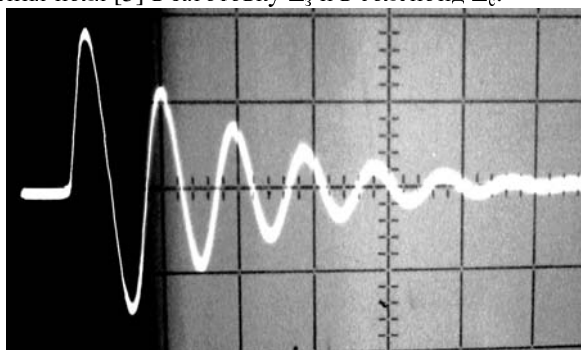


Рис. 4. Падение напряжения на бифилярном шунте ( $C = 1$  мкФ, масштабные коэффициенты сетки: по вертикали 1 В/дел., по горизонтали 5 мкс/дел.)

Из данных табл. 1 с учетом толщины трубы и поперечных размеров соленоида следует, что для всех вариантов импульса разрядного тока в соленоиде и трубе резко проявляется поверхностный эффект.

#### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В основу проведения экспериментов принято известное положение о том, что при резком поверхностном эффекте закон изменения напряженности магнитного поля вблизи проводников можно представить в виде [6, с. 106]

$$\vec{H}(Q,t) = \vec{G}(Q)F(t), \quad (2)$$

где  $\vec{G}(Q)$  – функция точки наблюдения поля  $Q$ ;  $F(t)$  – функция времени  $t$ , одинаковая для всех точек.

Таблица 1  
Результаты измерений периода колебаний, расчета частоты импульса и глубины проникновения поля

Вариант импульса	$C$ , мкФ	$T$ , мкс	$f$ , кГц	$\omega$ , с <sup>-1</sup>	$\Delta_z$ , мм	$\Delta_c$ , мм
1	1	4,59	217,67	$1,367 \cdot 10^6$	0,144	0,474
2	3	6,83	146,39	$0,919 \cdot 10^6$	0,176	0,578
3	7	10,42	95,97	$0,603 \cdot 10^6$	0,217	0,714
4	12	14,78	67,68	$0,425 \cdot 10^6$	0,258	0,850
5	17	17,53	57,05	$0,358 \cdot 10^6$	0,281	0,926
6	22	19,88	50,30	$0,316 \cdot 10^6$	0,299	0,986
7	27	21,74	46,01	$0,289 \cdot 10^6$	0,313	1,031

Естественно, что подобное соотношение имеет место и для вектора индукции магнитного поля  $\vec{B}(Q,t)$ , а также для проекций векторов  $\vec{H}(Q,t)$  и

$\vec{B}(Q,t)$ , при этом в правой части (2) используется соответствующая проекция вектора  $\vec{G}(Q)$ . Согласно методике [6], основанной на формуле (2), относительное распределение осевой составляющей индукции магнитного поля  $B_z(R,z,t_\phi)$  на поверхности трубы представляем в таком виде:

$$\frac{B_z(R,z,t_\phi)}{B_z(R,0,t_\phi)} = \frac{e_z(R,z,t_\phi)}{e_z(R,0,t_\phi)}, \quad (3)$$

где  $e_z(R,z,t_\phi)$  – э.д.с., наводимая в индукционном преобразователе, который расположен на поверхности трубы параллельно оси  $z$ ;  $t_\phi$  – некоторый фиксированный момент времени.

В формуле (3) величины  $R, z$  являются координатами точки наблюдения поля (в эту точку должен помещаться центр преобразователя), а момент времени  $t_\phi$  может быть любым. Таким образом, экспериментальное исследование распределения магнитного поля на поверхности трубы сводится к осциллографированию э.д.с. и, в отличие от известных подобных экспериментов [7], не требует её интегрирования.

С помощью описанного выше устройства индукционный преобразователь перемещали вдоль поверхности трубы и в равноотстоящих точках осциллографировали э.д.с.  $e_z(R,z,t)$ . Типичная осциллограмма показана на рис. 5. В качестве  $t_\phi$  был выбран момент времени, соответствующий максимуму первой положительной полуволны э.д.с. Результаты обработки осциллограмм представлены в табл. 2 и на рис. 6. Приняты обозначения:

$$B_z^*(R,z) = \frac{e_z(R,z,t_\phi)}{e_z(R,0,t_\phi)}; \quad (4)$$

$\zeta$  – абсолютная величина относительного расхождения между заданным и экспериментальным значениями  $B_z^*(R,z)$ .

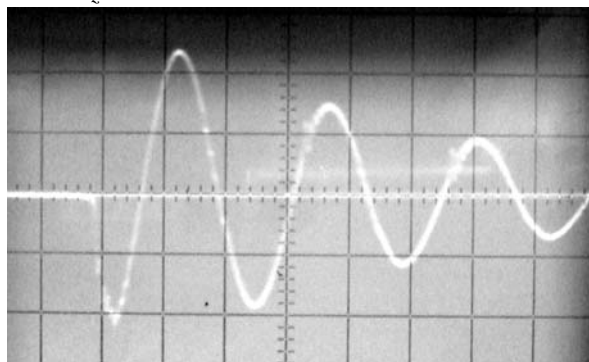


Рис. 5. Осциллограмма э.д.с., наведенной в индукционном преобразователе при  $C = 1$  мкФ,  $z = 27$  мм (масштабные коэффициенты сетки: по вертикали 0,1 В/дел., по горизонтали 2 мкс/дел.)

Заданные значения  $B_z^*(R,z)$  были вычислены с помощью формулы (1) и последующего деления на  $B_z(R,0)$ , что соответствует физическому смыслу соотношения (3). В числителях табл. 2 приведены значения  $e_z(R,z,t_\phi)$  в вольтах ( $e_z$  – сокращенное

обозначение), а в знаменателях – значения  $B_z^*(R, z)$ , полученные из экспериментальных данных.

### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Максимальная относительная погрешность нахождения  $B_z^*(R, z)$  по формуле (4), в силу равенства максимальных относительных погрешностей числителя и знаменателя, не превосходит удвоенного значения максимальной погрешности измерения э.д.с.  $\tilde{\zeta}_u$  [8]. Оценим составляющие этой погрешности, используя известные рекомендации [9, 10]. Представим  $\tilde{\zeta}_u$  в виде суммы:

$$\tilde{\zeta}_u = \tilde{\zeta}_{uo} + \tilde{\zeta}_{np} + \tilde{\zeta}_{yc}, \quad (5)$$

где  $\tilde{\zeta}_{uo}$ ,  $\tilde{\zeta}_{np}$  и  $\tilde{\zeta}_{yc}$  – относительные погрешности, обусловленные соответственно измерением при помощи осциллографа, неточностью расположения преобразователя относительно осевой компоненты напряженности магнитного поля и усреднением измеряемой величины по объему преобразователя.

Каждое слагаемое этой суммы состоит из систематической и случайной составляющих. Для уменьшения случайных составляющих были проведены многократные измерения одной и той же величины и найдено её математическое ожидание (в дальнейшем случайными составляющими слагаемых погрешности пренебрегаем). Погрешность  $\tilde{\zeta}_{uo}$  согласно паспорту осциллографа С1–65 А равна ~ 5 %, а погрешность  $\tilde{\zeta}_{np}$  не превосходит обычно 0,15 % [10].

Таблица 2

Результаты измерений и сравнение с заданным распределением  $B_z^*(R, z)$

z, мм	Заданное распределение $B_z^*(R, z)$	Вариант импульса (табл. 1)									
		1		2		3		4		7	
		$\frac{e_z}{B_z^*(R, z)}$	$\zeta, \%$	$\frac{e_z}{B_z^*(R, z)}$	$\zeta, \%$	$\frac{e_z}{B_z^*(R, z)}$	$\zeta, \%$	$\frac{e_z}{B_z^*(R, z)}$	$\zeta, \%$	$\frac{e_z}{B_z^*(R, z)}$	$\zeta, \%$
0	1,0000	$\frac{0,8878}{1,0000}$	0	$\frac{0,9715}{1,0000}$	0	$\frac{0,9434}{1,0000}$	0	$\frac{0,7457}{1,0000}$	0	$\frac{0,7324}{1,0000}$	0
3	1,1723	$\frac{0,9762}{1,1651}$	0,6	$\frac{1,1021}{1,1344}$	3,2	$\frac{1,1053}{1,1716}$	0,1	$\frac{0,8648}{1,1597}$	1,1	$\frac{0,8318}{1,1357}$	3,1
6	1,4622	$\frac{1,2262}{1,4635}$	0,1	$\frac{1,3816}{1,4221}$	2,7	$\frac{1,3270}{1,4066}$	3,8	$\frac{1,0105}{1,3551}$	7,3	$\frac{0,9884}{1,3495}$	7,7
9	1,6115	$\frac{1,3245}{1,5809}$	1,9	$\frac{1,4896}{1,5333}$	4,9	$\frac{1,4476}{1,5345}$	4,8	$\frac{1,1064}{1,4836}$	7,9	$\frac{1,0674}{1,4575}$	9,6
12	1,3768	$\frac{1,1422}{1,3632}$	1,0	$\frac{1,2708}{1,3081}$	5,0	$\frac{1,2119}{1,2846}$	6,7	$\frac{0,9534}{1,2785}$	7,1	$\frac{0,9144}{1,2484}$	9,3
15	0,9865	$\frac{0,7995}{0,9542}$	3,3	$\frac{0,9127}{0,9395}$	4,8	$\frac{0,8934}{0,9470}$	4,0	$\frac{0,7051}{0,9456}$	4,1	$\frac{0,6991}{0,9545}$	3,2
18	0,6785	$\frac{0,5492}{0,6553}$	3,4	$\frac{0,6337}{0,6523}$	3,9	$\frac{0,6329}{0,6708}$	1,1	$\frac{0,5243}{0,7031}$	3,6	$\frac{0,4834}{0,6601}$	2,7
21	0,4778	$\frac{0,4010}{0,4786}$	0,2	$\frac{0,4560}{0,4693}$	1,8	$\frac{0,4547}{0,4821}$	0,9	$\frac{0,3644}{0,4886}$	2,3	$\frac{0,3582}{0,4891}$	2,4
24	0,3498	$\frac{0,2940}{0,3509}$	0,3	$\frac{0,3451}{0,3552}$	1,6	$\frac{0,3457}{0,3665}$	4,8	$\frac{0,2701}{0,3622}$	3,5	$\frac{0,2650}{0,3619}$	3,5
27	0,2658	$\frac{0,2335}{0,2787}$	4,9	$\frac{0,2688}{0,2766}$	4,1	$\frac{0,2605}{0,2761}$	3,9	$\frac{0,2010}{0,2695}$	1,4	$\frac{0,2062}{0,2816}$	5,9
30	0,2085	$\frac{0,1826}{0,2179}$	4,5	$\frac{0,2062}{0,2122}$	1,8	$\frac{0,2094}{0,2219}$	6,4	$\frac{0,1594}{0,2142}$	2,7	$\frac{0,1562}{0,2132}$	2,3
33	0,1679	$\frac{0,1462}{0,1745}$	3,9	$\frac{0,1701}{0,1751}$	4,3	$\frac{0,1662}{0,1761}$	4,9	$\frac{0,1312}{0,1759}$	4,7	$\frac{0,1203}{0,1643}$	2,2

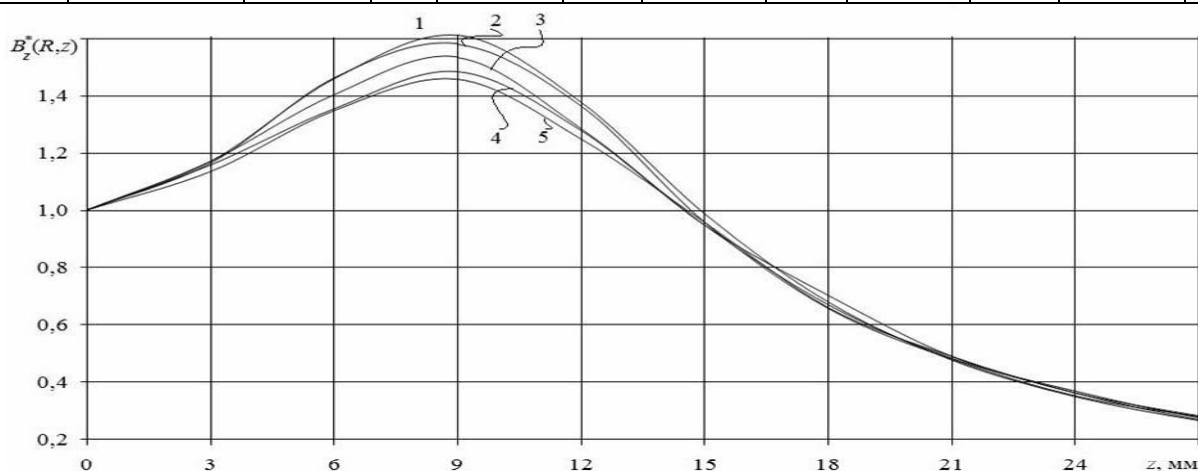


Рис. 6. Заданное (кривая 1) и полученные экспериментально (кривые 2–5) распределения  $B_z^*(R, z)$  на поверхности трубы: для кривой 2 – вариант 1 импульса тока (табл. 1), 3 – 3, 4 – 4, 5 – 7

Третье слагаемое формулы (5)  $\tilde{\zeta}_{yc}$  обусловлено конечными размерами преобразователя и неоднородностью измеряемого магнитного поля. Значение приведенной ошибки зависит, прежде всего, от соотношения габаритов преобразователя и размера зазора между соленоидом и трубой в точке измерения. При увеличении (уменьшении) этого отношения влияние неоднородности измеряемого поля, а также соответствующая погрешность увеличиваются (уменьшаются). Индукционный преобразователь, использованный при проведении экспериментов, является миниатюрным (средний диаметр  $\sim 0,9$  мм, длина – 1 мм), поэтому погрешностью усреднения индукции магнитного поля по его объему  $\tilde{\zeta}_{yc}$  в первом приближении пренебрегаем. Таким образом, максимальная относительная погрешность измерений э.д.с. равна  $\sim 5,2\%$ . Следовательно, погрешность определения  $B_z^*(R, z)$  составляет  $\sim 10,4\%$ , и расхождения  $\zeta$ , приведенные в табл. 2, не превосходят этой величины.

Заметим, что анализ расхождений  $\zeta$  в отдельных точках на поверхности трубы под рабочей частью соленоида, формирующей заданное распределение поля, является более строгим, чем анализ среднеквадратических отклонений  $\sigma$  в совокупности этих точек, поскольку значения  $\zeta$  в отдельных точках могут существенно превышать величину  $\sigma$  [7]. Сказанное иллюстрируется данными табл. 3, в которой приведены значения  $\sigma$ , вычисленные согласно рекомендациям [9]. Данные табл. 3 и кривые рис. 6 показывают, что с уменьшением частоты импульса тока значения  $\sigma$ , а также  $\zeta$  (для определенной части распределения  $B_z^*(R, z)$ ) возрастают, что можно объяснить влиянием проникновения электромагнитного поля в соленоид и трубу.

Таблица 3  
Среднеквадратичные отклонения получаемого и заданного распределений  $B_z^*(R, z)$

Вариант импульса (табл. 1)	1	2	3	4	7
$\sigma$	0,0159	0,0377	0,0406	0,0580	0,0682

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подтверждена достоверность основных положений методики определения профиля массивного одновиткового соленоида [3], обеспечивающего заданное распределение импульсного магнитного поля на поверхности металлической трубчатой заготовки.

2. В случае, когда импульс разрядного тока близок к экспоненциально затухающей синусоиде, а электромагнитное поле практически полностью затухает в толще заготовки, погрешности воспроизведения заданного распределения поля (решения задачи о выборе формы одновиткового соленоида), обусловленные, в частности, допущением идеального поверхностного эффекта, не превосходят погрешностей измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.
2. "Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития", Труды международной научно-технической конференции МИОМ – 2007 (Самара, 18 – 19 сентября 2007 г.), Самарский гос. аэрокосм. университет, Самара, 2007.
3. Коновалов О.Я. Определение формы соленоида по заданному граничному распределению магнитного поля // Электронное моделирование. – 2009. – Т. 31., №1 – С. 117–126.
4. Борцов А.В. Генератор для физического моделирования импульсных электромагнитных полей // Электротехніка і Електромеханіка – 2008. – № 1. – С. 63–66.
5. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники : В 2 т. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – Т. 2. – 416 с.
6. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. – Харьков: Вища школа, 1979. – 140 с.
7. Мовмыга И.Н. Синтез массивных одновитковых соленоидов для получения сильных импульсных магнитных полей : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.05. – Харьков, 1991. – 142 с.
8. Бахвалов Н.С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). – М.: Наука. – 1973. – 632 с.
9. Тойберт П. Оценка точности результатов измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 88 с.
10. Панчишин Ю.М., Усатенко С.Т. Измерение переменных магнитных полей. – К.: Техніка, 1973. – 140 с.

Поступила 10.11.08

Коновалов Олег Ярославич

Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",  
кафедра "Инженерная электрофизика"  
тел. (057) 707-62-45, E-mail: O.Y.Konovalev@gmail.com