

эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок // Вестник НТУ «ХПИ». Электроэнергетика и преобразовательная техника: Сб. научных трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004, №35. – С. 29-54. 9. ГОСТ 8.256-77. Государственная система измерений. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения.

Поступила в редколлегию 29.05.2007.

УДК 621.317.39

Ю.С.НЕМЧЕНКО; Л.М.БОЛОТОВА; Ю.Н.ГИРКА; НТУ «ХПИ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

У статті розглядаються особливості підбору полеутворюючих систем для метрологічної атестації засобів вимірювання магнітних полів розробки НДПКІ «Молнія». Особлива увага приділена питанню похибки вимірювання магнітного поля, яка пов'язана з вибором місця розташування вимірної перетворювача в робочому об'ємі полеутворюючої системи. Наведено приклад метрологічної атестації конкретного вимірника напруженості магнітного поля.

In this article, peculiarities of selection of field forming system for metrological certification of measuring means of magnetic fields developed in RDI «Molniya» are considered. Special attention is given to the question of measurement error of magnetic field connected with the choice of position of measuring transducer in the working volume of field-forming system. Example of metrological certification of particular magnetic field intensity meter is considered.

За время интенсивной эксплуатации высоковольтных электроразрядных установок (ЭРУ) НИПКИ «Молния» было создано большое количество уникальных средств измерения текущих и выходных параметров ЭРУ, в том числе более 40 типов средств измерения импульсных магнитных полей (ИНМП).

Такое большое количество ИНМП [1] необходимо было для суммарного перекрытия чрезвычайно широкого амплитудно-временного диапазона (АВД) ЭРУ, а так же АВД магнитных полей, проникающих извне в испытываемые технические средства (ТС).

В реальности этот АВД составляет по амплитудам от 0,1 А/м до 10^7 А/м, а по времени 1 нс – 0,1 с, то есть для измерения этих АВД необходимы ИНМП, перекрывающие 8 порядков как по амплитуде, так и по времени. Измеритель для перекрытия всего АВД практически сделать невозможно, поэтому и было разработано большое количество ИНМП, дискретно перекрывающих весь требуемый АВД ЭРУ. ИНМП, предназначенные для измерения

Н-полей наносекундного диапазона, имеют шифр ИНМП-3Х; для микросекундного диапазона – ИНМП-2С; для миллисекундного – ИНМП-1С; а ИНМП, предназначенные для измерения полей внутри экранов ТС, имеют шифр ИНМП-ЭХ.

Область применения каждого дискретного ИНМП определяется его переходной характеристикой (ПХ), то есть реакцией ИНМП на единичный скачек напряженности магнитного поля. Основными параметрами ПХ [2] являются форма ПХ, время ее нарастания $T_n^{ПХ}$, постоянная времени спада $T_c^{ПХ}$ и коэффициент преобразования $K_{пр}$.

Рассмотрим подробнее значимость каждого параметра ПХ:

– форма ПХ существенно влияет на степень искажения формы измеряемого магнитного поля, то есть на погрешность измерения формы этих полей. Поэтому для измерения магнитных полей ЭРУ, представляющих собой биэкспоненциальные импульсы, наиболее предпочтительной, с точки зрения ее реализации, является форма ПХ в виде гладкой кривой с экспоненциально нарастающим фронтом и экспоненциальным спадом;

– время нарастания ПХ определяет скоростные возможности ИНМП, то есть для того чтобы с погрешностью менее 5 % измерять длительность фронта T_ϕ магнитных полей, необходимо соблюдать условие:

$$T_\phi \geq 3T_n^{ПХ}; \quad (1)$$

– постоянная времени спада $T_c^{ПХ}$ определяет возможность ИНМП измерять самую медленную часть магнитных полей, то есть их длительность T_c . При 5 % погрешности измерения T_c соотношение между ними должно быть:

$$T_c^{ПХ} \geq 20 T_c; \quad (2)$$

– коэффициент преобразования – это аналитическая зависимость между амплитудой измеряемого магнитного поля H_{max} и амплитудой напряжения на выходе ИНМП – U_{max} :

$$K_{пр} = \frac{U_{max}}{H_{max}} = const. \quad (3)$$

Выражение (3) справедливо только при условии, что выполнены все предыдущие требования к ПХ. Так как только в этом случае форма напряжения на выходе ИНМП $U(t)$ практически совпадет с формой измеряемого магнитного поля $H(t)$.

Разработанные нами ИНМП, структурные схемы которых приведены на рис. 1, состоят из индукционного измерительного преобразователя (ИП) в виде круглой многовитковой катушки, сигнал с которого через RL- или RC-интегратор поступает на вход электронного осциллографа.

Расчетное значение коэффициента преобразования $K_{пр}$ можно определить по формуле:

$$K_{пр} = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot w}{C_n} \geq \frac{3K_{ymin}}{H_{min}} \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;
 S – площадь катушки, м²;
 w – количество витков катушки;
 $T_{\text{и}}$ – постоянная интегрирования, сек;
 K_{ymin} – минимальная чувствительность осциллографа;
 H_{min} – минимальная амплитуда напряженности магнитного поля, которую этот измеритель сможет зарегистрировать.

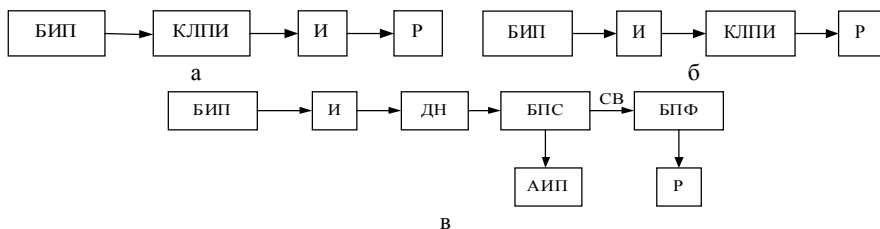


Рисунок 1 – Структурная схема измерителя типа ИНМП

БИП – блок индукционного измерительного преобразователя; КЛПИ – кабельная линия передачи информации; Р – регистратор; ДН – делитель напряжения; И – интегратор; БПС – блок преобразования электрического сигнала в световой; АИП – автономный источник питания; СВ – световод; БФП – блок фотоприемника; а – измеритель с RC-интегратором; б – измеритель с RL-интегратором; в – измерителя ИНМП с волоконно-оптической линией связи

Обычно параметры ПХ определяются экспериментально при помощи специальной аппаратуры. При этом, как правило, отдельно определяются все параметры ПХ ($T_{\text{с}}^{\text{ПХ}}$, $T_{\text{н}}^{\text{ПХ}}$ и $K_{\text{пр}}$). Остановимся более подробно на методах экспериментального определения $K_{\text{пр}}$.

Эти методы основаны на внесении ИП аттестуемого ИНМП в импульсное магнитное поле с известной амплитудой H_{max} и регистрации полученного при этом напряжения на выходе ИНМП при помощи электронного осциллографа.

Источником известного магнитного поля $H(t)$ должны являться полеобразующие системы (ПС), напряженность магнитного поля в которых зависит только от геометрических размеров ПС и амплитудно-временных параметров (АВП) протекающего в ПС импульса тока $I(t)$. В этом случае H_{max} можно рассчитать аналитически. Так как при этом форма $H(t)$ полностью повторяет форму $I(t)$, то, измеряя известными методами форму тока в ПС, мы имеем четкие представления не только о форме $I(t) \sim H(t)$, но и об амплитуде I_{max} , а измерение геометрических размеров ПС – задача простая.

Рассмотрим несколько видов простейших ПС. Такими ПС являются соленоиды различного вида [3] и полосковые линии [4].

Из всех видов соленоидов, которые можно применить для аттестации

ИНМП [3], наиболее простыми являются одновитковые соленоиды (ОС) и кольца Гельмгольца (КГ), обеспечивающие достаточно высокую точность результатов аттестации.

Одновитковые соленоиды

На рис. 2 приведен общий вид одновиткового соленоида.

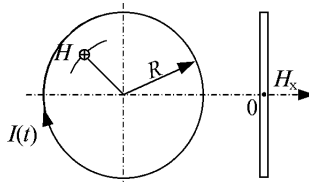


Рисунок 2

Структура магнитного поля в плоскости и по оси одновиткового соленоида описывается следующими уравнениями:

$$H(y) = \frac{I_M}{2} \frac{R^{oc2}}{(R^{oc2} + y^2)^{3/2}}; \quad (5)$$

$$H(\rho) = \frac{I_M E(K)}{\pi R^{oc} (1 - K^2)}, \quad (6)$$

где I_M – амплитуда тока;

R^{oc} – радиус соленоида;

$E(K)$ – полный эллиптический интеграл 2-го рода;

$K = \rho(R^{oc})$.

При рассмотрении зависимости напряженности магнитного поля от координат ρ и x [3] можно сделать выводы, что магнитное поле на значительном расстоянии от центра соленоида как по оси, так и в его плоскости практически однородно (на расстоянии $\rho, x = 0,1 R^{oc}$ неоднородность 1 %, а на расстоянии $\rho, x = 0,2 R^{oc}$ – 3 %). В то же время в области соленоида, примыкающей к токопроводу неоднородность чрезвычайно велика (в точках с координатой $\rho = 0,9 R^{oc}$ напряженность поля возрастает более чем в 3 раза по сравнению с напряженностью в центре). Таким образом, равномерная область магнитного поля, прилегающая к центру соленоида, должна использоваться для определения чувствительности ИНМП, а область резконеоднородного поля вдали от центра – для определения габаритных погрешностей ИНМП.

Значение напряженности магнитного поля в центре ОС H_0 рассчитывается по формуле:

$$H_0 = \frac{I(t)}{D_{OC}} \quad (7)$$

где $I(t)$ – ток протекающий по ОС, А;
 D_{OC} – средний диаметр ОС, м.

Погрешности калибровки в ОС

Рассмотрим здесь только погрешности калибровки ИНМП, вызванные соотношением габаритов ИП и ОС, считая при этом, что у нас отсутствует погрешность аттестации из-за неидеальности ОС, угловой и геометрической погрешности установки ИП в ИС.

В соответствии с существующей методикой напряженность магнитного поля в дискретных точках пространства определяется при помощи измерительных устройств, имеющих отличные от нуля геометрические размеры. Фактически это означает, что интегральному значению магнитного потока через объем ИП придается значение напряженности магнитного поля в точке, соответствующей центру ИП. Такой подход верен при измерениях в однородных полях. Во всех остальных случаях возникает погрешность, связанная с усреднением измеряемой величины по объему ИП, которая возрастает при увеличении габаритов ИП и степени неоднородности измеряемого магнитного поля.

Ниже приведена методика определения такого рода погрешностей, называемых в дальнейшем габаритными погрешностями.

Так как в конечном итоге величина напряжения U_0 на выходе ИНМП, являющаяся мерой измеряемого магнитного, поля зависит от величины потокосцепления Ψ $U_0 = -\frac{d\Psi}{dt}$, то решение задачи состоит в определении и последующем сравнении величин истинного и среднего потокосцеплений в объеме ИП.

Среднее значение потокосцепления рассчитывается из условия, что магнитное поле однородно по объему ИП и, в следствие этого равно по величине, по формуле:

$$\Psi_{cp} = \mu_0 S w H_M, \quad (8)$$

где H_M – значение напряженности магнитного поля в расчетной точке М, соответствующей центру ИП.

Истинное значение потокосцепления:

$$\Psi_p = w \Phi_p, \quad (9)$$

где

$$\Phi_p = \mu_0 \int_S H(S) dS, \quad (10)$$

где $H(S)$ – функция распределения напряженности магнитного поля по

сечению S ИП.

В выбранной прямоугольной системе координат (см. рис. 3) для ИП, измеряющего горизонтальную составляющую ($w = 1$), поток определим по формуле:

$$\Phi_p = \mu_0 \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{z_1}^{z_2} H(y, z) dz, \quad (11)$$

где y_1, y_2, z_1, z_2 – координаты вершин ИП.

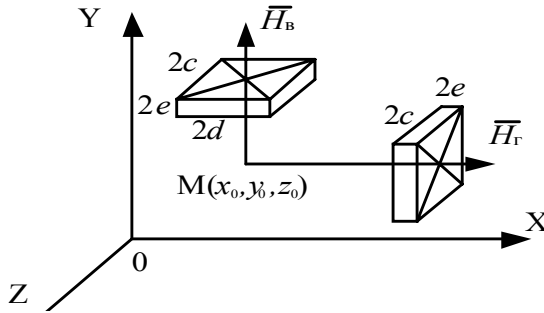


Рисунок 3 – Расположение ИП при измерении горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля в точке M (центры ИП смещены относительно точки M для наглядности)

В общем случае при $w = 1$ потокосцепление в объеме ИП найдем из выражения:

$$\Psi_p = \mu_0 \sum_{i=1}^w \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{z_1}^{z_2} H(y, z) dz. \quad (12)$$

Заменим суммирование интегрированием, применим теорему о среднем и в результате получим:

$$\Psi_p = \frac{\mu_0 \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{z_1}^{z_2} H(x, y, z) dz}{2e}, \quad (13)$$

где $2e$ – толщина ИП.

Габаритная погрешность Π_Γ , определяемая как:

$$\Pi_\Gamma = \frac{\Phi_p - \Phi_{cp}}{\Phi_{cp}} \cdot 100\% = \left(\frac{\Phi_p}{\Phi_{cp}} - 1 \right) 100\%, \quad (14)$$

в соответствии с (8) и (13) для ИП прямоугольной формы в общем случае имеет вид:

$$\Pi_\Gamma = \left(\frac{\int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{z_1}^{z_2} H(x, y, z) dz}{2eSH_{cp}} - 1 \right) 100\%, \quad (15)$$

где $S = 2c \cdot 2d$ – площадь ИП.

В том же случае, если ИП имеет круглую форму, то общее выражение для Π_{Γ} значительно усложняется, вследствие чего его целесообразно конкретизировать для отдельных составляющих H . Например, для H_{Γ} выражение имеет вид:

$$\Pi_{\Gamma}^K = \left(\frac{\int_{x_0-e}^{x_0+e} dx \int_{-R}^R dz \int_{y_0-\sqrt{R^2-z^2}}^{y_0+\sqrt{R^2-z^2}} H_{\Gamma}(x, y, z) dy}{2e\pi r^2 H_{\Gamma}(x_0, y_0, z_0)} - 1 \right) 100\%, \quad (16)$$

где r – радиус ИП;

$2e$ – толщина ИП;

x_0, y_0, z_0 – координаты центра ИП.

Для магнитных полей, однородных вдоль одной из координат, например, при $H_z = \text{const}$ уравнения (15) и (16) могут быть записаны следующим образом:

$$\Pi_{\Gamma}^{\Pi} = \left(\frac{\int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} H(x, y) dy}{4edH_{\text{cp}}} - 1 \right) 100\%; \quad (17)$$

$$\Pi_{\Gamma}^K = \left(\frac{\int_{x_0-e}^{x_0+e} dx \int_{-R}^R dz \int_{y_0-\sqrt{R^2-z^2}}^{y_0+\sqrt{R^2-z^2}} H_{\Gamma}(x, y) dy}{2e\pi r^2 H_{\Gamma}(x_0, y_0)} - 1 \right) 100\%. \quad (18)$$

При калибровке в одновитковом соленоиде габаритная погрешность $\Pi_{\Gamma K}$ зависит от соотношения габаритов соленоида и ИП и от места установки ИП в плоскости соленоида.

При расчетах $\Pi_{\Gamma K}$ полагаем, что напряженность магнитного поля по толщине ИП не изменяется, что правомерно при условии, если $2e \leq 0,05R^{oc}$.

Расчетная модель для случая ИП круглой формы показана на рис. 3.

Напряженность магнитного поля в плоскости одновиткового соленоида зависит только от расстояния между расчетной точкой и его центром и описывается уравнением:

$$H(\rho) = \frac{I \cdot E(k)}{\pi R^{oc} (1-k^2)}, \quad (19)$$

где $E(k)$ – полный эллиптический интеграл 2-го рода.

В соответствии с (14) габаритную погрешность одновиткового соленоида можно рассчитать по формуле:

$$\Pi_{\Gamma K} = \left(\frac{\int S H(S) dS}{S \cdot H(\rho_0)} - 1 \right) = \left(\frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\rho_1}^{\rho_2} H(\rho) \rho d\rho}{\pi r^2 H(\rho_0)} - 1 \right) 100\%. \quad (20)$$

Для всех точек соленоида с координатой $\rho_0 \geq R$:

$$\Pi_{ГК} = \left(\frac{(1 - K_0^2) \int_{-\arcsin \frac{1}{m}}^{\arcsin \frac{1}{m}} d\varphi \int_r^{r \frac{m \cos \varphi + \sqrt{1 - m^2 \sin^2 \varphi}}{1 - K^2}} \frac{\rho E(\rho)}{1 - K^2} d\rho}{\pi r^2 E(K_0)} - 1 \right) 100\%, \quad (21)$$

где $K_0 = \rho_0 / R^{oc}$;

$m = K_0$;

$n = R/r$.

Для точек соленоида с координатой $\rho_0 \leq r$:

$$\Pi_{ГК} = \left(\frac{(1 - K_0^2) \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r \frac{m \cos \varphi + \sqrt{1 - m^2 \sin^2 \varphi}}{1 - K^2}} \frac{\rho E(K)}{1 - K^2} d\rho}{\pi r^2 E(K_0)} - 1 \right) 100\%. \quad (22)$$

$\Pi_{ГК}$ в зависимости от координаты центра ИП показаны на рисунке 4. Из этого рисунка видно, что при коэффициенте $n \geq 10$ величина габаритной погрешности не превышает долей процента при расположении ИП вблизи центра соленоида.

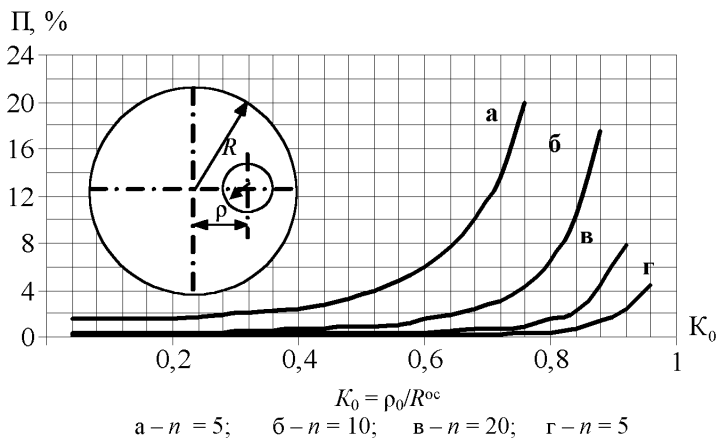


Рисунок 4 – Амплитудная погрешность калибровки ИНМП в одновитковом соленоиде в зависимости от соотношения габаритов соленоида и ИП

Кольца Гельмгольца

Это система круговых контуров с током, которая характеризуется расположением соосных витков на расстоянии друг от друга, равном их радиусу (рис. 5).

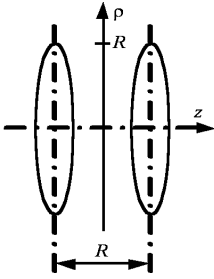


Рисунок 5 – Система колец Гельмгольца

Такая система нашла широкое применение в схемах метрологической аттестации ИНМП благодаря тому, что:

- напряженность поля такой системы легко поддается теоретическому расчету;
- система имеет относительно малую индуктивность;
- область относительной однородности поля достаточно велика.

Напряженность поля, создаваемую системой колец, легко найти суммированием полей отдельных пар. Из соображений удобства суммарную напряженность поля целесообразно для всех систем записать в едином виде [5]:

$$\begin{cases} H_z = \frac{Iw}{R} k_0 \left[1 + k_2 \frac{u_2}{R^2} + k_4 \frac{u_4}{R^4} \right]; \\ H_\rho = \frac{Iw}{R} k_0 \left[-k_2 \frac{v_2}{R^2} - k_4 \frac{v_4}{R^4} \right]. \end{cases} \quad (23)$$

где I – сила тока;

w – половина общего числа витков;

$R_{кр}$ – радиус витка;

$k_0 = 0,715542$; $k_2 = -1,152$; $k_4 = 1,262$;

$$u_2 = \frac{1}{2}(2z^2 - \rho^2); u_4 = \frac{1}{8}(8z^4 - 24z^2\rho^2 + 3\rho^4);$$

$$v_2 = z\rho; v_4 = \frac{1}{2}z\rho(4z^2 - 3\rho^2).$$

В данном случае нас интересует только H_z -составляющая поля. Представим формулу (23) в следующем виде:

$$H_z = \frac{Iw}{R_{кр}} K_{геом}, \quad (24)$$

$K_{геом}$ – геометрический коэффициент, учитывающий расположение ИП в плоскости колец Гельмгольца, зависит от координат ρ и z . Значения этого коэффициента представлены в табл. 1.

отся не более чем на 1 %. Для практических целей достаточно пространство с однородным полем считать в первом приближении сферическим. Радиус сферы r_0 , соответствующий максимальной относительной неоднородности $\eta = 0,01$, определяется по первому не исключенному члену ряда $k_2 = -1,152$ таким образом:

$$\frac{r_0}{R} = \left(\frac{\eta}{|k_4|} \right)^{1/4}. \quad (25)$$

Таблица 1 – Значения геометрического коэффициента в зависимости от координат в долях от радиуса колец Гельмгольца

$\frac{z}{\rho}$	0	$0,2 R_{\text{кг}}$	$0,4 R_{\text{кг}}$	$0,5 R_{\text{кг}}$
0	0,715542	0,684012	0,606734	0,565815
$0,2 R_{\text{кг}}$	0,732569	0,696712	0,60645	0,555794
$0,4 R_{\text{кг}}$	0,790142	0,741302	0,612092	0,532224
$0,6 R_{\text{кг}}$	0,907734	0,837256	0,643132	0,514579
$0,8 R_{\text{кг}}$	1,117803	1,017031	0,732028	0,535316
$R_{\text{кг}}$	1,465788	1,326068	0,92422	0,639873

Примечание – Предполагая поле симметричным, рассматривается только положительная часть значений координат.

Определим область относительно однородного поля, то есть где H_z изменяется. Тогда для каждой точки пространства $r_0 = 0,3 R$.

Предполагается, что старшие, неисключенные члены ряда вносят существенно меньший вклад в основное поле.

Наглядное представление о максимальной неоднородности поля η дает график на рис. 6.

Если измерительный преобразователь имеет толщину $0,1 R$, то при расположении его верхнего края на высоте $0,3 R$ на краях ИП ($z = 0,05 R$; $\rho = 0,03 R$) $H_z = 5,2\%$ от $H_{z\text{max}}$ (в центре системы).

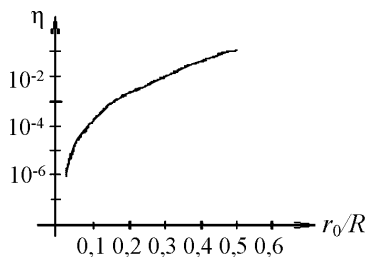


Рисунок 6

Оценка и корректирование влияния ошибок изготовления

Рассмотрим катушку Гельмгольца, у которой радиусы секций R_1 и R_2 несколько отличаются друг от друга и расстояние между плоскостями секций $2a$ не равно среднему радиусу $R = (R_1 + R_2)/2$. Обозначим $\Delta R = (R_1 - R_2)/2$; $\Delta a = a - R/2$. Если в результате ошибок изготовления $\Delta R \neq 0$, $\Delta a \neq 0$, то напряженность поля можно получить по формуле:

$$H_z = \frac{Iw}{R} 0,7155 \left[\left(1 - 1,2 \frac{\Delta a}{R} \right) - 2,4 \frac{\Delta R}{R} \frac{u_1}{R} + 3,84 \frac{\Delta a}{R} \frac{u_2}{R^2} + 5,12 \frac{\Delta R}{R} \frac{u_3}{R^3} \right]. \quad (26)$$

Ошибка изготовления сказалась на появлении членов первого, второго и третьего порядков, искажающих теоретическое распределение поля катушки Гельмгольца. Исходя из требуемой однородности поля не трудно оценить допустимые шибки изготовления.

Считая $R_1 = R + 1 \%$; $R_2 = R - 1 \%$, рассмотрим два варианта:

1) $a = R/2 + 1 \%$;

2) $a = R/2 + 2 \%$.

Тогда на границе относительной однородности поля считая от начала координат (сфера радиусом $0,3 R$) напряженность магнитного поля будет составлять:

1) $H_z = (Iw/R) \cdot 0,7076 \text{ А/м}$;

2) $H_z = (Iw/R) \cdot 0,6934 \text{ А/м}$.

То есть ошибка соответственно будет в пределах $1,2 \%$ и $2,1 \%$.

В самом центре координат напряженность магнитного поля имеет такие значения:

1) $H_z = (Iw/R) \cdot 0,706 \text{ А/м}$;

2) $H_z = (Iw/R) \cdot 0,6962 \text{ А/м}$,

а ошибка составит $1,3 \%$ и $2,7 \%$ соответственно.

Таким образом, погрешность изготовления колец Гельмгольца в указанном интервале дает ошибку определения напряженности магнитного поля не более 3% .

Практическое проведение метрологической аттестации ИНМП

Объект аттестации – измеритель напряженности магнитного поля ИНМП–2С.

Полеобразующая система – кольца Гельмгольца КГИ-90.

Измеритель напряженности импульсных магнитных полей (ИМП) ИНМП-2С (далее по тексту – измеритель ИНМП-2С) предназначен для измерения формы и амплитудно-временных параметров (АВП) напряженности однократных и периодических ИМП микросекундного диапазона при проведении испытаний технических средств (ТС) на электромагнитную совместимость.

Метрологические и технические характеристики измерителя ИНМП-2С приведены в табл. 2.

Внешний вид ИНМП–2С представлен на рис. 7.

Для определения коэффициента преобразования использовались такие средства измерительной техники и оборудование:

1 Кольца Гельмгольца измерительные КГИ-90.

2 Генератор импульсов магнитных полей Г-ИМП.

3 Шунт коаксиальный измерительный ШК-50.

4 Цифровой двухканальный запоминающий осциллограф Tektronix TDS 1012.

Таблица 2

Наименование характеристики	Единица измерения	Величина
1 Амплитуда напряженности измеряемых магнитных полей	А/м	10–5000
3 Погрешность измерения величины магнитного поля, не более	%	5
6 Длина линии передачи информации, не менее	м	10
7 Габаритные размеры БИП, не более	мм	$d = 110, \ell = 25$
8 Масса, не более		
– БИП	кг	3
– КЛПИ		10

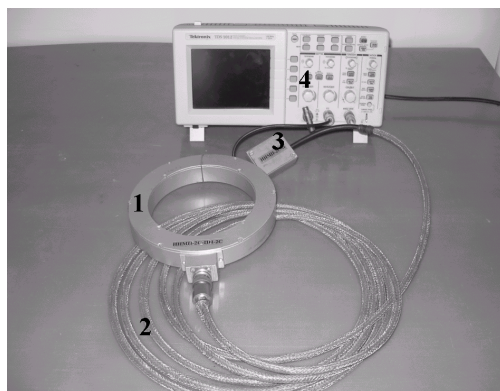


Рисунок 7 – Внешний вид ИНМП–2С
1 – БИП; 2 – КЛПИ; 3 – И; 4 – Р

Кольца Гельмгольца измерительные КГИ-90 (далее по тексту – КГИ-90), рис. 8, предназначены для создания высокооднородного магнитного поля в пространстве между кольцами, используемого для метрологической аттестации ИНМП любого типа с максимальным габаритом не более 250 мм. С помощью КГИ-90 определяются: коэффициент преобразования ИНМП – $K_{пр}$ и погрешность его определения.

В состав КГИ-90 входят:

- блок из двух металлических колец (БКГ);
- диэлектрическая подставка (ДП).

Основные технические характеристики КГИ-90:

1 Основные технические характеристики БКГ:

- средний диаметр каждого кольца, см 89,3;
- расстояние между кольцами, см 44,9;

- вес, кг 1,4;
- 2 Основные технические характеристики ДП:
- габариты (диаметр×высота), см 15×42;
- вес, кг 0,8.

Рабочее место при определении коэффициента преобразования показано на рис. 9

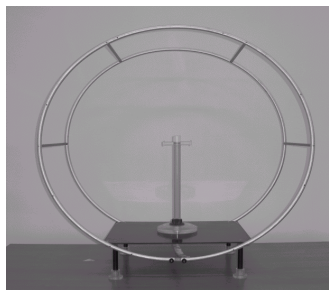


Рисунок 8 – Кольца Гельмгольца измерительные КГИ-90

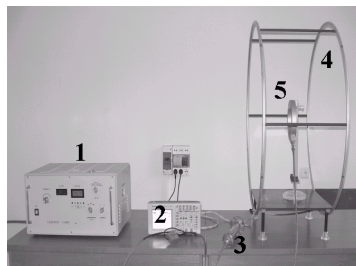


Рисунок 9 – Рабочее место при определении коэффициента преобразования ИНМП-2С
1 – генератор Г-ИМП; 2 – осциллограф Tektronix TDS1012; 3 – шунт измерительный коаксиальный ШК-50; 4 – кольца Гельмгольца КГИ-90; 5 – аттестуемый измеритель ИНМП-2С

При определении $K_{пр}$ был получен ряд осциллограмм, характерный вид которых приведен на рис. 10. На входы осциллографа подавалось одновременно два сигнала: с измерительного шунта ($U_{ЭОII}$) и с измерительного преобразователя ИНМП ($U_{ЭОI}$).

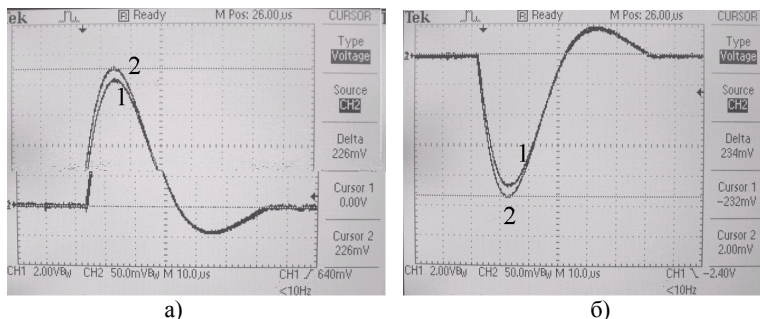


Рисунок 10 – Осциллограммы при разрядном токе 300 А (1 – $U_{ЭОI}$, 2 – $U_{ЭОII}$)
а – положительный импульс тока; б – отрицательный импульс тока

При определении временных параметров ПХ ИНМП-2С использовались такие измерительные приборы и оборудование:

- 1 Генератор крутых всплесков напряжения, тока и магнитного поля

ГКВ – У, I, Н.

2 Цифровой двухканальный запоминающий осциллограф Tektronix TDS 1012.

3 Цифровой мультиметр Fluke 187.

Рабочий стенд для определения времени нарастания ПХ ИНМП–2С показан на рис. 11.

Характерная осциллограмма, полученная при определении временных параметров ИНМП, показана на рисунке 12.

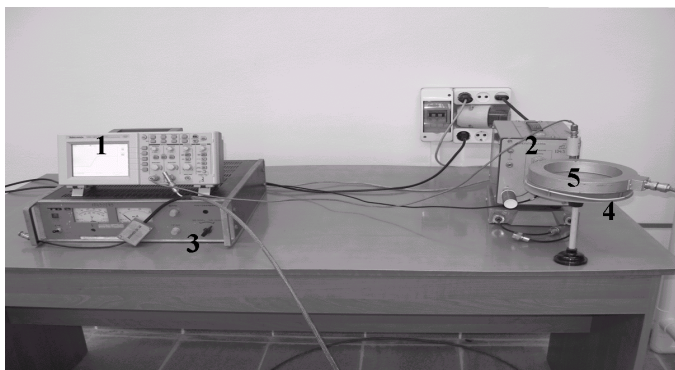


Рисунок 11 – Рабочее место при определении времени нарастания ПХ ИНМП-2С
1 – осциллограф; 2 – генератор ГКВ-У, I, Н; 3 – блок питания генератора;
4 – магнитная рамка; 5 – измеритель ИНМП-2С

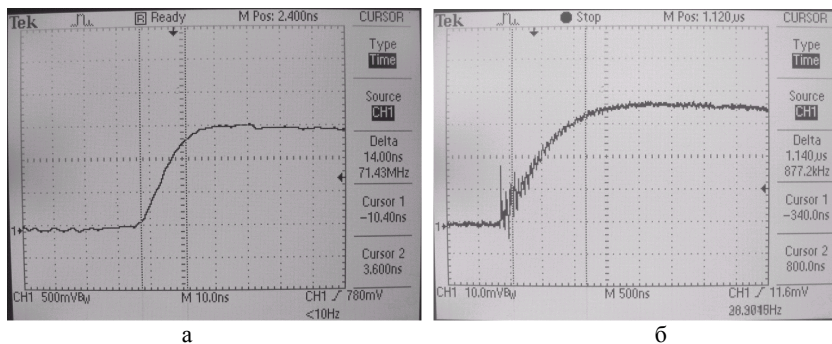


Рисунок 12

а – исходный импульс в виде крутого всплеска;
б – переходная характеристика измерителя ИНМП-2С

Результаты данной метрологической аттестации приведены в табл. 2.
Итоговые результаты аттестации

1) Метрологические характеристики измерителя ИНМП-2С:

$$K_{\text{пр}} = 0,342 \pm 0,006 \text{ мВ/А/м}, P = 0,95;$$

$$T_{\text{н}}^{\text{ПХ}} = 1,14 \pm 0,014 \text{ мкс}; \quad T_{\text{с}}^{\text{ПХ}} = 2,61 \pm 0,029 \text{ мс}.$$

2) Измеритель ИНМП-2С допускается к эксплуатации.

Таблица 2

Метрологические характеристики	Требования по НД		Получено при аттестации		
	Величина	Погрешность	Величина	Относительная погрешность	Абсолютная погрешность
Коэффициент преобразования, $K_{\text{пр}}$	0,35 мВ/А/м	не более $\pm 0,05$ мВ/А/м	0,342 мВ/А/м	1,64 %	0,006 мВ/А/м
Время нарастания ПХ, $T_{\text{н}}^{\text{ПХ}}$, с	$T_{\text{ф}} > 3 T_{\text{н}}^{\text{ПХ}}$	не более $\pm 5 \%$.	1,14 мкс	1,0 %	0,014 мкс
Постоянная времени спада ПХ, $T_{\text{с}}^{\text{ПХ}}$, с	$T_{\text{с}}^{\text{ПХ}} \geq 10 T_{\text{с}}$	не более $\pm 5 \%$.	2,61 мс	1,1 %	0,0287 мс

Выводы. Таким образом, наиболее подходящей полеобразующей системой для определения метрологических характеристик ИНМП являются кольца Гельмгольца. Допустимая погрешность (1 %) измерения магнитного поля возникает при расположении измерительного преобразователя в центре колец таким образом, что объем занимаемый измерительным преобразователем не превышает объема сферы радиусом $0,3 R_{\text{к}}$. На примере конкретной метрологической аттестации ИНМП-2С были подтверждены рассчитанные величины.

Список литературы: 1. Лантушко Б.Н., Лесной И.П., Немченко Ю.С. Средства измерения напряженности импульсных электрических, магнитных полей, токов и напряжений // Вестник НТУ «ХПИ». – 2002. – Т. 1, № 7. – С. 133–145. 2. ГОСТ 8.256–77 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения. 3. Немченко Ю.С. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Спин-9». – 1980. – Гл. 6. 4. Ковалев И.С. Конструирование и расчет полосковых устройств. – М., 1974. – 296 с. 5. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н. и др. Средства измерений параметров магнитного поля. – Л., «Энергия», 1979.

Поступила в редколлегию 22.05.2007