

Ю.С. НЕМЧЕНКО, гл. метролог, НИПКИ «Молния», НТУ «ХПИ»;
С.П. ШАЛАМОВ, студент, НТУ «ХПИ»

ИНДУКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ МОЛНИИ

В статье рассмотрены краткие теоретические сведения для выбора параметров сверхширокополосного измерителя напряженности магнитного поля индукционного типа. Представлены результаты реализации преобразователя для измерения биэкспоненциального импульса магнитного поля. Приведены параметры созданного преобразователя. Используя программу MicroCap, смоделирована работа преобразователя при воздействии на схему сигнала, параметры которого эквивалентны сгенерированному в системе колец Гельмгольца. Проведена калибровка преобразователя.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, электромагнитная индукция, биэкспоненциальный импульс, калибровка индукционного преобразователя, кольца Гельмгольца.

Введение. При исследованиях в области электромагнитных явлений, которые сопровождают молниевый разряд либо при решении задач экранирования, возникает необходимость измерять биэкспоненциальные импульсы магнитного поля (ИМП), имеющие параметры, описанные в [1]. Из-за того, что невозможно измерить одним преобразователем параметры широкополосного ИМП, которое, например, проникает внутрь экранированного объекта, так как при этом длительность импульса может значительно превышать величину, приведенную в [1], применяют независимые друг от друга преобразователи, параметры которых подбираются так, чтобы была возможность произвести измерения с минимальной погрешностью [2]. Удобнее анализировать измерения, когда имеется полная осциллограмма сигнала, а не две отдельные. Для получения полной картины сигнала на одной осциллограмме, необходимо предпринять ряд мер.

Выбор параметров преобразователя. Индукционный преобразователь (ИП) представляет собой магнитную (рамочную) антенну, помещенную в измеряемое магнитное поле. ЭДС, наводимая в ИП, в соответствии с законом электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля [3]:

$$e_d = -\mu_0 \mu_r s w \frac{dH}{dt} \cos \varphi, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость материала сердечника ИП; s – площадь рамки (m^2); w – количество витков рамки; φ –

угол между направлением вектора H и нормалью к рамке.

В соответствии с установленной терминологией, данное средство измерения называют измерителем напряженности магнитного поля (ИНМП).

Под чувствительностью ИП будем понимать отношения максимального напряжения, снимаемого с ИП к максимальной амплитуде измеряемого магнитного поля:

$$K_{.M} = \frac{U}{H_M} \cdot d. \quad (2)$$

Чувствительность ИП любого типа можно определить как [3]:

$$K_{.M} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S \cdot W \cdot \cos \varphi}{T_u}, \quad (3)$$

где T_u – постоянная интегрирования ИНМП.

Исходя из (3) чувствительность ИНМП с RC -интегратором будет низка. Это объясняется следующим:

а) для неискаженной передачи фронта ИП должен иметь малую величину времени нарастания переходной характеристики относительно фронта измеряемого импульса, что может быть выполнено лишь при малом значении параметра SW ;

б) для качественного интегрирования выходного сигнала ИП постоянная интегрирования должна быть очень большой.

Повышение уровня сигнала на выходе ИП можно осуществить, если производить измерения не одним ИНМП, а двумя - ИП фронта и ИП спада импульсов. При этом параметры ИНМП выбираются из условий

$$T_d \ll \frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\beta}; \quad (4)$$

$$\frac{1}{\alpha} \geq T_u \gg \frac{1}{\beta}. \quad (5)$$

Условия (4) и (5) говорят о том, что ИП для измерения фронта должен иметь параметр SW , обеспечивающий неискаженную передачу фронта импульса, а интегратор должен иметь постоянную интегрирования в (30-50) раз больше, чем длительность фронта. Напряжение на выходе данного ИНМП практически совпадает по форме с измеряемым импульсом магнитного поля в интервале времен от 0 до t_{max} .

Параметры ИНМП для измерения спада (SW и T_u) выбираются из условий:

$$\frac{1}{\alpha} \gg T_d \geq \frac{1}{\beta}; \quad (6)$$

$$T_u \gg \frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\beta}. \quad (7)$$

Напряжение на выходе таких измерителей практически совпадает по длительности с измеряемым импульсом.

Канал ИНМП измерения фронта (ИНМП-ВФ) построен по схеме ИНМП с RL-интегратором (элементы R1, L1), а канал ИНМП измерения длительности импульса (ИНМП-ВС) – по схеме с RC-интегратором (элементы L2, C1, R5) (Рис. 1). Особенности применения ИНМП с RL- и RC-интегратором приведены в [3].

Напряжение на выходе каналов ИНМП-ВФ и ИНМП-ВС имеют вид:

$$U_{\phi} = K_{\text{M}}^{\phi} (e^{-t/T_{\text{H}}^{\phi}} - e^{-\beta t}); \quad (8)$$

$$U_{\text{c}} = K_{\text{M}}^{\text{c}} (e^{-\alpha t} - e^{-t/T_{\text{H}}^{\text{c}}}), \quad (9)$$

где T_{H}^{ϕ} – постоянная интегрирования канала фронта; T_{H}^{c} – постоянная времени нарастания переходной характеристики канала длительности импульса.

Для суммирования сигналов с ИНМП-ВФ и ИНМП-ВС применяется схема, приведенная на рис. 1.

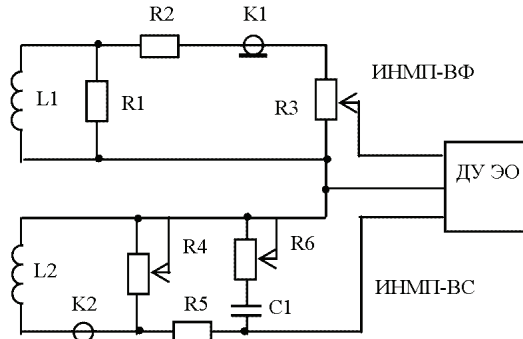


Рисунок 1 – Принципиальная схема ИНМП

Сумма обоих сигналов такова:

$$U_{\text{o}} = K_{\text{M}}^{\phi} e^{t/T_{\text{H}}^{\phi}} - K_{\text{M}}^{\phi} e^{-\beta t} + K_{\text{M}}^{\text{c}} e^{-\alpha t} + K_{\text{M}}^{\text{c}} e^{t/T_{\text{H}}^{\text{c}}}. \quad (10)$$

При выполнении условий:

$$T_{\text{H}}^{\phi} = T_{\text{H}}^{\text{c}}; \quad (11)$$

$$K_{\text{M}}^{\phi} = K_{\text{M}}^{\text{c}}; \quad (12)$$

$$U_{\text{o}} = K_{\text{M}}^{\phi} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \approx H(t). \quad (13)$$

Реализация условия (13) достигается:

- выполнением условия (11) регулировкой резистора R3;
- выполнением условия (10) регулировкой резистора R4.

Сложение сигналов U_{ϕ} и U_{c} производится в дифференциальном усилителе осциллографа (ДУ ЭО).

Из-за некоторого отличия формы сигналов U_ϕ и U_c от описанных уравнениями (8) и (9), в месте их стыка наблюдается небольшой провал, который устраняется при настройке измерителя корректирующим резистором R6 [4].

Созданные датчики имеют следующие параметры:

ИНМП-ВФ:

Диаметр витков – 75 мм; количество витков – 20; интегрирующее сопротивление – 1 Ом.

Датчик должен передавать практически без искажений фронт импульса, имеющий $\tau_{\phi(0,1-0,9)} = 100$ (нс).

ИНМП-ВС:

Диаметр витков – 75 мм; количество витков – 1000; интегрирующее сопротивление – 10 кОм; интегрирующая емкость – 0,3 мкФ.

Чувствительность ИНМП-ВС рассчитанная по формуле (2):

$$K_{\text{ИНМП-ВС}}^{\text{расчет}} = 1,85 \text{ (мВ/А/м)}.$$

Моделирование работы ИНМП. При помощи программы MicroCap построена схема, моделирующая работу широкополосного ИНМП. Схема замещения широкополосного ИНМП в MicroCap приведена на рис. 2.

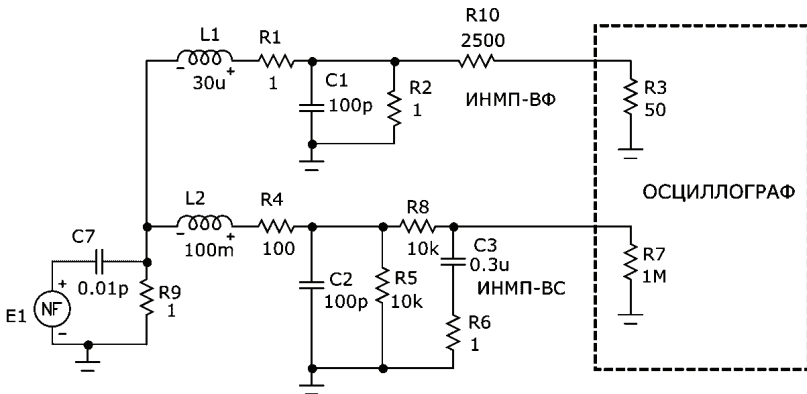


Рисунок 2 – Схема замещения широкополосного ИНМП в MicroCap

Источник E1 моделирует сигнал, который имеет фронт 300 (нс), а спад – 1,5 (мс). На вход преобразователя подается сигнал, который имеет вид:

$$U = A(\beta e^{-\beta t} - \alpha \cdot e^{-\alpha t}) \sim \frac{dH(t)}{dt}. \quad (14)$$

Сигнал источника E1 приведен на рис. 3 и 4.

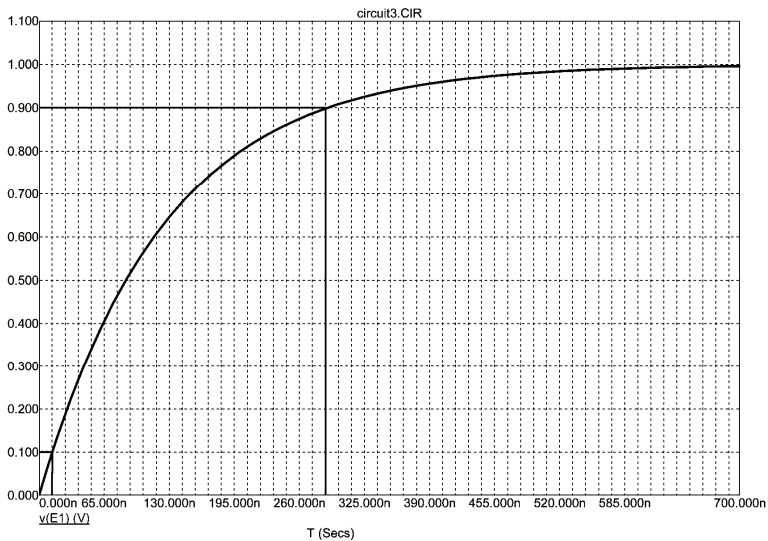


Рисунок 3 – Фронт измеряемого сигнала

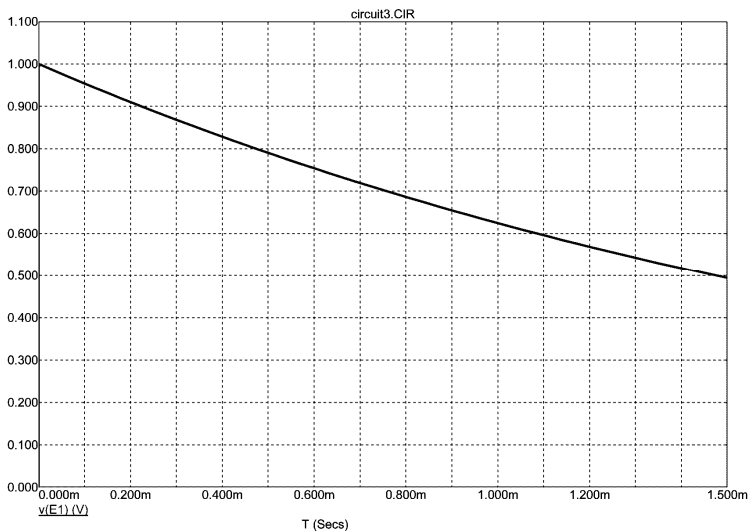


Рисунок 4 – Длительность спада измеряемого сигнала

Из рис. 3 видно, что фронт импульса на уровнях 0,1 и 0,9 относительно максимального значения имеет величину $T_{\Phi(0,1-0,9)} = 300$ нс.

Из рис. 4 определяется длительность импульса на уровне 0,5 от макси-

мального значения, составляющая $T_c = 1,5$ (мс).

Результаты моделирования процесса измерения напряженности магнитного поля приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что условия (11) и (12) выполнены, но спад передается с относительной погрешностью 58 %.

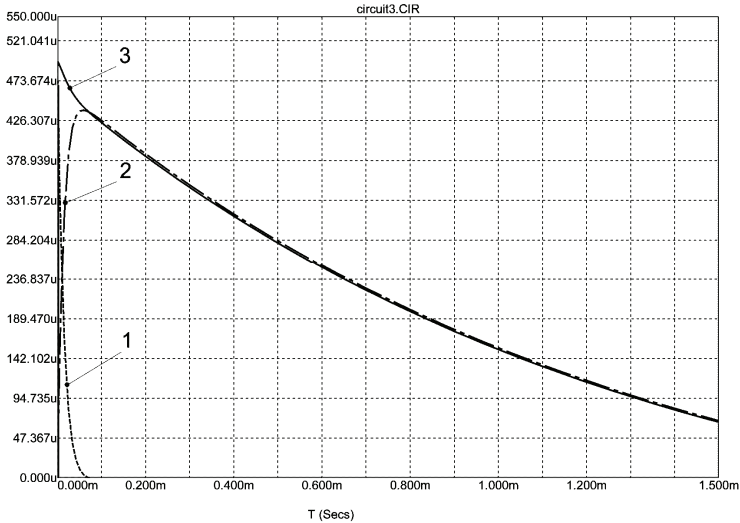


Рисунок 5 – Результаты моделирования: 1 - сигнал с ИНМП-ВФ; 2 - сигнал с ИНМП-ВС; 3 - сигнал после суммирования

Калибровка ИНПМ. Принципиальная схема установки, с помощью которой проводилась калибровка преобразователя, приведена на рис. 6.

Внешний вид калибровочной установки приведен на рис. 7.

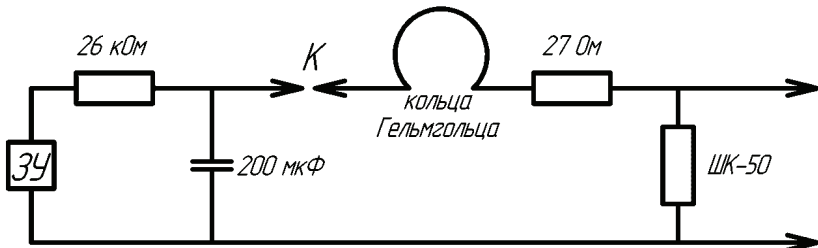


Рисунок 6 - Принципиальная схема установки

Осциллограмма импульса напряжения, снимаемого с шунта ШК-50 приведена на рис. 8 и рис. 9.

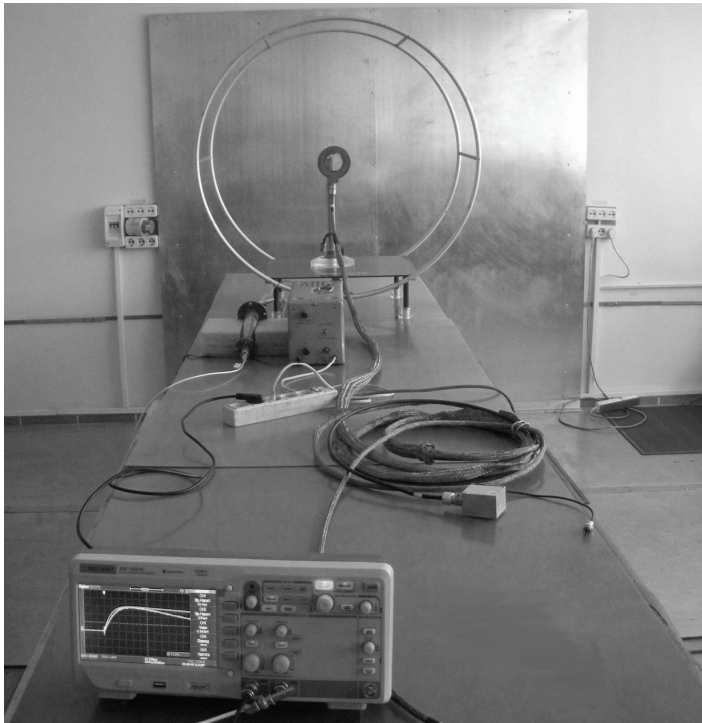


Рисунок 7 – Внешний вид калибровочной установки

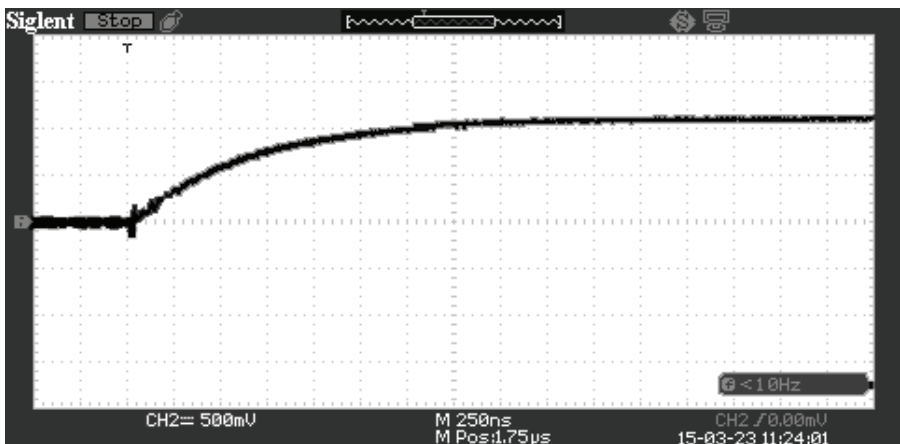


Рисунок 8 - Фронт измеряемого импульса

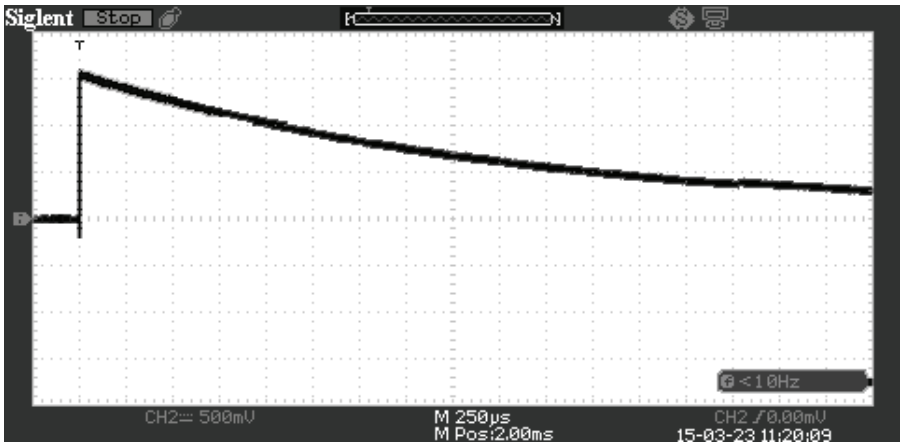


Рисунок 9 -Длительность импульса

Из рис. 8 видно, что фронт импульса напряжения, снимаемого с шунта на уровнях 0,1 и 0,9 относительно максимального значения имеет величину $T_{\Phi(0,1-0,9)} = 1,2$ (мкс).

Из рис. 9 определена длительность импульса напряжения, снимаемого с шунта на уровне 0,5 от максимального значения, составляющая $T_C = 1,5$ (мс).

Сигнал, снимаемый с датчиков приведен на рис. 10 и рис. 11.

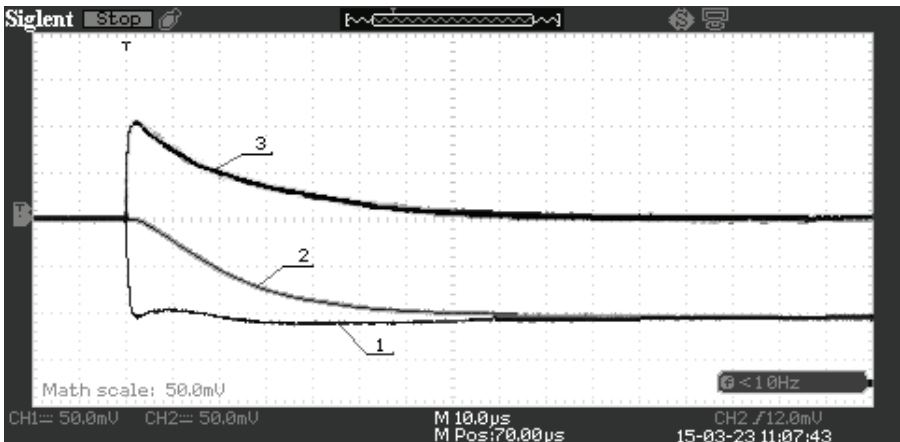


Рисунок 10 – Сигнал, снимаемый с датчиков

1 - сигнал с ИНМП-ВФ; 2 - сигнал с ИНМП-ВС; 3 - сигнал после суммирования

На рис. 10 приведен случай, когда условия (11) и (12) выполнены. Вследствие разной формы сигналов, а именно спада ИНМП-ВФ и фронта

ИНМП-ВС, существует небольшой провал, величина которого не превышает 5 %.

При сравнении осциллограмм, приведенных на рис. 9 и 11 определили, что созданный датчик спад импульса передает с погрешностью менее 5 %.

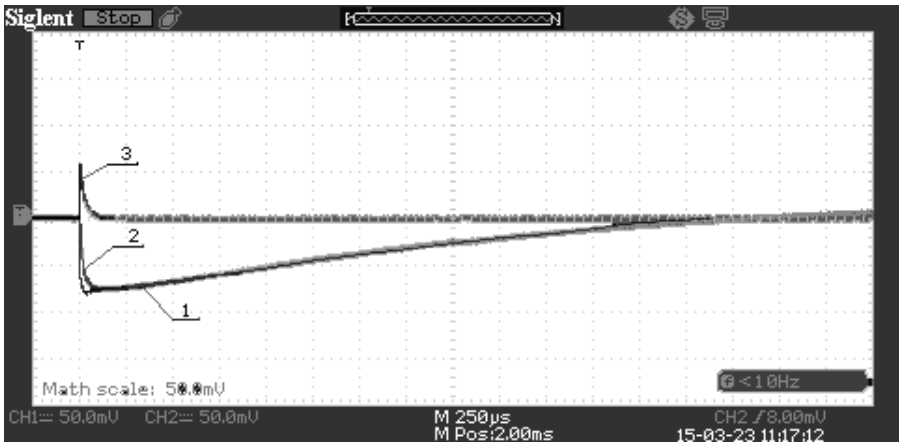


Рисунок 11 – Сигнал, снимаемый с датчиков

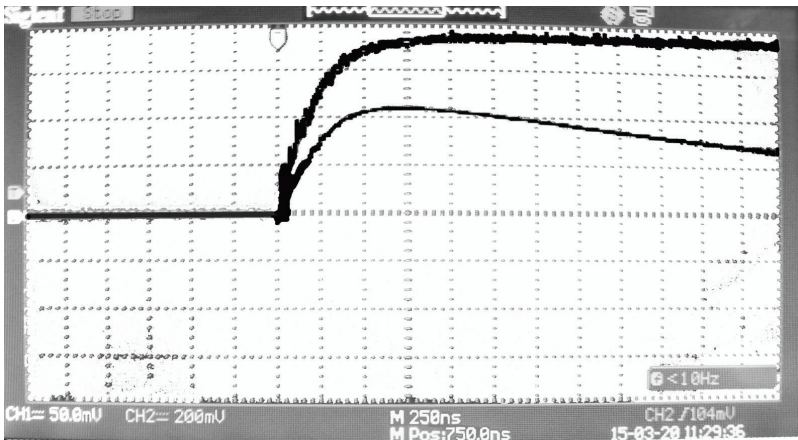


Рисунок 12 – Измерение фронта импульса

Поле в центре колец Гельмгольца рассчитывается по выражению [5]:

$$H = 0,716 \frac{I}{r}, \quad (15)$$

где r - радиус колец.

Шунт ШК-50 имеет сопротивление $R_{ш}=0,0237$ (Ом), разрядный ток

$I_p = 46,4$ (А). При расчете по (13), $H = 74,24$ (А/м).

Экспериментально определено значение чувствительность ИНМП-ВС: $K_{\text{ИНМП-ВС}}^{\text{эксп.}} = 1,48$ (мВ/А/м), что согласуется с расчетными значениями. Относительная погрешность расчетного значения чувствительности, если принять за истинное значение экспериментальные результаты, составляет 25 %.

Для получения импульса магнитного поля с более коротким фронтом использовали одновитковый соленоид с диаметром 0,895 м. Использовался шунт ШК-50. Осциллограммы сигнала, снимаемого с шунта и ИНМП-ВФ приведены на рис. 12.

ИНМП-ВФ измеряет фронт импульса $T_{\Phi(0,1-0,9)} = 350$ (нс) с погрешностью менее 5%.

Выводы. Спроектирован и создан измеритель напряженности магнитного поля индукционного типа для измерения сверхширокополосного биэкспоненциального импульсного магнитного поля.

Время нарастания переходной характеристики менее 350 нс, постоянная интегрирования более 1,5 мс.

Приведены условия для корректного суммирования сигнала с двух независимых преобразователей.

Смоделирована работа измерителя с помощью MicroCap.

Проведена калибровка измерителя на стенде.

Результаты калибровки и моделирования совпадают с приемлемой погрешностью.

Список литературы: 1. DSTU 3681-98 Стойкость к воздействию грозových разрядов. Технические требования и методы испытаний. – Держстандарт України, 1998. – 28 с. 2. *Oleksii Skoblikov, Volodymyr Kniaziev* Penetration of lightning electromagnetic pulses into metallic enclosures with apertures // Electric power system research. – Vol. 113, august 2014. – P. 48-63. 3. *Шаламов С.П.* Измерение импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2014. - № 50. – С. 161-168. 4. *Немченко Ю.С., Лесной И.П., Лантушко Б.Н, Князев В.В.* Метрологическое обеспечение эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». 2004. - № 35. – С. 29-54. 5. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 392 с.

Bibliography (transliterated): 1. DSTU 3681-98 Stojkost' k vozdeystviyu grozovyh rozrjadov. Tehnicheskie trebovanija i metody ispytanj. Derzhstandart Ukraїni, 1998. 28. Print. 2. *Oleksii Skoblikov, Volodymyr Kniaziev.* Electric power system research. Vol. 113, august 2014. 48-63. Print. 3. *Shalamov S.P.* Izmerenie impul'snyh magnitnyh polej. *Shalamov S.P Vestn. Har'k. politehn. in-ta.* 2014. No 50. 161-168 Print. 4. *Nemchenko Ju.S* Metrologicheskoe obespechenie jekspluatacii vysokovol'tnyh impul'snyh jelektrozrjadnyh ustanovok. *Nemchenko Ju.S., Lesnoj I.P., Lantushko B.N, Knjazev V.V Vestn. Har'k. politehn. in-ta.* 2004. No 35. 29-54. Print. 5. *Knopfel' G.* Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. *L Knopfel' G.* Moscow: Mir, 1972. 392. Print.

Поступила (received) 02.04.2015