

- [2] Koch R. H., Rozen J. R. Low-noise flux-gate magnetic-field sensors using ring- and rod-core geometries // *Applied physics letters*. — 2001. — V. 73. — No 13. — P. 1897–1899.
- [3] Ioan C., Tibu M, Chiriac H. Magnetic noise measurement for Vacquier type fluxgate sensor with double excitation // *J. of Optoelectronics and Advanced Materials*. — 2004. — V. 6. — No 2. — P. 705–708.
- [4] Sasada I., Kashima H. Simple Design for Orthogonal Fluxgate Magnetometer in Fundamental Mode // *J. of the Magnetics Society of Japan*. — 2009. — V. 33. — No 2. — P. 43–45.
- [5] Paperno E. Suppression of magnetic noise in the fundamental-mode orthogonal fluxgate // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2004. — V. 116. — No 3. — P. 405–409.
- [6] Koch R. H., Deak J. G., Grinstein G. Fundamental limits to magnetic field sensitivity of flux-gate magnetic-field sensors // *Applied Physics Letters* — 1999. — V. 75. — No 24. — P. 3862–3864.
- [7] Merayo J. M. G., P. Brauer, F. Primdahl. Triaxial fluxgate gradiometer of high stability and linearity // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2005. — V. 120. — No 1. — P. 71–77.
- [8] Nielsen O. V., J. R. Petersen, F. Primdahl, P. Brauer, B. Hernando, A. Fernandez, J. M. G. Merayo, P. Ripka. Development, construction and analysis of the ‘Oersted’ fluxgate magnetometer // *Measurement Science and Technology*. — 1995. — V. 6. — No 8. — P. 1099.
- [9] Носенко В. К. Аморфні та нанокристалічні сплави для приладобудування і енергоєфективних технологій // *Вісник НАН України*. — 2015. — Т. 4. — С. 68–79.
- [10] Harrison L. T. Current sources & voltage references / *Digitaler Nachdr.* — Amsterdam: Newnes, 2009.
- [11] Tsvividis Y. P. Accurate analysis of temperature effects in Ic-Vbe characteristics with application to bandgap reference sources // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. — 1980. — V. 15. — No 6. — P. 1076–1084.
- [12] Rax B. G., C. I. Lee, A. H. Johnston. Degradation of precision reference devices in space environments // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1997. — V. 44. — No 6. — P. 1939–1944.
- [13] <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1000afe.pdf>, ресурс доступний на 2016.06.07.
- [14] <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5791.pdf>, ресурс доступний на 2016.06.07.
- [15] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2188.pdf>, ресурс доступний на 2016.06.07.
- [16] <http://www.vishaypg.com/docs/63060/VSMMP.pdf>, ресурс доступний на 2016.06.07.

УДК 621.317.4

С.П. Шаламов

НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ”, Харьков, Украина

ИНДУКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*A current meter based on the principle of electromagnetic induction. The aim of the article is to describe the design of wide band meter of magnetic field. **Methodology.** Meters based on the principle of electromagnetic induction have several advantages, such as simplicity of construction, reliability, low cost, no need in a power source, relatively high sensitivity. Creation of such a meter is necessary, because in some cases there is no possibility to use other method. Transient properties of a meter are determined by the number of turns and the constant of integration. Sensitivity is determined by measuring the number of turns, the coil sectional area, the core material and the integration constant. A meter has the rise time from 10 ns and the integration constant from 1 ms. Earlier described dependencies were used to select the main parameters of the converter. It was based on generally accepted and widely known equivalent circuit. The experience of created earlier pulse magnetic field meters was considered both for measuring the magnetic fields, and large pulse current. **Practical value.** The results of meter implementation are given. The design peculiarities of the given measuring instruments are shown.*

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, электромагнитная индукция, биэкспоненциальный импульс, калибровка индукционного преобразователя, переходная характеристика.

При исследованиях в области электромагнитных явлений, которые сопровождают молниевый разряд или при решении задач экранирования, возникает необходимость измерять широкополосные биэкспоненциальные импульсы магнитного поля. Индукционные преобразователи широко применяются при научных исследованиях из-за своей простоты и надежности, имеют широкий амплитудно-временной диапазон и приемлемую точность. Измеритель напряженности магнитного поля (ИНМП) индукционного типа представляет собой магнитную антенну. Основными электрическими параметрами ИНМП является постоянная интегрирования и чувствительность. Так как эти параметры, определяющие амплитудно-временные характеристики выходного сигнала обратно пропорциональны друг другу, то при расчетах измерителей необходимо ограничивать или чувствительность, или временные характеристики измерителей за счет преимущественного использования одного из параметров. Поэтому невозможно создать высокочувствительный измеритель с очень широкой полосой пропускания. Поэтому широкополосный ИНМП индукционного типа для измерения широкополосного импульсного магнитного поля состоит из двух независимых друг от друга

каналов измерения фронта (ИНМП-ИФ) и спада (ИНМП-ИС). Канал измерения фронта построен по схеме преобразователя с RL интегрированием, канал измерения спада использует RC интегрирования. Нижняя граница чувствительности определяется чувствительностью осциллографа.

Индукционный преобразователь предназначен измерять широкополосное импульсное магнитное поле с фронтом более 50 нс и длительностью импульса до 1 мс.

1. Анализ современных достижений в области измерения импульсных токов

В [1] представлено описание измерителя сильных импульсных токов для измерения в цепях с высоким рабочим напряжением. Принципиальная схема измерителя представлена на рис. 1. Конструктивное выполнение показано на рис. 2.

Сигнал интегрируется на RC-интеграторе. Измеряемый ток I_k пропускают по прямолинейному проводнику. Вокруг проводника при этом возникает магнитное поле, совпадающее по форме с импульсом тока. В симметричных относительно проводника точках М и М' компланарно и противофазно установлены два индукционных измерительных преобразователя.

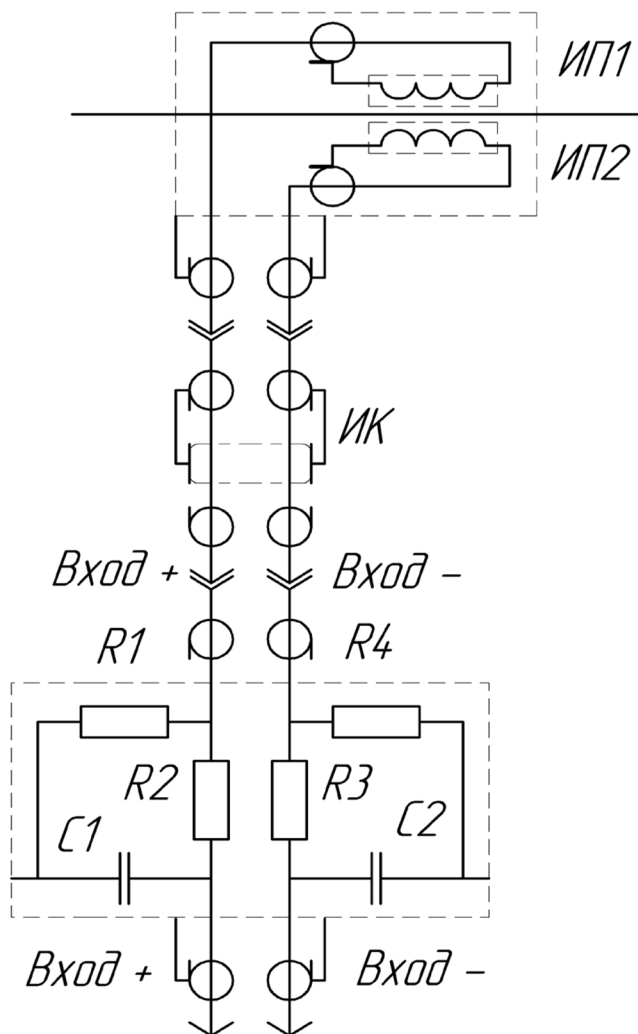


Рис. 1. Принципиальная схема измерителя

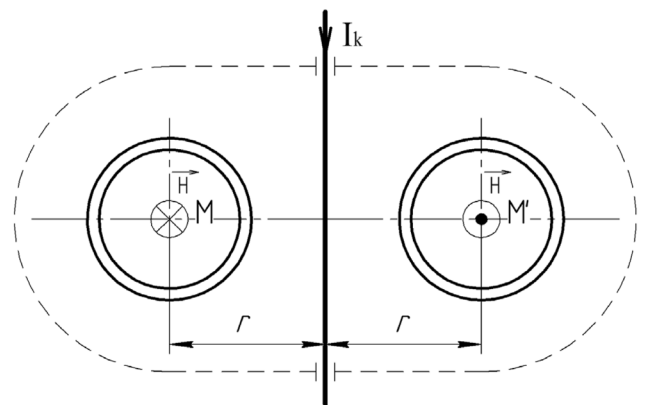


Рис. 2. Конструкция измерителя

Вся конструкция заключена в электромагнитный экран цилиндрической формы. Под действием электромагнитного поля в обоих преобразователях возникают равные по величине, но противоположные по фазе э. д. с., которые в последующих устройствах интегрируются, а затем вычитаются в дифференциальном усилителе осциллографа. Разработанная конструкция позволяет эффективно избавиться от помех.

2. Конструкция измерителя

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 [1,2]:

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

где μ_0 — постоянная магнитной проницаемости; μ_r — относительная магнитная проницаемость материала сердечника ИП; s — площадь рамки; w — количество витков рамки; φ — угол между направлением вектора H и нормалью к рамке.

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

$$K_m = U_d / H_m \quad (2)$$

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: 1) 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 ; 2) 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.

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

$$U_\phi = K_m^\phi (e^{-t/T^\phi} - e^{-\beta t}) \quad (8)$$

$$U_c = K_m^c (e^{-\alpha t} - e^{-t/T^c}) \quad (9)$$

где T^ϕ — постоянная интегрирования канала фронта; T^c — постоянная времени нарастания переходной характеристики канала длительности импульса.

Для суммирования сигналов с ИНМП-ВФ и ИНМП-ВС применяется схема, приведенная на рис. 3 [3,4].

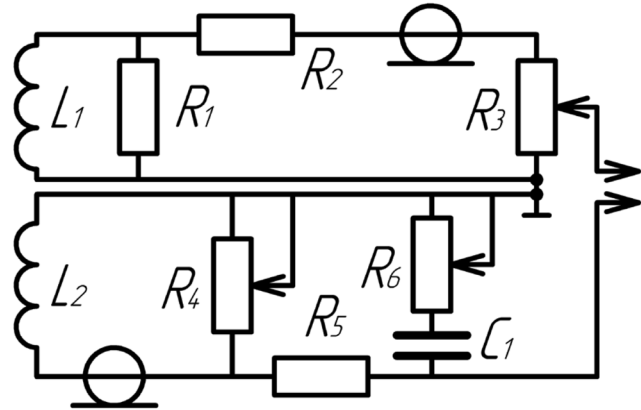


Рис. 3. Принципиальная схема ИНМП

Сумма обоих сигналов такова:

$$U_o = K_m^\phi e^{t/T^\phi} - K_m^\phi e^{-\beta t} + K_m^c e^{-\alpha t} + K_m^c e^{t/T^c} \quad (10)$$

Условия, необходимые для работы измерителя:

$$T_n^\phi = T_n^c \quad (11)$$

$$K_m^\phi = K_m^c \quad (12)$$

$$U_o = K_m^\phi (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \approx H(t) \quad (13)$$

Реализация условия (13) достигается 1) выполнением условия (11) регулировкой резистора R3; 2) выполнением условия (10) регулировкой резистора R4. Сложение сигналов U_ϕ и U_c производится в дифференциальном усилителе осциллографа.

3. Описание конструкции датчика

Переходная характеристика индукционного преобразователя для измерения фронта импульса магнитного поля показана на рис 4.

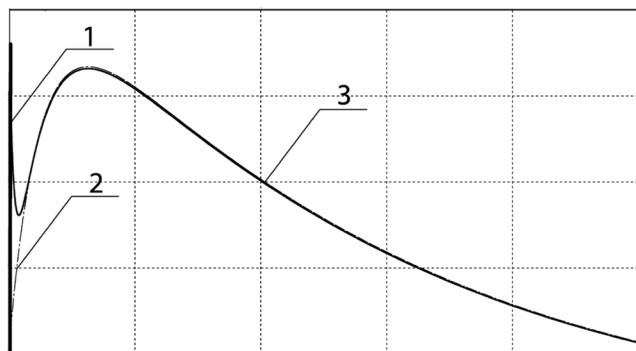


Рис. 4. Результаты расчета переходной характеристики измерителя (1 — сигнал с ИНМП-ИФ; 2 — сигнал с ИНМП-ИС; 3 — сумма сигналов; масштаб по вертикали — относительные единицы; масштаб по горизонтали — 5 нс/клетка)

Осциллограммы импульса тока приведены на рис. 5 и рис. 6.

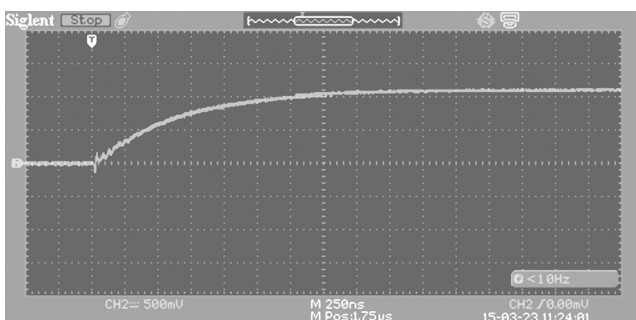


Рис. 5. Фронт импульса тока

Из рис. 5 видно, что фронт импульса напряжения, которое снимается с шунта на уровнях 0,1 и 0,9 от максимального значения имеет величину $T_{\phi(0,1-0,9)}$ мкс.

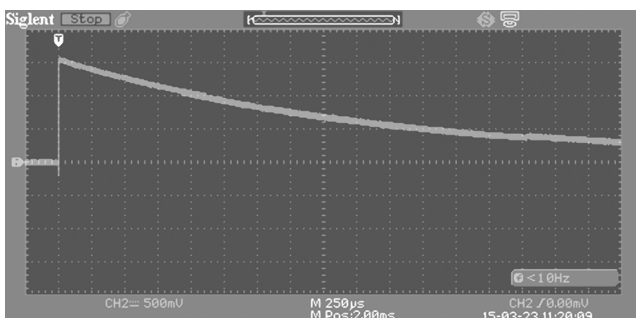


Рис. 6. Спад импульса тока

Из рис. 6 определено, что длительность импульса напряжения на уровне 0,5 от максимального значения имеет величину $T_c=1,75$ мс.

Осциллограммы сигналов с измерителя приведены на рис. 7.

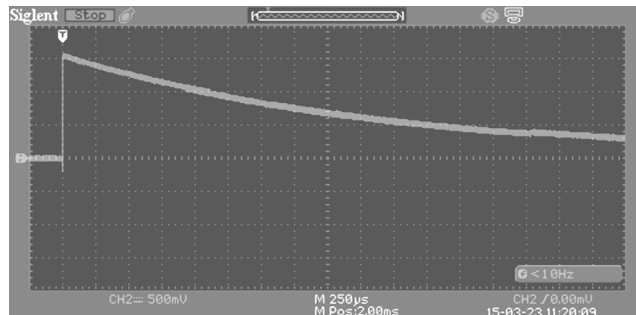


Рис. 7. Сигнал с измерителя (1 — сигнал с ИНМП-ИФ; 2 — сигнал с ИНМП-ИС; 3 — сумма сигналов; масштаб по вертикали — 50 мВ/клетка; масштаб по горизонтали — 10 мкс/клетка)

Метрологические характеристики измерителя:
 $K = 0,279 \pm 0,1$ мВ/А/м.

Выводы

1. Представлены результаты разработки датчиков магнитного поля индукционного типа. Для повышения частотного рабочего диапазона описывается вариант применения составного индукционного преобразователя соединения.

2. Выполнены расчеты переходных характеристик при различных значениях электрических параметров элементов созданного датчика.

3. Изготовлен образец датчика индукционного типа для измерения токов наносекундного диапазона. Время нарастания его переходной характеристики измерителя менее 100 нс, чувствительность — 0,279 мВ/А/м.

Список литературы

- [1] Немченко Ю.С., Лесной И.П., Лантушко Б.Н, Князев В.В. Метрологическое обеспечение эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок // Вестник НТУ «ХПИ». — 2004. — № 35. — С. 29–54.
- [2] Шаламов С.П. Измерение импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». — 2014. — № 50. — С. 161–168.
- [3] Немченко Ю.С. Широкополосные средства измерения импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». — 2007. — № 20. — С. 132–146.
- [4] Немченко Ю.С., Шаламов С.П. Индукционный преобразователь импульсного магнитного поля молнии // Вестник НТУ «ХПИ». — 2015. — № 20 (1129). — С. 99–108.