

# Разработка измерителя параметров импульсного магнитного поля

Я. А. Тяркин<sup>1</sup>, Н. В. Романцова<sup>2</sup>, С. В. Романцов<sup>3</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup>slava.tyarkin@mail.ru, <sup>2</sup>nvromantsova@mail.ru, <sup>3</sup>romantsov89@gmail.com

**Аннотация.** В докладе представлены результаты моделирования индукционного преобразователя для интеллектуальной измерительной системы анализа параметров импульсного магнитного поля, осуществлен выбор параметров преобразователя. Выведены аналитические описания сигнала на выходе первичного измерительного преобразователя в равномерной и среднеквадратической метрике.

**Ключевые слова:** импульсное магнитное поле, индукционный преобразователь, молниезащита, напряженность магнитного поля, расширение частотной характеристики, функциональное преобразование, метрологический анализ, измерительный канал

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные электронные компоненты постепенно уменьшаются в размерах, что приводит к увеличению их чувствительности к электромагнитным возмущениям. Естественные источники электромагнитных помех, такие как электромагнитные импульсы, создаваемые прямыми или удаленными ударами молнии, являются значительной угрозой для электронного оборудования. В таком случае повышение электромагнитной совместимости, а именно повышение защиты электронного оборудования от мощных электромагнитных помех, в сложных системах, как, например, бортовая система самолетов, системы управления атомными электростанциями и передовое телекоммуникационное оборудование, становится важной исследовательской и технической проблемой. Для проведения испытаний технических средств на устойчивость к воздействиям магнитных полей, производимых молниевыми разрядами, необходимо иметь возможность измерять импульсы магнитного поля [1]. Поэтому, основной сферой применения таких устройств является испытание оборудования на воздействие импульсного магнитного поля.

Существует несколько основных методов измерения напряженности магнитного поля: индукционный метод, метод феррозонда, методы с использованием эффекта Холла, Фарадея, и магнитосопротивления. В работах [2–10] описаны различные решения, которые можно применять для измерения временных и амплитудных параметров импульсного магнитного поля.

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА

Параметры тестового импульса, следующие: длительность фронта импульса  $T_f = 0,3$  мкс, время полуспада  $T_{0,5} = 100$  мкс, диапазон пикового значения напряженности импульсного магнитного поля  $H_{max}$  от 100 А/м до 3000 А/м.

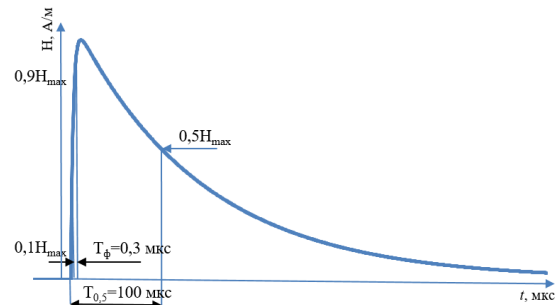


Рис. 1. Типовая форма напряженности импульсного магнитного поля повторного разряда молнии

В программе MATLAB был смоделирован данный сигнал и сохранен в виде текстового файла с массивом точек. Сигнал определяется следующими выражениями:

$$A_1(t) = \begin{cases} \frac{305}{76} e^{76t} - 305t; & t \in [0; 0.04] \\ -184 - 8000t^2 + 6750t; & t \in [0.04; 0.43] \\ -698 + 1893.66t^{-0.0275}; & t \in [0.43; 5.43] \\ 367 + 790.17e^{-0.01139t}; & t \in [5.43; 150] \end{cases}$$

Длительность фронта составила 0,298 мкс (рис. 2), а длительность полуспада – 100 мкс (рис. 3).

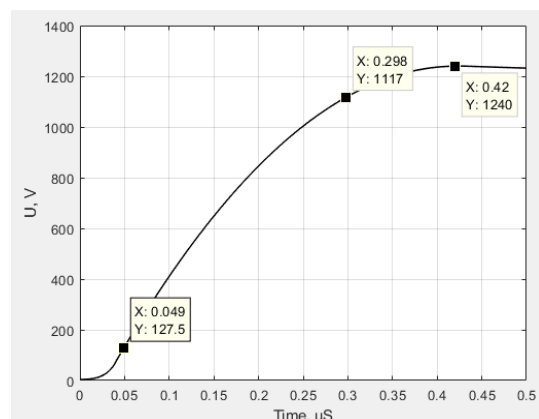


Рис. 2. Фронт смоделированного сигнала

В качестве первого варианта измерительного датчика был выбран индуктивный (катушка индуктивности). Индуктивность соленоида определяется следующей формулой:

$$L = \frac{\mu_0 W^2 \pi R^2 K_a}{l},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $W$  – количество витков;  $R$  – радиус витков катушки;  $l$  – длина катушки;  $K_a$  – табличный коэффициент, определяемый по отношению  $l/(2R)$ . [11]

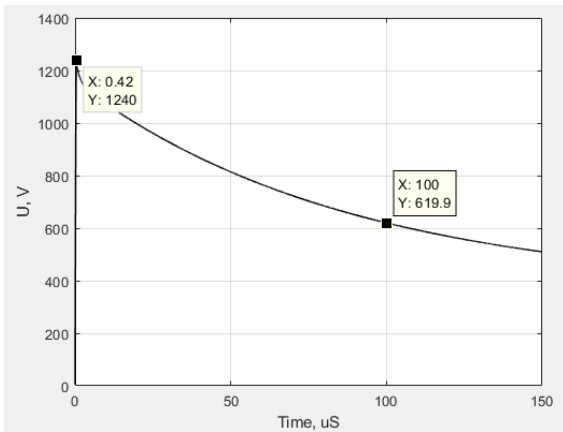


Рис. 3. Полупад смоделированного сигнала

При радиусе 10 см и длине 3 см для достижения планируемой индуктивности 500 мкГн требуется 38 витков.

На рис. 4 показана электрическая схема подключения индуктивного датчика.

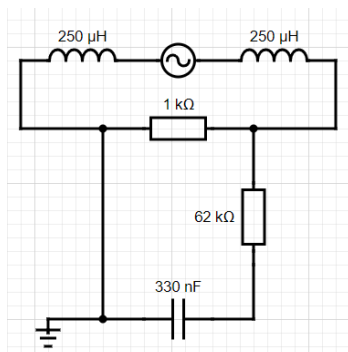


Рис. 4. Электрическая схема подключения датчика

Схема подключения индуктивного датчика была смоделирована в программной среде Multisim. Разработанная схема подключения изображена на рис. 5. В данной модели принято допущение, при котором катушка разбита на две равные секции L1, R1 и L2, R2 для подачи сигнала непосредственно на катушку; C1 – собственная емкость катушки, C2 – паразитная емкость, C3 и R4 – RC-интегратор; R3 – сопротивление для подавления осцилляций выходного сигнала.

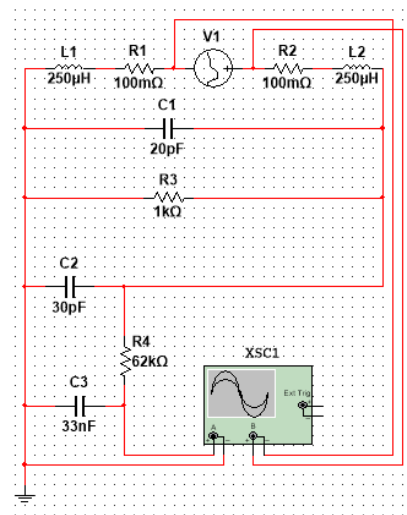


Рис. 5. Схема подключения индуктивного датчика

Резистор R3 необходим в данной схеме поскольку без него, осцилляции затрудняют определение временных параметров сигнала (рис. 6).

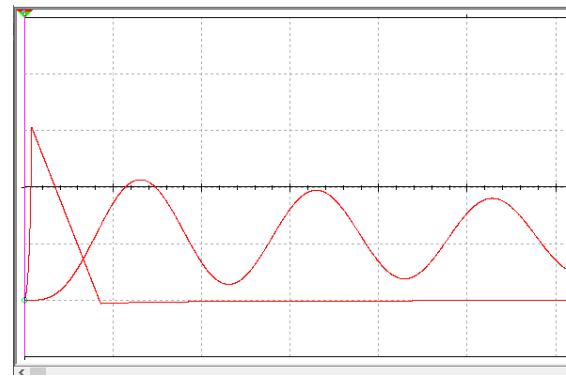


Рис. 6. Осциллирующий выходной сигнал

Сигнал, подаваемый на катушку, должен соответствовать проинтегрированному сигналу H-поля:

$$e_d = -\mu_0 \mu_r S W \frac{dH}{dt} \cos \varphi,$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника ИП;  $S$  – площадь рамки ( $m^2$ );  $W$  – количество витков в рамке;  $\varphi$  – угол между направлением вектора  $\vec{H}$  и нормалью к рамке. [6]

Сигнал, подаваемый на вход схемы (рис. 7):

$$A_1'(t) = \begin{cases} 305 e^{76t} - 305; & t \in [0; 0.04) \\ -16000 + 6750; & t \in [0.04; 0.43) \\ -52.076t^{-1.0275}; & t \in [0.43; 5.43) \\ -9e^{-0.01139t}; & t \in [5.43; 150) \end{cases}$$

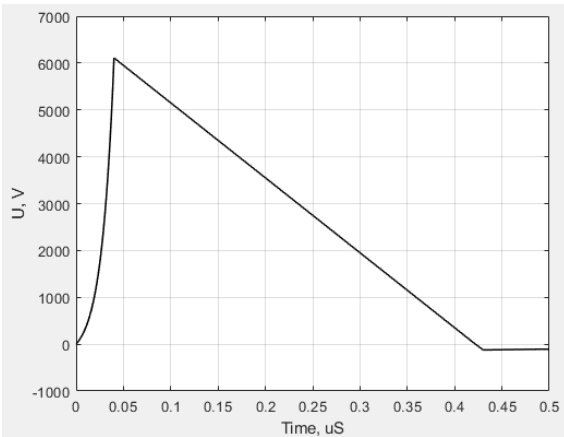


Рис. 7. Сигнал подаваемый на схему

Показания виртуального осциллографа в результате подачи данного сигнала на схему представлены на рис. 8–9. Амплитудные развертки осциллографа составляли 200 мВ/дел для выходного сигнала и 2 кВ/дел для входного, а временные 500 нс/дел для фронта сигнала (рис. 8) и 20 мкс/дел для полуспада (рис. 9).

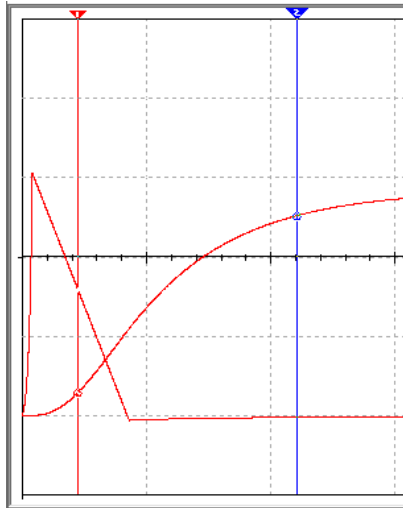


Рис. 8. Фронт сигнала на выходе схемы

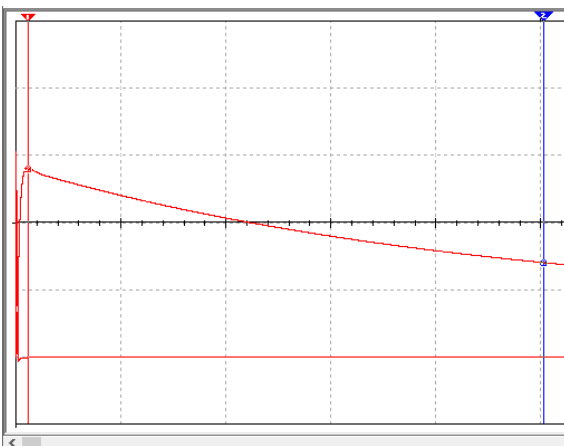


Рис. 9. Полуспад сигнала на выходе схемы

Длительность фронта при RC интегрировании значительно искажилась и составила 0,88 мкс (относительная погрешность 252 %). А длительность полуспада составила 100,53 мкс (погрешность менее 1 %).

Аналитическое описание сигнала в среднеквадратической метрике на выходе первичного измерительного преобразователя получено при помощи функции polyfit в программной среде MATLAB:

$$B_1(t) = \begin{cases} -1.21t^3 + 2.14t^2 - 0.167t + 0.002; & t \in [0; 0.38) \\ 0.012t^5 - 0.138t^4 + 0.63t^3 - 1.48t^2 + 1.76t - 0.311; & t \in [0.38; 3.22) \\ -5.2 \cdot 10^{-8}t^3 + 2.37 \cdot 10^{-5}t^2 - 0.005t + 0.567; & t \in [3.22; 147) \end{cases}$$

Максимальное значение отклонения составило 0.0034 В, а среднеквадратическая погрешность 0.023 В.

Время фронта и время до полуспада определенные по данному описанию составили 0.88 мкс и 100.51 мкс соответственно.

Аналитическое описание сигнала в равномерной метрике:

$$B_2(t) = \begin{cases} 0.322t^3 + 1.21t^2 - 0.038t; & t \in [0; 0.38) \\ 0.012t^5 - 0.134t^4 + 0.62t^3 - 1.45t^2 + 1.75t - 0.307; & t \in [0.38; 3.22) \\ -8 \cdot 10^{-8}t^3 + 3.1 \cdot 10^{-5}t^2 - 0.005t + 0.571; & t \in [3.22; 147) \end{cases}$$

Максимальное отклонение составляет 0.0064 В. Время фронта 0.88 мкс, и время до полуспада 102.83 мкс.

Также был сформирован сигнал со значительно более продолжительным временем фронта (2.5 мкс):

$$A(t) = \begin{cases} \frac{119}{4} e^{4t} - 119t; & t \in [0; 0.49) \\ -201 - \frac{185}{2}t^2 + 781t; & t \in [0.49; 4.3) \\ 322 - 1177.6e^{-0.0107t}; & t \in [4.3; 150) \end{cases}$$

Его продифференцированная версия:

$$A'(t) = \begin{cases} 119 e^{4t} - 119; & t \in [0; 0.49) \\ -185t + 781; & t \in [0.49; 4.3) \\ -12.6e^{-0.0107t}; & t \in [4.3; 150) \end{cases}$$

Результаты симуляции подачи данного сигнала на схему представлены на рис. 10–11. Амплитудные развертки осциллографа составляли 200 мВ/дел для выходного сигнала и 200 В/дел для входного, а временные 2 мкс/дел для фронта сигнала (рис. 10) и 20 мкс/дел для полуспада (рис. 11).

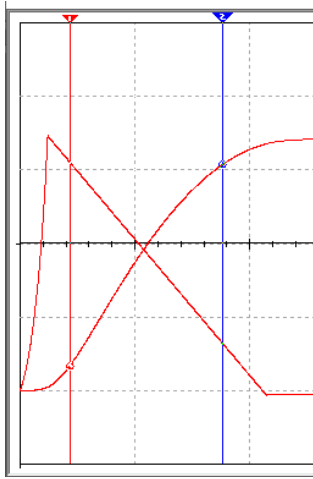


Рис. 10. Фронт сигнала на выходе схемы

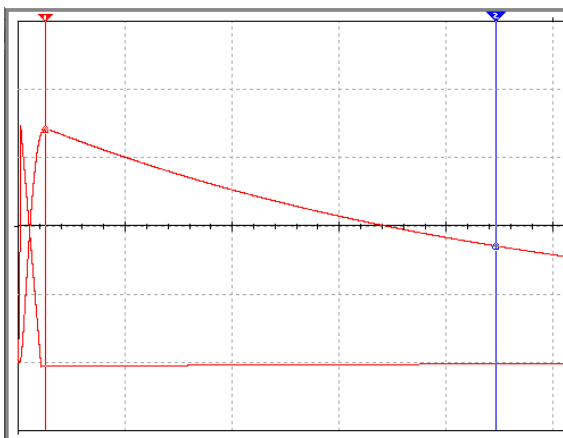


Рис. 11. Полуспад сигнала на выходе схемы

При таком импульсе длительность фронта искажается не настолько критично, как было с предыдущим сигналом, и составляет 2.66 мкс (погрешность 6 %), однако длительность полуспада искажилась более значительно до 89.27 мкс (погрешность 11 %).

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено моделирование индукционного преобразователя с различными параметрами и его подключение к RC-интегратору. Проведенное моделирование схемы подключения индуктивного преобразователя показало приемлемые результаты для длительности фронта 2.5 мкс и длительности до

полуспада 100 мкс. В дальнейшем данная схема будет модифицироваться для сигналов с длительностью фронта порядка 0.3 мкс. Предполагается создание функционального преобразователя, при включении в измерительный канал которого, общая частотная характеристика индукционного преобразователя и функционального преобразователя будет постоянной в диапазоне частот от 250 Гц до 6МГц с точностью  $\pm 10\%$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Балюк Н.В., Орлов С.Д., Оленевский В.В., Стецюк Д.Н. Требования устойчивости и стойкости технических систем к воздействию импульсных электромагнитных полей // Технологии электромагнитной совместимости. 2022. № 2 (81). С. 3–19.
- [2] Шаламов С.П. Измерение импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». 2014. № 50. С. 161–168. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/10634>
- [3] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля: Методы генерации и физические эффекты, связанные с созданием импульсных полей мегаэрстедного диапазона / Пер. с англ. Ф.А. Николаева и Ю.П. Свириденко. М.: Мир, 1972. 392 с.
- [4] Отечественные и зарубежные патенты по магнитометрическим датчикам и магнитометрам за 1994–2003 годы / А.А. Игнатъев, А.В. Ляшенко, В.А. Костяков [и др.] // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2004. № 1. С. 149–162.
- [5] Шваб А. Измерения на высоком напряжении: (Измерит. приборы и способы измерения) / Пер. с нем. П.С. Богуславского. М.: Энергия, 1973. 233 с.
- [6] Панин В.В., Степанов Б.М. Измерение импульсных магнитных и электрических полей. М.: Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
- [7] Метрологическое обеспечение эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок / Ю.С. Немченко, И.П. Лесной, Б.Н. Лантушко, В.В. Князев // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». 2004. № 35. С. 29–54.
- [8] Немченко Ю.С. Широкополосные средства измерения импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». 2007. №20. С. 132–146. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/35318>
- [9] Романцов В.Н., Романцов С.В., Романцова Н.В. Расширение частотной характеристики измерителя импульсного магнитного поля на основе RL-интегратора // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023;26(1):99–112. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-1-99-112>
- [10] V.A. Baronova, D.D. Kashin, N.V. Romantsova, Y.A. Tyarkin, "Pulsed Magnetic Field Meter," // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 321–323, doi: 10.1109/EICon61730.2024.10468241
- [11] Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей, М.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.