

## Расширение частотной характеристики измерителя импульсного магнитного поля на основе $RL$ -интегратора

В. Н. Романцов<sup>1</sup>, С. В. Романцов<sup>1</sup>, Н. В. Романцова<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>АО "31 ГПИСС" ОП "НИЦ 26 ЦНИИ", Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [nvromantsova@mail.com](mailto:nvromantsova@mail.com)

### Аннотация

**Введение.** В некоторых областях современной науки и техники необходимо проводить измерения амплитудно-временных характеристик импульсного магнитного поля. Такие измерения проводят при испытаниях на стойкость к импульсному магнитному полю, при этом длительность фронта импульса магнитного поля составляет сотни наносекунд, а длительность импульса до полуспада – сотни микросекунд.

**Цель работы.** Разработка измерителя напряженности магнитного поля, обладающего линейной характеристикой преобразования, позволяющего проводить измерения длительности фронта, длительности импульса до полуспада и пикового значения напряженности импульсного магнитного поля.

**Материалы и методы.** Для измерения параметров импульсного магнитного поля существует несколько методов, в данной статье выбран индукционный метод. Для получения сигнала, пропорционального напряженности импульсного магнитного поля, сигнал с индукционного преобразователя интегрируют с использованием самоинтегрирующего индукционного преобразователя ( $RL$ -интегрирование) или при помощи внешнего  $RC$ -интегратора. Первый способ показывает хорошие результаты при измерении сигналов длительностью сотни наносекунд, однако дает плохой результат при измерении параметров более длинных импульсов. Второй способ применяют для определения параметров сигналов длительностью сотни микро- и миллисекунд, данный способ дает большую погрешность при измерении параметров сигналов длительностью сотни наносекунд и меньше. Последовательное использование двух способов интегрирования приводит к возникновению дополнительной погрешности измерения длительности импульса до полуспада.

**Результаты.** Разработано устройство, которое позволило при помощи измерителя импульсного магнитного поля на основе  $RL$ -интегратора определять требуемые параметры импульса магнитного поля с относительными погрешностями 10, 10 и 9 % соответственно. Данное устройство устраняет ошибку, вызванную потерями в активном сопротивлении индукционного преобразователя, что позволяет провести измерение длительности импульса до полуспада без дополнительных погрешностей в условиях, когда длительность фронта импульса составляет сотни наносекунд, а длительность спада импульса – сотни микросекунд.

**Заключение.** Разработка функционального преобразователя позволила расширить частотную характеристику измерителя импульсного магнитного поля на основе  $RL$ -интегратора в область низких частот.

**Ключевые слова:** импульсное магнитное поле, индукционный преобразователь, молниезащита, напряженность магнитного поля,  $RL$ -интегратор, расширение частотной характеристики, функциональное преобразование

**Для цитирования:** Романцов В. Н., Романцов С. В., Романцова Н. В. Расширение частотной характеристики измерителя импульсного магнитного поля на основе  $RL$ -интегратора // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 99–112. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-99-112

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.08.2022; принята к публикации после рецензирования 19.12.2022; опубликована онлайн 28.02.2023



## Frequency Response Extension of a Pulsed Magnetic Field Meter Based on an *RL* Integrator

Vladimir N. Romantsov<sup>1</sup>, Sergey V. Romantsov<sup>1</sup>, Natalia V. Romantsova<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>JSTC "31 SDI of SC" SD "SEC 26 of the CRI", St Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ nvromantsova@mail.com

### Abstract

**Introduction.** Measurements of the amplitude-time characteristics of pulsed magnetic fields are required in various research and technology areas. Such measurements are carried out during pulsed magnetic field immunity testing, with the magnetic field pulse rise time being hundreds of ns, and the pulse duration to its half initial value (half-droop) being hundreds of  $\mu$ s.

**Aim.** To develop a meter of magnetic field strength with a linear conversion characteristic for measuring the pulse rise time, the pulse duration to its half-droop, and the peak value of the pulsed magnetic field strength.

**Materials and methods.** Among several available methods for measuring pulsed magnetic field parameters, the induction method was selected. To obtain a signal proportional to the pulsed magnetic field strength, a signal from the induction transducer is integrated using a self-integrating induction transducer (*RL* integration) or by using an external *RC* integrator. The former method shows good results when measuring signals with a duration of hundreds of ns; however, this method is inefficient when measuring the parameters of longer-duration pulses. The latter method is used to determine the parameters of signals with a duration of hundreds of  $\mu$ s and ms; however, this method gives a large error when measuring the parameters of signals with a duration of hundreds of ns and less. The consecutive use of the two integration methods leads to an additional error in the measurement of the pulse duration to its half-droop.

**Results.** A setup for determining the required magnetic field pulse parameters using a pulsed magnetic field meter based on an *RL* integrator was developed. The relative measurement errors comprised 10, 10, and 9 %, respectively. The developed setup eliminates the error caused by losses in the active resistance of an induction transducer, thus enabling the pulse duration to its half-droop to be measured without additional errors under the pulse rise time of hundreds of ns and the pulse droop time of hundreds of  $\mu$ s.

**Conclusion.** The development of a functional converter made it possible to extend the frequency response of a pulsed magnetic field meter based on an *RL* integrator to the low-frequency region.

**Keywords:** pulsed magnetic field, induction transducer, lightning protection, magnetic field strength, *RL* integrator, frequency response extension, functional transformation

**For citation:** Romantsov V. N., Romantsov S. V., Romantsova N. V. Frequency Response Extension of a Pulsed Magnetic Field Meter Based on an *RL* Integrator. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 1, pp. 99–112. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-99-112

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 04.08.2022; accepted 19.12.2022; published online 28.02.2023

**Введение.** В некоторых областях современной науки и техники необходимо проводить измерения амплитудно-временных характеристик импульсного магнитного поля. Для проведения испытаний технических средств, объектов и их комплектующих на стойкость к воздействию магнитных полей, исследования процессов, сопровождающих молниевый разряд, и для изучения вопросов экранирования необходимо выполнять измерения и регистрацию импульсов магнитного поля [1].

Молнии и сопровождающие их процессы могут наносить серьезный ущерб. При ударах молнии выделяются сотни мегаджоулей энергии. Для повреждения некоторых электронных систем достаточный уровень энергии несколько миллиджоулей, поэтому такие системы необходимо защищать от магнитных полей.

Особенно важно защищать электронные системы, которые обеспечивают безопасность, например, производств, а также системы, по-

вреждение которых может нанести серьезный экономический урон.

Основным способом проверки восприимчивости технических средств к воздействию импульсных магнитных полей является проведение экспериментальных исследований [2–4], в которых используются преобразователи напряженности импульсного магнитного поля.

Для испытаний на стойкость к импульсному магнитному полю изделие помещают в зону, имеющую равномерное магнитное поле. Для этой цели может применяться специальная катушка (катушка Гельмгольца), состоящая из двух параллельных коаксиальных плоских колец. Расстояние между кольцами должно равняться радиусу кольца. Средний диаметр кольца должен быть не менее чем в 2.5 раза больше габаритных размеров испытуемого объекта. Корпус и узлы крепления катушки должны быть изготовлены из немагнитных материалов.

Изделие подвергают воздействию магнитных полей в соответствии с реальными условиями эксплуатации.

Силу тока выбирают с таким расчетом, чтобы получить в центре катушки магнитное поле требуемой напряженности.

Напряженность магнитного поля вычисляется по формуле [5]

$$H = \frac{1.44 I N}{D}, \quad (1)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;  $I$  – сила тока, протекающего через обмотку;  $N$  – число витков обмотки каждого из колец;  $D$  – средний диаметр кольца.

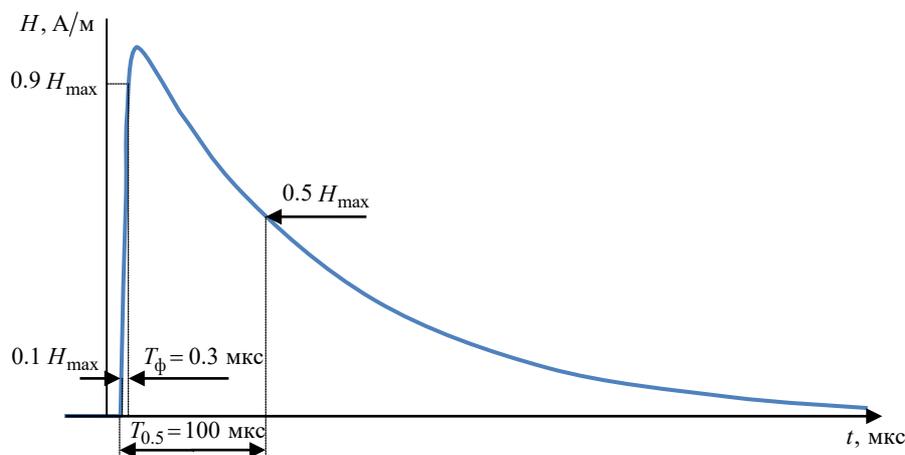


Рис. 1. Типовая форма напряженности импульсного магнитного поля повторного разряда молнии

Fig. 1. Standard form of the pulsed magnetic field strength of a repeated lightning strike

Испытуемый объект и катушку, создающую магнитное поле, поворачивают относительно друг друга до положения, при котором наблюдается максимальное влияние поля на изделие.

Изделие считается выдержавшим испытание, если во время и после проведения испытания его характеристики соответствуют требованиям, установленным в технических условиях на изделие.

Метрологическое обеспечение при экспериментальных исследованиях должно давать возможность получать в исследуемой точке при каждом испытании данные о значениях амплитудно-временных характеристик полей с суммарной погрешностью не более  $\pm 20\%$  для напряженности магнитного поля. Для измерения значений амплитудно-временных характеристик напряженности магнитного поля применяются преобразователи напряженности магнитного поля.

#### Постановка задачи и метод ее решения.

*Постановка задачи.* Необходимо разработать измеритель напряженности магнитного поля, обладающий линейной характеристикой  $U(H)$ , позволяющий проводить при помощи осциллографа измерение длительности фронта  $T_\phi$ , длительности импульса до полуспада  $T_{0.5}$  и пикового значения напряженности импульсного магнитного поля  $H_{\max}$ . На рис. 1 представлена форма напряженности импульсного магнитного поля для повторного молниевых разряда, данный импульс может служить примером измеряемого сигнала.



Рис. 2. Структура измерительного канала

Fig. 2. Measuring channel block diagram

Длительность фронта импульса  $T_{\phi} = 0.3$  мкс; длительность импульса до полуспада  $T_{0.5} = 100$  мкс; диапазон пикового значения напряженности импульсного магнитного поля  $H_{\max}$  от 100 до 3000 А/м.

*Описание измерительного канала.* Измерительный канал в общем случае состоит из ряда преобразователей (рис. 2): первичного измерительного преобразователя (ПИП); вторичного измерительного преобразователя (ВИП); нормирующего преобразователя (ИП); аналогоцифрового преобразователя (АЦП); персонального компьютера (ПК).

В частных случаях некоторые отдельные преобразования, такие как вторичное измерительное преобразование, могут не выполняться. Также несколько преобразований возможно выполнять при помощи одного устройства.

Предположим, что результирующая погрешность измерения состоит из случайных некоррелированных составляющих, тогда среднее квадратическое отклонение результирующей погрешности определяется выражением

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2},$$

где  $n$  – число суммируемых составляющих погрешности;  $\sigma_i^2$  – дисперсия  $i$ -й составляющей погрешности. Доверительный интервал случайной погрешности можно найти по выражению

$$\delta_{\Sigma} = \pm k_{\Sigma}^P \sigma_{\Sigma},$$

где  $k_{\Sigma}^P$  – коэффициент, зависящий от закона распределения результирующей погрешности с доверительной вероятностью  $P$ . При суммировании составляющих, имеющих симметричные законы распределения, можно пользоваться приближенными значениями  $k_{\Sigma}^P$ : при доверительной вероятности  $P=0.90$  коэффициент  $k_{\Sigma}^{0.90} \approx 1.6$ ; при доверительной вероятности  $P=0.95$  коэффициент

$k_{\Sigma}^{0.95} \approx 1.8$ . При этом погрешность в определении  $\delta_{\Sigma}$  не превышает  $\pm 10\%$  [6].

*Индукционный преобразователь.* Существует несколько основных методов измерения напряженности магнитного поля: индукционный метод, метод феррозонда, методы с использованием эффекта Холла, Фарадея, магнитосопротивления [7–9]. Для измерения параметров импульсного магнитного поля был выбран индукционный метод, поэтому первичный измерительный преобразователь был построен на основе индукционного преобразователя (ИП). Метод основан на появлении электродвижущей силы (ЭДС) в катушке, находящейся в переменном магнитном поле. Метод позволяет с приемлемой точностью исследовать параметры магнитного поля в диапазоне частот от единиц герц до десятков мегагерц и в диапазоне амплитуд от долей миллиампер на метр до сотен тысяч ампер на метр. Сложностью при реализации измерений индукционным методом является слабая помехозащищенность.

При помещении ИП в изменяющееся магнитное поле в нем наводится ЭДС, которая в соответствии с законом электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля:

$$e_d = -\mu_0 \mu_r S W \frac{dH}{dt} \cos \varphi, \quad (2)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость ма-

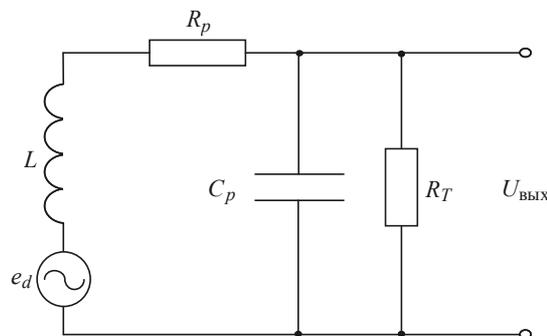


Рис. 3. Эквивалентная схема ИП

Fig. 3. Equivalent circuit of induction transducer (IT)

териала сердечника ИП;  $S$  – площадь рамки;  $W$  – количество витков в рамке;  $\varphi$  – угол между направлением вектора  $\mathbf{H}$  и нормалью к рамке [10–13].

При  $\varphi=0$  в индукционном преобразователе наводится максимум ЭДС. На рис. 3 приведена эквивалентная схема ИП.

Цепь, приведенная на рис. 3, описывается дифференциальным уравнением

$$e_d = LC_p \frac{d^2 U_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + \left( \frac{L}{R_T} + R_p C_p \right) \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} + \left( 1 + \frac{R_p}{R_T} \right) U_{\text{ВЫХ}},$$

где  $e_d$  – ЭДС, наводимая в ИП;  $L$  – индуктивность ИП;  $C_p$  – суммарная паразитная емкость ИП;  $R_T$  – входное сопротивление интегратора;  $R_p$  – сопротивление ИП;  $U_{\text{ВЫХ}}$  – выходное напряжение ИП.

Для уменьшения искажения формы измеряемого импульса используют ИП с критически согласованной передаточной характеристикой [10].

Для получения сигнала, пропорционального напряженности импульсного магнитного поля, необходимо сигнал с ИП проинтегрировать, для чего применяют один из двух способов:

- интегрирование с использованием самоинтегрирующего ИП ( $RL$ -интегрирование);
- интегрирование внешним  $RC$ -интегратором.

Для измерения магнитных полей наносекундного диапазона предпочтителен измеритель напряженности магнитного поля (ИНМП) с самоинтегрирующими ИП, в то время как для измерения магнитных полей микро- и миллисекундного диапазонов – ИНМП с  $RC$ -интегратором [7, 14–16].

Для измерения напряженности импульсного магнитного поля, имеющего форму, представленную на рис. 1, необходимо использовать ИП с  $RL$ -интегратором для измерения фронта импульса и ИП с  $RC$ -интегратором для измерения времени импульса до полуспада, так как длительность импульса до полуспада в 300 раз больше длительности фронта импульса.

Продemonстрируем отличия применения  $RC$ - и  $RL$ -интеграторов на примере. На рис. 4 представлена осциллограмма фронта импульса на выходе  $RL$ -интегратора, на рис. 5 – осциллограмма полного импульса на выходе  $RL$ -интегратора. Коэффициент преобразования по амплитуде  $RL$ -интегратора составляет  $5.5 \cdot 10^{-3}$  В/(А/м). Видно, что фронт импульса длительностью 250 нс и максимальное значение напряженности импульсного магнитного поля переданы достаточно хорошо, однако длительность импульса до полуспада на осциллограмме на порядок меньше, чем длительность импульса напряженности магнитного поля до полуспада (см. рис. 1).

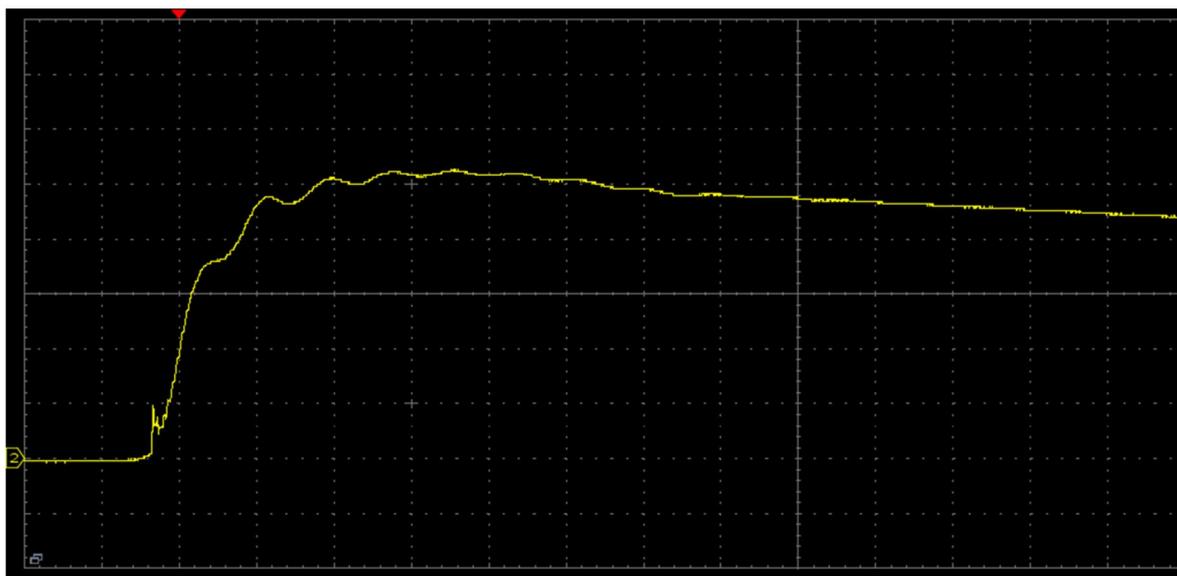


Рис. 4. Осциллограмма фронта импульса на выходе  $RL$ -интегратора (2 В/дел, 200 нс/дел)

Fig. 4. Oscillogram of the pulse rise at the  $RL$  integrator output (2 V/div, 200 ns/div)

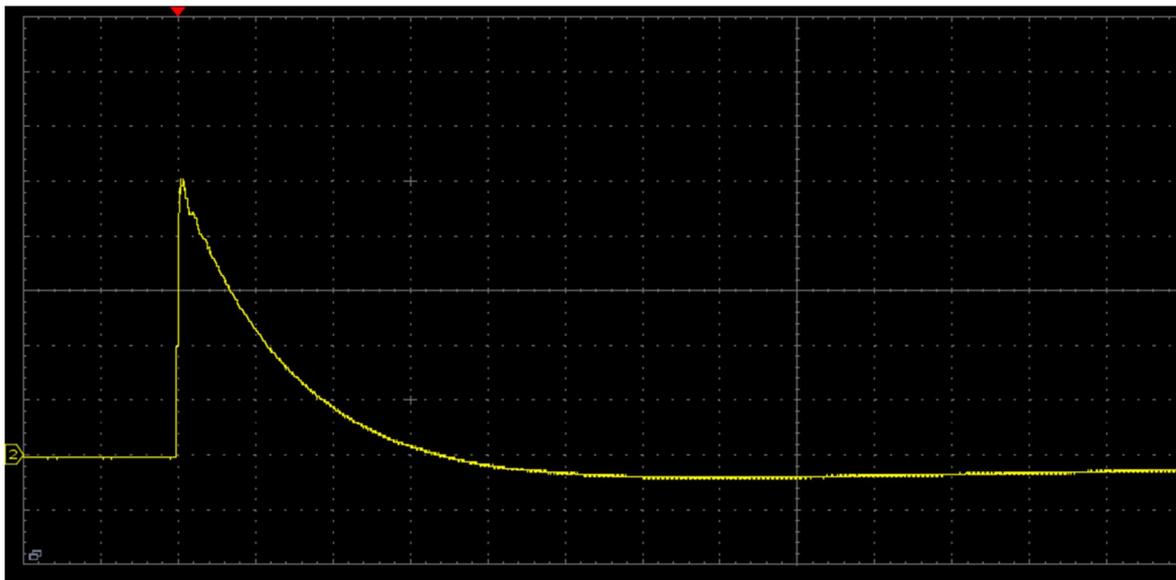


Рис. 5. Осциллограмма полного импульса на выходе  $RL$ -интегратора (2 В/дел, 5 мкс/дел)

Fig. 5. Oscillogram of the total pulse at the  $RL$  integrator output (2 V/div, 5  $\mu$ s/div)

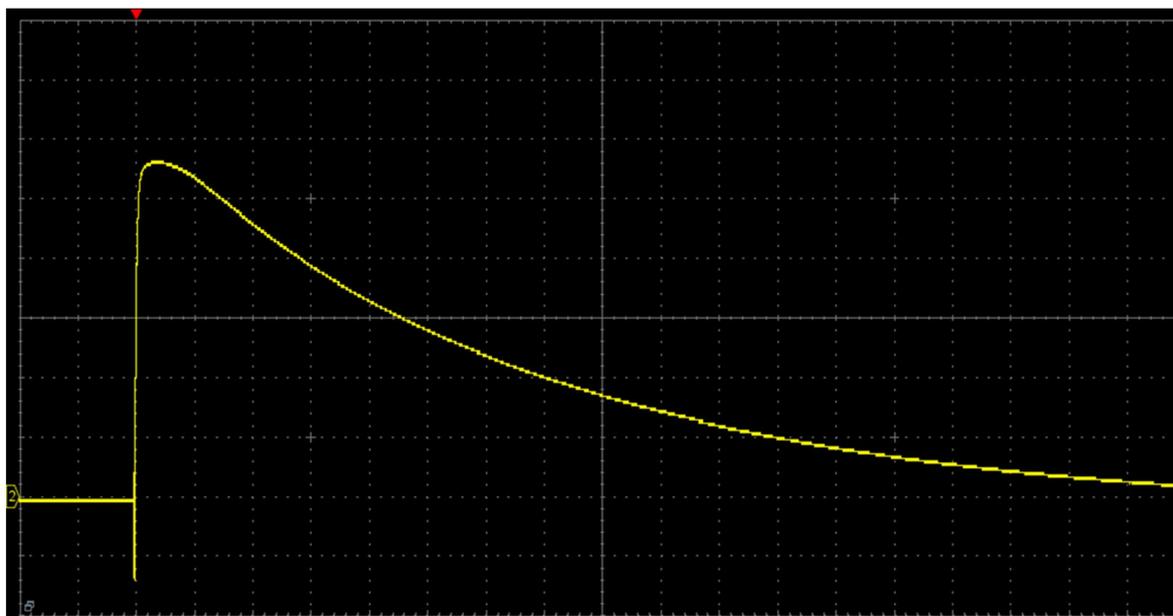


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на выходе  $RC$ -интегратора (100 мВ/дел, 20 мкс/дел)

Fig. 6. Oscillogram of  $RC$  integrator output voltage (100 mV/div, 20  $\mu$ s/div)

Для измерения длительности импульса до полуспада  $RL$ -интегратор заменяется  $RC$ -интегратором с коэффициентом преобразования  $3.2 \cdot 10^{-4}$  В/(А/м). На рис. 6 представлена осциллограмма импульса на выходе  $RC$ -интегратора, на которой видно, что фронт импульса изменил свою форму, что, в свою очередь, затрудняет определение начала отсчета длительности импульса до полуспада и вносит погрешность измерения данной временной характеристики.

Чтобы исключить погрешность, необходимо отказаться от совместного применения  $RL$ - и  $RC$ -интеграторов и разработать дополнительное устройство, которое позволит при использовании  $RL$ -интегратора измерять не только длительность фронта, но также длительность импульса до полуспада. Данное устройство совместно с  $RL$ -интегратором будет выполнять интегрирование ЭДС индукционного преобразователя и расширит частотную характеристику измерителя импульсного магнитного поля в область низких частот.

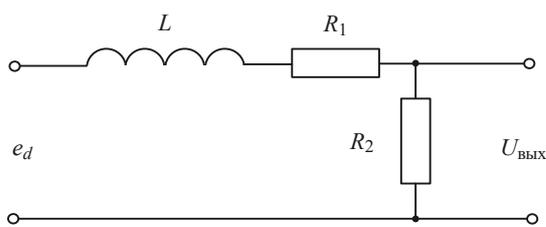


Рис. 7. Схема замещения ИП с внутренним сопротивлением  $R_1$  и резистором  $R_2$ , с которого снимается выходной сигнал

Fig. 7. Equivalent circuit of the IT with internal resistance  $R_1$  and the resistor  $R_2$  from which the output signal is picked up

Разработка устройства для расширения частотной характеристики преобразователя импульсного магнитного поля с  $RL$ -интегратором. Если представить индукционный преобразователь в виде индуктивности  $L$  и внутренним сопротивлением  $R_1$ , то, включив в схему сопротивление  $R_2$ , получим схему, изображенную на рис. 7, через перечисленные элементы будет протекать ток  $i(t)$ .

В этом случае проинтегрированный сигнал  $e_d$  будет эквивалентен сигналу напряженности магнитного поля  $H$ . Необходимо выразить напряженность магнитного поля через значение сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$ . При изменении потока вектора магнитной индукции через площадь рамки ИП возникает ЭДС электромагнитной индукции в соответствии с законом Фарадея. Эта ЭДС индуцирует в замкнутом контуре индукционный ток (в соответствии с законом Ома). Напряжение, пропорциональное скорости изменения напряженности магнитного поля, определяется согласно выражению

$$e_d = U_L + U_{R_1} + U_{R_2},$$

где  $U_L$  – напряжение, падающее на индуктивности  $L$ ;  $U_{R_1}$  – напряжение, падающее на внутреннем сопротивлении  $R_1$  ИП;  $U_{R_2}$  – напряжение, падающее на резисторе  $R_2$ .

Выразим напряжения через ток  $i = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}$ :

$$e_d(t) = L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R_1 + U_{\text{ВЫХ}}(t) =$$

$$= \frac{L}{R_2} \frac{dU_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + U_{\text{ВЫХ}}(t) \frac{R_1}{R_2} + U_{\text{ВЫХ}}(t),$$

так как согласно (2)  $H \sim \int_0^t e_d dt$ , проинтегрировав обе части уравнения, получим:

$$\int_0^t e_d dt = \frac{L}{R_2} U_{\text{ВЫХ}} + \frac{R_1}{R_2} \int_0^t U_{\text{ВЫХ}} dt + \int_0^t U_{\text{ВЫХ}} dt;$$

$$H \sim \left[ \left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \int_0^t U_{\text{ВЫХ}} dt + \frac{L}{R_2} U_{\text{ВЫХ}} \right],$$

где  $\frac{L}{R_2} U_{\text{ВЫХ}}$  – сигнал на выходе  $RL$ -интегратора;

$$\left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \int_0^t U_{\text{ВЫХ}} dt \quad (3)$$

– составляющая сигнала на выходе измерительного преобразователя, обуславливающая отличие напряженности магнитного поля от значения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$   $RL$ -интегратора. Данная составляющая вызвана потерями в активном сопротивлении катушки ( $R_1$ ) и сопротивлении ( $R_2$ ). Составляющая (3) приводит к резкому уменьшению длительности импульса (см. рис. 5) на выходе  $RL$ -интегратора по сравнению с длительностью импульса напряженности магнитного поля (см. рис. 1). Функциональное преобразование, компенсирующее составляющую (3), позволит расширить частотную характеристику измерителя импульсного магнитного поля на основе  $RL$ -интегратора в область низких частот.

**Результаты.** Была разработана электрическая схема (рис. 8), состоящая из интегратора на операционном усилителе (ОУ) и сумматора на ОУ, которая осуществляет функциональное преобразование, компенсирующее составляющую сигнала на выходе измерительного преобразователя (3). Коэффициент  $\frac{R_1}{R_2}$  уравнения (3) подбирался при настройке схемы переменными резисторами и коэффициентами усиления интегратора и сумматора на ОУ. Сигнал на выходе интегратора инвертированный, поэтому используется схема параллельного сумматора.

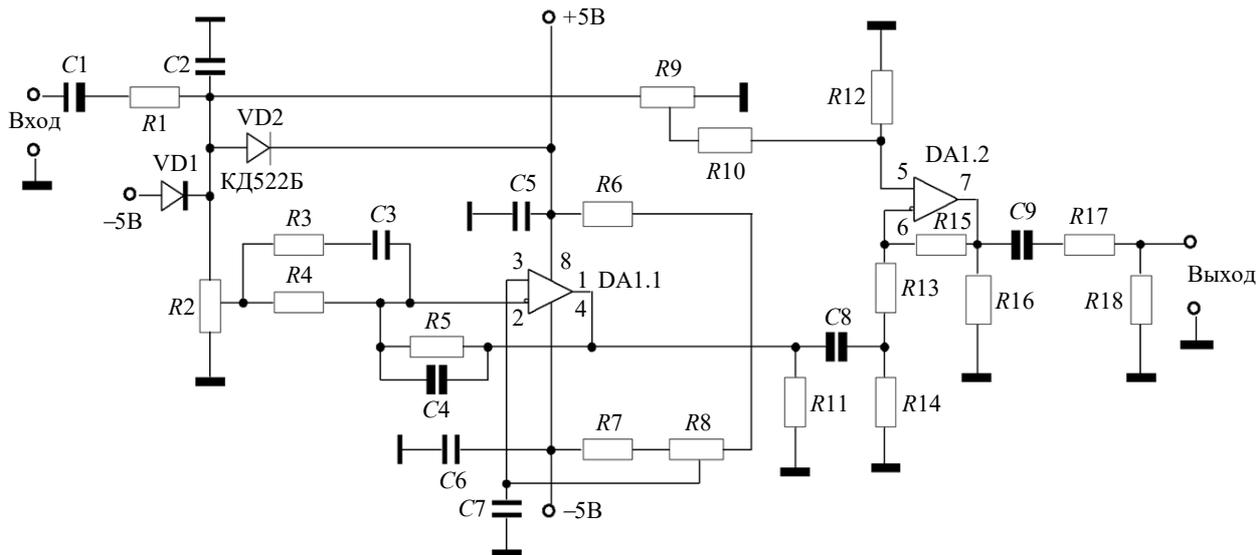


Рис. 8. Электрическая схема, реализующая функциональное преобразование  
 Fig. 8. Electrical circuit implementing the functional transformation

Интегрирующее и суммирующее устройства выполнены на операционном усилителе AD8056.

Интегратор выполнен на ОУ DA1.1 конденсаторе  $C4$  и резисторе  $R4$ . Резистор  $R5$  используется для разряда конденсатора  $C4$  (сбрасывает интегратор в ноль). Схема параллельного сумматора выполнена на ОУ DA1.2. Конденсаторы  $C1$ ,  $C8$  и  $C9$  блокируют ОУ от постоянного напряжения. Диоды  $VD1$  и  $VD2$  защищают ОУ по входу от перенапряжения. Конденсаторы  $C2$ ,  $C5$ ,  $C6$ ,  $C7$  и резисторы  $R1$ ,  $R17$  фильтруют высокочастотную помеху. Делитель на резисторах  $R6$ ,  $R7$  и  $R8$  нужен для коррекции напряжения смещения на выходе DA1.1. Звено коррекции на резисторе  $R3$  и конденсаторе  $C3$  увеличивает частоту интегратора. Настройка параметров схемы осуществлялась экспериментально, подстройкой резисторов  $R2$  и  $R9$ .

Схема ИП с  $RL$ -интегратором представлена на рис. 9.

$RL$ -интегратор построен на индуктивности ИП и резисторе  $R19$ , делитель, выполненный на резисторах  $R20$  и  $R21$ , делит выходное напряжение 1 к 7. Конденсатор  $C14$  добавлен в схему для фильтрации высокочастотной помехи.

Структурная схема измерителя импульсного магнитного поля на основе  $RL$ -интегратора, предназначенного для измерения амплитудно-временных параметров напряженности импульсного магнитного поля с регистрацией данных на осциллограф, представлена на рис. 10. Преобразователь состоит из индукционного преобразователя с  $RL$ -интегратором и делителем, выполняющих функцию первичного преобразования; функционального преобразователя, который обеспечивает линейность характеристики преобразования, а также усиливает сигнал; осциллографа, выполняющего функцию АЦП и хранения данных; оптоволоконной линии (ОЛ) USB, предназначенной для передачи данных на ПК; ПК, выполняющего функции масштабирования, визуализации и хранения данных.

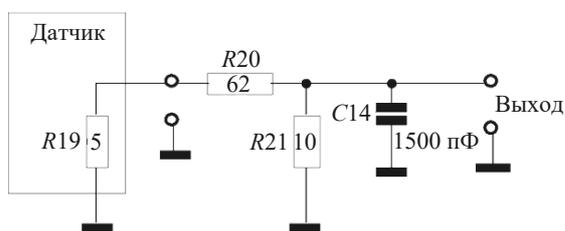


Рис. 9. Электрическая схема ИП с  $RL$ -интегратором и делителем

Fig. 9. IT electrical circuit with  $RL$  integrator and divider

Индукционный преобразователь представлен на рис. 11. Индукционный преобразователь



Рис. 10. Структура измерительного канала

Fig. 10. Measuring channel block diagram



Рис. 11. Внешний вид ИП  
 Fig. 11. IPT appearance

состоит из многовитковой катушки, которая располагается внутри металлического корпуса с радиальным разрезом. Внутри корпуса также размещен интегрирующий резистор  $R_{19}$ .

Блок осциллографа состоит из функционального преобразователя (см. рис. 8), блока питания 5 В и USB-осциллографа АКИП-73203D MSO и части оптической линии связи. Все части блока осциллографа расположены в дюралюминиевом корпусе. Внешний вид блока осциллографа и оптоволоконного кабеля представлен на рис. 12.

Использование оптоволоконного кабеля позволяет уменьшить наведенные помехи.

Данная конструкция измерителя напряженности импульсного магнитного поля позволяет передать на осциллограф импульс напряжения, практически совпадающий по форме с напряженностью импульсного магнитного поля, представленного на рис. 1.

**Обсуждение.** Проверка функционирования измерителя напряженности импульсного маг-



Рис. 12. Внешний вид блока осциллографа и оптоволоконного кабеля

Fig. 12. Oscilloscope unit and fiber optic cable appearance

нитного поля с расширенной частотной характеристикой на основе  $RL$ -интегратора. Целью проведения проверки является определение работоспособности и временно-амплитудных параметров преобразователя и коэффициента преобразования. Для воспроизведения магнитного поля молниевых разрядов использовался имитатор молниевых разрядов – ИМП-МР, состоящий из генераторной части (ГИН-500) и устройства полеобразования магнитного поля в виде катушек Гельмгольца.

Напряженность магнитного поля в центре колец вычислялась по (1). Для использованных колец:

$$H = 1.44I. \quad (4)$$

Ток  $I$  измерялся шунтом. Сопротивление шунта равно 0.05 Ом. Шунт позволяет измерять импульсы тока с длительностью фронта  $\geq 10$  нс. Ток и напряженность магнитного поля измерялись одновременно двухканальным USB-осциллографом. На рис. 13 представлена схема испытательной установки.

Технические характеристики имитатора и параметры магнитного поля, создаваемого имитатором ИМП-МР, представлены в табл. 1.

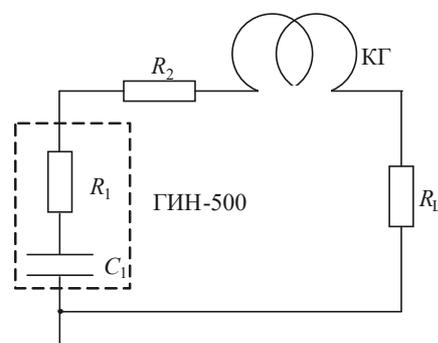


Рис. 13. Схема моделирования магнитного поля молниевых разрядов

Fig. 13. Lightning discharge magnetic field simulation scheme

Табл. 1. Технические характеристики ИМП-МР  
 Tab. 1. Technical characteristics of MFS-LD

Характеристика	Значение
Напряженность магнитного поля, А/м	3050
Длительность фронта импульса, мкс	0.3
Длительность импульса, мкс	104
Номинальное напряжение имитатора, кВ	500
Размер устройства полеобразования магнитного поля молниевых разрядов (кольца Гельмгольца), диаметр, м	1

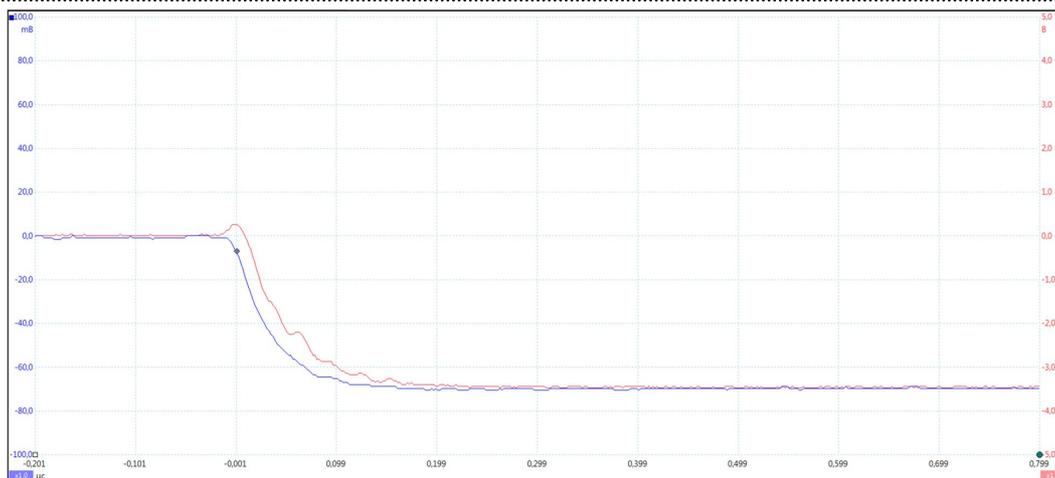


Рис. 14. Осциллограмма. Сигнал с датчика магнитного поля – синий (20 мВ/дел, 100 нс/дел).  
Сигнал с шунта – красный (20 А/дел, 100 нс/дел)

Fig. 14. Oscillogram. The magnetic field sensor signal is blue (20 mV/div, 100 ns/div).  
The shunt signal is red (20 A/div, 100 ns/div)

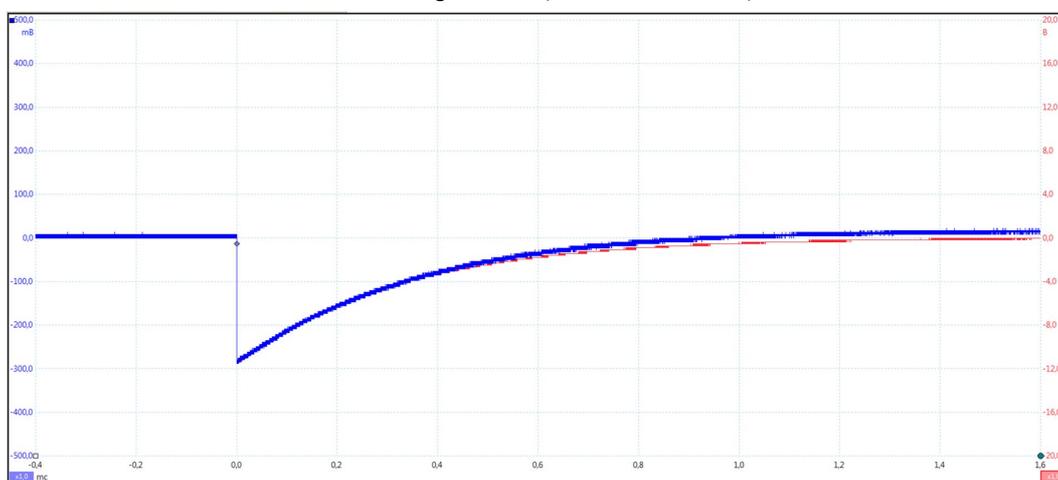


Рис. 15. Осциллограмма. Сигнал с датчика магнитного поля – синий (100 мВ/дел, 200 мкс/дел).  
Сигнал с шунта – красный (80 А/дел, 200 мкс/дел)

Fig. 15. Oscillogram. The magnetic field sensor signal is blue (100 mV/div, 200  $\mu$ s/div).  
The shunt signal is red (80 A/div, 200  $\mu$ s/div)

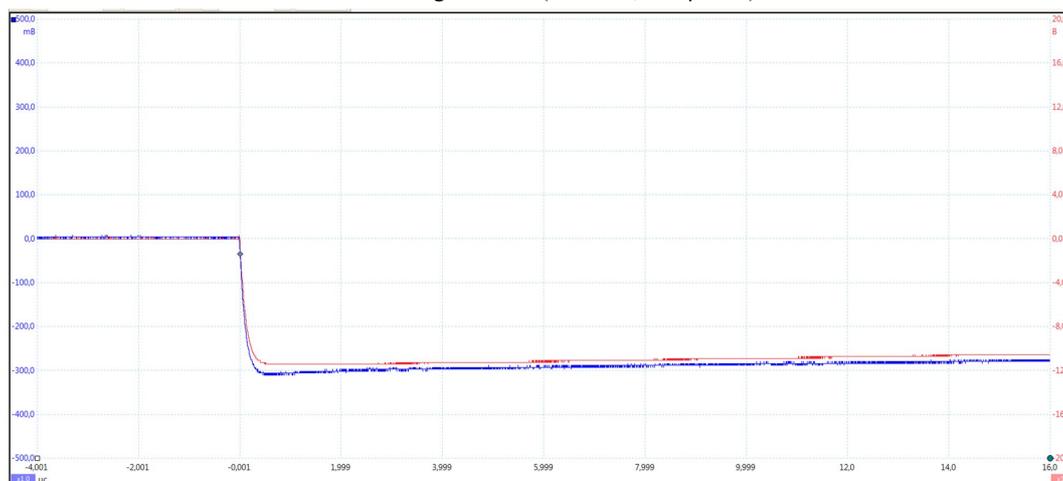


Рис. 16. Осциллограмма. Сигнал с датчика магнитного поля – синий (100 мВ/дел, 2 мкс/дел).  
Сигнал с шунта – красный (80 А/дел, 2 мкс/дел)

Fig. 16. Oscillogram. The magnetic field sensor signal is blue (100 mV/div, 2  $\mu$ s/div).  
The shunt signal is red (80 A/div, 2  $\mu$ s/div)

При разряде ГИН-500 через резистор  $R_2$  на кольца Гельмгольца (КГ) в объеме устройства полеобразования происходит формирование импульса магнитного поля.

Данные измерений представлены на осциллограммах (рис. 14, 15). Сигнал с преобразователя напряженности импульсного магнитного поля на осциллограмме окрашен в синий цвет, сигнал с шунта окрашен в красный цвет.

Калибровка по амплитуде проведена по осциллограмме, представленной на рис. 16. При этом индукционный преобразователь был размещен в центре системы КГ, и плоскость индукционного преобразователя была параллельна плоскости колец.

Максимальное измеренное значение тока, проходящего через шунт,  $I_{\max} = 238$  А; напряженность магнитного поля в центре КГ  $H_{\max}$  согласно (4) – 342 А/м. Максимальное значение напряжения на датчике  $U_{\text{изм}} = 309$  мВ. Таким образом, коэффициент преобразования по напряженности магнитного поля  $K$ :

$$H_{\max} = \frac{U_{\text{изм}}}{K},$$

$$K = 9.03 \cdot 10^{-4} \frac{\text{В}}{\text{А/м}}.$$

На рис. 15 видно, что форма импульса, измеренного датчиком, и сигнал с шунта совпадают вплоть до времени 400 мкс, что примерно в 4 раза больше значения измеряемой длительности

импульса до полуспада  $T_{0.5}$ . Таким образом, была подтверждена работоспособность преобразователя напряженности импульсного магнитного поля, позволяющего расширить частотный диапазон работы измерителя импульсного магнитного поля на основе  $RL$ -интегратора, и определен коэффициент преобразования.

*Определение метрологических характеристик измерителя импульсного магнитного поля.* Оценка показателей погрешности измерений амплитудно-временных характеристик напряженности магнитного поля проводилась с помощью прямых многократных независимых измерений по плану статистической обработки группы результатов прямых многократных (менее пятнадцати) независимых однотипных измерений  $n = 5$ . Магнитное поле создавалось ИМП-МР (см. табл. 1) и контролировалось сигналом с шунта (см. рис. 13). Таким образом, точностные характеристики параметров импульсного магнитного поля, созданного ИМП-МР, определяются погрешностью USB-осциллографа и шунта, а также точностью геометрии КГ.

Обработке подвергались следующие параметры импульсов напряженности магнитного поля:

- максимальное значение напряженности магнитного поля;
- длительность импульса до полуспада;
- длительность переднего фронта импульса на уровне 0.1 и 0.9 от максимального значения.

В табл. 2 представлены результаты измерений параметров магнитного поля.

Табл. 2. Результаты измерений параметров магнитного поля разработанным измерителем

Tab. 2. Measurement results of the magnetic field parameters by the developed meter

№ измерения	Максимальное значение напряженности магнитного поля, А/м	Длительность переднего фронта импульса, мкс	Длительность импульса до полуспада, мкс
1	3050	0.3	100
2	3040	0.29	101
3	3050	0.3	102
4	3060	0.3	100
5	3050	0.31	100

Табл. 3. Результаты обработки параметров напряженности магнитного поля

Tab. 3. Results of processing the magnetic field strength parameters

Параметр	Значение	Полная погрешность ( $\Delta$ )	Доверительная вероятность ( $P$ )
Максимальное значение напряженности магнитного поля, А/м	3050	270	0.95
Длительность импульса до полуспада, мкс	104	10	0.95
Длительность переднего фронта импульса, мкс	0.3	0.03	0.95

Результаты обработки параметров напряженности магнитного поля в центре рабочего объема имитатора электромагнитных полей молниевых разрядов приведены в табл. 3.

Погрешность измерения максимального значения напряженности магнитного поля молниевых разрядов составляет  $\pm 270$  А/м при доверительной вероятности  $P = 0.95$ .

Погрешность длительности переднего фронта импульса и погрешность длительности импульса на уровне 0.5 напряженности магнитного поля составили 0.03 мкс и  $\pm 10$  мкс соответственно при доверительной вероятности  $P = 0.95$ .

**Заключение.** В статье описана разработка и создание устройства, которое позволило при помощи измерителя импульсного магнитного поля на основе  $RL$ -интегратора определять три параметра импульса магнитного поля: длительность фронта, длительность импульса до

полуспада и максимальное значение напряженности магнитного поля. Данное устройство устраняет ошибку, вызванную потерями в активном сопротивлении катушки  $R_1$  и сопротивлении  $R_2$  (3), что позволяет провести измерение длительности до полуспада импульса без дополнительных погрешностей в условиях, когда длительность фронта импульса составляет сотни наносекунд, а длительность спада импульса на 2 порядка больше.

Разработанное устройство состоит из интегратора на операционном усилителе и сумматора на операционном усилителе. На основе разработанного устройства был создан измеритель напряженности импульсного магнитного поля, для которого была проведена экспериментальная проверка работоспособности и определены метрологические характеристики.

### Список литературы

1. Требования устойчивости и стойкости технических систем к воздействию импульсных электромагнитных полей / Н. В. Балюк, С. Д. Орлов, В. В. Оленевский, Д. Н. Стецюк // Технологии электромагнитной совместимости. 2022. № 2 (81). С. 3–19.
2. Методика и результаты испытаний защитного действия активного молниеотвода / В. М. Куприенко, Г. А. Акомелков, В. Н. Романцов, Н. М. Орехов, А. И. Хлебников // Изв. Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 3. С. 129–139.
3. Проведение испытаний на молниестойкость экспериментальных и конструктивно-подобных образцов, выполненных из углепластика, с молние-защитным покрытием / А. Г. Гуляева, Л. В. Черфас, О. А. Комарова, В. М. Куприенко // Тр. ВИАМ. 2017. № 7 (55). С. 10. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-10-10
4. Skoblikov O., Kniaziev V. Penetration of lightning electromagnetic pulses into metallic enclosures with apertures // Electric Power Systems Research. 2014. Vol. 113. P. 48–63. doi: 10.1016/j.epsr.2014.03.014
5. Гормаков А. Н., Ульянов И. А. Расчет и моделирование магнитных полей, создаваемых системой "кольца Гельмгольца – соленоид" // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 40–45.
6. Ивановский И. К. Статистические особенности трещинообразования на поверхности плоских глинистых образцов пластического формования при нагреве тепловым потоком // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. 2003. № 4. С. 54–68. doi: 10.21122/1029-7448-2003-0-4-54-68
7. Шаламов С. П. Измерение импульсных магнитных полей // Вестн. НТУ "ХПИ". Техника и электрофизика высоких напряжений. 2014. № 50. С. 161–168.
8. Средства измерений импульсных электромагнитных полей и токов / К. Ю. Сахаров, В. А. Туркин, О. В. Михеев, А. В. Сухов, В. Л. Уголев, М. Ю. Денисов // Технологии электромагнитной совместимости. 2020. № 1(72). С. 63–76.
9. Отечественные и зарубежные патенты по магнитометрическим датчикам и магнитометрам за 1994–2003 годы / А. А. Игнатъев, А. В. Ляшенко, В. А. Костяков, С. П. Кудрявцева, Л. А. Романченко, Л. С. Сотов, Л. Л. Страхова, А. Л. Хвалин // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2004. № 1. С. 149–162.
10. Schwab A. J. Hochspannungsmesstechnik. Messgeräte und Messverfahren. Klassiker der Technik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 236 p. doi: 10.1007/978-3-642-19882-3 (in German)
11. Панин В. В., Степанов Б. М. Измерение импульсных магнитных и электрических полей. М.: Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
12. Метрологическое обеспечение эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок / Ю. С. Немченко, И. П. Лесной, Б. Н. Лантушко, В. В. Князев // Вестн. НТУ "ХПИ". Техника и электрофизика высоких напряжений. 2004. № 35. С. 29–54.
13. Глухов О. А., Глухов Д. О. Расчет параметров индукционного датчика тока на базе катушки Роговского // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 3–4. С. 124–131. doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-124-131

14. Немченко Ю. С. Широкополосные средства измерения импульсных магнитных полей // Вестн. НТУ «ХПИ». 2007. № 20. С. 132–146.

15. Шаламов С. П. Датчик для измерения токов наносекундного диапазона на основе индукционного преобразователя // Электротехника и электромехани-

ка. 2016. № 5. С. 57–60. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.09

16. Немченко Ю. С., Шаламов С. П. Индукционный преобразователь импульсного магнитного поля молнии // Вестн. НТУ «ХПИ». 2015. № 20 (1129). С. 99–108.

### Информация об авторах

**Романцов Владимир Николаевич** – специалист по направлению "Инженерная электрофизика" (1986), главный специалист АО "31 Государственный проектный институт специального строительства" обособленного подразделения "НИЦ 26 Центрального научно-исследовательского института". Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – измерительная техника; молниезащита; электромагнитная совместимость.

Адрес: АО "31 ГПИСС" ОП "НИЦ 26 ЦНИИ", ул. Атаманская, д. 6, Санкт-Петербург, 191167, Россия  
E-mail: v.romantsov@internet.ru

**Романцов Сергей Владимирович** – магистр по направлению "Приборостроение" (2020), ведущий инженер АО "31 Государственный проектный институт специального строительства" обособленного подразделения "НИЦ 26 Центрального научно-исследовательского института". Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – измерительная техника; молниезащита; электромагнитная совместимость.

Адрес: АО «31 ГПИСС» ОП «НИЦ 26 ЦНИИ», ул. Атаманская, д. 6, Санкт-Петербург, 191167, Россия  
E-mail: romantsov89@gmail.com

**Романцова Наталия Владимировна** – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 51 научной работы. Сфера научных интересов – информационно-измерительные системы; метрологический анализ.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: nvromantsova@mail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>

### References

1. Balyuk N. V., Orlov S. D., Olenovsky V. V., Stetsyuk D. N. Requirements for the Stability and Resistance of Technical Systems to the Effects of Pulsed Electromagnetic Fields. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*. 2022, no. 2 (81), pp. 3–19. (In Russ.)

2. Kuprienko V. M., Akomelkov G. A., Romantsov V. N., Orekhov N. M., Khlebnikov A. I. Test Technique and Results of Active Lightning-Conductor Protective Action. *Proc. of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2015, no. 3, pp. 129–139. (In Russ.)

3. Gunyaeva A. G., Cherfas L. V., Komarova O. A., Kuprienko V. M. Carrying out Tests for Resistance to Lightnings of the Experimental and Constructive and Similar Samples Executed from Carbon Plastic, with Covering Protected from Lightnings. *Proc. of VIAM*. 2017, no. 7 (55), pp. 10. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-10-10 (In Russ.)

4. Skoblikov O., Kniaziev V. Penetration of Lightning Electromagnetic Pulses into Metallic Enclosures with Apertures. *Electric Power Systems Research*. 2014, vol. 113, pp. 48–63. doi: 10.1016/j.epr.2014.03.014

5. Gormakov A. N., Ulyanov I. A. Calculation and Modeling of Magnetic Fields Generated By the System "Helmholtz Rings-Solenoid". *Fundamental Research*. 2015, no. 3, pp. 40–45. (In Russ.)

6. Ivanovsky I. K. Statistical Peculiar Features of Surface Cracking on Flat Clay Samples of Plastic Moulding

when Heated by Heat Flow. *Energetika. Proc. of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2003, no. 4, pp. 54–68. doi: 10.21122/1029-7448-2003-0-4-54-68 (In Russ.)

7. Shalamov S. P. Measurement of Pulsed Magnetic Fields. *Vestnik NTU "KhPI". Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazhenii* [Bulletin of NTU "KhPI". High Voltage Engineering and Electrophysics]. 2014, no. 50, pp. 161–168. (In Russ.)

8. Sakharov K. Yu., Turkin V. A., Mikheev O. V., Sukhov A. V., Ugolev V. L., Denisov M. Yu. Measuring Instruments of Transient Electromagnetic Fields and Currents. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovместимости* [Electromagnetic compatibility technologies]. 2020, no. 1(72), pp. 63–76. (In Russ.)

9. Ignatiev A. A., Lyashenko A. V., Kostyakov V. A., Kudryavceva S. P., Romanchenko L. A., Sotov L. S., Strakhova L. L., Khvalin A. L. Russian and Foreign Patents on Magnetometrical Sensors and Magnetometers from 1994 to 2003 Years. *Heteromagnetic Microelectronics*. 2004, no. 1, pp. 149–162. (In Russ.)

10. Schwab A. J. *Hochspannungsmesstechnik. Messgeräte und Messverfahren. Klassiker der Technik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 236 p. doi: 10.1007/978-3-642-19882-3 (In German)

11. Panin V. V., Stepanov B. M. *Izmerenie impul'snykh magnitnykh i elektricheskikh polei* [Measure-

ment of Pulsed Magnetic and Electric Fields]. Moscow, *Energoatomizdat*, 1987, 120 p. (In Russ.)

12. Nemchenko Yu. S., Lesnoi I. P., Lantushko B. N., Knyazev V. V. Metrological Support of Operation of High-Voltage Pulsed Electric Discharge Installations. *Vestnik NTU "KhPI". Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazhenii* [Bulletin of NTU "KhPI". High voltage engineering and Electrophysics]. 2004, no. 35, pp. 29–54. (In Russ.)

13. Glukhov O. A., Glukhov D. O. The Computation of Parameters of Induction Current Sensor Based on Rogowski Coil. *Power Engineering: Research, Equip-*

*ment, Technology*. 2015, no. 3–4, pp. 124–131. doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-124-131 (In Russ.)

14. Nemchenko Yu. S. Broadband Means of Measuring Pulsed Magnetic Fields. *Vestnik NTU "KhPI"* [Bulletin of NTU "KhPI"]. 2007, no. 20, pp. 132–146. (In Russ.)

15. Shalamov S. P. An Induction Sensor for Measuring Currents of Nanosecond Range. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016, no. 5, pp. 57–60. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.09 (In Russ.)

16. Nemchenko Yu. S., Shalamov S. P. Induction Converter of Pulsed Magnetic Field of Lightning. *Vestnik NTU "KhPI"* [Bulletin of NTU "KhPI"]. 2015, no. 20 (1129), pp. 99–108. (In Russ.)

### Information about the authors

**Vladimir N. Romantsov**, engineer in "Engineering Electrophysics" (1986), chief specialist of JSC "31 State Design Institute of Special Construction" of a separate subdivision "SIC 26 of the Central Research Institute". The author of 1 scientific publication. Area of expertise: electrophysics; lightning protection; electromagnetic compatibility.

Address: JSTC "31 SDI of SC" SD "SEC 26 of the CRI", 6, Atamanskaya St., St Petersburg 191167, Russia  
E-mail: v.romantsov@internet.ru

**Sergey V. Romantsov**, Master in "Instrument Engineering" (2020), leading engineer of JSC "31 State Design Institute of Special Construction" of a separate subdivision "SIC 26 of the Central Research Institute". The author of 4 scientific publications. Area of expertise: measuring equipment; lightning protection; electromagnetic compatibility.

Address: JSTC "31 SDI of SC" SD "SEC 26 of the CRI", 6, Atamanskaya St., St Petersburg 191167, Russia  
E-mail: romantsov89@gmail.com

**Natalia V. Romantsova**, Can. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor of the Department of Information-measuring Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 51 scientific publications. Area of expertise: information and measurement systems; metrological analysis.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: nvromantsova@mail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>

---