

С.П. Шаламов

## ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ИНДУКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Представлено результати реалізації високочутливого датчика струмів наносекундного діапазону індукційного типу для детектування імпульсів струму, що протікають на стержневоому блискавкоприймачі. Аналіз останніх досягнень в галузі вимірювань слабких імпульсних струмів наведено. Представлено результати розрахунку датчика, показано вплив паразитних параметрів на вигляд перехідної характеристики датчика. Зроблено опис основних особливостей конструкції. Наведено параметри створеного датчика та результати калібрування. Бібл. 6, рис. 9.*

*Ключові слова:* напруженість магнітного поля, струм корони, перехідна характеристика, електромагнітна індукція, біекспоненціальний імпульс, калібрування індукційного перетворювача, лінія з розподіленими параметрами.

*Представлены результаты реализации высокочувствительного датчика токов наносекундного диапазона индукционного типа для измерения импульсов тока, протекающих на стержневом молниеприемнике. Проведен анализ современных достижений в области измерений слабких импульсных токов. Представлены результаты расчета датчика, показано влияние паразитных параметров на вид переходной характеристики датчика. Описаны основные особенности конструкции. Приведены параметры созданного датчика и результаты калибровки. Библ. 6, рис. 9.*

*Ключевые слова:* напряженность магнитного поля, ток короны, переходная характеристика, электромагнитная индукция, биэкспоненциальный импульс, калибровки индукционного преобразователя, линия с распределенными параметрами.

**Введение.** Знання из области газового разряда применяются в различных областях современной науки. Коронный разряд возникает в резко неоднородных электрических полях, характерных для электродных систем «игла - плоскость». Эффект возникает при подаче потенциала определенной величины, необходимого для реализации самостоятельной формы разряда. Существует интервал напряжения, при котором разрядный ток представляет собой стабильную последовательность импульсов. Увеличение напряжения на разрядном промежутке, при не изменяющихся внешних условиях, приводит к увеличению частоты следования импульсов. Сегодня в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» ведутся работы по исследованию коронного разряда с молниеприемников в предгрозовой обстановке. Результаты работы позволят создать систему предупреждения о грозовой опасности. Для регистрации разрядного тока, протекающего на игольчатом электроде, применяется индукционный преобразователь. Поскольку на стационарные стержневые молниеприемники невозможно произвести установку шунта, индукционный преобразователь в этом случае является незаменимым инструментом, которому не нужен электрический контакт с молниеприемником.

**Цель работы** – создание измерительного комплекса, который будет основой для системы предупреждения грозовой опасности.

**Постановка задачи.** Моделирование процесса коронирования стержневых молниеприемников осуществлено на высоковольтном испытательном стенде ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». Стержневой молниеприемник размещался между двумя параллельными металлическими плоскостями. Размеры плоскостей: нижняя – 4,02 × 6,56 м, верхняя – 3,63 × 5,22 м. Нижняя плоскость заземлена, верхняя плоскость потенциальна. Стержень устанавливался на нижней плоскости и имел соединение с заземленной плоскостью через сопротивление шунта 75 Ом. Индукционный преобразователь позволил гальванически

отделить систему измерения от элементов установки, находящихся под высоким потенциалом.

Типовые осциллограммы измеряемого тока представлены на рис. 1.

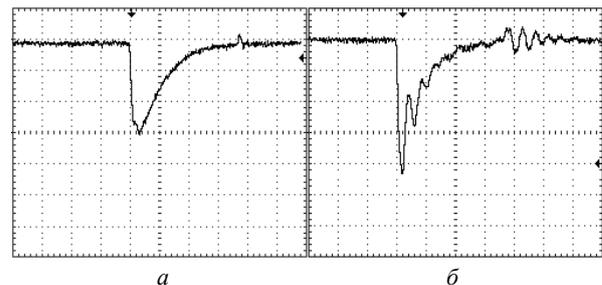


Рис. 1. Типовые осциллограммы тока единичного стримера (масштаб по вертикали – 100 мВ/клетка; масштаб по горизонтали – 100 нс/клетка)

При различных значениях напряженности электрического поля в пространстве и в зависимости от геометрии конструкции, возможны изменения амплитудно-временных параметров тока стримера, но все они находятся в определенном диапазоне: время фронта импульса тока – от 14,8 нс до 20,5 нс, амплитуда – от 4 мА до 20,5 мА.

Формулы для расчета времени нарастания переходной характеристики, постоянной интегрирования измерителя при использовании  $RL$  – интегратора и чувствительности преобразователя имеют вид [2, 3]:

$$T_{riseTime} = 3,35\sqrt{L_d C_d}; \quad (1)$$

$$T = \frac{L_d}{R_I}; \quad (2)$$

$$K_n = \frac{\mu_0 \mu_r S_w \cdot \cos \varphi}{T}, \quad (3)$$

где  $T_{riseTime}$  – время нарастания переходной характеристики;  $L_d$  – индуктивность индукционного преобразо-

вателя;  $C_d$  – суммарная паразитная емкость;  $T$  – постоянная интегрирования самоинтегрирующего индукционного преобразователя;  $R_I$  – сумма собственного и интегрирующего сопротивления;  $K_n$  – коэффициент преобразования;  $\mu_0$  – постоянная магнитной проницаемости;  $\mu_r$  – магнитная проницаемость материала сердечника;  $S$  – площадь витков;  $w$  – количество витков;  $\varphi$  – угол между направлением вектора напряженности магнитного поля и нормалью к рамке.

Для обеспечения надежной регистрации тока стримера, чувствительность измерителя принимается не менее 2,5 мВ на 1 мА.

**1. Анализ современных достижений в области измерения импульсных токов.** В [2] представлено описание измерителя сильных импульсных токов для измерения в цепях с высоким рабочим напряжением и отсутствием возможности использования шунта. Принципиальная схема измерителя представлена на рис. 2. Конструктивное выполнение показано на рис. 3.

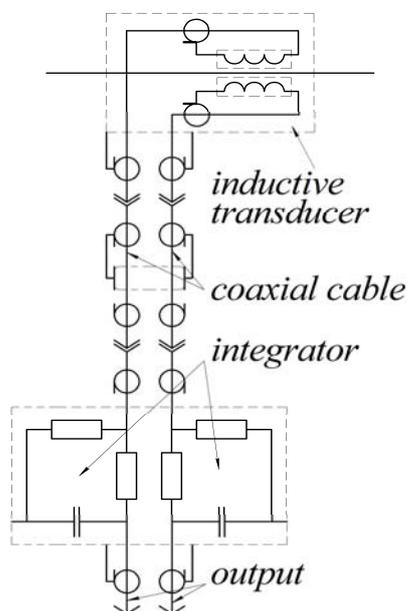


Рис. 2. Принципиальная схема измерителя

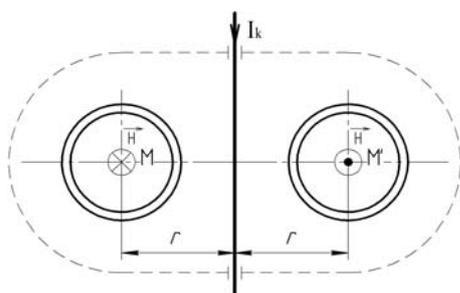


Рис. 3. Конструкция измерителя

Сигнал интегрируется на  $RC$ -интеграторе. Изменяемый 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  $M$  и  $M'$  компланарно и противофазно установлены два индукционных измерительных преобразователя.

Вся конструкция заключена в электромагнитный экран цилиндрической формы. Под действием элек-

тромагнитного 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.

В [4] приведены результаты разработки средств измерения импульсных магнитных полей электроразрядных установок, используемых для испытаний технических средств на молниестойкость. Описана теория работы измерителей импульсных магнитных полей индукционного типа. Представлены требования к параметрам измерителя для достоверного измерения биэкспоненциальных полей. Параметры измерителя должны быть следующими:

$$T_{inc} \geq (3 \div 5)T_{riseTime}; \quad (4)$$

$$T_{dec} \geq (10 \div 50)T_{fallTime}, \quad (5)$$

где  $T_{fallTime}$  – длительность спада переходной характеристики;  $T_{inc,dec}$  – длительность фронта и спада измеряемых импульсов магнитного поля

Для измерения широкополосных импульсных магнитных полей описана схема измерителя, состоящего из двух независимых каналов: измерения фронта импульса и канал измерения длительности импульса. Электрическая схема приведена на рис. 4.

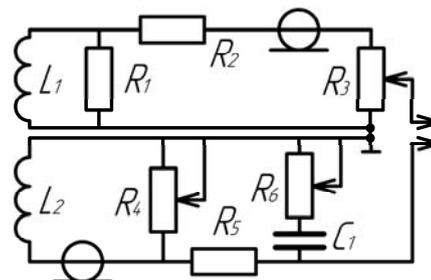


Рис. 4. Схема широкополосного измерителя напряженности магнитного поля

Канал измерения фронта импульса достоверно измеряет форму импульса в диапазоне времен от единиц наносекунд до 10 мкс, а канал измерения спада – в диапазоне времен от 10 мкс до нескольких десятков миллисекунд. Для интегрирования сигнала используют  $RL$  (элементы  $L_1, R_1$ ) и  $RC$  (элементы  $R_5, C_1$ ) интеграторы. Элементы  $L_1$  и  $L_2$  являются индуктивностью каналов измерения фронта и спада. Для правильной работы измерителя необходимо достичь совпадения формы сигналов на спаде импульса канала измерения фронта и фронта импульса канала измерения спада. Это достигается регулированием  $R_4$ . Регулирование амплитуды сигнала с канала измерения фронта осуществляется резистором  $R_3$ . При сложении сигналов возникает провал в месте стыка сигналов, который устраняется регулировкой  $R_6$ . Резистор  $R_2$  позволяет согласовать кабель. В [5] реализован широкополосный измеритель напряженности магнитного поля.

В [6] рассматривается принцип работы, производительность, ограничения и развитие технологии измерений токов с помощью пояса Роговского и излагаются меры по совершенствованию конструкции интегратора, который позволяет достичь ширины полосы частот до 10 МГц. Проведен анализ поведения

пояса Роговского при измерениях токов высокой частоты. Упрощенная схема замещения катушки Роговского показана на рис. 5

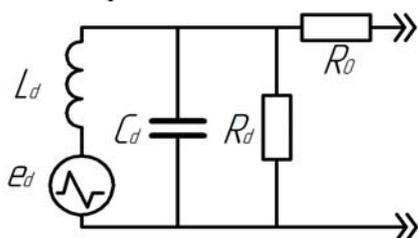


Рис. 5. Электрическая эквивалентная схема катушки с нагрузочным сопротивлением  $R_d$  и последовательном резистором  $R_0$  ( $R_0 \gg R_d$ )

Элементы  $L_d$  и  $C_d$  представляют индуктивность и емкость катушки,  $R_0$  является интегрирующим сопротивлением. Для обеспечения необходимого затухания выбор  $R_d$  проводится в согласии с выражением:

$$R_d = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{L_d}{C_d}} \quad (6)$$

Значение  $R_d$  выше, чем волновое сопротивление катушки  $\rho = (L/C)^{0,5}$ , хотя и есть основания предполагать, что катушка должна быть нагружена на  $\rho$ . Но было обнаружено, что (6) дает лучшую переходную характеристику. Кроме того, емкость измерительного кабеля будет увеличивать эквивалентную емкость катушки и тем самым существенно уменьшит пропускную способность. Чтобы избежать этого эффекта, последовательное сопротивление  $R_0$  установлено на конце катушки, как показано на рис. 5. Этот резистор образует часть RC интегратора [6].

**2. Описание конструкции датчика.** Измеритель состоит из последовательно соединенных индукционных преобразователей, как показано на рис. 6. Выходной сигнал увеличивается пропорционально количеству соединенных измерителей в том случае, если система обладает свойством длинной линии. Это имеет место, когда длина волны измеряемого поля соизмерима с электрической длиной проводника катушки. Выбор сопротивления  $R_d$  можно проводить в согласии с (6), но при этом датчик работает в колебательном режиме. На рис. 7 приведены результаты расчета переходной характеристики при значении  $\rho$  катушки, равном 160 Ом.

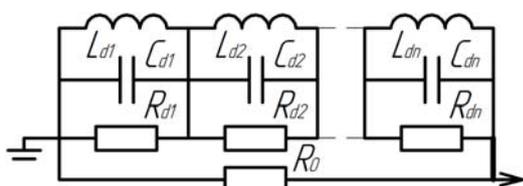


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема измерителя ( $R_d$  – демпфирующее сопротивление)

Для достижения минимального времени нарастания переходной характеристики  $T_{riseTime}$  нужно выбирать  $R_d$  равным  $(\pi/2)\rho$ . В случае необходимости получения аperiodической переходной характеристики, рекомендуется принять  $R_d \leq \rho$ .

Созданный измеритель представляет собой катушку, намотанную на ферромагнитный сердечник

прямоугольного сечения. Параметры измерителя следующие: сопротивление катушки 2 Ом, паразитная емкость 100 пФ, индуктивность 5 мкГн.

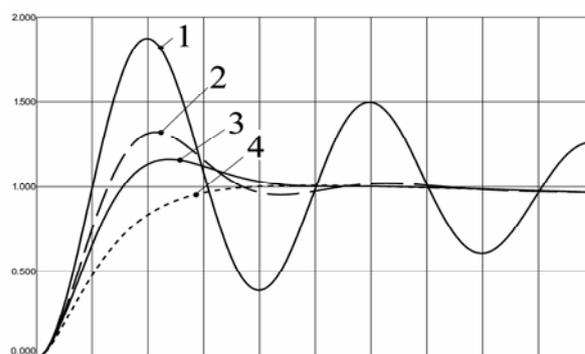


Рис. 7. Результаты расчета переходной характеристики измерителя (1 –  $R_d$  отсутствует; 2 –  $R_d = (\pi/2)\rho$ ; 3 –  $R_d = \rho$ ; 4 –  $R_d = \rho/2$ ; масштаб по вертикали – относительные единицы; масштаб по горизонтали – 5 нс/клетка)

На рис. 8 показан сигнал с измерителя (2), полученный при измерении тока прямоугольной формы (1) с фронтом 5 нс. Нагрузочное сопротивление  $R_d$  принимается равным  $(\pi/2)\rho$ .

На рис. 9 приведены осциллограммы сигналов датчика и шунта с сопротивлением 75 Ом, установленных на стержневом молниеприемнике. Измеряется ток короны.

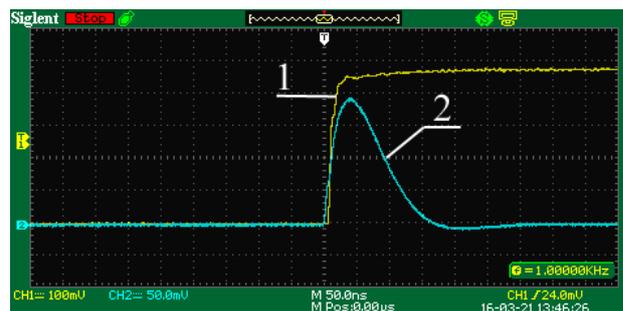


Рис. 8. Осциллограммы выходного напряжения с измерителя (1 – сигнал с генератора; 2 – выходной сигнал с измерителя)

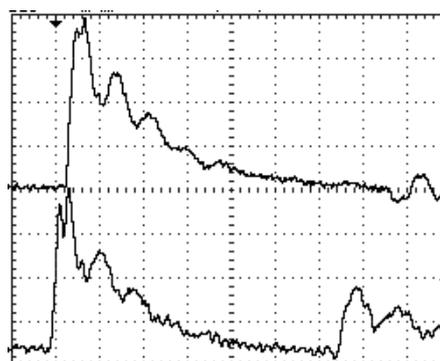


Рис. 9. Осциллограммы выходных сигналов напряжения с шунта и измерителя (канал 1: масштаб по вертикали – 100 мВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 нс/клетка; канал 2: масштаб по вертикали – 20 мВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 нс/клетка)

Из рис. 8: чувствительность измерителя – 8 мВ/мА, время фронта выходного сигнала – 25 нс.

**3. Особенности конструкции датчика.** Для повышения чувствительности и помехозащищенности

измерителя можно использовать два идентичных преобразователя, включенных встречно. Если индукционный преобразователь нагружен на малое активное сопротивление, по сути, режим короткого замыкания, то возникает противополе, по величине близкое к величине измеряемого поля и вытесняющее из объема индукционного преобразователя измеряемое магнитное поле. Если использовать два преобразователя и при измерениях их располагать близко друг к другу, то выходной сигнал с преобразователей будет существенно меньше, чем если бы они располагались друг относительно друга на значительном расстоянии. Для решения этой проблемы существует несколько путей: использование провода малого сечения для увеличения собственного сопротивления и, как следствие, снижения величины тока в катушке, либо разделение преобразователей и удаление их друг от друга до того момента, пока взаимдуктивность измерителей не станет исчезающе малой.

Автор выражает благодарность Ю.С. Немченко за помощь при проведении исследований.

Работа выполнена в рамках проекта 0115U000611, финансируемого МОН Украины.

#### Выводы.

1. Создан измерительный комплекс для системы предупреждения грозовой опасности, в состав которого входит индукционный преобразователь. Для повышения чувствительности датчиков индукционного типа применяется схема их последовательного соединения. Такое соединение датчиков обладает свойством длинной линии в том случае, если длина волны измеряемого поля соизмерима с электрической длиной проводника катушки.

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 составляет 25 нс, а чувствительность – 8 мВ/мА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernuhin A. Yu., Kniaziev V.V. Стримерная корона со стержневых молниеприемников // East European Scientific Journal. – 2016. – №6. – Ч.2. – С. 39-46.
2. 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.
3. Шаламов С.П. Измерение импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – №50. – С. 161-168.
4. Немченко Ю.С. Широкополосные средства измерения импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – №20. – С. 132-146.
5. Немченко Ю.С., Шаламов С.П. Индукционный преобразователь импульсного магнитного поля молнии // Вестник НТУ «ХПИ». – 2015. – №20(1129). – С. 99-108.
6. Power Electronic Measurements Ltd (PEM). – Режим доступа: <http://www.pemuk.com/publications.aspx>.

#### REFERENCES

1. Chernuhin A. Yu., Kniaziev V.V. The streamer corona from the rod lightning arresters. *East European Scientific Journal*, 2016, no.6, iss.2, pp. 39-46. (Rus).
2. Nemchenko Yu.S., Lesnoy I.P., Lantushko B.N., Knyazev V.V. Metrological maintenance operation of high-voltage pulse electric discharge equipment. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2004, no.35, pp. 29-54. (Rus).
3. Shalamov S.P. Measurement of pulsed magnetic fields. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50, pp. 161-168. (Rus).
4. Nemchenko Yu.S. Wideband means of measuring pulse magnetic fields. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2007, no.20, pp. 132-146. (Rus).
5. Nemchenko Yu.S., Shalamov S.P. Induction converter pulsed magnetic field of lightning. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.20, pp. 99-108. (Rus).
6. Power Electronic Measurements Ltd (PEM). Available at: <http://www.pemuk.com/publications.aspx> (Accessed 08 April 2013).

Поступила (received) 10.09.2016

Шаламов Станислав Павлович, аспирант,  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,  
тел/phone +38 057 7076010, e-mail: shalamov.stas@i.ua

S.P. Shalamov

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### An induction sensor for measuring currents of nanosecond range.

**Purpose.** A current meter based on the principle of electromagnetic induction is designed to register the current flowing in the rod lightning. The aim of the article is to describe the way of increasing the sensitivity of the converter by means of their serial communication. **Methodology.** The recorded current is in the nanosecond range. If compared with other methods, 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 a shunt. 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. For measuring the magnetic field pulses with a rise time of 5 ns to 50 ns a meter has turns from 5 to 15. The sensitivity of such a meter is low. When the number of turns is increased, the output signal and the front increase. 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. **Originality.** Series connection of converters has the property of a long line. The level of the transient response of the meter is calculated. The influence of parasitic parameters on the type of meter transient response is examined. The shown construction was not previously described. **Practical value.** The results of meter implementation are given. The design peculiarities of the given measuring instruments are shown. References 6, figures 9.

**Key words:** magnetic field strength, corona current, surge characteristic, electromagnetic induction, bi-exponential pulse, induction transformer's calibration, distributed parameter line.