

УДК 53.084.4:537.528

**В. Г. ЖЕКУЛ, С. Г. ПОКЛОНОВ, А. П. СМІРНОВ, В. С. МАКАРЕНКО****КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ РАЗРЯДЕ В ЖИДКОСТИ**

В работе предложена комплексная методика калибровки средств измерения электрических процессов (длительностью от 10 мкс до 100 мкс, амплитудное значение разрядного тока  $10^4$ - $10^5$  А, зарядное напряжение десятки киловольт) при электрическом разряде в жидкости. Она позволяет выполнить калибровку и проверку средств измерения на режимах близких по своим параметрам к измеряемым в процессе проведения экспериментальных работ, снизить вероятность ошибки, уменьшить погрешность процесса калибровки, а также периодически осуществлять проверку коэффициента уже поверенных средств измерения непосредственно в процессе проведения экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** высоковольтный разряд в жидкости, разрядный ток, напряжение на разрядном промежутке, коаксиальный омический шунт, делитель напряжения, катушка Роговского.

**Введение.** Электроразрядные технологии успешно применяются в различных отраслях промышленности: от машиностроения и химической промышленности до пищевой и нефтегазодобывающей [1, 2]. Успешность применения высоковольтного электрического разряда в жидкости для нужд промышленности дает нам повод говорить об актуальности работ, которые направлены на расширение границ области его применения и повышения эффективности уже существующих электроразрядных технологий. Выполнение этих работ невозможно без проведения научных исследований, одним из методов которых является физическое моделирование, с измерением электрических характеристик разряда: разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке. По их виду и последующему анализу можно судить о протекании процесса и его эффективности. Все это говорит о важности корректного подхода к постановке физического эксперимента, выбору и калибровке средств измерения.

**Постановка задачи.** На выбор средств измерения при электрическом разряде в жидкости накладывает свои ограничения специфика измеряемого импульса напряжения и тока: малая длительность (десятки микросекунд) и высокие амплитудные значения (десятки килоампер и десятки киловольт).

Учитывая вышеизложенные требования для измерения импульсных токов большой амплитуды (от  $10^4$  до  $10^5$ ) А используются различного рода зонды [3-5]: токовые шунты различной конструкции, индукционные катушки – катушка (пояс) Роговского, датчики Холла и т.д. В качестве зондов для измерения высоких импульсных напряжений в электроразрядных установках различного назначения используются, как правило, различного рода делители напряжения (емкостные, омические, смешанные и т.д.) [3, 6, 7].

Проведенный анализ показал, что для измерения импульсных токов и напряжений при экспериментальных исследованиях электрического разряда наиболее широкое применение получили катушка Роговского и резистивный шунт, а также емкостной делитель напряжения [8-11].

Исследования рынка производителей средств высоковольтных измерений показало, что существуют фирмы, которые занимаются их серийным производ-

ством [12-13]. Однако специфика научных исследований зачастую подразумевает необходимость разработки измерительного оборудования с индивидуальными массогабаритными показателями и необходимым для данных измерений коэффициентом трансформации исследуемого сигнала, которые часто отличаются от серийно выпускаемых моделей. И если их изготовление, при наличии соответствующих навыков, знаний и необходимых комплектующих, не представляет серьезных затруднений [3], то процесс калибровки вызывает некоторую сложность. Особенно если учесть, что калибровка должна осуществляться при параметрах близких к характеристикам измеряемого импульса.

В ряде литературных источников описано несколько методик по калибровке катушки Роговского, резистивного шунта и делителя напряжения. Так в [5] калибровка шунта проводилась с помощью генератора аperiodических импульсов ГАИ-2 и калиброванной катушкой Роговского. Авторами работы [14] для калибровки катушки Роговского использовался низковольтный генератор импульсных токов. В работе [15] описаны основные моменты калибровки промышленно изготавливаемых катушек Роговского:

- катушку Роговского необходимо калибровать вместе с его интегратором;
- с учетом высокой линейности характеристик пояса калибровку можно производить лишь в одной точке при фиксированном значении параметров тока (амплитуды и частоты);
- желателен индивидуальный подход к калибровке катушек Роговского.

В [4] предлагается для определения коэффициента делителя использовать единичные импульсы с известными параметрами, а для калибровки шунта – квазипрямоугольные импульсы тока, получаемые путем разряда конденсатора на контур с нужным активным сопротивлением.

Также существует несколько патентов (одним из примеров может служить [16]) в которых описана калибровка шунтов и катушек Роговского. Для калибровки измерительного оборудования могут быть применены промышленные калибраторы [17]. Для калибровки могут быть использованы также серийно выпускаемые сертифицированные измерители тока и напряжения [12-13].

Таким образом, анализ показал, что в литературе отсутствует подробное описание комплексной методики калибровки средств измерения электрических процессов при высоковольтном разряде в жидкости с параметрами, близкими к характеристикам измеряемого импульса без использования калибраторов или других образцовых приборов. При этом определено, что она должна включать в себя не только несколько методов калибровки, для уменьшения вероятности ошибки при определении коэффициента, но и, одновременно, осуществлять проверку работоспособности средств измерения при исследуемых параметрах. Другим немаловажным свойством этой методики должна быть возможность ее осуществления только средствами исследовательской лаборатории, которые впоследствии будут использованы при проведении экспериментальных исследований. Это уменьшит материальные и временные затраты на калибровку, а также позволит периодически осуществлять проверку коэффициента уже поверенных средств измерения или калибровать, в случае необходимости, новые не прерывая процесс проведения экспериментальных исследований.

Учитывая все вышесказанное, в данной работе была поставлена цель, на основании уже известных методов, создать комплексную методику калибровки и проверки высоковольтных средств измерения электрических процессов длительностью  $\approx$  от 10 мкс до 100 мкс, в случае высоковольтного разряда в жидкости, которую можно осуществить только средствами экспериментальной высоковольтной лаборатории.

**Калибровка средств измерения разрядного тока.** Как уже было сказано выше, для измерения разрядного тока при электрическом разряде в жидкости могут быть использованы катушка Роговского и омический коаксиальный шунт (внешний вид используемых в работе средств измерения представлен на рис. 1 и рис. 2). Причем в процессе измерения желательно использовать оба измерительных прибора, что позволит оперативно отреагировать на потерю работоспособности одного из них.

Для повышения точности их калибровки, уменьшения погрешности измерения и проверки их работоспособности предлагается использовать два метода: экспериментальный и расчетный.

Калибровку предлагается проводить на режиме короткого замыкания (КЗ), когда разрядный промежуток в электродной системе замкнут металлическим проводником большого сечения. В этом случае разрядная цепь установки представляет собой классический RLC разрядный контур, разрядные характеристики которого легко и точно можно рассчитать по исходным параметрам [18].

В дальнейшем калибруемые средства измерения планируется использовать в исследованиях по повышению эффективности электроразрядного способа декольматации. Поэтому параметры разрядной цепи при калибровке должны соответствовать параметрам электроразрядного скважинного устройства «Скиф»: величина зарядного напряжения  $U_z = 30$  кВ, емкость конденсаторной батареи  $C = 2,26$  мкФ [19-22].



Рисунок 1 – Внешний вид катушки Роговского



Рисунок 2 – Внешний вид омического коаксиального шунта

*Экспериментальный метод калибровки средств измерения разрядного тока.* Сущность экспериментального метода калибровки состояла из двух шагов и заключалась в следующем.

На первом шаге калибровки с помощью образцового моста постоянного тока МО62 ГОСТ 7165-93 измерялось сопротивление шунта. В результате проведенных измерений было определено сопротивление шунта используемого в данной работе, которое составляло  $R_{ш} = 0,00564 (\pm 0,5 \%)$  Ом.

На втором шаге выполнялось осциллографирование разрядного тока на режиме КЗ. На рис. 3 представлена полученная осциллограмма.

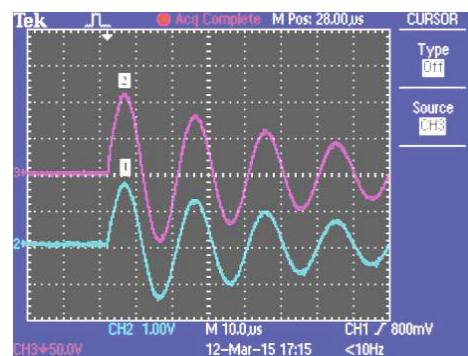


Рисунок 3 – Осциллограмма режима короткого замыкания:

1 – ток в разрядной цепи, измеренный с помощью пояса Роговского; 2 – ток в разрядной цепи, измеренный с помощью омического коаксиального шунта

В процессе обработки полученных осциллограмм была определена величина первой амплитуды тока как для случая измерения с помощью шунта ( $U_{ш}$ ), так и для случая измерения катушкой Роговского ( $U_{п}$ ). Затем используя выражения (1) определяли истинное значение тока, а по (2) – коэффициент катушки Роговского ( $K_p$ ). Аналогично находится и коэффициент шунта ( $K_{ш}$ ).

$$I = U_{ш} / R_{ш}, \quad (1)$$

где  $I$  – истинное значение разрядного тока, А;  $U_{ш}$  – напряжение на шунте, В;  $R_{ш}$  – сопротивление шунта, Ом.

$$K_p = I/U_{ш}, \quad (2)$$

где  $U_{п}$  – напряжение сигнала, полученного с помощью катушки Роговского, В.

Все полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

$U_{ш}, В$	$U_{п}, В$	$I, А$	$K_{ш}, А/В$	$K_p, А/В$
108	1,68	19148,936	177,3	11398,18

*Расчетный метод калибровки средств измерения разрядного тока.* Для проверки точности калибровки, наряду с экспериментальной методикой, необходимо использовать расчетный (теоретический) метод, который позволяет по известным параметрам разрядной цепи и измеренному с помощью измерительных средств временного профиля тока КЗ рассчитать любую по порядку следования амплитуду затухающих колебаний разрядного тока.

При расчете полагали, что разрядная цепь представляет собой классический RLC-контур [18]. С помощью полученной осциллограммы тока КЗ (рис. 3) определяли период колебаний  $T$  и декремент затухания  $\Delta$  ( $\Delta=I/I_3$ ). Используя эти данные и известные соотношения для RLC-контра (3-4) можно определить сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  разрядного контура.

$$T = 2\pi \sqrt{LC}; \quad (3)$$

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C}. \quad (4)$$

Зная, что для RLC-контра  $\alpha = R/2L$  и  $\alpha = \ln \Delta/T$ , приравниваем правые части

$$R/2L = \ln \Delta/T \quad (5)$$

можем определить сопротивление контура (сопротивление разрядной цепи экспериментальной установки в режиме КЗ)

$$R = \frac{2L \ln \Delta}{T}. \quad (6)$$

Все параметры разрядного контура экспериментального стенда приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Параметры разрядного контура экспериментального стенда

$U_3$	$C$	$T$	$L$	$R$
кВ	мкФ	мкс	мкГн	Ом
30,0	2,26	19,52	4,288	0,154

Зная  $R$  и зарядное напряжение ( $U_3$ ) можно определить реальное значение первой амплитуды тока используя известные формулы для RLC цепи

$$I_{1r} = \frac{U_3}{L\omega} e^{-\alpha t_1}, \quad (7)$$

где  $t_1$  – время на осциллограмме амплитуды первого максимума тока;  $\alpha = R/2L$ ;  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ ;  $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ .

Полученное по выражению (7) значение амплитуды первого максимума тока КЗ – 19970 А.

Расчетные коэффициенты катушки Роговского –

11886,905 А/В, шунта - 184,9 А/В.

В ходе калибровки было получено хорошее совпадение результатов, полученных с использованием двух методик – расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет 4,11 %.

При проведении экспериментальных исследований в качестве основного необходимо брать расчетный коэффициент, так как он не содержит погрешность, связанную с использованием дополнительных средств измерения.

**Калибровка делителя напряжения.** Как показал предварительный анализ, лучшим вариантом для измерения напряжения на разрядном промежутке при электрическом разряде в воде является делитель напряжения. При выполнении данной работы, с учетом плана проведения экспериментальных работ и ожидаемых параметров измеряемого сигнала, был разработан и создан емкостной делитель, внешний вид которого приведен на рис. 4. Делитель напряжения был создан по схеме, представленной в [3], и помещен в керамический корпус резистора КЭВ-40.

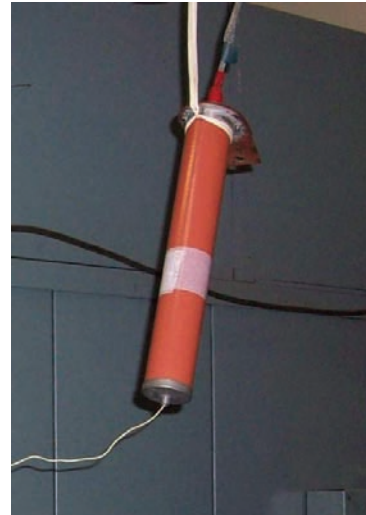


Рисунок 4 – Внешний вид емкостного делителя напряжения

Для проверки работоспособности и калибровки созданного делителя напряжения было принято решение также использовать два метода.

*В основе первого метода* лежит использование импульсов низкого напряжения для отладки, в процессе разработки и создания делителя, а также для последующей калибровки. Для этого использовался генератор прямоугольных импульсов (типа Г 5-63). Он генерирует импульсы низкого напряжения (до 60 В), длительность которых может варьироваться в диапазоне от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$  с. При калибровке делителя импульсом с длительностью, равной длительности разряда, подбором согласующих элементов делителя добиваются полного повторения формы импульса на данной частоте, после чего определяется коэффициент деления делителя. На рис. 5 представлен пример калибровки делителя напряжения прямоугольным импульсом длительностью 10 мкс. Данные процесса калибровки занесены в табл. 3.



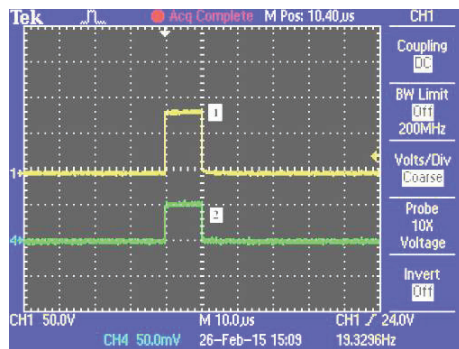


Рисунок 5 – Пример калибровки делителя прямоугольным импульсом низкого напряжения длительностью 10 мкс:  
1 – прямой сигнал с генератора, 2 – сигнал через делитель напряжения

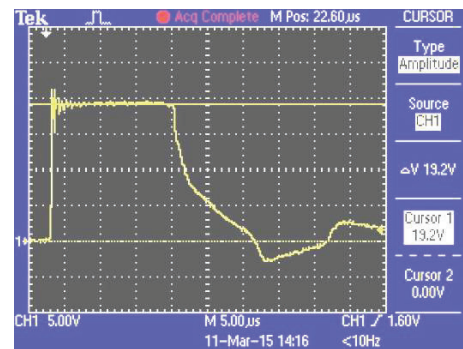


Рисунок 6 – Калибровка делителя высоким напряжением

Таблица 3 – Данные процесса калибровки

Сигнал генератора		Сигнал через делитель напряжения		
Ампл. U, В	Длит. τ, мкс	Ампл. U, В	Длит. τ, мкс	Коефф. делит (Кд)
84	от 10 до 100	0,05	от 10 до 100	1680

Данный метод применяется с целью проверки возможности использования разработанного делителя напряжения для измерения сигнала длительностью от 10 мкс до 100 мкс и предварительной калибровки. Результаты исследования показали, что коэффициент делителя напряжения остается неизменным во всем рассматриваемом временном диапазоне. Однако, так как для калибровки использовались низковольтные импульсные сигналы, а созданный делитель напряжения предназначен для измерения высоковольтных импульсов напряжения, то его коэффициент деления должен быть уточнен. Для этого используется *второй метод калибровки*.

Его сущность заключается в определении коэффициента делителя на высоковольтном напряжении путем осциллографирования напряжения на разрядном промежутке при режимах с большим временем задержки до пробоя. Для этого осуществляют разряд с большим межэлектродным промежутком (до 50 мм) в слабопроводящей среде. При таком режиме разряда в предпробойной стадии разряда напряжение на зарядном промежутке равно зарядному напряжению на конденсаторе, затем происходит пробой и резкое падение напряжения. Импульс напряжения при этом близкий к прямоугольному. На рис. 6 приведена осциллограмма данного метода калибровки при пробое высоким напряжением 30 кВ.

Для осуществления разряда используется управляемый разрядник–коммутатор. Зарядное напряжение на конденсаторе регистрируется специальным электростатическим киловольтметром с погрешностью не более 1 % и сравнивается со значением полученном на осциллограмме.

По полученной осциллограмме определяется величина сигнала соответствующая «полке» задержки пробоя ( $U_{но}$ ), а зная величину зарядного напряжения легко определить коэффициент делителя используя выражение (8)

$$K_d = U_3 / U_{но}$$

Согласно данным, приведенным на рис. 6 коэффициент делителя напряжения, при работе на высоком напряжении составляет 1562,5. Различие с коэффициентом делителя напряжения, полученного при низком напряжении, составляет  $\approx 7\%$ . При выполнении экспериментальных работ необходимо брать значение коэффициента делителя, полученное на высоком напряжении.

**Выводы.** В данной работе предложена комплексная методика калибровки средств измерения электрических процессов, разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке, при электрическом разряде в жидкости. Она позволяет выполнить калибровку и проверку средств измерения, снизить вероятность ошибки и уменьшить погрешность процесса калибровки, а также периодически осуществлять проверку коэффициента уже поверенных средств измерения непосредственно в процессе проведения экспериментальных исследований. Помимо этого отмечено:

- методика калибровки измерителей тока (омического коаксиального шунта и катушки Роговского) должна осуществляться по двум методам - экспериментальному и расчетному;

- калибровка измерителя напряжения (делителя напряжения) также должна проходить в два этапа и включать в себя непосредственно калибровку на высоком напряжении и проверку корректной его работы при измерении импульсов короткой длительности.

**Список литературы:** 1. Гулый Г. А. Основы разрядно-импульсных технологий / Г. А. Гулый. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 2. Вовченко А. И. 50-летний путь развития: теория и практика электроразрядных процессов / А. И. Вовченко // Материалы XVI Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» (19-22 августа 2013). – Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2013. – С. 3-6. 3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / А. Шваб. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 4. Ашнер А. М. Получение и измерение импульсных высоких напряжений / А. М. Ашнер. – М.: Энергия, 1979. – 120 с. 5. Донец С. Е. Стержневой шунт для измерения сильных токов микросекундной длительности / С. Е. Донец, В. В. Леденев, В. В. Литвиненко // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2008. – № 44. – С. 39-44. 6. Важов В. Ф. Техника высоких напряжений: курс лекций / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с. 7. Куффель Е. Техника и электрофизика высоких напряжений / Е. Куффель, В. Цаенгель,

Дж. Куффель. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. – 520 с. **8.** Винников Д. В. Экспериментальное исследование электрического разряда в жидкости, создаваемого между электродами с конусной выемкой / Д. В. Винников, А. Н. Озеров, В. Б. Юферов и др. // Электротехника и электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 55-60. **9.** Аблесимов В. Е. Измерение характеристик электрического разряда в растворе NaCl / В. Е. Аблесимов, В. М. Карюк, А. Н. Павлов и др. // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 3. – С. 42-44. **10.** Жекул В. Г. К теории формирования электрического разряда в проводящей жидкости / В. Г. Жекул, Г. Б. Раковский // Журнал Технической физики. – 1983. – Т. 53, № 1. – С. 8-14. **11.** Поклонов С. Г. Эффективность электрического разряда для условий нефтяных скважин / С. Г. Поклонов, В. Ж. Глушенко, Л. П. Трофимова и др. // Нефтяное хозяйство. – 1992. – №3. – С. 20-23. **12.** High Voltage Probes. Электронный ресурс: <http://www.highvoltageprobes.com/high-voltage-probes>. **13.** Stangenes Industries, Inc. Электронный ресурс: <http://www.stangenes.com>. **14.** Батыгин Ю. В. Численная обработка результатов измерения импульсных токов поясом Роговского / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, Е. А. Чаплыгин // Автомобильный транспорт. – 2009. – № 25. – С. 194-199. **15.** Ковнерев М. Использование катушки Роговского для токовых измерений / М. Ковнерев, Ю. Троцкий // Электронные компоненты. – 2005. – № 5. – С. 123-127. **16.** Баранов П. Ф. Пат. 139577. Российская Федерация. Устройство для проверки шунта / П. Ф. Баранов, Э.И. Цимбалист, В. Н. Бориков, Е. В. Бедарева. – 2014. **17.** Денисова Н. Новая эра в системе калибровки / Н. Денисова // Современная электроника. – 2011. – № 5. – С. 34-37. **18.** Теоретические основы электротехники. Т. 1. – М.: Высшая школа, 1976. – 544 с. **19.** Жекул В. Г. Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины / В. Г. Жекул, В. А. Кучернюк, Ю. И. Мельхер и др. // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2012. – Вып. 21. – С. 72-77. **20.** Shwets I. S. Application of elektroimplosion for well stimulation / I. S. Shwets, O. N. Sezenenko, R. A. Macsutov // Proceedings volume 1:7 the European Symposium on Improved oil Recovery, 27-29 October, 1993, Moscow, Russia. **21.** Shwets I. S. Elektrohydroimpulse equipment for Increase of Oil and Intake Wells / I. S. Shwets, Y. I. Kurashko, N. N. Klimanskiy and others // 13th International Simposium on High Current Electronics: Proceedings. – Tomsk: Publishing house of the IAO SBRAS, 2004. – P. 409-411. **22.** Софийский К. К. Динамические способы декольматации поверхностных скважин / К. К. Софийский, П. Е. Филимонов, Б. В. Бокий и др. – Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2014. – 248 с.

**References:** **1.** Gulyj, G. A. Osnovy razrjadnoimpul'snyh tehnologij [Fundamentals of discharge-pulse technologies]. Kiev, Naukova dumka, 1990. 208. **2.** Vovchenko A. I. 50-letnij put' razvitiya: teorija i praktika jelektrozrazjadnyh processov [The 50-year-old way of development: theory and practice of electrodischarge processes]. Fizika impul'snyh razrjadov v kondensirovannyh sredah: materialy XVI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (19-22 avgusta 2013) [Physics of Pulse Discharges in Condensed Media: The materials XVI-th International Scientific Conference (August, 19-22, 2013)]. Nikolaev, Mikolaïvs'ka oblasna drukarnja, 2013, pp. 3-6. **3.** Shvab A. Izmereniya na vysokom naprjazhenii [High-voltage measurements]. Moscow, Jenergoatomizdat, 1983. 264. **4.** Ashner A. M. Poluchenie i izmerenie impul'snyh vysokih naprjazhenij [Production and measurement of high-voltage pulses]. Moscow, Jenergiya, 1979. 120. **5.** Donec S. E., Ledenev V. V., Litvinenko V. V. Sterzhnevij shunt dlja izmereniya sil'nyh tokov mikrosekundnoj dlitel'nosti

[Rod shunt for measuring high currents of microsecond duration]. Vestnik NTU "HPI". Serija: Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij. 2008. No. 44. P. 39-44. **6.** Vazhov V. F., Lavrinovich V. A. Tehnika vysokih naprjazhenij: kurs lekcij [High-voltage machines: course of lectures]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2008. 150. **7.** Kuffel E., Zaengl V., Kuffel J. Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij [High-voltage engineering and electrophysics]. Dolgoprudnyj: Izd. dom "Intellekt", 2011. 520. **8.** Vinnikov D. V., Ozerov A. N., Juferov V. B., Sakun A. V., Korytchenko K. V., Mesenko A. P. Jeksperimental'noe issledovanie jelektricheskogo razrjada v zhidkosti, sozdavaemogo mezhdru jelektrodami s konusnoj vyemkoj [Experimental investigation of electrical discharge in liquid initiated between cone channel electrodes]. Jelektrotehnika i Jelektromehanika. 2013. No 1. P. 55-60. **9.** Ablesimov V. E., Karjuk V. M., Pavlov A. N., Kirpichev A. A., Simchuk A. A. Izmerenie harakteristik jelektricheskogo razrjada v rastvore NaCl [Measurement of characteristics of an electrical discharge in NaCl solution]. Zhurnal tehniczeskoj fiziki. 2015. Vol. 85, No. 3. P. 42-44. **10.** Zhekul V. G., Rakovskij G. B. K teorii formirovaniya jelektricheskogo razrjada v provodjashhej zhidkosti [On the theory of formation of an electrical discharge in a conductive fluid]. Zhurnal Tehniczeskoj fiziki. 1983. Vol. 53. No. 1. P. 8-14. **11.** Poklonov S. G., Glushenko V. Zh., Trofimova L. P., Curkin V. N., Kovjazin N. I. Jefeektivnost' jelektricheskogo razrjada dlja uslovij neftjanykh skvazhin [Efficiency of the electric discharge for oil well conditions]. Neftjanoe hozjajstvo. 1992. No. 3. P. 20-23. **12.** High Voltage Probes. Available at: <http://www.highvoltageprobes.com/high-voltage-probes>. (accessed 21.03.2016). **13.** Stangenes Industries, Inc. Available at: <http://www.stangenes.com>. (accessed 21.03.2016). **14.** Batygin Ju. V., Serikov G. S., Chaplygin E. A. Chislennaja obrabotka rezul'tatov izmereniya impul'snyh tokov pojansom Rogovskogo [Measuring results numeral treatment of impulsive currents by means of Rogovsky belt application]. Avtomobil'nyj transport. 2009. No. 25. P. 194-199. **15.** Kovnerev M., Troickij Ju. Ispol'zovanie katushki Rogovskogo dlja tokovyh izmerenij [The use of a Rogowski coil for measuring the current]. Jelektroonnye komponenty. 2005. No. 5. P. 123-127. **16.** Baranov P. F., Cimbalist Je. I., Borikov V. N., Bedareva E. V. Ustrojstvo dlja poverki shunta [The device for shunt testing]. Patent RF, no. 139577, 2014. **17.** Denisova N. Novaja jera v sisteme kalibrovki [A new era in calibration system]. Sovremennaja jelektronika. 2011. No. 5. P. 34-37. **18.** Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki [Fundamentals of electrical engineering]. Moscow, Vysshaja shkola, 1976. Vol. 1. 544 p. **19.** Zhekul V. G., Kuchernjuk V. A., Mel'her Ju. I., Poklonov S. G., Smirnov A. P., Shvec I. S. Jelektrozrazjadnaja obrabotka skvazhin na neftedobvyajushhijh mestorozhdenijah Ukrainy [Electrodischarge treatment of wells at oil fields of Ukraine]. Vestnik NTU "HPI". Serija: Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij. 2012. No. 21. P. 72-77. **20.** Shwets I. S., Grebennikov I. Yu., Gynko V. I., Dmitrishin A. Ja., Onishenko L. I. About Increase of the Specific Energy Characteristics and Lifetime of Higt - Voltage Pulse Capacitors. 13th International Simposium on Higt Current Electronics: Proceedings. Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2004. P. 130-133. **21.** Shwets I. S., Kurashko Y. I., Klimanskiy N. N., Hvoshan O. V., Onishenko L. I. Elektrohydroimpulse equipment for Increase of Oil and Intake Wells. 13th International Simposium on High Current Electronics: Proceedings. Tomsk, Publishing house of the IAO SBRAS, 2004. P. 409-411. **22.** Sofijskij K. K., Filimonov P. E., Bokij B. V., Shvec I. S., Cherednikov V. V., Smirnov A. P., Agaev R. A. Dinamicheskie sposoby dekol'matacii poverhnostnyh skvazhin [Dynamic methods of declmation of surface wells]. Doneck, Shidnij vidavnichij dim, 2014. 248.

Поступила (received) 19.02.2016

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Жекул Василий Григорьевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: v\_zhekul@mail.ru

**Zhekul Vasilii Grigoryevich** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: v\_zhekul@mail.ru

**Поклонов Сергей Георгиевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

**Poklonov Sergey Georgievich** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

**Смирнов Алексей Петрович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: aps-78@mail.ru

**Smirnov Oleksiy Petrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: aps-78@mail.ru

**Макаренко Владимир Сергеевич** – инженер 2 категории, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: vladimir.makarenko17@gmail.com

**Makarenko Volodymyr Sergijovich** – Engineer II cat., Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: vladimir.makarenko17@gmail.com

УДК 621.317.3

**В. В. КНЯЗЕВ, И. А. ПОСТЕЛЬНИК**

### РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ГРОЗОВОЙ ОПАСНОСТИ

Представлены результаты разработки локальной системы предупреждения о грозовой опасности, которая осуществляется по схеме «снизу-вверх». Такая схема имеет существенные преимущества по сравнению с аналогичными системами, которые функционируют в странах G20. Преимущество достигается за счет установки большого числа простых и дешевых локальных элементов, которые объединяются в многоуровневую сеть посредством передачи данных через сотовые сети и Интернет. Только такая концепция построения обеспечивает возможность создания системы оперативного предупреждения. Действительно, число пользователей, которые за свои средства устанавливают элементы локальной системы предупреждения о грозовой опасности, может достаточно быстро (в течении нескольких лет) превысить 1% от числа жителей в тех местах, где проблема молниезащиты актуальна. Описано устройство автономного индикатора грозовой опасности ИКС-1, функционирующего на эффекте коронного разряда со стержневых молниеприемников.

**Ключевые слова:** грозовая опасность, локальная система предупреждения, индикатор грозовой опасности.

**Введение.** Линейные молнии «облако-земля» явление достаточно частое. Однако, число ( $N_g$ ) таких разрядов молнии в год на квадратный километр весьма неравномерно распределено по районам Земли. Наибольшая молниевая активность  $N_g \approx 100$  [1] наблюдается в центральных районах Азии, Африки и Южной Америки. В большинстве из этих районов находятся страны третьего мира. В связи с этим, общее число человеческих жертв ежегодно растет. Например, на Украине при среднем числе  $N_g \approx 4$ , ежегодно от прямых ударов и косвенных воздействий молнии гибнут и получают травмы до 50 человек. Как правило, это происходит на открытых пространствах вблизи водоемов, игровых площадках и т.п.

В настоящее время в Украине отсутствует инфраструктура, обеспечивающая регистрацию параметров молний и позволяющая осуществить преду-

предление людей об атмосферных процессах, которые с высокой вероятностью могут привести к появлению молнии в конкретном районе.

В большинстве стран, относящихся к группе G20, существуют национальные сети регистрации молний, обеспечивающие прогноз динамики грозовой активности. Наиболее развита такая инфраструктура в США, где функционирует несколько независимых сетей. Основной сетью является National Lightning Detection Network (NLDN), которая имеет более 100 стационарных станций, расположенных по всей территории США, и ряд спутников на геостационарных орбитах, обеспечивающих визуальное наблюдение. Каждая станция оснащена разнообразными средствами измерения электромагнитных эффектов, сопровождающих молнию. Разработчики NLDN утверждают, что обеспечивается фиксация не менее 95 % всех раз-