

М.И. Баранов, С.Г. Буряковский, С.В. Рудаков

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В УКРАИНЕ ИСПЫТАНИЙ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ, АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСОВ ТОКА (НАПРЯЖЕНИЯ) ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ И КОММУТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

*Викладено сучасне положення метрологічного забезпечення в Україні натурних випробувань об'єктів промислової енергетики, авіаційної і ракетно-космічної техніки на стійкість до прямої дії на них потужних імпульсів струму (напруги) штучної блискавки та аперіодичних комутаційних імпульсів напруги. Показано, що подібні випробування технічних об'єктів на блискавкостійкість та комутаційну стійкість можуть проводитися відповідно до вимог нормативних документів США SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5416: 2013, міжнародного стандарту IEC 62305-1: 2010 і стандарту ГОСТ 1516.2-97 в польових умовах на унікальних вітчизняних високовольтних сильнострумних електроустановках, які оснащені сучасними вимірювальними засобами. Описані основні технічні характеристики розроблених і створених в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» для метрологічного забезпечення натурних випробувань вказаних технічних об'єктів на блискавкостійкість та комутаційну стійкість: вимірювальних коаксіальних сильнострумних шунтів типу ШК-300М1 і ШК-300М2, ємнісних і омичних високовольтних та надвисоковольтних подільників напруги типу ЄПН-100, ЄПН-1,2, ОПН-1,2 і ОПН-2,5. Приведені приклади практичного використання при натурних випробуваннях на блискавкостійкість та комутаційну стійкість відмічених технічних об'єктів вказаних нестандартізованих вимірювальних засобів власного виготовлення. Бібл. 23, табл. 4, рис. 16.*

*Ключові слова:* високовольтні генератори імпульсів струму (напруги) штучної блискавки і комутаційних імпульсів напруги, об'єкти енергетики, авіаційної і ракетно-космічної техніки, вимірювальні засоби для натурних випробувань технічних об'єктів на стійкість до дії імпульсів струму (напруги) штучної блискавки та комутаційних імпульсів напруги.

*Изложено современное состояние метрологического обеспечения в Украине натурных испытаний объектов промышленной энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к прямому воздействию на них мощных импульсов тока (напряжения) искусственной молнии и аперiodических коммутационных импульсов напряжения. Показано, что подобные испытания технических объектов на молниестойкость и коммутационную стойкость могут проводиться в соответствии с требованиями нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5416: 2013, международного стандарта IEC 62305-1: 2010 и стандарта ГОСТ 1516.2-97 в полевых условиях на уникальных отечественных высоковольтных электроустановках, оснащенных современными измерительными средствами. Описаны основные технические характеристики разработанных и созданных в НИПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» для метрологического обеспечения натурных испытаний указанных технических объектов на молниестойкость и коммутационную стойкость: измерительных коаксиальных сильнотоочных шунтов типа ШК-300М1 и ШК-300М2, емкостных и омических высоковольтных и сверхвысоковольтных делителей напряжения типа ЕДН-100, ЕДН-1,2, ОДН-1,2 и ОДН-2,5. Приведены примеры практического использования при натурных испытаниях на молниестойкость и коммутационную стойкость отмеченных технических объектов указанных нестандартизованных измерительных средств собственного изготовления. Библ. 23, табл. 4, рис. 16.*

*Ключевые слова:* высоковольтные генераторы импульсов тока (напряжения) искусственной молнии и коммутационных импульсов напряжения, объекты энергетики, авиационной и ракетно-космической техники, измерительные средства для натурных испытаний технических объектов на стойкость к действию импульсов тока (напряжения) искусственной молнии и коммутационных импульсов напряжения.

**Введение.** В соответствии с требованиями действующих на сегодня нормативных документов США SAE ARP 5412:2013 [1], SAE ARP 5416:2013 [2] и международного стандарта IEC 62305-1:2010 [3] при натурных испытаниях объектов авиационной, ракетно-космической техники и энергетики на молниестойкость на последние от мощных высоковольтных генераторов тока молнии (ГТМ) подаются импульсы тока искусственной молнии с различными амплитудно-временными параметрами (АВП). При этом амплитуды  $I_{mL}$  протекающих через испытываемые объекты импульсов тока молнии могут изменяться от десятков ампер до сотен тысяч ампер, а их длительности  $\tau_p$  – от сотен микросекунд до одной тысячи миллисекунд [1-3]. В документах [1-3] более подробно указаны численные значения нормированных АВП применяемых при испытаниях на молниестойкость рассматриваемых технических объектов импульсов тока искусственной молнии. В [4] авторами были описаны технические характеристики уникальных

отечественных мощных высоковольтных ГТМ, реализующих на практике требования документов [1-3]. Действующий стандарт ГОСТ 1516.2-97 [5] определяет нормированные АВП импульсов напряжения грозового происхождения и коммутационных аперіодических импульсов напряжения, используемых при испытаниях электрической прочности наружной (внутренней) изоляции объектов промышленной энергетики с емкостной характеристикой (например, выключателей, разъединителей, вводов, изоляторов, трансформаторов тока, конденсаторов и др.). В этом случае грозовой аперіодический импульс напряжения, формируемый на испытываемой нагрузке генератором импульсных напряжений (ГИН), построенным по классической схеме Аркадьева-Маркса, характеризуется временной формой  $\tau_f/\tau_p=1,2$  мкс/50 мкс (при допусках по: фронту  $\tau_f \pm 30\%$ ; амплитуде напряжения  $U_{mL} \pm 3\%$ ; длительности импульса  $\tau_p$  на уровне  $0,5U_{mL} \pm 20\%$ ), нормированное максимальное значение кото-

© М.И. Баранов, С.Г. Буряковский, С.В. Рудаков

рого  $U_{mL}$  обычно не превышает 1 МВ [5]. Укажем, что амплитуда  $U_{mk}$  коммутационных аperiodических импульсов напряжения, воспроизводимых на электрической нагрузке генератором коммутационных импульсов напряжения (ГКИН), достигает уровня в несколько мегавольт. Время нарастания (подъема)  $T_{\Pi}$  таких импульсов напряжения до уровня  $U_{mk}$  составляет несколько сотен микросекунд, а их длительность  $T_P$  на уровне  $0,5U_{mk}$  – до нескольких тысяч микросекунд [5]. Для оперативной регистрации АВП указанных импульсов тока и напряжения требуются соответствующие измерительные средства. Необходимо отметить, что отечественная промышленность подобных измерительных средств не производит. В этой связи разработчикам и создателям ГТМ, ГИН и ГКИН, а также обслуживающему их оперативному инженерно-техническому персоналу требуется самостоятельно решать вопросы метрологического обеспечения выполняемых с помощью указанных высоковольтных генераторов импульсов тока и напряжения договорных работ и прикладных научных исследований в рассматриваемой актуальной во всем мире научно-технической области техники и электрофизики больших токов и высоких (сверхвысоких) напряжений.

**Целью статьи** является изложение и анализ современного состояния метрологического обеспечения в Украине испытаний оборудования объектов промышленной энергетики на молниестойкость и коммутационную стойкость, а также объектов авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость.

**1. Метрологическое обеспечение испытаний технических объектов на молниестойкость.** Вначале остановимся на вопросах метрологического обеспечения испытаний объектов авиационной и ракетно-космической техники и энергетики на стойкость к воздействию на них импульсов тока искусственной молнии. Для объектов авиационной и ракетно-космической техники подобные испытания регламентируются требованиями нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 [1] и SAE ARP 5416: 2013 [2]. Согласно [1, 2] через испытываемые объекты указанной техники могут протекать следующие составляющие тока искусственной молнии, генерируемые в высоковольтных сильноточных цепях ГТМ: импульсная  $A$ - (или повторная импульсная  $D$ -), промежуточная  $B$ - и длительная  $C$ - (или укороченная длительная  $C^*$ -) компоненты тока искусственной молнии. Основные АВП данных компонент импульсного тока искусственной молнии приведены в табл. 1. Наиболее часто применяются следующие комбинации указанных компонент тока молнии [1, 2, 6]:  $A$ - ,  $B$ - и  $C$ - компоненты;  $A$ - ,  $B$ - и  $C^*$ - компоненты;  $D$ - ,  $B$ - и  $C^*$ - компоненты.

Для объектов промышленной энергетики рассматриваемые высоковольтные сильноточные испытания на молниестойкость регламентируются требованиями международного стандарта IEC 62305-1:2010 [3] и разработанного в РФ на его основе национального стандарта ГОСТ Р МЭК 62305-1:2010 [7]. При этом от мощного ГТМ на испытываемый объект подается аperiodический импульс тока искусственной молнии временной формы  $\tau_f/\tau_p=10$  мкс/350 мкс обеих полярностей, характерный для прямого короткого грозового удара в защищаемые рядом инженерных служб

энергоснабжающих компаний наземные объекты. В табл. 2 приведены основные АВП этого мощного испытательного импульса тока искусственной молнии.

Таблица 1  
Нормированные АВП основных компонент импульсного тока искусственной молнии [1, 2, 4]

Компонента тока молнии	$I_{mL}$ , кА	$I_c$ , кА	$q_L$ , Кл	$J_L$ , $10^6$ Дж/Ом	$\tau_f$ , мкс	$\tau_p$ , мс
$A$	200±20	–	–	2±0,4	≤50	≤0,5
$B$	–	2±0,4	10±1	–	–	5±0,5
$C$	0,2-0,8	–	200±40	–	–	$(0,25\pm 1) \cdot 10^3$
$C^*$	–	0,4	6-18	–	–	15-45
$D$	100±10	–	–	0,25±0,05	≤25	≤0,5

*Примечание.*  $I_{mL}$  – амплитуда импульса тока;  $I_c$  – среднее значение тока;  $q_L$  – количество протекшего через испытываемый объект электрического заряда;  $J_L$  – интеграл действия импульса тока;  $\tau_f$ ,  $\tau_p$  – соответственно длительность фронта импульса между уровнями  $(0,1-0,9)I_{mL}$  и импульса тока на уровне  $\leq 0,1I_{mL}$ .

Таблица 2  
Нормированные АВП аperiodического импульса тока молнии временной формы 10 мкс/350 мкс [3, 4]

Наименование параметра импульса тока молнии	Уровень молниезащиты объекта по стандарту IEC 62305-1: 2010		
	I	II	III-IV
Длительность фронта $\tau_f$ , мкс	10±2	10±2	10±2
Длительность импульса на полуспаде $\tau_p$ (на уровне $0,5I_{mL}$ ), мкс	350±35	350±35	350±35
Амплитуда тока $I_{mL}$ , кА	200±20	150±15	100±10
Интеграл действия $J_L$ , $10^6$ Дж/Ом	10±3,5	5,6±1,96	2,5±0,875
Заряд $q_L$ , Кл	100±20	75±15	50±10

Что касается проведения испытаний электрической прочности наружной и внутренней изоляции объектов электроэнергетики к воздействию грозовых разрядов, то они согласно [5] выполняются с использованием указанного выше грозового импульса напряжения временной формы 1,2 мкс/50 мкс. При этом для его измерения нами могут применяться как измерительные стандартные шары диаметром от 125 мм до 1,5 м [8], так и высоковольтные емкостные (ЕДН) и омические (ОДН) делители напряжения на импульсные напряжения уровнем  $\pm(0,1-2,5)$  МВ, имеющие в составе высоковольтные и низковольтные плечи [5, 9].

**1.1. Измерительные коаксиальные дисковые шунты типа ШК-300М1 и ШК-300М2.** Для регистрации импульсов тока искусственной молнии с АВП согласно данных табл. 1 и 2, генерируемых на испытываемых объектах мощными ГТМ [4], удовлетворяющими требованиям [1-3], в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в 2016 г. были разработаны и созданы специальные измерительные высоковольтные сильноточные дисковые шунты типа ШК-300М1 [10] (рис. 1) и ШК-300М2 [11] (рис. 2) коаксиальной конструкции. Подобные конструкции шунтов характеризуются малыми значениями их индуктивности (не более 10 нГн) и активного сопротивления (не более 0,2 мОм), что обеспечивает незначительное влияние собственных электрических параметров измерительного шунта на протекающие в нагрузке электромагнитные процессы. Существенным отличием конструкций данных сильноточных шунтов от известных (например, описанного в [6])

является применение в них вместо тонкостенного (толщиной не более 0,3 мм) высокоомного манганинового диска, с которого снимается падение импульсного напряжения от прохождения по нему измеряемого импульса тока, диска толщиной от 1 до 2 мм из нержавеющей стали марки 12X18H10T [10, 11].



Рис. 1. Внешний вид усовершенствованного коаксиального дискового шунта типа ШК-300M1, предназначенного для измерения в микро- и миллисекундном диапазонах затухающих синусоидальных и аperiodических импульсов тока искусственной молнии амплитудой до  $\pm 220$  кА в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ГТМ с интегралом их действия до  $3 \cdot 10^6$  Дж/Ом [10]

Такое техническое усовершенствование конструкции измерительного высокоомного диска в составе высоковольтного сильноточного шунта (см. рис. 1 и 2) позволило существенно повысить его электротермическую стойкость к протекающим по нему большим импульсным токам (БИТ) и избежать в нем развитие опасного для механической стойкости шунта явления электрического взрыва (ЭВ) его металла.



Рис. 2. Внешний вид усовершенствованного коаксиального дискового шунта типа ШК-300M2, предназначенного для измерения в согласованном режиме работы его кабельной линии передачи сигнала в микро- и миллисекундном диапазонах импульсов тока искусственной молнии амплитудой до  $\pm 220$  кА в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГТМ с интегралом их действия до  $15 \cdot 10^6$  Дж/Ом [11]

Как известно [12, 13], ЭВ металлического измерительного диска шунта при регистрации БИТ сопровождается резким повышением газодинамического давления внутри шунта (до сотен атмосфер [14]), обычно приводящим к его разрушению и выходу из строя. На рис. 3 приведен схематический вид конструкции шунта типа ШК-300M2 в продольном разрезе.

Для одновременного измерения нескольких компонент полного тока искусственной молнии, генери-

руемого в высоковольтной сильноточной разрядной цепи ГТМ, потребовалась разработка и создание специального измерительного согласующего делителя напряжения (СДН), включаемого на выходе дополнительно экранированной коаксиальной линии связи (рис. 4). В приведенном на рис. 4 делителе типа СДН-300 имеется два коаксиальных разъема 1:1 и 1:2, предназначенных для согласованного подсоединения их выходов ко входам измерительных каналов цифровых запоминающих осциллографов (ЦЗО) [6, 10].

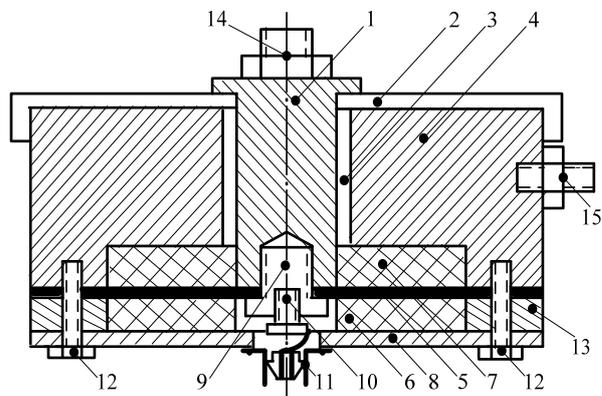


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции коаксиального дискового шунта типа ШК-300M2 в его продольном осевом разрезе (1 – массивный внутренний цилиндрический латунный электрод; 2, 3 – изоляционные втулки из фторопласта; 4 – массивный наружный цилиндрический латунный электрод; 5 – измерительный высокоомный стальной диск; 6, 7 – массивные прижимные изоляционные диски; 8 – бандажный латунный диск; 9, 10, 12 – стальные винты крепления; 11 – выходной коаксиальный разъем типа СР-75; 13 – массивное прижимное латунное кольцо; 14, 15 – соответственно входные (потенциальные) и выходные (заземленные) элементы латунного болтового подсоединения шунта к высоковольтной сильноточной разрядной цепи ГТМ) [11]



Рис. 4. Внешний вид измерительного шунта типа ШК-300M1, подсоединенного ко входу дополнительно экранированного коаксиального радиочастотного кабеля марки РК 75-7-11 длиной 70 м, выход которого подключен к экранированному согласующему делителю напряжения типа СДН-300 с двумя выходными коаксиальными разъемами 1:1 и 1:2 для согласованного подсоединения к ним измерительных каналов трех ЦЗО (например, серии Tektronix TDS 1012) при одновременной регистрации в сильноточной разрядной цепи ГТМ сразу трех компонент полного импульса тока искусственной молнии с различными АВП [6, 10]

На рис. 5 представлен общий вид размещения трех ЦЗО типа Tektronix TDS 1012 в заглубленном экранированном измерительном бункере при натур-

ных испытаниях объектов авиационной техники на прямое воздействие в них согласно [1, 2] тока молнии.



Рис. 5. Внешний вид размещения трех параллельно регистрирующих с одного измерительного шунта типа ШК-300М1 полезные электрические сигналы цифровых запоминающих осциллографов серии Tektronix TDS 1012 в заглубленном экранированном измерительном бункере, предназначенном для метрологического обеспечения натурных испытаний различных технических объектов на молниестойкость [9]

Отметим, что используемые нами ЦЗО при испытаниях технических объектов на молниестойкость имеют соответствующие сертификаты метрологической проверки и калибровки ГП «Харьковстандартметрология» (например, №08/2128К от 16.05.2017 г.).

В табл. 3 приведены основные технические характеристики описанных шунтов типа ШК-300М1 и ШК-300М2, прошедших государственную метрологическую аттестацию в ГП «Харьковстандартметрология» (акт проверки №06/184 от 27.06.2017 г. и сертификат соответствия №06/0206 от 19.07.2017 г.) [11].

Таблица 3

Основные технические характеристики высоковольтных сильноточных шунтов ШК-300М1 и ШК-300М2

Наименование шунта	Значение характеристики		
	$R_S$ , мОм	$K_S$ , А/В	Масса, кг
ШК-300М1	0,158±1 %	$K_{SA}=12625$	3,1
		$K_{SC}=6312$	
ШК-300М2	0,080±1 %	$K_{SA}=25000$	3,2
		$K_{SC}=12500$	

Примечание.  $R_S$  – активное сопротивление диска шунта, мОм;  $K_S=2/R_S$  – коэффициент преобразования шунта, А/В;  $K_{SA}$  – коэффициент преобразования шунта при измерении в разрядной цепи ГТМ АВП А- и D- компонент тока молнии и грозового импульса формы 10 мкс/350 мкс, А/В (с коаксиального разъема 1:1 делителя СДН-300);  $K_{SC}$  – коэффициент преобразования шунта при измерении в разрядной цепи ГТМ АВП В-, С- и С\*- компонент тока искусственной молнии, А/В (с коаксиального разъема 1:2 делителя СДН-300).

Используя данные табл. 3 и показания (в долях или единицах вольт) регистрируемого на экране ЦЗО с измерительного шунта падения импульсного напряжения  $U_S$ , искомое значение силы  $I_{mL}$  измеряемого импульса тока молнии определяем в виде:  $I_{mL}=K_S U_S$ .

**1.2. Емкостные и омические делители напряжения типа ЕДН-100, ЕДН-1,2, ОДН-1,2 и ОДН-2,5.** В 2011 г. при изучении поведения образцов высоковольтной изоляции (в частности, из древесины) испы-

тательных электроустановок отдела №4 института в условиях воздействия на них больших импульсных токов и высоких напряжений нам оказался необходимым малогабаритный передвижной емкостный делитель импульсного напряжения амплитудой до ±100 кВ (ЕДН-100), функционирующий в микросекундном временном диапазоне. На рис. 6 приведена схема подключения ЕДН-100 к измерительной цепи установки.

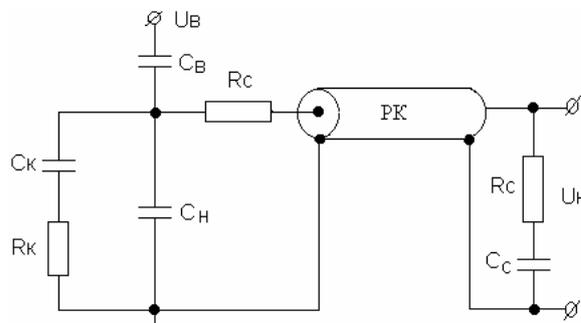


Рис. 6. Схема подсоединения ЕДН-100 ко входу ЦЗО [15]

Схема измерения на рис. 6 высокого напряжения  $U_B$ , подаваемого на высоковольтное плечо делителя емкостью  $C_B$ , последовательно соединенное с низковольтным плечом делителя емкостью  $C_H \gg C_B$ , базируется на согласованном режиме работы измерительной цепи ЕДН-100. Для реализации этого режима используется включение в цепь жилы коаксиального радиочастотного кабеля (ПК) с волновым сопротивлением  $Z_B$  линии передачи полезного электрического сигнала с низковольтного плеча делителя согласующего активного сопротивления  $R_C=Z_B$  и подключение на низковольтной стороне схемы с напряжением  $U_H$  согласующей  $R_C C_C$  – цепочки (см. рис. 6). Укажем, что включение сопротивления  $R_C$  согласно схемы на рис. 6 уменьшает вдвое полезный сигнал с уровнем напряжения  $U_H$ , подаваемый на измерительный канал ЦЗО. Для улучшения передаточных характеристик рассматриваемого делителя его низковольтное плечо содержит корректирующую  $R_k C_k$  – цепочку. В соответствии со схемой рис. 6 были использованы следующие численные значения основных электрических параметров делителя ЕДН-100 (рис. 7):  $C_B=0,47$  нФ;  $C_H=C_C=0,54$  мкФ;  $R_C=Z_B=75$  Ом;  $R_k=27$  Ом;  $C_k=2,8$  нФ.

Укажем, что при создании высоковольтного плеча делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 были применены высоковольтные керамические конденсаторы типа К-15-10 (емкостью 4700 пФ на номинальное напряжение ±50 кВ). В этой связи емкость  $C_B$  состояла из 10 шт. последовательно соединенных конденсаторов указанного типа, размещенных на воздухе в изоляционной трубе из СТЭФ (длиной 915 мм и внутренним диаметром 151 мм с толщиной стенки 12 мм). Низковольтное плечо рассматриваемого делителя емкостью  $C_H=0,54$  мкФ было реализовано на основе двух параллельно соединенных конденсаторов типа К-73-11 емкостью 0,27 мкФ на напряжение 250 В [15]. Согласующее активное сопротивление  $R_C$  было собрано из двух параллельно включенных резисторов типа МЛТ-2 номиналом 150 Ом. Электрическая часть низковольтного плеча описываемого делителя размещалась в прямоугольном алюминиевом корпусе с ко-

аксиальным разъемом типа СР-75, жестко закрепленном на изоляционном основании делителя и подсоединенном к заземляющей шине испытательной установки. Расчетное значение коэффициента деления для ЕДН-100 в схеме согласно рис. 6 численно составляло  $K_{D1}=2C_H/C_B=2298$ . Выполненные высоковольтные эксперименты показали, что опытное значение коэффициента деления ЕДН-100 равняется  $K_{D2}\approx 2515$  [15].

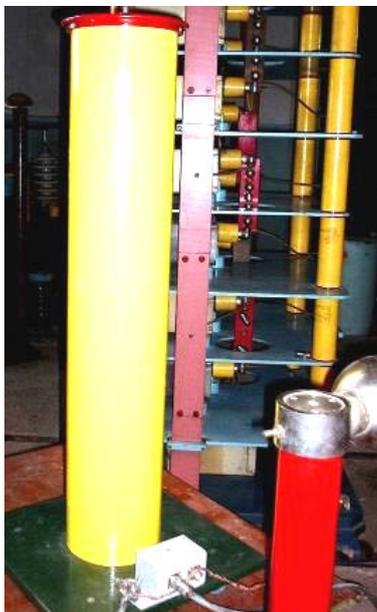


Рис. 7. Общий вид передвижного высоковольтного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 на номинальное напряжение  $\pm 100$  кВ, размещенного на испытательном поле сверхвысоковольтного генератора импульсных напряжений типа ГИН-1,2 этажерочной конструкции собственной разработки (генератор ГИН-1,2 размещен за делителем ЕДН-100; справа от делителя ЕДН-100 расположены передвижные стандартные измерительные шары диаметром 125 мм) [15]

На рис. 8 приведена электрическая схема с применением сверхвысоковольтного емкостного делителя напряжения типа ЕДН-1,2, предназначенная для формирования на длинном воздушном промежутке между электродами  $\mathcal{E}_1$  (диском) и  $\mathcal{E}_2$  (стержнем) нестандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения временной формы 250 мкс/5000 мкс амплитудой до  $\pm 1$  МВ [16]. В этой схеме делитель ЕДН-1,2 на номинальное напряжение  $\pm 1,2$  МВ выполняет не только роль измерительного средства, но и роль сверхвысоковольтной формирующей емкости.

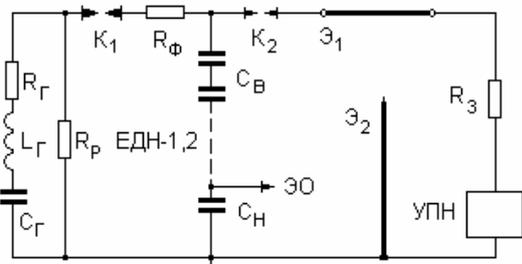


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема формирования в разрядной цепи генератора типа ГИН-1,2 на длинном воздушном промежутке коммутационного аperiodического импульса напряжения временной формы 250 мкс/5000 мкс амплитудой до  $\pm 1$  МВ, базирующаяся на использовании в ней емкостного делителя напряжения типа ЕДН-1,2 [16]

В схеме согласно рис. 8 на потенциальный электрод  $\mathcal{E}_1$  воздушного промежутка от установки постоянного напряжения (УПН) через защитное сопротивление  $R_3$  величиной 1,4 ГОм (14 резисторов типа КЭВ-5-100 МОм общей длиной 2,05 м) может подаваться постоянное напряжение уровнем до  $\pm 50$  кВ. Генератор импульсных напряжений типа ГИН-1,2 имел следующие собственные электрические параметры [16]:  $R_T=48$  Ом;  $L_T=6$  мкГн;  $C_T=20,8$  нФ; разрядное сопротивление  $R_P=340$  кОм. Фронтное активное сопротивление  $R_\Phi$ , включенное в схему на рис. 8 между отсекающим  $K_1$  и разделительным  $K_2$  коммутаторами, составляло 360 кОм. Емкость  $C_B$  высоковольтного плеча делителя ЕДН-1,2 была выбрана равной 130 пФ, а емкость  $C_H$  его низковольтного плеча, подключаемого к ЭО или ЦЗО, – 2,6 мкФ. При этом расчетный коэффициент деления для ЕДН-1,2 имел численное значение, равное  $K_{DC}=C_H/C_B=20\cdot 10^3$  [16].

На рис. 9 приведен общий вид высоковольтного испытательного стенда, использующего в основе своего построения электрическую схему согласно рис. 8 с емкостным делителем напряжения типа ЕДН-1,2.



Рис. 9. Общий вид высоковольтного испытательного стенда НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», предназначенного для испытания средств молниезащиты технических объектов коммутационным аperiodическим импульсом напряжения амплитудой до  $\pm 1$  МВ временной формы 250 мкс/5000 мкс и содержащего в схеме передвижной сверхвысоковольтный емкостный делитель напряжения типа ЕДН-1,2 [16]

На рис. 10 показан общий вид разработанного и созданного в отделе №4 института сверхвысоковольтного омического делителя напряжения ОДН-1,2.

Изоляционная несущая конструкция (ИНК) делителя ОДН-1,2 собрана из пяти жестко закрепленных между собой в одну стойку полых стеклопластиковых секций, внутри которых на гетинаксовых пластинах были размещены высоковольтные керамические резисторы типа ТВО-5-250 Ом [17]. Каждая секция делителя содержит 40 шт. последовательно и зигзагообразно соединенных с обеих сторон гетинаксовой пластины указанных резисторов с общим активным сопротивлением 10 кОм. В случае использования в делителе четырех указанных секций может быть реализована конструкция омического делителя типа ОДН-1 на номинальное напряжение  $\pm 1$  МВ (рис. 11) [17].



Рис. 10. Общий вид передвижного сверхвысоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-1,2 на номинальное напряжение  $\pm 1,2$  МВ, размещенного на заводском испытательном поле высоковольтного испытательного стенда СВИ-1,2, предназначенного для определения в лабораторных условиях импульсной электрической прочности полимерной изоляции собственного производства (предприятие ES «Полимер», г. Бахмут, Украина, 2006 г.) [9, 17]



Рис. 11. Общий вид высоковольтного испытательного стенда НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», на испытательном поле которого размещены передвижные генератор импульсных напряжений типа ГИН-1,2, делитель типа ОДН-1 и стандартные измерительные шары диаметром 250 мм [17]

Для делителя типа ОДН-1,2 высоковольтное плечо характеризуется активным сопротивлением  $R_B=50$  кОм. Его низковольтное плечо выполнено из двух парал-

лельно соединенных резисторов типа МЛТ-2 с общим активным сопротивлением  $R_H=2,5$  Ом. В этой связи расчетный коэффициент деления для делителя ОДН-1,2 составляет  $K_{DR}=R_B/R_H=20 \cdot 10^3$ . При практическом использовании в измерительном тракте, подключаемом к низковольтному плечу делителя типа ОДН-1,2, схемы согласования, которая аналогична изображенной на рис. 6, коэффициент его деления  $K_{DR}$  удваивается и численно составляет примерно  $40 \cdot 10^3$ . Экспериментальная проверка величины  $K_{DR}$  с использованием согласно требований [8] стандартных измерительных шаров диаметром 250 мм (см. рис. 11) показала, что она принимает численное значение, равное примерно  $39,8 \cdot 10^3$ . Из рис. 10 и 11 видно, что сверху ИНК делителей типа ОДН-1,2 и ОДН-1 установлены противокоронные металлические экраны, улучшающие одновременно и распределение сильного электрического поля вдоль их верхних секций [17].

Применение в разрядной цепи приведенного на рис. 8 и 11 генератора импульсных напряжений типа ГИН-1,2 на номинальное напряжение  $\pm 1,2$  МВ с собственным разрядным сопротивлением  $R_P=240$  кОм и дополнительным формирующим сопротивлением  $R_\Phi=1,98$  кОм (рис. 12) омического делителя напряжения типа ОДН-1,2 (или ОДН-1) позволяет на испытываемой твердой, жидкой или газовой изоляции объекта электроэнергетики формировать согласно требований [5] стандартную грозовую аperiodическую волну напряжения временной формы 1,2 мкс/50 мкс с указанными ранее допусками и требуемыми значениями ее амплитуды  $U_{ml} \leq \pm 1$  МВ [16, 18]. При этом в расчетной схеме формирования стандартного грозового импульса формы 1,2 мкс/50 мкс следует учитывать емкостной характер нагрузки ( $C_H \approx 10$  пФ) и паразитную емкость делителя ОДН-1,2, равную примерно 50 пФ.

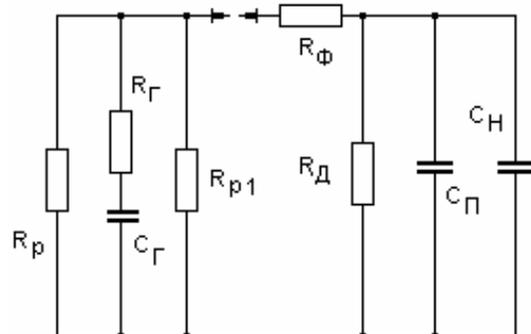


Рис. 12. Электрическая схема для получения в разрядной цепи генератора ГИН-1,2 на испытываемой нагрузке с емкостной характеристикой стандартного грозового импульса напряжения временной формы 1,2 мкс/50 мкс с применением омического делителя напряжения типа ОДН-1,2 с активным сопротивлением  $R_D=50$  кОм ( $R_P=240$  кОм – собственное разрядное сопротивление ГИН-1,2;  $R_{P1}=3,91$  кОм – дополнительное разрядное сопротивление ГИН-1,2;  $R_\Gamma=48$  Ом;  $C_\Gamma=20,8$  нФ;  $R_\Phi=1,98$  кОм;  $C_H \approx 10$  пФ;  $C_H \approx 50$  пФ) [9, 18]

Применение в разрядной цепи генератора импульсных напряжений типа ГИН-1,2 на номинальное напряжение  $\pm 1,2$  МВ емкостного делителя напряжения типа ОДН-1,2 (рис. 13) позволяет на испытываемой электрической нагрузке с указанной емкостной характеристикой ( $C_H \approx 10$  пФ) формировать стандартный

коммутационный импульс напряжения временной формы 250 мкс/2500 мкс амплитудой  $U_{mk} \leq \pm 700$  кВ с нормированными допусками (для длительности подъема –  $\pm 20$  %; для длительности полуспада –  $\pm 30$  %; для амплитуды  $U_{mk}$  –  $\pm 3$  %) [5, 18]. Необходимо указать, что передвижной емкостный делитель напряжения типа ЕДН-1,2 содержит три последовательно включенные С- секции, каждая из которых помещена в стеклопластиковую трубу марки ТСЭФ длиной 900 мм и наружным диаметром 300 мм с толщиной стенки 35 мм. Каждая его С- секция состоит из 12 последовательно соединенных высоковольтных керамических конденсаторов типа К 15-10-4700 пФ на  $\pm 50$  кВ. Причем, каждая из указанных секций делителя залита трансформаторным маслом марки Т-1500, а ее верхний и нижний выходы подключены к круглым металлическим фланцам диаметром 350 мм [16, 18].

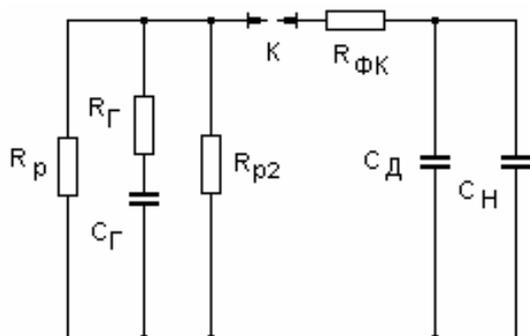


Рис. 13. Электрическая схема для получения в разрядной цепи генератора ГИН-1,2 на испытываемой нагрузке с емкостной характеристикой стандартного коммутационного импульса напряжения временной формы 250 мкс/2500 мкс с применением емкостного делителя напряжения типа ЕДН-1,2 с общей емкостью  $C_Д=130$  пФ ( $R_Г=240$  кОм – собственное разрядное сопротивление ГИН-1,2;  $R_{p2}=840$  кОм – дополнительное разрядное сопротивление ГИН-1,2;  $R_Г=48$  Ом;  $C_Г=20,8$  нФ;  $R_{ФК}=395$  кОм;  $C_Н \approx 10$  пФ;  $K$  – отсекающий высоковольтный коммутатор генератора ГИН-1,2) [9, 18]

Для измерения с погрешностью не более 5 % на объектах промышленной электроэнергетики аperiodических грозовых и коммутационных импульсов напряжения амплитудой до  $\pm 2,5$  МВ в отделе №4 института был создан сверхвысоковольтный омический делитель напряжения типа ОДН-2,5 [19, 20]. Основные технические характеристики данного делителя импульсного напряжения приведены ниже в табл. 4 [20].

Таблица 4  
Основные технические характеристики сверхвысоковольтного омического делителя напряжения ОДН-2,5

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Максимальный уровень измеряемого напряжения $U_m$ , кВ	$\pm 2500$
2	Активное сопротивление высоковольтного плеча делителя $R_B$ , кОм	107,3
3	Активное сопротивление низковольтного плеча делителя $R_H$ , Ом	4
4	Коэффициент деления, $K_{DR}$	$26,82 \cdot 10^3$
5	Высота (длина), м	12,6
6	Масса, кг	350

Общий вид сверхвысоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-2,5, функционирую-

щего в составе уникального генератора коммутационных импульсов напряжения (ГКИН) на  $\pm 2,5$  МВ, показан на рис. 14. Высоковольтное плечо делителя типа ОДН-2,5 выполнено из девяти последовательно соединенных R- секций, размещенных на и вне стеклопластиковой трубы марки ТСЭФ наружным диаметром 120 мм с толщиной стенки 10 мм. Каждая R- секция содержит 20 шт. последовательно-параллельно соединенных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-10-2,4 кОм, собранных на двух стеклопластиковых пластинах длиной 1400 мм и толщиной 5 мм. В результате сопротивление каждой секции высоковольтного плеча делителя составляет около 12 кОм, а его полное сопротивление –  $R_B \approx 107,3$  кОм [20].

Низковольтное плечо делителя типа ОДН-2,5 выполнено из малогабаритных керамических резисторов типа ТВО-2-2 Ом с общим активным сопротивлением  $R_H=4$  Ом. В этой связи расчетный коэффициент деления  $K_{DR}$  для рассматриваемого делителя напряжения типа ОДН-2,5 будет примерно равным  $K_{DR}=R_B/R_H=26,82 \cdot 10^3$ . При согласованном режиме измерения импульсного напряжения на нагрузке коэффициент деления для делителя типа ОДН-2,5 будет удваиваться и принимать численное значение около  $53,65 \cdot 10^3$ . Экспериментальная оценка времени реакции  $T_R$  омического делителя типа ОДН-2,5 на воздействие прямоугольного импульса напряжения [21] показала, что для этого типа делителя  $T_R \approx 170$  нс [19]. В этой связи делитель напряжения типа ОДН-2,5 можно использовать для измерения импульсов напряжения амплитудой  $U_m \leq \pm 2,5$  МВ, изменяющихся в микро- и миллисекундном временных диапазонах. Сравнение метрологических характеристик сверхвысоковольтного омического делителя типа ОДН-2,5 с характеристиками известных измерителей высокого и сверхвысокого напряжения [22] указывает на то, что отечественный делитель напряжения типа ОДН-2,5 соответствует современным требованиям и разработкам в области высоковольтной измерительной техники.



Рис. 14. Общий вид сверхвысоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-2,5 на номинальное напряжение  $\pm 2,5$  МВ, подсоединенного в разрядной цепи ГКИН к двухэлектродной системе «игла-плоскость» с длиной воздушного промежутка 3 м (верхний стальной стержень-электрод этой электроразрядной системы размещен по центру ее нижнего плоского электрода, выполненного из тонкой оцинкованной стали с размером в плане 5 м  $\times$  5 м) [23]

На рис. 15 приведена осциллограмма импульса сверхвысокого напряжения микросекундной длительности, полученная с помощью омического делителя напряжения типа ОДН-2,5 на длинном воздушном промежутке величиной 3 м при его электрическом пробое в системе «стержень-стержень» [20]. Из осциллограммы рис. 15 видно, что напряжение среза  $U_C$  в нашем случае равняется примерно  $U_C \approx 25 \text{ В} \times 53,65 \cdot 10^3 \approx 1341,3 \text{ кВ}$ . При этом предразрядное время  $T_C$  для указанного изоляционного воздушного промежутка составляет около  $T_C \approx 5 \times 2,5 \cdot 10^{-6} \approx 12,5 \text{ мкс}$ , а длительность среза  $T_{DC}$  микросекундной волны напряжения численно не превышает значения 5,47 мкс.

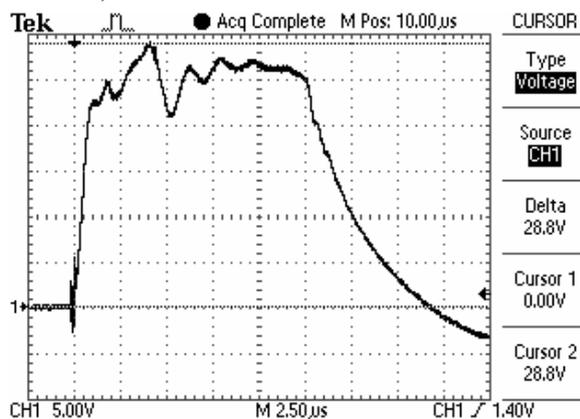


Рис. 15. Осциллограмма импульса сверхвысокого напряжения положительной полярности на воздушном промежутке длиной 3 м в системе «стержень-стержень», срезанного на его нарастающей части и зарегистрированного с помощью омического делителя напряжения ОДН-2,5 (напряжение среза  $U_C \approx 1341,3 \text{ кВ}$ ; предразрядное время  $T_C \approx 12,5 \text{ мкс}$ ; длительность среза  $T_{DC} \approx 5,47 \text{ мкс}$ ; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 2,5 мкс/клетка) [20]

**2. Метрологическое обеспечение испытаний технических объектов на коммутационную стойкость.** Для проведения натурных испытаний объектов силовой энергетики на коммутационную стойкость в 2012 г. в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» на экспериментальном полигоне института (п. Андреевка, Харьковской обл.) был создан уникальный ГКИН на номинальное напряжение до  $\pm 2 \text{ МВ}$  [23]. Данный ГКИН, размещенный на открытом воздухе, позволяет в полевых условиях на крупногабаритной испытываемой электрической нагрузке надежно формировать в соответствии с требованиями [5] стандартный аperiodический коммутационный импульс напряжения временной формы 205 мкс/1900 мкс обеих полярностей.

Для измерения АВП формируемых в схеме генератора ГКИН импульсов напряжения может быть использован описанный выше сверхвысоковольтный омический делитель напряжения типа ОДН-2,5 [20]. Данные рис. 14 как раз наглядно иллюстрируют практическое использование сверхвысоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-2,5 при метрологическом обеспечении испытаний электрической прочности длинных воздушных промежутков электроэнергетических устройств на коммутационную стойкость. На рис. 16 изображена осциллограмма полного стандартного коммутационного импульса напряжения временной формы 205 мкс/1900 мкс положительной полярности, полученного в разрядной цепи генератора ГКИН в полевых условиях на откры-

том воздухе с использованием омического делителя напряжения типа ОДН-2,5 [23]. Из осциллограммы рис. 16 следует, что амплитуда  $U_{mk}$  коммутационной волны напряжения в этом случае составляет примерно  $U_{mk} \approx 9 \text{ В} \times 53,65 \cdot 10^3 \approx 483 \text{ кВ}$ . Для формируемого на длинном воздушном промежутке коммутационного импульса напряжения время подъема  $T_{II}$  достигает численного значения около  $T_{II} \approx 205 \text{ мкс}$ . При этом длительность  $T_P$  коммутационного импульса напряжения на уровне  $0,5 U_{mk}$  равняется примерно 1900 мкс.

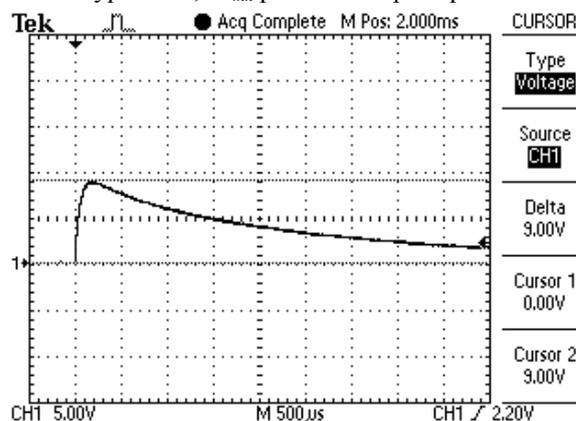


Рис. 16. Осциллограмма полного стандартного аperiodического коммутационного импульса напряжения положительной полярности, сформированного в разрядной цепи сверхвысоковольтного генератора ГКИН на двухэлектродной системе «игла-плоскость» с длиной воздушного промежутка 3 м и зарегистрированного с помощью омического делителя напряжения ОДН-2,5 ( $U_{mk} \approx 483 \text{ кВ}$ ; время подъема импульса напряжения –  $T_{II} \approx 205 \text{ мкс}$ ; длительность импульса напряжения –  $T_P \approx 1900 \text{ мкс}$ ; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 500 мкс/клетка) [23]

## Выводы.

1. Анализ современного состояния в Украине метрологического обеспечения натурных испытаний объектов промышленной энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость и коммутационную стойкость показывает, что НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в настоящее время располагает не только воспроизводящими в указанной области высоковольтной импульсной техники необходимые по требованиям отечественных и зарубежных нормативных документов испытательные импульсы тока и напряжения мощными высоковольтными электроустановками, размещенными на открытом воздухе и в отапливаемых специальных лабораторных помещениях, но и соответствующими измерительными средствами, прошедшими государственную метрологическую поверку (калибровку).

2. В состав данных высоковольтных измерительных средств, используемых в практике натурных испытаний при проверке стойкости объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники к воздействию на их электроаппаратуру, узлы и составные элементы импульсов тока (напряжения) грозовых разрядов и коммутационных импульсов напряжения, входят следующие нестандартизованные приборы собственного изготовления: высоковольтные сильноточные шунты типа ШК-300М1 и ШК-300М2, предназначенные для измерения микро- и миллисекундных импульсов тока амплитудой до  $\pm 220 \text{ кА}$  с интегралом их действия до  $15 \cdot 10^6 \text{ Дж/Ом}$ ; емкостные (типа ЕДН-100 и ЕДН-1,2) и омические (типа ОДН-1,2 и ОДН-2,5) делители импульсного напряжения

микро- и миллисекундной длительности, способные как измерять с помощью метрологически поверенных ЦЗО, так и формировать на испытываемой той или иной электрической нагрузке с емкостной характеристикой стандартные (нестандартные) грозовые и коммутационные импульсы напряжения амплитудой до  $\pm 2$  МВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
2. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
3. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
4. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2018. – no.4. – pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 1516.2-97. «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции». – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects // *Instruments and Experimental Technique*. – 2008. – no.3. – pp. 401-405. doi: 10.1134/S0020441208030123.
7. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы». – М.: Стандартиформ, 2011. – 46 с.
8. ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением. – М.: Госстандарт СССР, 1982. – 32 с.
9. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Харьков: Точка, 2014. – 400 с.
10. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. The coaxial shunt for measurement of current pulses of artificial lightning with the amplitude up to  $\pm 220$  kA // *Instruments and Experimental Technique*. – 2018. – vol.61. – no.4. – pp. 501-505. doi: 10.1134/S0020441218030156.
11. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. A coaxial disk shunt for measurement in the high-current circuit of high-voltage generator of storm discharges of pulses of current of artificial lightning with the integral of action up to  $15 \cdot 10^6$  J/Ohm // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – no.5. – pp. 45-50. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.07.
12. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Пер. с англ. Ф.А. Николаева, Ю.П. Свириденко. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
13. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – no.1. – pp. 31-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.
14. Baranov M.I., Rudakov S.V. Approximate calculation of basic characteristics of plasma at the air electric explosion of metal conductor // *Electrical engineering & electromechanics*, 2017. – no.6. – pp. 60-64. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.09.
15. Баранов М.И., Зиньковский В.М., Зябло Ю.П., Игнатенко Н.Н., Лысенко В.О. Разработка и создание передвижного емкостного делителя импульсного напряжения амплитудой до  $\pm 100$  кВ // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2011. – №49. – С. 3-10.
16. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябло Ю.П. Комплекс высоковольтного электрофизического оборудования для испытания средств молниезащиты технических объектов грозовыми

и коммутационными импульсами напряжения микро- и миллисекундной длительности амплитудой до  $\pm 1$  МВ // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – №4. – С. 60-65.

17. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зиньковский В.М., Зябло Ю.П., Игнатенко Н.Н. Омический делитель напряжения для измерения испытательных грозовых и коммутационных импульсов напряжения амплитудой до  $\pm 1$  МВ // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2007. – №20. – С. 20-30.
18. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябло Ю.П., Мельников П.Н. Комплекс электрофизического оборудования для генерирования микро- и миллисекундных импульсов напряжения до 1,2 МВ и тока до 200 кА // *Технічна електродинаміка*. – 2003. – №5. – С. 55-59.
19. Баранов М.И., Бочаров В.А., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2003. – №2. – С. 75-80.
20. Баранов М.И., Колишко Г.М. Экспериментальная оценка электрической прочности длинных воздушных промежутков в электродной системе «стержень-стержень» для микросекундных импульсов напряжения // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2011. – №49. – С. 11-20.
21. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / Пер. с нем. – М.: Энергия, 1973. – 233 с.
22. Гуров С.А., Владимиров Г.А. Универсальные измерительные комплексы на напряжения до 4 МВ // *Електротехніка*. – 1978. – №11. – С. 51-53.
23. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects // *Instruments and Experimental Technique*. – 2013. – vol.56. – no.6. – pp. 653-658. doi: 10.1134/S0020441213050126.

#### REFERENCES

1. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
2. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
3. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
4. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.4, pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.
5. GOST 1516.2-97. *Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napriazhenie 3 kV i vyshe. Obshchie metody ispytaniy elektricheskoi prochnosti izolatsii* [GOST 1516.2-97. Electrical equipment and electrical options of alternating current voltage 3 kV and above. Common test methods for dielectric strength]. Minsk, Publishing house of standards, 1998. 31 p. (Rus).
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/S0020441208030123.
7. GOST R MEK 62305-1-2010. *Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy* [GOST R IEC 62305-1-2010. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 46 p. (Rus).
8. GOST 17512-82. *Elektrooborudovanie i elektroustanovki na napryazhenie 3 kV i vyshe. Metody izmereniya pri ispytaniyah vysokim napryazheniem* [GOST 17512-82. Electrical equipment and electric options on voltage 3 kV and higher. Measuring methods at tests by high voltage]. Moscow, State standard of the USSR Publ., 1982. 32 p. (Rus).
9. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 3-h tomah. Tom 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 3-th vols. Vol.3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv,

Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).

10. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. The coaxial shunt for measurement of current pulses of artificial lightning with the amplitude up to  $\pm 220$  kA. *Instruments and Experimental Technique*, 2018, vol.61, no.4, pp. 501-505. doi: 10.1134/S0020441218030156

11. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. A coaxial disk shunt for measurement in the high-current circuit of high-voltage generator of storm discharges of pulses of current of artificial lightning with the integral of action up to  $15 \cdot 10^6$  J/Ohm. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 45-50. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.07.

12. Knopfel' G. *Sverkhshil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).

13. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.1, pp. 31-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.

14. Baranov M.I., Rudakov S.V. Approximate calculation of basic characteristics of plasma at the air electric explosion of metal conductor. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.6, pp. 60-64. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.09.

15. Baranov M.I., Zin'kovskiy V.M., Zybko Yu.P., Ignatenko N.N., Lysenko V.O. Development and creation of movable capacity divider of impulsive voltage amplitude to  $\pm 100$  kV. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2011, no.49, pp. 3-10. (Rus).

16. Baranov M.I., Bocharov V.A., Zybko Yu.P. Complex high-voltage electrophysical equipment for testing lightning protection of technical objects via storm and switching micro and millisecond voltage impulses with up to 1 MV amplitude. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.4, pp. 60-65. (Rus).

17. Baranov M.I., Bocharov V.A., Zin'kovskiy V.M., Zybko Yu.P., Ignatenko N.N. Ohmic divider of voltage for measuring of proof-of-concept storm and interconnect impulses of voltage amplitude to  $\pm 1$  MV. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2007, no.20, pp. 20-30. (Rus).

18. Baranov M.I., Bocharov V.A., Zybko Yu.P., Mel'nikov P.N. Complex of electrophysics equipment for generating of micro- and millisecond impulses of voltage to 1,2 MV and current to 200 kA. *Technical electrodynamics*, 2003, no.5, pp. 55-59. (Rus).

19. Baranov M.I., Bocharov V.A., Ignatenko N.N., Kolobovskiy A.K. Powerful generators of impulsive voltages and currents of maximum parameters for testing of power electroenergy equipment. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2003, no.2, pp. 75-80. (Rus).

20. Baranov M.I., Koliushko G.M. Experimental estimation of electric durability of long air intervals in the electrode system «bar-bar» for the microsecond impulses of voltage. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2011, no.49, pp.11-20. (Rus).

21. Shvab A. *Izmereniya na vysokom napryazhenii* [Measuring on high voltage. Trans. with German]. Moscow, Energy Publ., 1973. 233 p. (Rus).

22. Gurov S.A., Vladimirov G.A. Universal measuring complexes on voltages to 4 MV. *Electrical Engineering*, 1978, no.11, pp. 51-53. (Rus).

23. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2013, vol.56, no.6, pp. 653-658. doi: 10.1134/S0020441213050126.

Поступила (received) 19.07.2018

Баранов Михаил Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., гл.н.с.,  
Буряковский Сергей Геннадиевич<sup>1</sup>, д.т.н., директор,  
Рудаков Сергей Валерьевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
<sup>1</sup> НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,

тел/phone +38 057 7076841,

e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua, sergbyrg@i.ua

<sup>2</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины,  
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,

тел/phone +38 057 7073438,

e-mail: serg\_73@i.ua

M.I. Baranov<sup>1</sup>, S.G. Buriakovskiy<sup>1</sup>, S.V. Rudakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

<sup>2</sup> National University of Civil Protection of Ukraine,  
94, Chernyshevskaya Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

**The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage.**

**Purpose.** Presentation and analysis of the modern state of the metrology support in Ukraine of model tests of equipment of objects of energy on resistibility to the action of pulsed current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage, and also objects of aviation and space-rocket engineering on resistibility to lightning. **Methodology.** Electrophysics bases of engineering of high-voltage and large pulsed currents, theoretical bases of the electrical engineering, technique of the strong electric and magnetic fields, and also measuring technique. **Scientific methods of analysis of scientific and technical information. Results.** Information is resulted, touching the modern consisting of Ukraine of providing high-voltage measuring facilities conducted on requirements of the normative documents of the USA of SAE ARP 5412:2013, SAE ARP 5416:2013, International Standard of IEC 62305-1:2010 and Standard GOST 1516.2-97 model tests of equipment of objects of energy on resistibility to lightning and commutation resistibility, and also objects of aviation and space-rocket engineering on resistibility to lightning. It is marked that similar measuring facilities are not made by domestic industry. It is indicated that R&DPCI «Molniya» of the NTU «KhPI» disposes the proper measuring facilities of the own making, passing a state metrology check (calibration). Basic technical descriptions are described developed and created at this Institute: high-voltage high-current shunts of type of SC-300M1 and SC-300M2, intended for measuring of micro- and millisecond pulses of current amplitude to  $\pm 220$  kA with the integral of their action to  $15 \cdot 10^6$  J/Ohm; capacitive (type of CDV-100 and CDV-1,2) and ohmic (type of ODV-1,2 and ODV-2,5) dividers of pulsed voltage of micro- and millisecond duration, capable not only to measure but also form on the tested electric loading standard (non-standard) storm and commutation pulses of voltage amplitude to  $\pm 2$  MV. **Originality.** First in the generalized kind possibilities are developed and created by the domestic scientific and technical workers of high-voltage high-current measuring facilities, intended for the aims of the metrology providing of model tests in obedience to the requirements of domestic and foreign normative documents of equipment of objects of energy on resistibility to lightning and commutation resistibility, and also objects of aviation and space-rocket engineering on resistibility to lightning. **Practical value.** Application in practice of model tests on powerful high-voltage pulsed current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage of electrical equipment and component elements of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to lightning and commutation resistibility of the described special high-voltage measuring facilities will be instrumental in the decision of global in the world problem of protection from lightning of ground and air-based technical objects and to the increase of their strength security. References 23, tables 4, figures 16.

**Key words:** high-voltage generators of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage, objects of energy, aviation and space-rocket engineering, measuring facilities for the model tests of technical objects on resistibility to the action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage.