

вания показали, что величина мощности излучения в случае, когда воздействующее поле параллельно току диода, в пределах порядка превышает мощность в условиях, когда оно перпендикулярно диодному току. Это на качественном уровне также соответствует предложенным в [3], [4] расчетным моделям, согласно которым мощность излучения прямо пропорционально времени взаимодействия наведенного тока с колебаниями структуры, а это время, в свою очередь, прямо пропорционально размерам образца (диода), поперечные размеры которого на порядок меньше продольных.

И, наконец, достоверность физических моделей [3], [4] подтверждается также тем, что энергия излучения собственных электромагнитных колебаний твердотельных структур, комплектованных рассмотренные полупроводниковые приборы, прямо пропорционально амплитуде воздействующего импульсного напряжения.

Список литературы: 1. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 2. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 3. Кравченко В.И., Лосев Ф.В., Яковенко И.В. Возбуждение электромагнитных колебаний в полупроводниковых структурах ЭРИ потоком заряженных частиц, наведенных ЭМИ // Вісник НТУ «ХП». – Харків «НТУ» ХП. – 2004. – № 35. – С.161-168. 4. Кравченко В.И., Лосев Ф.В., Яковенко И.В. Электростатические колебания структуры металл-диэлектрик-полупроводник в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения // Вісник НТУ «ХП». – Харків НТУ «ХП». – 2004. – № 35. – С. 154-161. 5. Дж. А. Стрэттон. Теория электромагнетизма. – Москва, ОГИЗ-ГИТТЛ. 1948. 6. Конструирование и расчет полосковых устройств. Под ред. И.С.Ковалева. – Москва, Сов. Радио, 1974.

Поступила в редколлегию 11.06.2007.

УДК 621.373.5

М.И.БАРАНОВ, докт.техн.наук; **В.А.БОЧАРОВ**;
В.М.ЗИНЬКОВСКИЙ; **Ю.П.ЗЯБКО**; **Н.Н.ИГНАТЕНКО**; НТУ «ХПИ»

ОМИЧЕСКИЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ГРОВОВЫХ И КОММУТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ АМПЛИТУДОЙ ДО 1 МВ

Описано конструкцію і технічні характеристики створеного пересувного високовольтного омичного дільника для виміру імпульсів напруги мікро- і мілісекундного часового діапазону амплітудою до 1 МВ і дані рекомендації з його практичного застосування в області техніки і електрофізики високих напруг.

The design and performance data of the movable high-voltage ohmic divider which was created for measurement of voltage pulses of micro- and millisecond time range with amplitudes up to 1 MV are

described, the recommendations on its practical application in the field of high-voltage engineering and electrophysics are given.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, омические делители напряжения (ОДН) нашли широкое практическое использование в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) [1-4]. В [2,5,6] приведены электрические схемы возможного построения и даны описания ряда конструкций высоковольтных ОДН, применяемых в технике высоких и сверхвысоких импульсных напряжений. Следует подчеркнуть то, что подобные устройства высоковольтного аппаратостроения относятся к нестандартизованному измерительному оборудованию и изготавливаются весьма ограниченным кругом специализированных организаций, причем обычно в единичных экземплярах. К одной из таких организаций в Украине и относится научно-исследовательский институт НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», занимающий сейчас ведущие позиции в области ВИТ. В настоящее время для проведения высоковольтных электрических испытаний объектов электроэнергетики и широкой номенклатуры электротехнической продукции на стойкость к воздействию стандартных (нестандартных) грозовых и коммутационных импульсов напряжения требуется укомплектование соответствующих испытательных электроустановок измерительными средствами, метрологически обеспечивающими в условиях практического применения ВИТ регистрирование амплитудно-временных параметров (АВП) высоковольтных импульсов их (объектов испытаний) нагружения. Учитывая многие аспекты электроразрядных технологий, к которым по праву и относятся указанные электрические испытания, как технического, так и экономического характера на практике при реализации соответствующих испытаний приходится базироваться, в основном, на собственных разработках и отечественной высоковольтной элементной базе.

Целью статьи является краткое описание конструкции и технических характеристик разработанного и изготовленного в последнее время в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» передвижного омического делителя напряжения типа ОДН-1, способного надежно регистрировать АВП стандартных (нестандартных) испытательных импульсов напряжения микро- и миллисекундного временного диапазона амплитудой до 1 МВ.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРЕДВИЖНОГО ОМИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА ОДН-1

На рис. 1 представлена электрическая схема соединений элементов рассматриваемого омического делителя напряжения типа ОДН-1. Согласно данной схеме ОДН-1 содержит четыре последовательно соединенных секции активных сопротивлений высоковольтного плеча R_B , каждая из которых выполнена из 50 шт. последовательно включенных высоковольтных керамиче-

ских резисторов типа ТВО-5-100 Ом на общее номинальное напряжение в 250 кВ [7]. Активное сопротивление высоковольтного плеча $R_B = 20$ кОм последовательно соединено с активным сопротивлением низковольтного плеча R_H , набранным из двух параллельно подключенных резисторов типа МЛТ-2 и равным 0,9 Ом. В результате такого выполнения электрической части делителя ОДН-1 предварительное расчетное значение его коэффициента деления $K_{Д}$ составляет величину, примерно равную $K_{ДР} = R_B/R_H = 22220$.

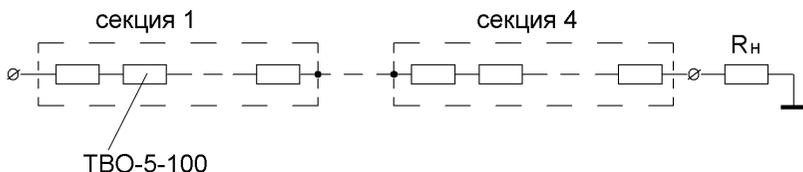


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема построения омического делителя напряжения типа ОДН-1

3. КОНСТРУКЦИЯ ПЕРЕДВИЖНОГО ОМИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА ОДН-1

На рис. 2 приведен общий вид передвижного омического делителя напряжения типа ОДН-1. Данный делитель состоит из следующих основных частей: изоляционной несущей конструкции (ИНК), электрической части (сопротивлений R_B и R_H), металлических экранов и металлического основания-шасси с вращающимися вокруг вертикальных осей на 360° четырьмя резиновыми металлическими колесами.

ИНК делителя типа ОДН-1 состоит из четырех стеклопластиковых труб типа ТСПО длиной 652 мм, наружным диаметром 120 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Данные трубы при помощи металлических фланцев собираются в общую изоляционную стойку, внутри которой на прямоугольных гетинаксовых пластинах (длина 633 мм, ширина 112 мм, толщина 10 мм) по последовательно соединенным между собой секциям размещены высоковольтные керамические резисторы типа ТВО-5-100 Ом. Данные резисторы для уменьшения общей высоты делителя ОДН-1 на указанных гетинаксовых пластинах собраны «елочкой» с использованием их обеих боковых поверхностей. Между стеклопластиковыми трубами ИНК установлены круглые дискообразные прокладки из СТЭФ (с центральным отверстием) наружным диаметром 131 мм и толщиной 10 мм. Сверху ИНК рассматриваемого делителя установлен металлический экран, состоящий из верхней дискообразной части диаметром 380 мм, по наружному периметру которой для исключения коронного разряда размещена гофрированная металлическая (стальная) труба диаметром 43 мм. На расстоянии (по вертикали) 540 мм от верхней части экрана установлена его нижняя часть, выполненная из противокоронной гофрированной металлической (стальной) трубы диаметром 56 мм, улучшающей вертикальное

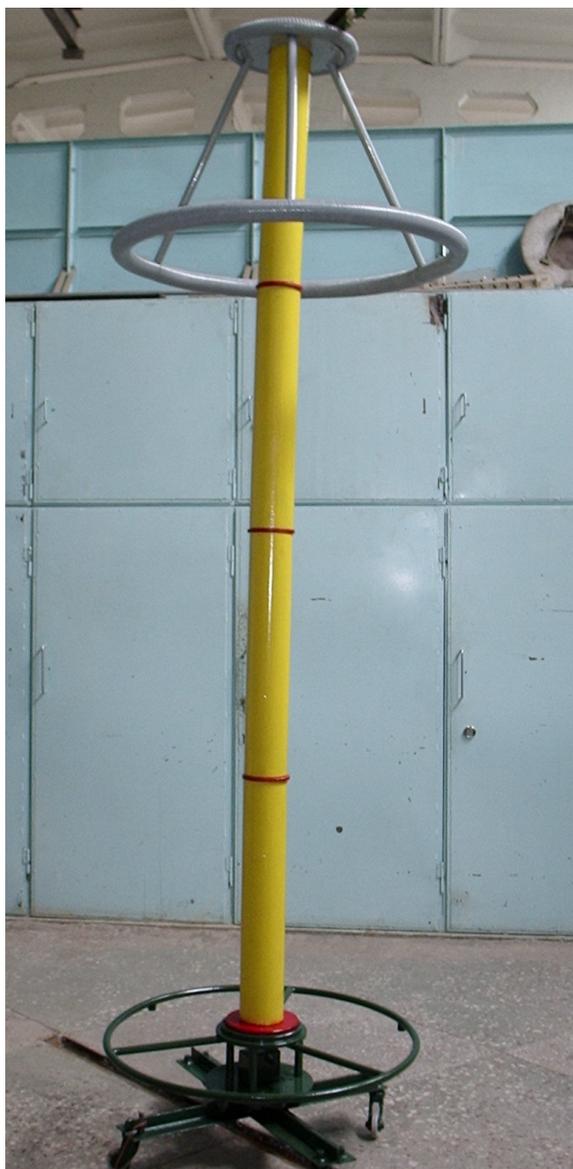


Рисунок 2 – Общий вид передвижного омического делителя напряжения типа ОДН-1

распределение сильного электрического поля вдоль верхних стеклопластиковых труб ИНК. Верхняя и нижняя части экрана делителя типа ОДН-1 между собой соединены при помощи трех алюминиевых труб длиной 620 мм и

диаметром 26 мм. Внизу делителя типа ОДН-1 расположен нижний металлический (стальной) экран наружным диаметром 850 мм, изготовленный из труб диаметром 22 мм. В области данного нижнего экрана под нижней стеклопластиковой трубой ИНК выполнено подключение к высоковольтному плечу делителя с активным сопротивлением R_B его низковольтного плеча с активным сопротивлением R_H . Описанная выше конструкция покоится на стальном основании-шасси, легко перемещающемся по полу испытательного поля. Общая высота делителя типа ОДН-1 составляет 3020 мм.

4. СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ ДЕЛИТЕЛЯ ТИПА ОДН-1 К ЦИФРОВОМУ ОСЦИЛЛОГРАФУ В РЕЖИМЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

На рис. 3 изображена электрическая схема подключения низковольтного плеча передвижного омического делителя типа ОДН-1 к цифровому осциллографу (ЦО) для измерения испытательных импульсов напряжения, подаваемых на описываемый делитель от генератора импульсных напряжений (ГИН) мегавольтного диапазона. Согласно данной схеме в ОДН-1 была применена низковольтная корректирующая $R_K C_K$ – цепь, позволяющая улучшить его амплитудно-частотную характеристику (особенно в области высоких частот). В качестве активного сопротивления R_K этой цепочки был использован резистор типа МЛТ-2 с номинальным сопротивлением, равным 33 Ом. Емкость $C_K = 3,3$ нФ корректирующей цепи была изготовлена с применением конденсаторов типа КСО-1, имеющих номинальное напряжение в 500 В. Для согласования низковольтного плеча делителя с активным сопротивлением R_H с измерительной цепью был применен согласующий резистор $R_{C1} = 50$ Ом, выполненный на базе двух параллельно включенных сопротивлений типа МЛТ-2 с номиналом в 100 Ом.

Резисторы R_H , R_{C1} и корректирующая $R_K C_K$ – цепь согласно рис. 3 были размещены в экранирующем латунном прямоугольном корпусе, имеющем габаритные размеры $100 \times 60 \times 100$ мм³. Для подключения в соответствии с рис. 3 к низковольтному плечу делителя типа ОДН-1 радиочастотного кабеля (РК) типа РК-50-9-11 в указанном металлическом корпусе был установлен коаксиальный разъем типа СР-50-73ФВ83РП. Для уменьшения паразитного влияния внешних мощных электрических и магнитных полей на измерение с помощью делителя типа ОДН-1 высоковольтных испытательных импульсов напряжения снаружи его коаксиального измерительного кабеля РК с медной оплеткой был дополнительно размещен заземленный гибкий металлический экран в виде луженной медной оплетки марки ПЛ. На выходе измерительного кабеля РК к его медной жиле перед ЦО для полного согласования был подключен второй согласующий резистор $R_{C2} = 50$ Ом, уменьшающий полезный сигнал в два раза и соответственно увеличивающий коэффициент деления K_D рассматриваемого ОДН-1 вдвое. Поэтому суммарное предвари-

тельное расчетное значение коэффициента деления описываемого омического делителя напряжения типа ОДН-1, с приведенной на рис. 3 схемой его подсоединения к ЦО (до экспериментального уточнения значения K_d), будет примерно равным $K_{др} = 44440$.

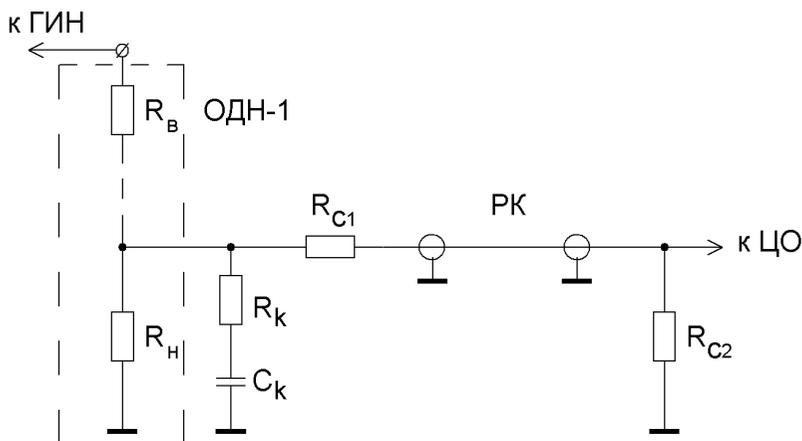


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема подключения низковольтного плеча омического делителя типа ОДН-1 к цифровому осциллографу для измерения испытательных импульсов напряжения

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОМИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА ОДН-1

Созданный омический делитель напряжения типа ОДН-1 был подвергнут высоковольтным электрическим испытаниям, направленным на проверку его работоспособности в условиях воздействия на него нестандартного аperiodического импульса напряжения амплитудой в сотни киловольт, а также на экспериментальное уточнение коэффициента его деления K_d . На рис. 4 показан общий вид испытательной высоковольтной установки, в электрическую схему которой включен омический делитель напряжения типа ОДН-1.

Согласно испытательной схеме, приведенной на рис. 4, в качестве источника высокого напряжения нами был использован генератор ГИН-1,2 на максимальное рабочее напряжение в 1 МВ [3,4], размещенный на воздухе в отапливаемом высоковольтном зале НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». Высоковольтный выход данного ГИН через формирующее омическое сопротивление $R_\phi = 216$ Ом, собранное на базе девяти последовательно включенных керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом, был подсоединен к высоковольтному плечу испытываемого делителя с активным сопротивлением R_B . Причем, эта общая высоковольтная «точка» ГИН-1,2 и ОДН-1 была электрически подключена к потенциальному (верхнему) металлическому электроду

стандартных измерительных шаров $\varnothing 250$ мм, нижний электрод которых был соединен с контуром заземления (см. рис. 4). В процессе измерений выход низковольтного плеча делителя типа ОДН-1 с активным сопротивлением R_H согласно схеме, представленной на рис. 3, был подсоединен к входу ЦО разработки США типа *Tektronix TDS-1012* (производство – Китай).



Рисунок 4 – Общий вид высоковольтной электроустановки с измерительными шарами $\varnothing 250$ мм для испытания передвижного омического делителя напряжения типа ОДН-1

На рис. 5 приведена осциллограмма полного испытательного аperiodического импульса напряжения временной формы 115 нс/280 мкс, формируемого на делителе типа ОДН-1 с помощью указанной выше разрядной схемы ГИН-1,2 (зарядное напряжение одного из 12 каскадов генератора $U_3 = +29$ кВ; напряжение на выходе генератора $U_{ГИН} = +348$ кВ).

На рис. 6 представлена амплитудно-временная диаграмма испытательного аperiodического импульса напряжения амплитудой +350 кВ, воздействующего на делитель типа ОДН-1, в режиме электрического пробоя воздушного промежутка длиной $l_{пр} = 160$ мм измерительных шаров $\varnothing 250$ мм. В соответствии с табл. 2

ГОСТ 17512-82 [8] данная осциллограмма 50 %-ного разрядного напряжения $U_p = 350$ кВ положительной полярности позволяет произвести экспериментальное уточнение искомого коэффициента деления K_d для делителя ОДН-1. В нашем случае экспериментальное значение коэффициента деления K_d для ОДН-1 составляет: $K_{dэ} = 350 \cdot 10^3 \text{ В} / 7,92 \text{ В} = 44192$. В результате усредненное значение коэффициента деления K_d созданного омического делителя напряжения типа ОДН-1 будет равно: $K_{дс} = (K_{др} + K_{дэ}) / 2 = 44316$.

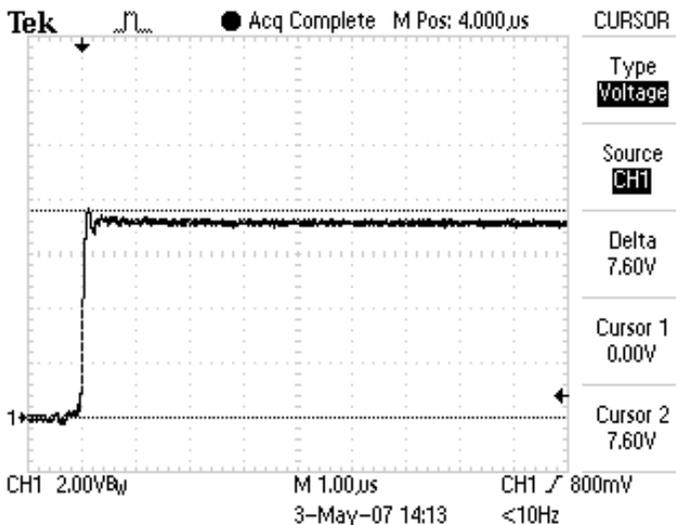


Рисунок 5 – Осциллограмма нарастающей части полного аperiodического импульса напряжения на делителе типа ОДН-1 при отсутствии электрического пробоя воздушного промежутка ($l_{np} = 160$ мм) измерительных шаров $\varnothing 250$ мм, подключенных параллельно исследуемому омическому делителю ($U_{ГИН} = +348$ кВ)

Согласно данным рис. 6 предразрядное время T_c , определенное в соответствии с требованиями действующего межгосударственного ГОСТ 1516.2-97 [9], составляет около 0,69 мкс. Кроме того, из осциллограммы разрядного напряжения U_p на рис. 6 видно, что длительность среза $T_{дс}$, найденная по рекомендациям из [9], принимает значение, примерно равное 0,3 мкс. Следует отметить тот немаловажный факт, что примененная нами высоковольтная испытательная схема на базе генератора ГИН-1,2 для проверки работоспособности омического делителя напряжения типа ОДН-1 обладает, согласно приведенным выше опытным данным, высоким коэффициентом использования по импульсному напряжению, равным $K_U = U_p / U_{ГИН} = 350 \text{ кВ} / 360 \text{ кВ} = 0,97$.

Осциллограмма на рис. 7 иллюстрирует фронт использованного нами испытательного импульса напряжения, полученного от генератора ГИН-1,2 в

разрядной схеме на рис. 4, согласно которой длительность его фронта τ_{ϕ} между уровнями 0,3 и 0,9 от амплитуды импульсного напряжения $U_m = 7,68 \cdot K_{ДС} = 341$ кВ оказывается примерно равной 115 нс. Видно, что выбросы за фронтом апериодического импульса напряжения на делителе типа ОДН-1 не превышают 5 % от его амплитуды U_m , что полностью соответствует требованиям, изложенным в ГОСТ 1516.2-97 [9].

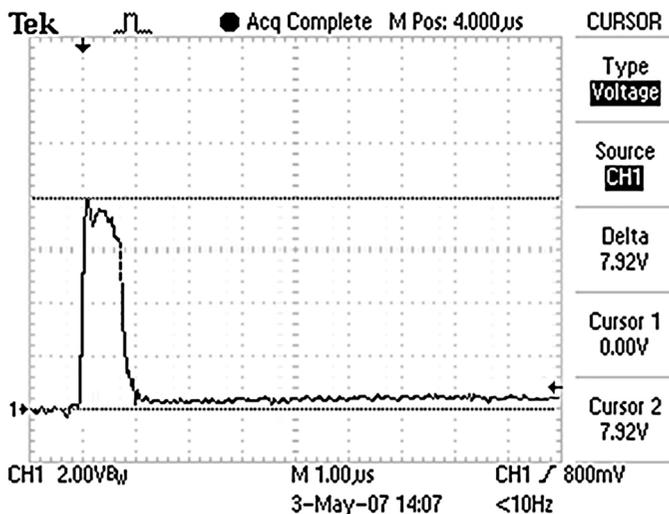


Рисунок 6 – Осциллограмма срезанного апериодического импульса напряжения на делителе типа ОДН-1 при электрическом пробое воздушного промежутка ($l_{пр} = 160$ мм) измерительных шаров $\varnothing 250$ мм, подключенных параллельно исследуемому омическому делителю ($U_{ГНН} = +360$ кВ)

Приближенная оценка переходной характеристики исследуемого омического делителя напряжения типа ОДН-1 показала, что время его реакции на воздействие прямоугольного импульса напряжения амплитудой не менее 50 В от стандартного генератора типа Г5-54 [10], имеющего собственное время нарастания (длительность фронта) получаемых от него импульсов напряжения около $\tau_H = 30$ нс, составляет с учетом этих численных значений τ_H не более 100 нс.

На рис. 8 показан полный апериодический испытательный импульс высокого напряжения положительной полярности, подаваемый в процессе проведенных электрофизических исследований на омический делитель напряжения типа ОДН-1. Расшифровка АВП данного импульса показывает, что его длительность на уровне 0,5 от амплитуды $U_m = 7,6 \cdot K_{ДС} = 337$ кВ принимает значение около $\tau_H = 280$ мкс.

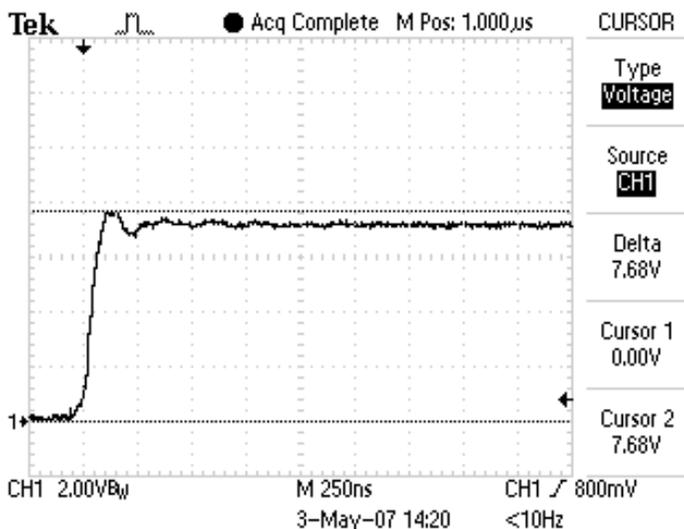


Рисунок 7 – Осциллограмма нарастающей части полного аperiodического импульса напряжения на делителе типа ОДН-1 при отсутствии электрического пробоя воздушного промежутка ($l_{np} = 162$ мм) измерительных шаров $\varnothing 250$ мм, подключенных параллельно созданному омическому делителю ($U_{ГНН} = +352$ кВ)

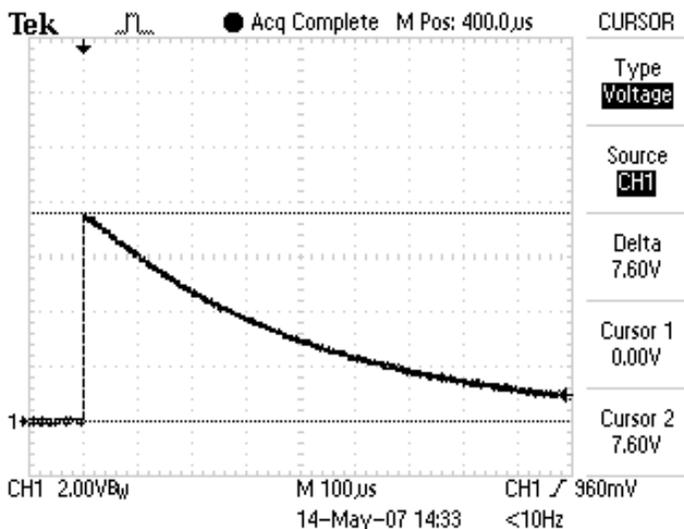


Рисунок 8 – Осциллограмма спадающей части полного аperiodического импульса напряжения на делителе типа ОДН-1 при отсутствии электрического пробоя воздушного промежутка ($l_{np} = 160$ мм) измерительных шаров $\varnothing 250$ мм, подключенных параллельно исследуемому омическому делителю ($U_{ГНН} = +348$ кВ)

Считаем, что представленный в данной работе передвижной омический делитель напряжения типа ОДН-1 может быть с успехом использован в качестве высоковольтного измерительного средства, способного надежно регистрировать АВП стандартных (нестандартных) испытательных импульсов напряжения микро- и миллисекундного временного диапазона амплитудой до 1 МВ при исследовании поведения газовой (вакуумной), жидкой и твердой изоляции, а также различных электроэнергетических и электротехнических устройств в условиях воздействия на них высокого импульсного напряжения и определения их соответствующей электромагнитной стойкости и совместимости.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Описаны основные технические характеристики и особенности конструкционного исполнения созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» передвижного высоковольтного омического делителя типа ОДН-1 для измерения стандартных или нестандартных испытательных грозовых и коммутационных импульсов напряжения микро- и миллисекундного временного диапазона амплитудой до 1 МВ.

2. Разработанный делитель импульсного напряжения типа ОДН-1 может использоваться в качестве измерительного средства при проведении высоковольтных испытаний различных технических объектов на электромагнитную стойкость (совместимость) и проверке электрической прочности различной высоковольтной изоляции.

Список литературы: 1. *Техника* больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С.Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 2. *Техника* высоких напряжений / Под ред. М.В.Костенко. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с. 3. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко 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. 4. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко Ю.П. Комплекс высоковольтного электрофизического оборудования для испытания средств молниезащиты технических объектов грозовыми и коммутационными импульсами напряжения микро – и миллисекундной длительности амплитудой до 1 МВ // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – № 4. – С. 60-65. 5. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / Пер. с нем. – М.: Энергия, 1973. – 233 с. 6. 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. 7. ГОСТ 11324-76. Резисторы постоянные объемные типа ТВО. – М.: Изд-во Госстандарта СССР, 1976. – 20 с. 8. ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением. – М.: Изд-во Госстандарта СССР, 1982. – 32 с. 9. Межгосударственный ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с. 10. Генератор импульсов Г5-54. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1982. – 92 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2007