

М.И. БАРАНОВ, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
В.М. ЗИНЬКОВСКИЙ, зав. сектором, НТУ «ХПИ»;
Ю.П. ЗЯБКО, вед. инж., НТУ «ХПИ»;
Н.Н. ИГНАТЕНКО, канд. техн. наук, зав. сектором, НТУ «ХПИ»;
В.О. ЛЫСЕНКО, аспирант НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ПЕРЕДВИЖНОГО ЕМКОСТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АМПЛИТУДОЙ ДО 100 КВ

Надані результати досліджень щодо розробки та створення на основі високовольтних керамічних конденсаторів типу К 15-10 діючого зразка пересувного ємкісного подільника імпульсної напруги амплітудою до ± 100 кВ, що легко вбудовується у вимірювальні кола високовольтних випробувальних електроустановок.

The results of researches of the development and creation on the base of high-voltage ceramic capacitors type K 15-10 operating standard of movable capacitance divider of impulsive tension amplitude to ± 100 kV, which can be easily inserted in the measuring chains of high-voltage proof-of-concept electric options are given.

Представлены результаты исследований по разработке и созданию на основе высоковольтных керамических конденсаторов типа К 15-10 действующего образца передвижного емкостного делителя импульсного напряжения амплитудой до ± 100 кВ, что легко встраивается в измерительные цепи высоковольтных испытательных электроустановок.

Введение. При проведении высоковольтных исследований и эксплуатации действующего электрооборудования в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) инженерно-техническим работникам необходимы переносные или передвижные измерительные средства, способные регистрировать с помощью цифровых осциллографов как большие импульсные токи (от единиц до сотен килоампер), так и высокие импульсные напряжения (от единиц до тысяч киловольт) нано-, микро- и миллисекундного временных диапазонов. В связи с отсутствием в настоящее время на инструментально-электротехнологическом рынке соответствующей измерительной аппаратуры с доступной для госучреждений ценой, предназначенной для работы в области ВИТ, научным работникам при их ограниченных финансовых возможностях приходится самостоятельно разрабатывать и создавать требуемые нестандартные измерительные средства. В НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» с его обширной высоковольтной элементной базой и разнообразной используемой техникой высокого электрического потенциала на протяжении ряда последних десятилетий подобная практика принята для персонала обычную и само собой разумеющуюся форму научно-технической деятельности. Для отдела электромагнитных исследований нашего института при изучении поведения древесины в условиях воздействия на нее больших им-

пульсных токов и высоких напряжений оказался необходимым малогабаритный емкостный делитель импульсного напряжения амплитудой до ± 100 кВ (ЕДН-100), функционирующий в микросекундном временном диапазоне. Некоторым особенностям в оперативном создании подобного высоковольтного делителя напряжения и посвящена данная статья.

1 Выбор электрической схемы для емкостного делителя импульсно-го напряжения типа ЕДН-100

Разработчиками емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 была выбрана классическая схема его построения (рис. 1), в которой высоковольтное плечо суммарной емкостью C_B на входное (измеряемое) напряжение U_B гальванически соединено с низковольтным плечом емкостью $C_H \gg C_B$ [1,2]. Для улучшения передаточных характеристик разрабатываемого делителя его низковольтное плечо может содержать корректирующую $R_k C_k$ – и согласующую $R_c C_c$ – цепочки. Согласование данного делителя на низковольтной стороне с напряжением U_H с коаксиальным кабелем линии передачи требует включения в цепь его жилы согласующего сопротивления R_c , номинал которого должен быть равен волновому сопротивлению Z_k применяемого кабеля. Необходимо помнить, что включение сопротивления R_c согласно рис. 1 вызывает уменьшение вдвое полезного электрического сигнала уровнем U_H , подаваемого на регистрирующий прибор (осциллограф того или иного типа).

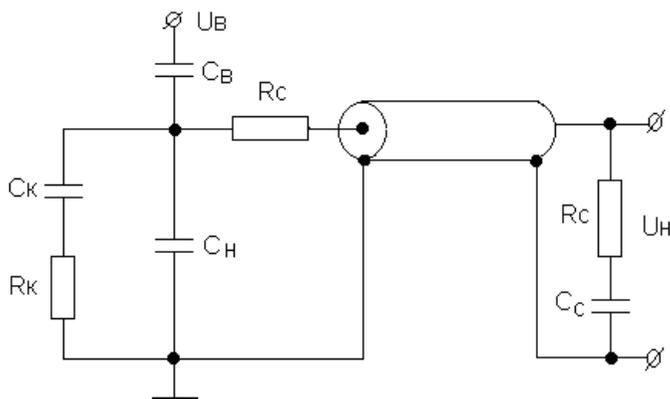


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема построения высоковольтного и низковольтного плеч передвижного емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100, работающего в микросекундном временном диапазоне

В соответствии со схемой рис. 1 нами были использованы следующие численные значения указанных выше электрических параметров элементов ЕДН-100: $C_B = 0,47$ нФ; $C_H = C_C = 0,54$ мкФ; $R_c = Z_k = 75$ Ом; $R_k = 27$ Ом; $C_k = 2,8$ нФ.

2 Выбор элементов и конструкции емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100

Исходя, прежде всего, из имеющейся в нашем распоряжении высоковольтной элементной базы при создании емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 были применены высоковольтные керамические конденсаторы типа К 15-10 емкостью 4700 пФ на номинальное напряжение 50 кВ, предварительно прошедшие соответствующие высоковольтные испытания постоянным напряжением 40 кВ и на основании их результатов возможную отбраковку (из 20 шт. конденсаторов испытания в среде трансформаторного масла указанным напряжением, действующим на них в течение 1 минуты, не прошли всего 2 шт.). Для обеспечения запаса электрической прочности высоковольтного плеча делителя ЕДН-100 нами при его номинальном напряжении $U_B = \pm 100$ кВ было использовано десять последовательно соединенных на воздухе конденсаторов типа К 15-10, обеспечивающих численное значение емкости C_B , равное 470 пФ. Жесткая гальваническая связь указанных керамических конденсаторов (наружным диаметром 131 мм и полной высотой 37 мм) с высоковольтными посеребренными дисковыми электродами была осуществлена при помощи коротких стальных шпилек М8 длиной 50 мм. Для обеспечения механической прочности конденсаторной сборки высоковольтного плеча делителя по ее высоте между соседними конденсаторами были установлены короткие упорные изоляционные трубки из СТЭФ наружным диаметром 60 мм при толщине их стенки 5 мм и длине 70 мм. Для повышения жесткости высоковольтного плеча делителя по высоте его конденсаторной сборки общей длиной 749 мм были размещены четыре упорных диска из СТЭФ диаметром 146 мм и толщиной 5 мм. После монтажа на горизонтальном столе указанной конденсаторной сборки она в таком же положении поэтапно размещалась внутрь изоляционной трубы корпуса из СТЭФ длиной 915 мм и внутренним диаметром 151 мм при толщине ее стенки в 12 мм. После выполнения такой технологической операции трубчатый цилиндрический корпус высоковольтного плеча делителя переводился в вертикальное положение и закреплялся на его изоляционном квадратном основании из СТЭФ с размером в плане 395×395 мм² при толщине в 20 мм. Центровка внутренней части высоковольтного плеча делителя относительно его изоляционной трубы-корпуса проводилась при помощи упорных изоляционных дисков, размещенных между керамическими конденсаторами, и наружного круглого стального фланца с осевым отверстием и закругленным высоковольтным электродом. Низковольтное плечо рассматриваемого делителя емкостью $C_H = C_C = 0,54$ мкФ было реализовано на основе двух параллельно соединенных конденсаторов типа К 73-11 емкостью 0,27 мкФ на постоянное напряжение до 250 В. В данном плече активное сопротивление R_k было выполнено на основе резистора МЛТ-2 номиналом 27 Ом, а емкость C_k – на основе конденсатора КСО-1 номиналом 2800 пФ. Согласующее активное со-

противление R_C в измерительной цепи кабельной линии передачи полезного электрического сигнала с низковольтного плеча делителя ЕДН-100 было собрано на базе двух параллельно включенных резисторов МЛТ-2 номиналом 150 Ом. Электрическая часть низковольтного плеча описываемого делителя размещалась в прямоугольном алюминиевом корпусе с коаксиальным разъемом СР-75, жестко закрепленном на изоляционном основании делителя и подсоединенном к заземляющей шине высоковольтной испытательной установки. Для удобства в работе к основанию из СТЭФ-20 делителя по его углам были симметрично закреплены четыре вращающихся колеса высотой 70 мм. В результате общая высота разработанного делителя ЕДН-100 составила 1085 мм.

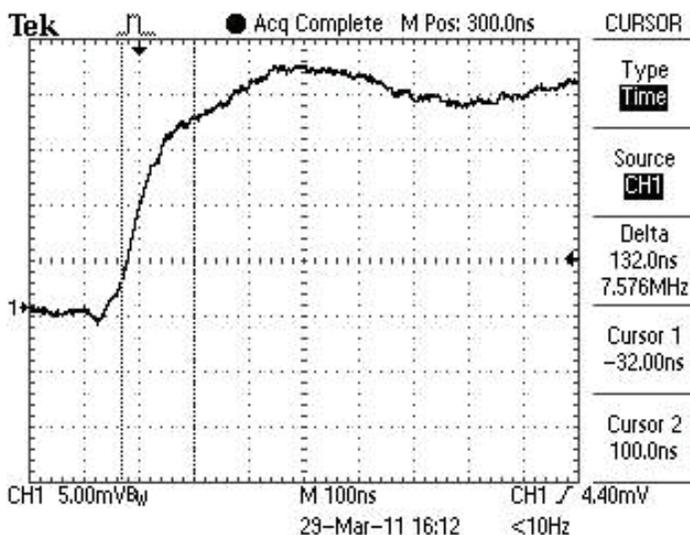


Рисунок 2 – Осциллограмма нарастающей части импульса напряжения на низковольтном плече делителя ЕДН-100 при подаче на вход его высоковольтного плеча прямоугольного импульса напряжения амплитудой 40 В с длительностью фронта до 30 нс (практически переходная характеристика емкостного делителя напряжения ЕДН-100)

3 Результаты оценки переходной характеристики емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 при помощи низковольтного источника импульсного напряжения

Для проверки работоспособности в микросекундном временном диапазоне разработанного и созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в «металле» емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 нами при помощи стандартного низковольтного генератора Г5-54, формирующего на электрической нагрузке прямоугольный импульс напряжения с фронтом до 30 нс при амплитуде не более 60 В, была в первом приближении снята его переходная характеристика (рис. 2). Из данных рис. 2 видно, что при подаче на

вход высоковольтного плеча делителя типа ЕДН-100 указанного наносекундного сигнала длительность фронта регистрируемого при помощи цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 с его низковольтного плеча полезного сигнала между уровнями 0,3–0,9 составляет около $\tau_f = 112$ нс.

Данную величину τ_f можно приближенно принять за длительность переходной характеристики емкостного делителя импульсного напряжения ЕДН-100. Это дает нам определенное основание считать, что созданный делитель напряжения типа ЕДН-100 можно использовать в качестве рабочего средства для измерения импульсов напряжения микросекундной длительности.

4 Исследование метрологических характеристик емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 при помощи высоковольтного источника импульсного напряжения

На рис. 3 показан внешний вид недавно созданного в отделе № 6 нашего института емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100.



Рисунок 3 – Внешний вид созданного в 2011 году емкостного делителя импульсного напряжения ЕДН-100, подключенного к стандартным измерительным шарам $\varnothing 125$ мм и высоковольтному источнику импульсного напряжения амплитудой до ± 100 кВ

Разработанный делитель ЕДН-100 успешно прошел необходимые испытания при условиях работы в реальной схеме высоковольтной испытательной установки (рис. 4). Для этой цели нами был использован генератор импульсных токов на номинальное напряжение ± 100 кВ (ГИТ-100) [3], формирующий в схеме согласно рис. 1 после срабатывания управляемого многоззорного воздушного коммутатора F_1 и пробоя воздушного промежутка стандартного двухэлектродного шарового разрядника ШР с диаметром электродов 125 мм на делителе ЕДН-100 высоковольтный аperiodический импульс напряжения.

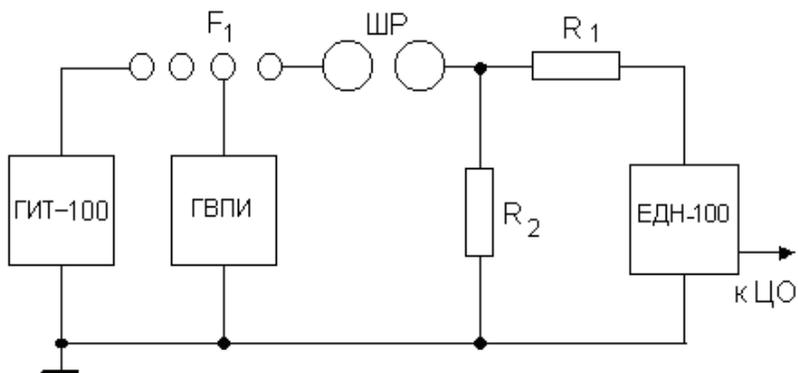


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема высоковольтного источника импульсного напряжения амплитудой до ± 100 кВ, использованного для исследования метрологических характеристик разработанного емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 (F_1 – многоззорный воздушный коммутатор типа МЗК-100; ШР – стандартный двухэлектродный шаровой разрядник с электродами $\varnothing 125$ мм; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов на напряжение ± 100 кВ; ЦО – цифровой осциллограф; R_1 , R_2 – нагрузочные активные сопротивления для формирования на делителе ЕДН-100 аperiodического импульса высокого напряжения)

Отметим, что высоковольтный генератор ГВПИ на своем выходе для защиты от влияния на его работоспособность высоковольтной цепи ГИТ-100 содержал необходимую разделительную емкость номиналом 180 пФ на напряжение до ± 120 кВ [4]. При высоковольтных испытаниях делителя ЕДН-100 была использована лишь половина емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) ГИТ-100 (всего 10 шт. параллельно соединенных импульсных конденсаторов типа ИК 100-0,4У4 общей емкостью $C_T = 4$ мкФ [3]). В ШР длина воздушного промежутка между медными никелированными шарами $\varnothing 125$ мм выбиралась равной 10 мм, что согласно требованиям ГОСТ 17512-82 [5] соответствует амплитуде пробивного импульсного напряжения положительной полярности указанной выше временной формы, равной $U_{ШР} = 31,7$ кВ. На рис. 5 приведена осциллограмма фронтальной части аperiodического импульса напряжения, формируемого на исследуемом делителе ЕДН-100 при разряде ЕНЭ генератора ГИТ-100 (при собствен-

ных электрических параметрах высоковольтного источника импульсного напряжения, равных $R_r = 0,4$ Ом и $L_r = 2,4$ мкГн [3]) на разрядную цепь согласно рис. 4, в которой на базе высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 были использованы следующие значения нагрузочных активных сопротивлений: $R_1 = 75$ Ом и $R_2 = 250$ Ом. Заметим, что активное сопротивление R_1 совместно с емкостью делителя ЕДН-100 будет определять длительность фронта между уровнями 0,3-0,9 фиксируемого импульса напряжения, а активное сопротивление R_2 с емкостью «в разряде» генератора ГИТ-100 – длительность данного импульса на его полуспаде (уровне 0,5).

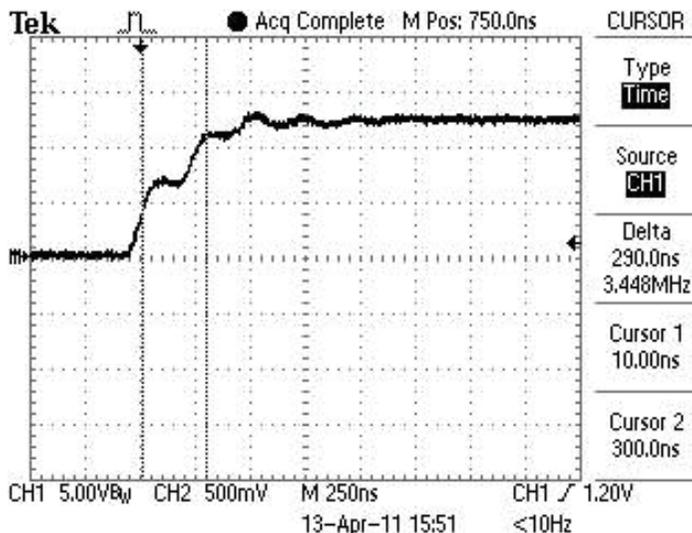


Рисунок 5 – Осциллограмма нарастающей части аperiodического импульса напряжения, полученная при помощи емкостного делителя импульсного напряжения ЕДН-100 в высоковольтной испытательной электрической схеме согласно рис. 4 ($U_{imp} = 31,7$ кВ)

Из данных рис. 5 следует, что в рассматриваемом случае длительность фронта регистрируемого при помощи делителя ЕДН-100 и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 аperiodического импульса напряжения составляет между уровнями 0,3-0,9 около 290 нс (масштаб по вертикали – 5 В/клетка; масштаб по горизонтали – 250 нс/клетка). При этом на наносекундном фронте импульса высокого напряжения наблюдаются наложенные затухающие колебания амплитудой до 10 %, что свидетельствует о невозможности применения подобного делителя для измерения импульсного напряжения наносекундного временного диапазона. На рис. 6 представлена осциллограмма полного аperiodического импульса напряжения, зарегистрированная в схеме согласно рис. 4 с помощью указанного цифрового осциллографа и емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 (масштаб по вертикали – 5

В/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мкс/клетка). Видно, что амплитуда измеряемого импульса напряжения при его длительности на уровне 0,5 в 420 мкс равна $U_H = 12,6$ В. Поэтому опытный масштабный коэффициент k_{D2} делителя ЕДН-100 будет составлять около $31,7 \cdot 10^3$ В/12,6 В = 2515. Расчетное значение данного коэффициента равно $k_{D1} = 2C_H/C_B = 2298$.

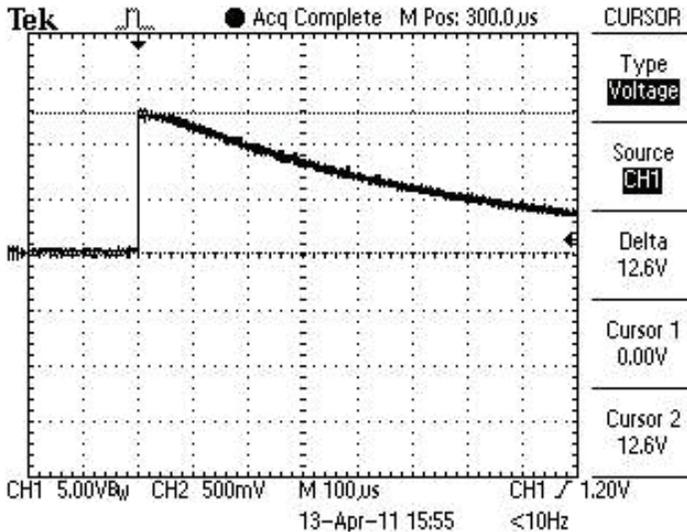


Рисунок 6 – Осциллограмма полного аperiodического импульса напряжения, полученная при помощи емкостного делителя импульсного напряжения ЕДН-100 в высоковольтной испытательной электрической схеме согласно рис. 4 ($U_{ИПР} = 31,7$ кВ)

Из данных рис. 6 явствует, что кривая микросекундного импульса напряжения, полученная с помощью ЕДН-100, искажениям не подвергается.

Выводы. Разработан, изготовлен и испытан в работе емкостный делитель импульсного напряжения типа ЕДН-100, предназначенный для измерения микросекундных импульсов высокого напряжения амплитудой до ± 100 кВ.

Список литературы: 1. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 2. Кузнецкин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с. 3. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко Ю.П. и др. 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 грозowymi и коммутационными импульсами напряжения микро- и миллисекундной длительности амплитудой до 1 МВ // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 4. – С. 60-65. 5. ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 32 с.

Поступила в редколлегию 17.10.2011