

А. А. ГУЧЕНКО, наук. сотр., НТУ «ХПИ»;
В. В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, зав. отд., НТУ «ХПИ»;
П. Н. МЕЛЬНИКОВ, наук. сотр., НТУ «ХПИ»;
А. Ю. ЧЕРНУХИН, инженер, НТУ «ХПИ»

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ АМПЛИТУДОЙ ДО 1,2 МВ

Розглянуто конструкцію розробленої й створеної в НДПКІ «Молнія» ємності на напругу до 1,2 МВ, яка використовується як формувальна ємність для забезпечення форм комутаційних імпульсів високої напруги та як ємнісний подільник напруги.

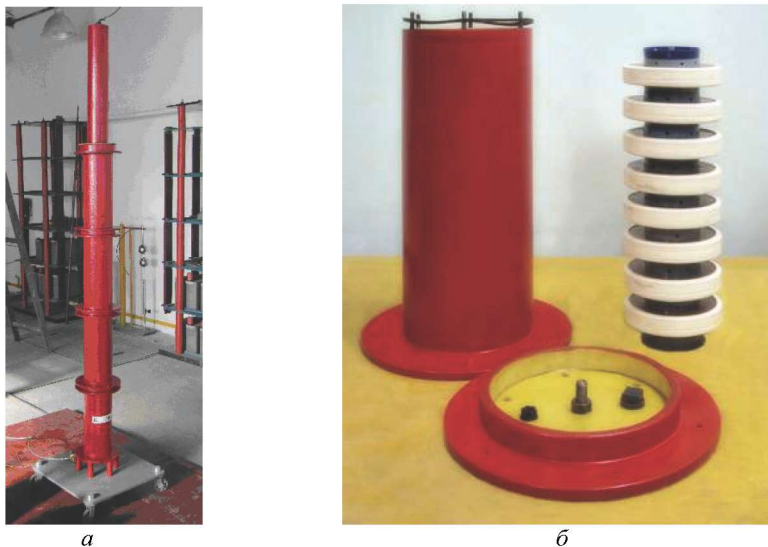
The construction developed and created in RDI «Molniya» capacity on voltage before 1,2 MV, used as forming capacity for providing forms of the high-voltage switching pulses and as capacitive divisor of the voltage is considered.

Введение. Необходимой составляющей испытаний технических средств, в частности электрооборудования и электроустановок, на электромагнитную стойкость являются испытания напряжениями коммутационных импульсов. Коммутационные перенапряжения возникают при коммутациях в электрических системах, при изменениях режимов работы либо при появлении повреждений (например, однофазных замыканий на землю). Импульсы коммутационных перенапряжений отличаются, например, от импульсов грозовых перенапряжений гораздо большей длительностью [1].

Для испытаний введен стандартный импульс аperiodической формы со временем подъема 250 мкс и спада до половины от амплитудного значения 2500 мкс, обозначаемый 250/2500. Помимо этого импульса допускается испытание технических средств импульсами с другими параметрами, например, 100/2500, 500/2500 и 1000/2500 [2]. В нормативной документации на электрооборудование отдельных видов указывается необходимость применения для испытания импульсов с параметрами, отличными от указанных.

Постановка проблемы. В НИПКИ «Молния» разработан и создан генератор импульсных напряжений (ГИН) амплитудой до 1,2 МВ, собственные параметры которого позволяют генерировать аperiodический импульс с временными параметрами 0,1/10000 мкс. Этот ГИН использовался при серии испытаний активных молниеприемников, в нормативной документации на которые (стандарт Франции NF C 17-102) указана необходимость проведения испытаний воздействием импульсов напряжения с параметрами 100–1000/10000 мкс. Так как операция перестройки ГИН, имеющего распределенные по ступеням демпфирующие и зарядно-разрядные резисторы (а существующий генератор является именно таким), довольно сложна [3], было принято решение о формировании импульса с помощью внешних дополнительных устройств – емкости формирующей (ЕФ) и фронтового резистора.

Основная часть. Разработанная и изготовленная ЕФ подключается к фронтному резистору ГИН и, являясь дополнительной емкостной нагрузкой, формирует требуемое время подъема импульса. Общий вид ЕФ приведен на рис. 1, а.



а – общий вид емкости формирующей; б – модуль в разобранном виде
Рисунок 1 – Емкость формирующая

ЕФ состоит из следующих основных частей: четырех одинаковых модулей и передвижной электрической платформы, имеющей колеса с поворотными вертикальными осями. Все модули установлены в центре платформы друг на друга соосно и соединены с помощью фланцев.

Габариты ЕФ составляют $2020 \times 620 \times 620 \text{ мм}^3$, а вес – 100 кг.

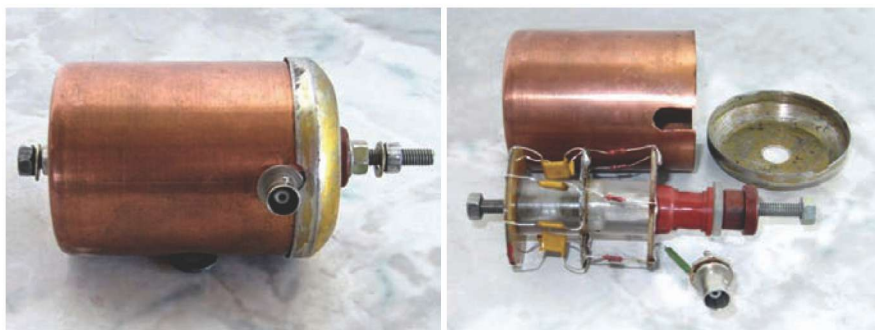
Конструкция отдельного модуля показана на рис. 1б. Корпус выполнен из отрезка стеклопластиковой трубы и заглушается с торцов с использованием уплотнительных кольцевых резиновых прокладок дисковыми фланцами из СТЭФ. Внутри по оси корпуса устанавливается блок из восьми соединенных последовательно керамических конденсаторов типа К 15-10-0,01, каждый из которых имеет емкость $C_k = 10000 \text{ пФ}$. Внутренний объем модуля заполняется трансформаторным маслом через имеющиеся на фланцах пробки с уплотнениями. Каждый модуль является универсальной сборочной единицей, способной работать как самостоятельно, так и в любой комбинации с другими модулями, будучи соединенной последовательно или параллельно. Полный вес собранного и заполненного маслом модуля составляет 21 кг.

Используемые керамические конденсаторы согласно паспорту предназначены для работы в среде трансформаторного масла, имеют номинальное

напряжение $U_n = 50$ кВ и довольно значительный разброс по величине емкости (± 20 %). С целью обеспечения максимальной надежности и качества функционирования ЕФ был принят ряд мер. Во-первых, чтобы избежать неравномерности распределения напряжения по высоте каждого модуля и ЕФ в целом, было отобрано по величине емкости требуемое количество конденсаторов $n_{\text{общ}} = 32$ (допускался разброс не более 0,5 %). Во-вторых, каждый конденсатор подвергался испытанию постоянным напряжением величиной 50 кВ в масляной ванне в течение 1 минуты, не выдержавшие испытания конденсаторы (перекрывшиеся или пробившиеся) отбраковывались. В третьих, для получения минимальной индуктивности сборка конденсаторов производилась с помощью шпилек малой длины, обеспечивающих непосредственное касание вывода предыдущего конденсатора с выводом последующего без промежуточных токопроводов. В-четвертых, исходя из многолетнего опыта проектирования и эксплуатации подобных ЕФ высоковольтных устройств на базе керамических конденсаторов, за рабочее напряжение ЕФ была принята не величина $U_n \cdot n_{\text{общ}} = 50 \cdot 32 = 1600$ кВ, а значение на 25 % меньшее, то есть – 1200 кВ.

Рассматриваемая ЕФ одновременно выполняет еще одну функцию – служит емкостным делителем для измерения формируемых импульсов напряжения. Согласно [4], ЕФ после подключения к ее нижнему концу емкости достаточной большой величины можно классифицировать как емкостный делитель напряжения с распределенными емкостями на стороне высокого напряжения.

Конструкция емкости плеча низкого напряжения показана на рис. 2.

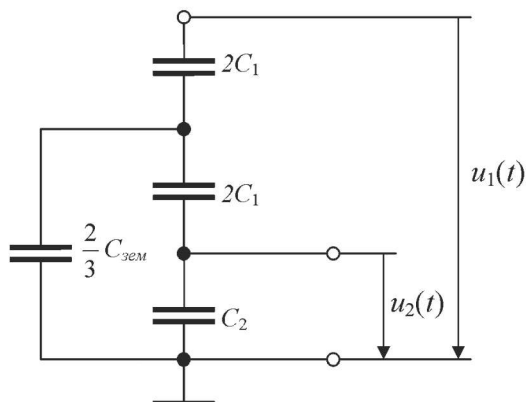


а – общий вид емкости; *б* – емкость в разобранном виде
Рисунок 2 – Емкость плеча низкого напряжения делителя

Снаружи, как видно на рис. 2, *а*, емкость представляет собой металлический экранирующий стакан, закрытый с торца крышкой, имеющий клеммы для подключения к плечу высокого напряжения с одной стороны и к заземлению с другой стороны и разъем для подключения измерительного кабеля. Пространственное расположение элементов, находящихся внутри стакана показано на рис. 2, *б*. Емкость набрана из семи параллельно включенных и расположенных коаксиально керамических конденсаторов К 10-17 на номиналь-

ное напряжение 50 В и емкостью 2 мкФ каждый. Последовательно с конденсаторами также коаксиально набран согласующий резистор общим сопротивлением 75 Ом, состоящий из семи параллельно включенных резисторов МЛТ.

Для определения расчетного коэффициента деления $K_o^{расч}$ рассматриваемого делителя применяется упрощенная схема замещения, приведенная на рис. 3.



- C_1 – емкость плеча высокого напряжения;
- C_2 – емкость плеча низкого напряжения ($C_1 \ll C_2$);
- $C_{зем}$ – емкость делителя относительно земли ($C_{зем} < C_1$);
- $u_1(t)$ – подводимое к делителю высокое напряжение;
- $u_2(t)$ – снимаемое с делителя низкое напряжение

Рисунок 3 – Упрощенная схема замещения емкостного делителя с распределенными емкостями относительно земли

Расчетный коэффициент деления с хорошим приближением записывается по [4] как

$$K_o^{расч} \approx \frac{C_1 + C_2}{C_1} \left(1 + \frac{C_{зем}}{6C_1} \right). \quad (1)$$

Последовательно соединенные конденсаторы модулей образуют емкость $C_1 = \frac{C_k}{n_{общ}} = \frac{10000}{32} = 310$ пФ.

Емкость делителя относительно земли $C_{зем}$, пФ как для вертикального цилиндра высотой H , см и диаметром D , см определяется по формуле [5]

$$C_{зем} = \frac{1,11H}{2 \ln \frac{2H}{D} - 1,1}. \quad (2)$$

После подстановки в формулу (2) размеров $H = 200$ см и $D = 9,3$ см, получается $C_{зем} = 34,6$ пФ.

Используемая емкость плеча низкого напряжения C_2 , измеренная с помощью цифрового измерителя L, C, R типа E 7-8, составляет 15,56 мкФ.

При таких численных значениях емкостей схемы замещения делителя коэффициент деления, рассчитанный по формуле (1), равен: $K_{\delta}^{расч} = 51127$.

С целью определения коэффициента деления экспериментальным путем, а также проверки функционирования делителя при воздействии на него импульсов напряжения были проведены высоковольтные испытания. К плечу высокого напряжения емкостного делителя был подсоединен высоковольтный вывод испытательного генератора типа ИГГИ-6 [6]. К разьему плеча низкого напряжения с помощью измерительного кабеля подсоединялся вход цифрового осциллографа типа TEKTRONIX TDS-1012. На рис. 4 и 5 приведены типовые осциллограммы импульсов напряжения, подаваемых на плечо высокого напряжения испытываемого емкостного делителя и снимаемых с плеча низкого напряжения. Используемый осциллограф позволяет регистрировать одновременно импульсы напряжения, подаваемые на плечо высокого напряжения делителя $u_1(t)$ и снимаемые с плеча низкого напряжения $u_2(t)$. Первая кривая регистрируется каналом осциллографа CH1, а вторая – каналом CH2, что и показано на рис. 4а и 5а. На рис. 4, б и 5, б кривые импульсов напряжения, снимаемого с плеча низкого напряжения, путем изменения вертикального масштаба изображения сигнала были совмещены по амплитуде с кривыми импульсов напряжения, подаваемого на плечо высокого напряжения делителя.

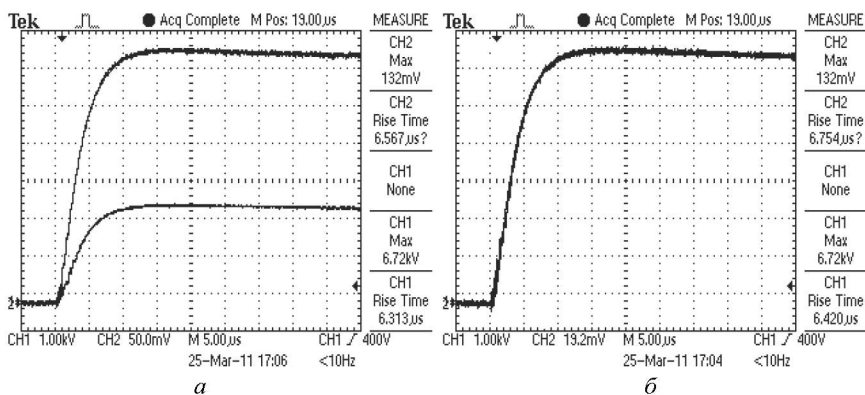


Рисунок 4 – Осциллограммы фронта импульсов напряжения

Полное совпадение импульсов по форме свидетельствует о достаточно малых временах нарастания и реакции на прямоугольный импульс испытываемого делителя, а отсутствие наложенных колебаний и выбросов доказывает малое влияние индуктивностей делителя.

После подачи и осциллографирования 20 апериодических импульсов напряжения амплитудой 6 кВ было проведено усреднение полученных данных. Коэффициент деления, определенный экспериментальным путем, вычислялся

как: $K_{\delta}^{экс} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)}$. Усреднение расчетного и экспериментальных значений да-

ет коэффициент деления рассматриваемого емкостного делителя напряжения $K_{\delta}^{ср} = 51230$. Для окончательного подтверждения полученных результатов высоковольтных испытаний предусматривается ряд экспериментов с подачей на делитель с включенными параллельно ему стандартными измерительными шарами импульсов напряжения от ГИН.

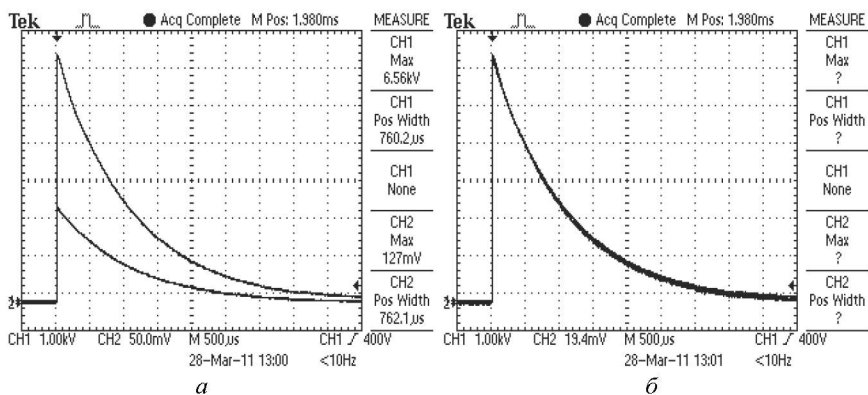


Рисунок 5 – Осциллограммы полных импульсов напряжения

Выводы

1. Разработанная и созданная в НИПКИ «Молния» емкость формирующая позволяет вместе с фронтовым резистором ГИН формировать коммутационные импульсы напряжения с амплитудой до 1,2 МВ и временными параметрами 100–1000/10000 мкс.
2. Емкостный делитель, созданный на базе формирующей емкости, пригоден к использованию в качестве измерительного средства при проведении испытаний различных технических средств на электромагнитную стойкость, совместимость, электрическую прочность изоляции и т.п. импульсами напряжения амплитудой до 1,2 МВ микро- и миллисекундного временного диапазона.

Список литературы: 1. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения : пер. с нем. / М. Бейер, В. Бек, К. Меллер, В. Цаенгль; под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 560 с. 2. Межгосударственный стандарт ГОСТ 1516.2 – 97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Киев: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с. 3. Кужескин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с. 4. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения : пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 5. Ашнер А.М. Получение и измерение импульсных высоких напряжений : пер. с нем. – М.: Энергия, 1979. – 120 с. 6. Испытательный генератор грозовых импульсов ИГИ-6. Руководство по эксплуатации. – 39 с.

Поступила в редколлегию 06.04.2011