

**О.Л. РЕЗИНКИН**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»,  
**В.И. РЕВУЦКИЙ**, преподаватель – стажер, НТУ «ХПИ»

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА МОЛНИЕСТОЙКОСТЬ В ВЫСОВОЛЬТНОМ ЗАЛЕ НТУ «ХПИ»**

Запропоновані технічні заходи щодо модернізації устаткування великого високовольтного залу НТУ „ХПІ” з метою забезпечення проведення досліджень у галузі розробки нових засобів молніезахисту та випробувань технічних об’єктів на молнієстійкість у відповідності до сучасної нормативно-технічної бази.

Предложены технические мероприятия по модернизации оборудования большого высоковольтного зала НТУ „ХПИ” с целью обеспечения проведения исследований в отрасли разработки новых средств молниезащиты и испытаний технических объектов на молниестойкость в соответствии с современной нормативно технической базы.

Upgrading of high voltage laboratory of NTU “KhPI” is proposed. The purpose of this upgrading is providing of investigations in the field of new lightning protection systems and high voltage testing of vulnerable technical objects on lightning stroke stability according to modern standards.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При проектировании молниеприемников, разработке систем экранирования, ограничителей перенапряжений, фильтров электрических помех и других средств защиты технических объектов от воздействия даров молнии, необходимо проведение высоковольтных испытаний оборудования на молниестойкость. Методологическое обеспечение высоковольтных испытаний оговаривается в ряде национальных и международных стандартов (ДСТУ, ГОСТ, ИЕС, IEEE), разработка и совершенствование которых продолжается в течение многих десятилетий по мере развития средств молниезащиты, а также возникновения новых объектов, подлежащих защите. Изменение нормативной базы приводит к необходимости постоянной модернизации оборудования высоковольтных лабораторий.

Одной из актуальных задач в области молниезащиты является испытание элементов лопастей турбин ветрогенераторов на воздействие прямого удара молнии. Актуальность этой задачи связана с тем, что в настоящее время ветроэнергетические установки являются весьма востребованными источниками возобновляемой энергии, а стоимость ремонта в случае попадания в них молнии очень высока. Проведение испытание лопастей турбин необходимо для выявления слабых мест в системе молниеприемников и токопроводов, обеспечивающих стекание тока молнии в заземлитель. Анализ результатов высоковольтных испытаний элементов лопастей турбин позволяет принимать научно обоснованные решения по совершенствованию старых и проектированию новых конструкций.

Другой актуальной задачей является испытание эффективности так называемых активных молниеотводов, разработкой которых занимается ряд зарубежных фирм. В основе принципа действия активных молниеотводов лежит расширение зоны ориентировки лидера молниевых канала на последнем этапе его приближения к земле (last stroke) путем инициирования от него восходящего лидерного канала. В настоящее время в Украине отсутствуют национальные стандарты, регламентирующие испытания данного защитного оборудования. Это связано с тем, что активные молниеотводы находятся на стадии разработки, а эффективность их использования пока в полной мере экспериментально не доказана. Тем не менее, ряд коммерческих фирм уже предлагают образцы разработанных ими активных молниеотводов потребителям и в некоторых странах (например, во Франции и Испании) приняты стандарты для их сертификации. Ряд зарубежных фирм в настоящее время уже проявляли свою заинтересованность в проведении НТУ "ХПИ" испытаний активных молниеотводов по упомянутым выше стандартам.

Обеспечение испытаний новых технических объектов и новых средств молниезащиты, приведение средств измерения параметров мощных импульсов высокого напряжения, тока, напряженностей электрического и магнитного полей в соответствие с современным уровнем развития информационно-измерительной техники делают необходимым проведение работ по модернизации оборудования высоковольтного зала НТУ "ХПИ".

## 1. ВОЗМОЖНОСТИ ИМЕЮЩЕГОСЯ ОБОРУДОВАНИЯ

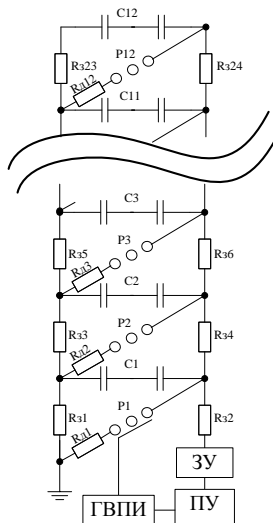
Основным высоковольтным оборудованием, применяющимся при испытаниях на молниестойкость, являются генераторы импульсных напряжений (ГИН). В настоящее время в высоковольтном зале имеется ГИН этажерочной компоновки, представляющий собой классическую многоступенчатую схему Аркадьева-Маркса [1], реализованную в виде 12 ступеней, каждая из которых собрана из двух последовательно включенных импульсных конденсаторов емкостью 0,17 мкФ.

При работе схемы Аркадьева-Маркса ступени ГИН сначала параллельно заряжаются от источника постоянного высокого напряжения, а затем, в результате срабатывания коммутаторов (в данном случае многозачерных воздушных искровых разрядников – политронов), переключаются последовательно и подключаются к нагрузке. В качестве нагрузки при проведении испытаний на устойчивость к прямым ударам молний выступает искровой промежуток, образованный высоковольтным электродом ГИН и объектом испытания, и, собственно, сам объект испытания.

Учитывая современное техническое состояние имеющихся высоковольтных импульсных конденсаторов, целесообразно их использование при уровне зарядного напряжения этажей ГИН до 100 кВ. Это позволяет проводить испытания при амплитуде испытательных импульсов до



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид (а) и электрическая схема (б) ГИН.

1.2 МВ. Эквивалентная емкость ГИН в процессе его разряда (так называемая емкость ГИН в ударе) составляет при этом  $C_{уд} = 7.1$  нФ, а запасаемая энергия  $W_{зап} = 850$  Дж.

Зарядное устройство ГИН состоит из регулятора напряжения (лабораторного автотрансформатора), высоковольтного трансформатора ИОМ 100/25 и однополупериодной схемы выпрямления. Для контроля зарядного напряжения предусмотрен омический делитель напряжения и подключенный к его низковольтному плечу измерительный прибор. Пульт управления установки содержит схемы блокировки и сигнализации, выполненные на электромеханической аппаратуре.

Высоковольтное измерительное оборудование зала состоит из измерительных шаров диаметром 1.5 м, позволяющих проводить измерение амплитуды выходного импульсного напряжения ГИН в соответствии с ГОСТ 17512—82. Импульсного измерительного делителя напряжения, позволяющего регистрировать форму импульсов ГИН при полном зарядном напряжении, в настоящее время в высоковольтном зале не имеется.

Для проверки функционирования ГИН была проведена регистрация его выходного напряжения при неполной зарядке. На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения на семи ступенях ГИН при их заряде до напряжения 50 кВ. Разряд ГИН проводился на омическую нагрузку  $R_n = 5$  кОм. Измерения выполнялись при помощи портативного высоковольтного емкостного делителя напряжения, максимальная амплитуда регистрируемого импуль-

са которого составляет 500 кВ. Делитель снабжен оптронной развязкой высоковольтной и низковольтной регистрирующих частей, связь между которыми выполнена по световоду длиной 30 м. Регистрация выходных импульсов делителя напряжения проводилась цифровым двухканальным осциллографом Tektronix TDS 1012, запитанным от автономного источника питания и размещенном в помещении, отделенном от высоковольтного зала железобетонной стеной. Тестирование данной измерительной системы показало, что уровень синфазной импульсной электромагнитной помехи на входе осциллографа ниже полезного сигнала не менее чем на 80 дБ.

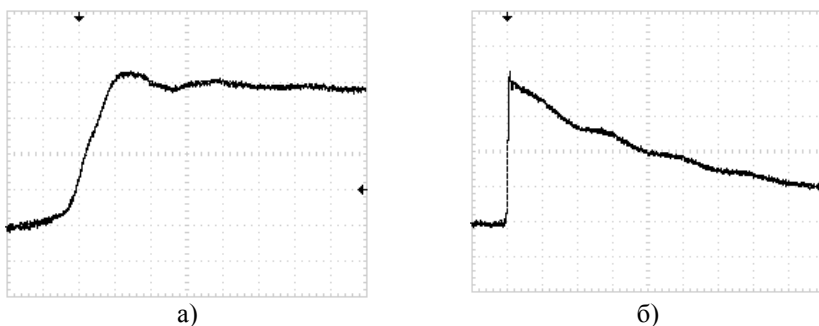


Рис. 2. Осциллограммы напряжения ГИН при неполной зарядке.  
а) фронт (250 нс/дел; 80 кВ/дел); б) спад (5 мкс/дел; 80 кВ/дел)

Повторная регистрация выходного напряжения ГИН показала отличную повторяемость генерируемых им высоковольтных импульсов, что свидетельствует о надежной работе многоазорных искровых коммутаторов и системе запуска схемы. Анализ формы напряжения на седьмой ступени ГИН показал, что при использовании полной схемы и соответствующей формирующей фронтальной емкости на его выходе может быть получен стандартный грозовой импульс напряжения, соответствующий МЭК 62305-1, ГОСТ Р 51992-2002.

## 2. ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ

Для проведения испытаний современных технических объектов (например, элементов ветротурбин, нефте- и газоперекачивающих станций, авиационной техники) и новых средств молниезащиты – активных молниеотводов, рассеивателей заряда (Charge Dissipation Terminal), а также для обеспечения возможности проведения научно-исследовательской работы по физике молнии, в высоковольтном зале НТУ "ХПИ" следует провести комплекс работ, включающих модернизацию имеющегося и разработку нового лабораторного оборудования. В соответствии с рядом международных и национальных стандартов (например [2, 3]) испытания должны проводиться при монотонном нарастании испытательного напряжения на исследуемых образцах в течение нескольких сотен микросекунд. В соответствии с требованиями дан-

ных стандартов длина искровых промежутков, отделяющих объект испытания от высоковольтных электродов системы полеобразования, должна составлять более одного метра, что соответствует уровню испытательного напряжения более одного миллиона вольт.

При разработке плана модернизации оборудования зала проведено компьютерное моделирование работы испытательного стенда, состоящего из ГИН, формирующего устройства, нагрузки и измерительного импульсного делителя напряжения, подключенного параллельно нагрузке. На рис. 3 представлена модель испытательного стенда, выполненная при помощи системы схемотехнического моделирования Micro-Cap.

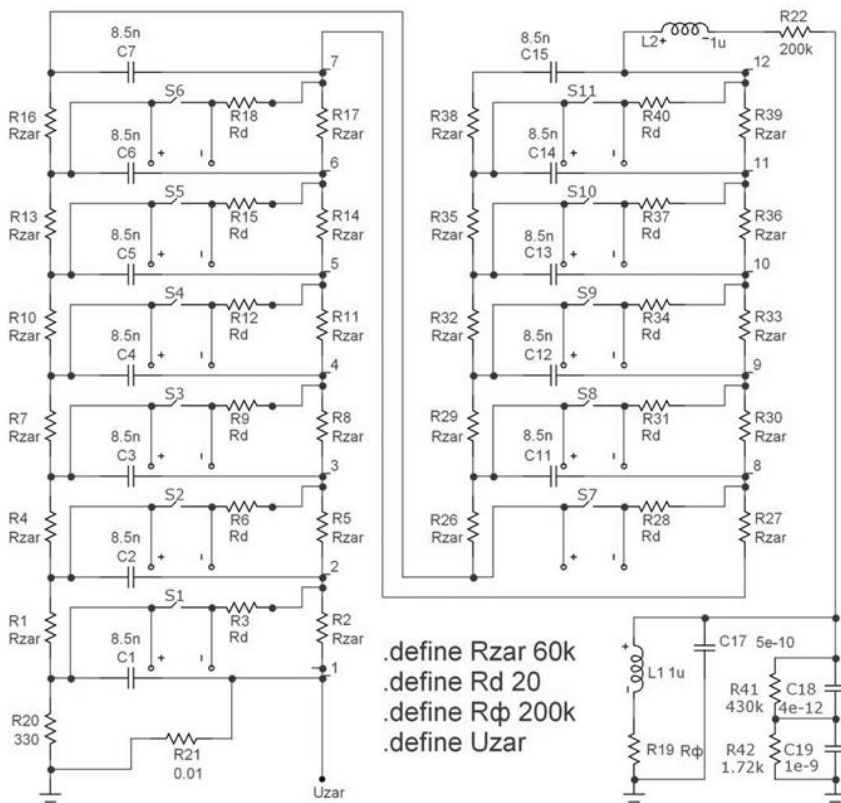


Рис. 3. Компьютерная модель схемы испытательного стенда после модернизации

В состав формирующего устройства входит резистор  $R_{\phi} = 200$  кОм и конденсатор  $C_{\phi} = 500$  пФ. Эквивалентные входные сопротивление и емкость измерительного делителя составляют соответственно  $R_{д} = 430$  кОм и конденсатор  $C_{д} = 4$  пФ. Емкость системы полеобразования оценена расчетным путем исходя из ее геометрических размеров на основании требований [2]. Величина этой емкости составила  $C_{п} = 8$  пФ. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 4 в виде графика зависимости напряжения на высоковольтном электроде системы полеобразования от времени. Из приведенной зависимости видно, что при указанных значениях параметров схемы ГИН и подключенных к его выходу формирующих элементов форма напряжения на нагрузке соответствует требованиям стандартов [2, 3].

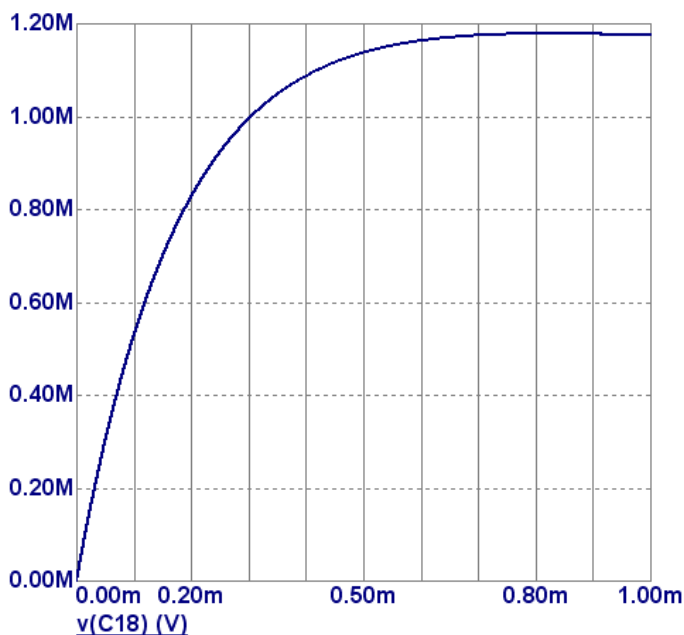


Рис. 4. Результаты моделирования напряжения на высоковольтном электроде

Для реализации предложенной схемы необходимо дополнить испытательный комплекс высоковольтного зала следующим высоковольтным оборудованием:

1. Устройством формирования, состоящим из высоковольтного импульсного конденсатора и резистора. Емкость конденсатора и сопротивление ре-

зистора должны соответствовать параметрам приведенной компьютерной модели, а рабочее напряжение - выходному напряжению ГИН (1.2 МВ).

2. Высоковольтными зарядными резисторами (в соответствии с параметрами приведенной компьютерной модели).

3. Полеобразующей системой, удовлетворяющей требованиям стандартов [2, 3].

4. Импульсным измерительным делителем напряжения, позволяющим проводить регистрацию формы импульсов в диапазоне времен от сотен наносекунд до единиц миллисекунд при их амплитуде от 50 кВ до 1.5 МВ.

Для работы ГИН при субмиллисекундной длительности фронта испытательных импульсов требуется произвести замену установленных зарядных резисторов ГИН на новые, отличающиеся большей величиной сопротивления. Сопротивления имеющихся резисторов не позволяют генерировать импульсы, имеющие длительность фронта несколько сотен микросекунд. Это связано с тем, что в процессе такого длительного разряда ГИН возникают значительные потери энергии, связанных с разрядом его емкостей через схему заряда. Разработанные зарядные резисторы выполнены в герметичных корпусах изготовленных из поливинилхлоридных водопроводных труб, в которые помещены по 8 резисторов типа ТВО – 5, соединенных последовательно. На концах труб напаяны стандартные фитинги, с установленными на них выводами резисторов. Корпуса резисторов заполнены изоляционным маслом ВГ, что обеспечивает электрическую прочность конструкции во всем возможном диапазоне зарядных напряжений.

Для метрологического обеспечения испытаний, в высоковольтном зале должно быть оборудование для осциллографических измерений импульсов испытательного напряжения. Таким оборудованием является импульсный делитель напряжения, изоляция которого должна выдерживать выходной импульс ГИН при его полном заряде.

Разработанный высоковольтный емкостно-омический делитель (рис. 5) имеет автономное питание и оптронную развязку выходного сигнала. Это обеспечивает гальваническую развязку измерительных цепей с контуром заземления и с сетью питания высоковольтного зала. Информация о форме измеренного импульсного напряжения передается от делителя в фотоприемник по световоду длиной 30 м и затем регистрируется цифровым осциллографом.

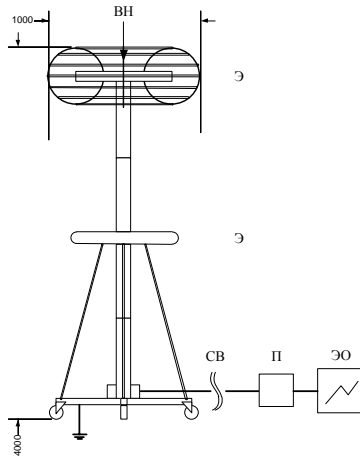


Рис. 5. Высоковольтный емкостно-омический делитель напряжения.  
 ВН – высокое напряжение, Э – экраны, СВ – световод,  
 П – преобразователь, ЭО – электронный осциллограф

Делитель оборудован подвижной платформой, которая обеспечивает возможность его перемещение по высоковольтному залу. Конструкция делителя модульная разборная. Высоковольтное плечо делителя состоит из 4 модулей, которые соединены между собой с помощью резьбового соединения. Каждый модуль содержит 13 групп соединенных последовательно – параллельно конденсаторов 2хПОВ 330 пФ 16 кВ и резисторов ТВО-5 - 8.2 кОм.

### Выводы.

Высоковольтное оборудование большого высоковольтного зала НТУ "ХПИ" может быть использовано для испытаний новых видов средств защиты технических объектов от воздействия даров молнии и других научно-исследовательских целей в том случае, если оно будет модернизировано и дополнено формирующим устройством, увеличивающим длительность фронта импульса высокого напряжения, а также измерительным комплексом для осциллографической регистрации испытательных импульсов.

**Список литературы:** 1. Генераторы импульсов высокого напряжения / Смирнов С.М., Терентьев П.В. – М.: Энергия, 1964. – 239с. 2. French Standard: Protection of structures and open areas against lightning using ESE air terminals. — NF C 17 102. — 1995. — P. 65. 3. Spanish Standard: Protection of structure and of open areas against lightning using early streamer emission air terminals. — UNE 21186. — 1996.