

ПОЛУЧЕНИЕ СТАНДАРТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Приведені результати отримання відповідно до вимог міждержавного ГОСТ 1516.2-97 на модернізованому високовольтному устаткуванні експериментального полігону НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ" в двоелектродній повітряній системі "голка-плоскість" стандартних комутаційних аперіодичних імпульсів напруги часової форми 205/1900 мкс амплітудою до 2 МВ.

Приведены результаты получения в соответствии с требованиями межгосударственного ГОСТ 1516.2-97 на модернизированном высоковольтном оборудовании экспериментального полигона НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" в двухэлектродной воздушной системе "игла-плоскость" стандартных коммутационных аперіодических импульсов напряжения временной формы 205/1900 мкс амплитудой до 2 МВ.

ВВЕДЕНИЕ

При определении электрической прочности изоляции различных электроэнергетических объектов (например, выключателей, разъединителей, высоковольтных вводов, трансформаторов тока, подвесных изоляторов и воздушной изоляции линий электропередачи и др.) сейчас в соответствии с требованиями межгосударственного ГОСТ 1516.2-97 используются генераторы стандартных коммутационных аперіодических импульсов высокого и сверхвысокого напряжения временной формы $T_{II}/\tau_{II} \approx (250 \pm 50)/(2500 \pm 750)$ мкс, где T_{II} , τ_{II} – соответственно время подъема импульса напряжения до своей амплитуды U_m и длительность генерируемого импульса напряжения на уровне $0,5 \cdot U_m$ [1, 2]. Обычно полярность этих импульсов выбирается положительной, для которой твердая, жидкая и газовая изоляция объектов промышленной электроэнергетики имеет наиболее низкие разрядные электрические градиенты и соответственно пониженную электрическую прочность [2, 3]. Поэтому создание подобного испытательного электрооборудования на высокое и особенно сверхвысокое импульсное напряжение сопряжено с весьма большими техническими трудностями, материальными и финансовыми затратами. При разработке, выборе элементной базы и изготовлении таких генераторов главной трудностью является ослабленная электрическая прочность их собственных изоляционных конструкций, испытывающих воздействие указанного импульсного напряжения микро- и миллисекундного временных диапазонов. Кроме того, требуется отметить, что при проведении натурных испытаний различных объектов электроэнергетики на электрическую прочность их изоляции часто требуются генераторы коммутационных импульсов напряжения указанных амплитудно-временных параметров (АВП) наружной установки.

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЗДАННОГО ГЕНЕРАТОРА СТАНДАРТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

В НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" в 2012 году был создан и введен в опытную эксплуатацию генератор коммутационных импульсов напряжения (ГКИН), позволяющий проводить в полевых условиях натур-

ные испытания различных объектов электроэнергетики на воздействие стандартных аперіодических импульсов напряжения положительной (отрицательной) полярности временной формы $T_{II}/\tau_{II} \approx 205/1900$ мкс при их амплитуде U_m до 2 МВ. Для его создания нами был использован модернизированный генератор импульсных напряжений ГИН-4 этажерочного типа на номинальное напряжение 4 МВ и номинальную запасаемую электрическую энергию 1 МДж (рис. 1) [4, 5], размещенный на открытом воздухе на исследовательско-экспериментальном полигоне НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" (п. Андреевка, Харьковской обл.).

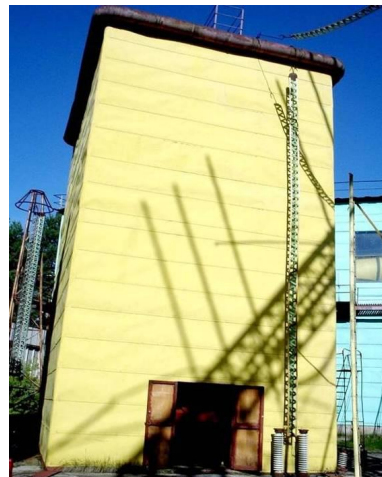


Рис. 1. Общий вид генератора импульсных напряжений ГИН-4 на номинальное напряжение 4 МВ и номинальную запасаемую электрическую энергию 1 МДж, входящего в состав созданного ГКИН на напряжение U_m до 2 МВ [4, 5]

Все низкоомные зарядные резисторы $R_3 \approx 500$ Ом в количестве 32 штук электрических цепей всех высоковольтных каскадов генератора ГИН-4 (рис. 2) при этом были заменены на высокоомные, каждый из которых имел активное сопротивление $R_3 \approx 30$ кОм (рис. 3) [6]. Данный ГКИН, общий вид которого приведен на рис. 4, содержит в своем составе: мощный генератор ГИН-4 с модернизированными зарядными цепями обеих электрических полярностей на постоянное зарядное напряжение U_3 до ± 125 кВ и собственным разрядным сопротивлением $R_{PI} \approx 440$ кОм;

© М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, В.И. Кравченко

нагрузочную емкость $C_H \approx 13,3$ нФ на номинальное импульсное напряжение 3 МВ; формирующий резистор $R_\phi \approx 4,28$ кОм на номинальное импульсное напряжение 2,5 МВ; дополнительный разрядный резистор $R_{p1} \approx 32,7$ кОм на номинальное импульсное напряжение 2,5 МВ; токоограничивающий резистор $R_T \approx 4,59$ кОм на номинальное импульсное напряжение 2,5 МВ; омический делитель импульсного напряжения ОДН-2 собственной разработки на номинальное напряжение 2,5 МВ.

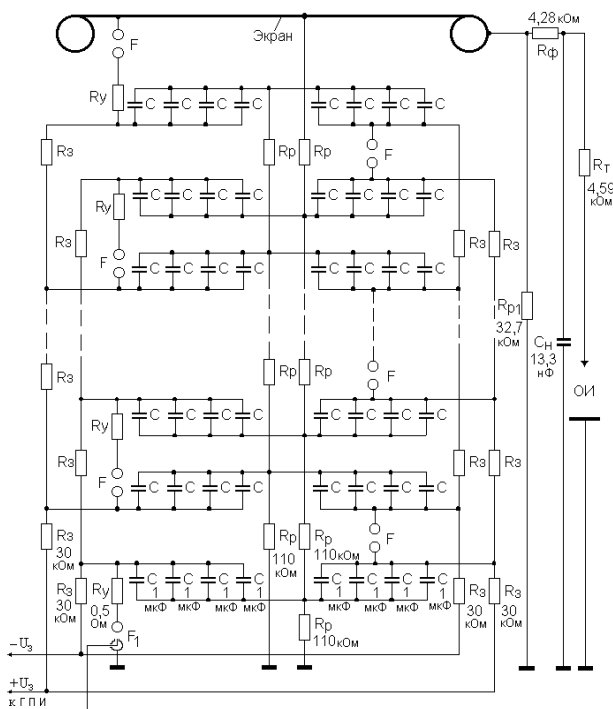


Рис. 2. Электрическая схема замещения модернизированного генератора импульсных напряжений ГИН-4, подсоединенного в схеме формирования стандартных коммутационных аperiodических импульсов напряжения к дополнительному разрядному $R_{p1} \approx 32,7$ кОм, формирующему $R_\phi \approx 4,28$ кОм и токоограничивающему $R_T \approx 4,59$ кОм резисторам, нагрузочной емкости $C_H \approx 13,3$ нФ и ОИ – двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длинным воздушным разрядным промежутком

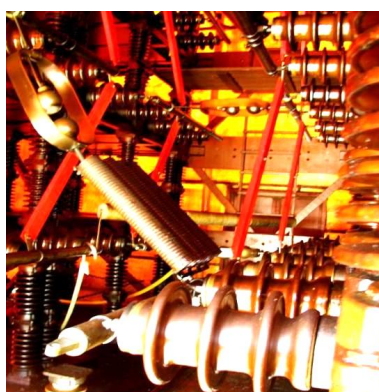


Рис. 3. Общий вид основных элементов модернизированного зарядно-разрядного контура (ЗПК) генератора ГИН-4, содержащего в зарядных цепях положительной и отрицательной полярностей своих высоковольтных каскадов 32 штуки высокоомных резисторов $R_3 \approx 30$ кОм



Рис. 4. Общий вид генератора для формирования на активно-индуктивной нагрузке стандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения временной формы 205/1900 мкс амплитудой U_m до 2 МВ (слева видна изоляционная опора с нагрузочной емкостью $C_H \approx 13,3$ нФ, к верхнему потенциальному электроду которой подсоединены формирующий $R_\phi \approx 4,28$ кОм и токоограничивающий $R_T \approx 4,59$ кОм резисторы)

На рис. 5 представлена электрическая схема замещения разрядной цепи ГКИН, содержащая активное сопротивление $R_D \approx 107,3$ кОм высоковольтного плеча омического делителя импульсного напряжения ОДН-2 изготовления НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", подключенного к выбранному нами объекту испытаний (ОИ) – двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длинным воздушным разрядным промежутком.

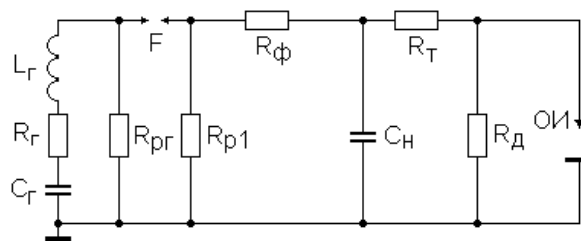


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема замещения разрядной цепи ГКИН, формирующего на ОИ – длинном разрядном воздушном промежутке двухэлектродной системы "игла-плоскость" стандартный коммутационный аperiodический импульс высокого и сверхвысокого напряжения обеих электрических полярностей временной формы $T_{11}/\tau_{1f} \approx 205/1900$ мкс амплитудой U_m до 2 МВ

Генератор ГИН-4 согласно схеме на рис. 2 содержит 16 штук высоковольтных каскадов на 250 кВ, каждый из которых имеет восемь импульсных конденсаторов в металлическом корпусе типа КБМГ-125/1 (номинальное напряжение 125 кВ, номинальная емкость 1 мкФ) разработки НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" и один неуправляемый двухэлектродный воздушный шаровой разрядник F с диаметром электродов 125 мм [4, 5]. Параллельный заряд данных конденсаторов осуществляется от мощного высоковольтного зарядного устройства ГКИН через цепочки зарядных $R_3 \approx 30$ кОм (в количестве 32 штук) и разряд-

ных $R_p \approx 110$ кОм (в количестве 16 штук) резисторов на номинальное напряжение до 500 кВ. Каждый из высоковольтных зарядных резисторов R_3 был выполнен на основе последовательно соединенных и залитых эпоксидным компаундом 100 штук объемных графито-керамических резисторов ТВО-5-300 Ом, а каждый разрядный резистор R_p – из последовательно соединенных и закрепленных на гетинаксовой пластине 50 штук объемных графито-керамических резисторов ТВО-10-2,2 кОм.

Первая секция высоковольтных конденсаторов нижнего этажа генератора ГИН-4 содержала управляемый трехэлектродный воздушный разрядник – тригatron F_1 [7] с диаметром основных шаровых электродов 125 мм, который управляется путем подачи на его управляющий электрод высоковольтного микросекундного импульса напряжения амплитудой до ± 10 кВ от генератора пусковых импульсов (ГПИ) разработки НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" [8]. Примененный генератор ГИН-4 в разрядной цепи ГКИН характеризуется следующими собственными электрическими параметрами: "емкостью в разряде" $C_T \approx 0,125$ мкФ; индуктивностью $L_T \approx 80$ мкГн; активным сопротивлением $R_T \approx 4,5$ Ом, определяемым последовательно включенными при срабатывании генератора ГИН-4 его девятью успокоительными (демпфирующими) резисторами $R_V \approx 0,5$ Ом. Изоляционная несущая конструкция генератора ГИН-4 выполнена на основе 576 штук фарфоровых опорных изоляторов КО-400С [4, 5].

Нагрузочная емкость $C_H \approx 13,3$ нФ разрядной цепи ГКИН выполнена на основе 30 штук последовательно включенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-100-0,4 (номинальное напряжение 100 кВ, номинальная емкость 0,4 мкФ) [9], которые были размещены на изоляционной опоре высотой 11 м (по 3 штуки на ее каждой из десяти секций), собранной из 52 штук фарфоровых опорных изоляторов ОНС-110/1000 (рис. 6). Формирующий резистор $R_\phi \approx 4,28$ кОм длиной 8,5 м выполнен из 40 штук последовательно включенных резистивных цепочек, каждая из которых была собрана из двух объемных графито-керамических резисторов ТВО-60 номиналом 51 и 56 Ом. Дополнительный разрядный резистор $R_{p1} \approx 32,7$ кОм длиной 10 м в нашем случае выполнен из 50 штук последовательно соединенных резистивных цепочек, каждая из которых состоит из двух объемных графито-керамических резисторов ТВО-60 номиналом 100 и 560 Ом. Токоограничивающий резистор $R_T \approx 4,59$ кОм длиной 9 м, обеспечивающий протекание в разрядной цепи ГКИН при электрическом пробое воздушного промежутка ОИ аperiodического импульса тока амплитудой до 440 А, по аналогии с формирующим резистором R_ϕ был выполнен из 90 штук последовательно включенных объемных графито-керамических резисторов ТВО-60-51 Ом.

Высоковольтное плечо примененного омического делителя импульсного напряжения ОДН-2 (рис. 7) было выполнено на основе девяти последовательно соединенных резистивных секций общей длиной 12,6 м, каждая из которых была изготовлена на основе двух параллельных резистивных цепочек с применением 20 штук объемных графито-керамических резисторов

ТВО-10-2,4 кОм. Измеренное общее активное сопротивление высоковольтного плеча делителя составило $R_{\Sigma} \approx 107,3$ кОм. Низковольтное плечо нашего омического делителя импульсного напряжения ОДН-2 было выполнено из двух маломощных графито-керамических резисторов ТВО-2-2 Ом с общим активным сопротивлением 4 Ом. При расчетном коэффициенте деления в ОДН-2 $K_{\Sigma} \approx 26825$ с учетом согласованного подключения омического делителя импульсного напряжения ОДН-2 к ОИ и цифровому осциллографу его масштабный коэффициент в проводимых экспериментах был примерно равным $2K_{\Sigma} \approx 53650$.



Рис. 6. Общий вид созданной и установленной на существующей изоляционной опоре нагрузочной емкости $C_H \approx 13,3$ нФ на номинальное импульсное напряжение 3 МВ, примененной в разрядной цепи описываемого ГКИН



Рис. 7. Общий вид делителя ОДН-2 на номинальное напряжение 2,5 МВ, подсоединенного в разрядной цепи ГКИН к двухэлектродной системе "игла-плоскость"

Заметим, что на рис. 7 двухэлектродная система "игла-плоскость" имела воздушный промежуток длиной 3 м. Причем, верхний круглый заостренный стальной электрод $\varnothing 25$ мм данной двухэлектродной системы был размещен по центру ее нижнего плоского электрода, выполненного из тонкой оцинкованной стали с габаритными размерами 5×5 м².

2. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛУЧЕНИЯ В РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ СОЗАННОГО ГКИН КОММУТАЦИОННЫХ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

На рис. 8 приведена осциллограмма полного стандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения $T_{II}/\tau_{II}=205/1900$ мкс положительной полярности при его амплитуде $U_m \approx 622$ кВ, полученная в разрядной цепи ГКИН на двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длиной воздушного промежутка в 3 м (см. рис. 7). При измерении АВП формируемых ГКИН на используемом ОИ импульсов напряжения был применен омический делитель импульсного напряжения ОДН-2 с экранированной кабельной линией передачи полезного электрического сигнала длиной до 60 м и запоминающий цифровой осциллограф Tektronix TDS 1012, размещенный вдали от ГКИН в заглубленном экранированном измерительном бункере.

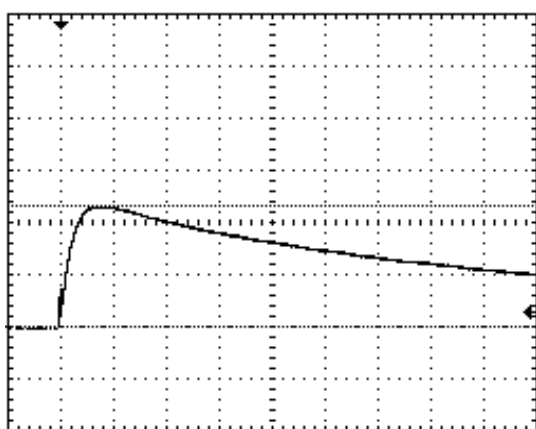


Рис. 8. Осциллограмма полного коммутационного аperiodического импульса напряжения положительной полярности на двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длиной воздушного промежутка в 3 м ($U_3 \approx \pm 32$ кВ; $U_m \approx 622$ кВ; $T_{II} \approx 205$ мкс; $\tau_{II} \approx 1900$ мкс; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 250 мкс/клетка)

На рис. 9 представлена осциллограмма нарастающей части полного стандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения положительной полярности амплитудой $U_m \approx 966$ кВ ($T_{II} \approx 205$ мкс) на двухэлектродной системе "игла-плоскость" согласно рис. 7 с длиной воздушного промежутка в 3 м. Из данных рис. 9 следует, что на фронте генерируемого с помощью мощного ГКИН стандартного коммутационного аperiodического импульса сверхвысокого напряжения ($U_m \approx 966$ кВ) временной формы $T_{II}/\tau_{II}=205/1900$ мкс наблюдается пикообразный всплеск длительностью до 7 мкс.

Отметим, что этот всплеск напряжения обусловлен особенностями работы генератора ГИН-4 из-за наличия в нем массивного металлического экрана (крыши) площадью до 60 м^2 и быстрого заряда его паразитной емкости от разряда импульсных конденсаторов $C \approx 1$ мкФ всех каскадов при срабатывании разрядников F_1 и F , установленных в ЗРК данного генератора импульсных напряжений.

На рис. 10 показана осциллограмма срезанного стандартного коммутационного аperiodического импульса сверхвысокого напряжения положительной по-

лярности при пробое на его нарастающей части воздушного промежутка длиной 3 м в используемой согласно рис. 7 двухэлектродной системе "игла-плоскость". Атмосферный воздух при этом характеризовался следующими зафиксированными параметрами: температурой ~ 19 °С; давлением ~ 741 мм рт. ст.; относительной влажностью ~ 76 %. В этом случае импульсное напряжение среза составляло $U_c \approx 1030$ кВ, а время среза – $T_c \approx 110$ мкс. Кроме того, важно отметить, что из-за наличия в разрядной цепи созданного ГКИН высокоомного токоограничивающего резистора $R_T \approx 4,59$ кОм после электрического среза на промежутке ОИ генерируемого импульса напряжения на его кривой отсутствуют какие-либо колебания (см. рис. 10).

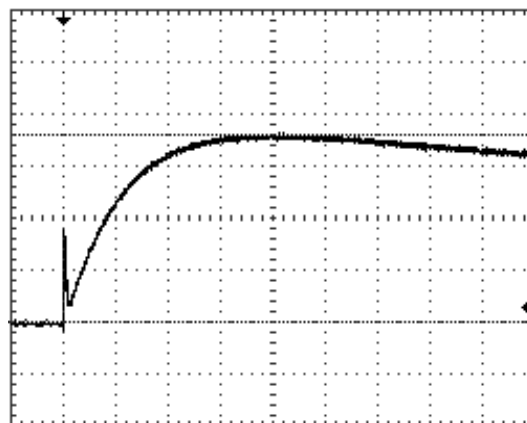


Рис. 9. Осциллограмма нарастающей части полного коммутационного аperiodического импульса напряжения положительной полярности на двухэлектродной системе "игла-плоскость" с длиной воздушного промежутка 3 м ($U_3 \approx \pm 51$ кВ; $U_m \approx 966$ кВ; $T_{II} \approx 205$ мкс; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

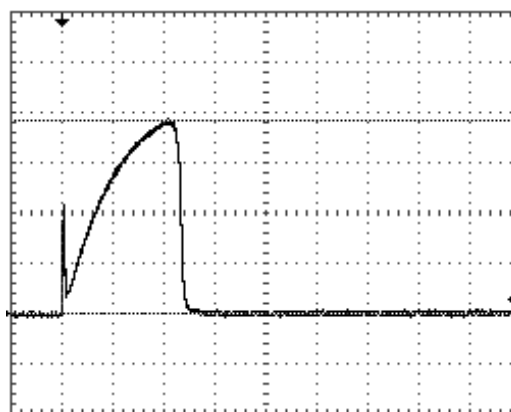


Рис. 10. Осциллограмма срезанного коммутационного аperiodического импульса напряжения положительной полярности при электрическом пробое воздушного промежутка длиной 3 м в двухэлектродной системе "игла-плоскость" ($U_3 \approx \pm 60$ кВ; $U_c \approx 1030$ кВ; $T_c \approx 110$ мкс; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

ВЫВОДЫ

В НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" на основе модернизированного сотрудниками отдела №6 генератора ГИН-4 в 2012 году был создан мощный стационарный генератор стандартных коммутационных аperiodических импульсов напряжения положительной (отрица-

тельной) полярности, способный формировать на активно-индуктивной нагрузке испытательные импульсы напряжения временной формы $T_{II}/\tau_{II} \approx 205/1900$ мкс с амплитудой U_m до 2 МВ. Данный генератор наружной установки может быть использован для проведения на открытом воздухе натуральных испытаний электрической прочности твердой, жидкой и газовой изоляции основных объектов промышленной электроэнергетики к воздействию на них коммутационных перенапряжений амплитудой от сотен до 2000 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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, 1997. – 31 с.
2. Бейер М., Бёк В., Мёллер К. и др. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы ее применения / Пер. с нем. под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 556 с.
3. 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.
4. Пекарь И.Р., Фертик С.М. Мощная высоковольтная электроразрядная установка на 4 МВ и 1 МДж // Сб. докл. межвуз. конф.: "Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция". – М.: Энергия, 1970. – С. 22-26.
5. Баранов М.И., Бочаров В.А., Игнатенко Н.Н. и др. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования // Электротехника и электромеханика. – 2003. – № 2. – С. 75-80.
6. Баранов М.И., Зиньковский В.М., Зябко Ю.П. и др. Влияние зарядных резисторов генератора импульсных напряжений на длительность формируемых на нагрузке аperiodических импульсов сверхвысокого напряжения // Вісник НТУ "ХПИ". Вип. "Техніка та електрофізика високих напруг". Харьков: НТУ "ХПИ", 2012. – № 52 (958). – С. 15-25.
7. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
8. Бочаров В.А., Пекарь И.Р. Малоиндуктивные генераторы импульсных напряжений // Приборы и техника эксперимента. – 1982. – № 3. – С. 115-117.
9. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н. и др. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

Bibliography (transliterated): 1. Mezhsudarstvennyj standart GOST 1516.2-97. `Elektrooborudovanie i `elektrostanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vyshе. Obschie metody ispytaniy `elektricheskoy prochnosti izolyacii. Minsk: Izd-vo standartov, 1997. – 31 s. 2. Bejer M., Bek V., Meller K. i dr. Tehnika vysokih napryazhenij: teoreticheskie i prakticheskie osnovy ee primeneniya / Per. s nem. pod red. V.P. Lari-onova. – M.: `Energoatomizdat, 1989. – 556 s. 3. GOST 17512-82. `El-ektrooborudovanie i `elektrostanovki na napryazhenie 3 kV i vyshе. Metody izmereniya pri ispytaniyah vysokim napryazheniem. – M.: Izd-vo standartov, 1982. – 32 s. 4. Pekar' I.R., Fertik S.M. Moschnaya vysokovol'tnaya `elektrozryadnaya ustanovka na 4 MV i 1 MDzh // Sb. dokl. mezhvuz. konf.: "'Elektrofizicheskaya apparatura i `elektricheskaya izolyaciya". – M.: `Energiya, 1970. – S. 22-26. 5. Baranov M.I., Bocharov V.A., Ignatenko N.N. i dr. Moschnye generatory impul'snyh napryazhenij i tokov predel'nyh parametrov dlya testirovaniya silovogo `elektro`energeticheskogo oborudovaniya // Elektrotehnika i elektromehaniка. – 2003. – № 2. – S. 75-80. 6. Baranov M.I., Zin'kovskij V.M., Zybko Yu.P. i dr. Vliyanie zaryadnyh rezistorov generatora impul'snyh napryazhenij na dlitel'nost' formiruemyh na nagruzke aperiodicheskikh impul'sov sverhvyssokogo napryazheniya // Visnik NTU "HPI". Vip. "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Har'kov: NTU "HPI", 2012. – № 52 (958). – S. 15-25. 7. Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej/ Pod red. V.S. Komel'kova. – M.: Atomizdat, 1970. – 472 s. 8. Bocharov V.A., Pekar' I.R. Maloinduktivnye generatory impul'snyh napryazhenij // Pribory i tehnika `eksperimenta. – 1982. – № 3. – S. 115-117. 9. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevskij M.N. i dr. `Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki: Spravochnik. – M.: `Energoatomizdat, 1987. – 256 s.

Поступила 11.01.2013

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,
Колушко Георгий Михайлович, к.т.н., с.н.с.,
Кравченко Владимир Иванович, д.т.н., проф.
НИПКИ "Молния"
Национального технического университета
"Харьковский политехнический институт".
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47
тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I.
Generation of standard switching aperiodic impulses of high and superhigh voltage for full-scale tests of electrical power objects.

Results of generation of standard switching aperiodic impulses of 205/1900- μ s upto-2-MV voltage in a double-electrode "needle-plane" air system are presented. The impulse generation complies with requirements of intergovernmental State Standard 1516.2-97, rebuilt high-voltage equipment of the experimental ground of NTU "KhPI" Reseach & Design Institute "Molniya" used.

Key words – switching impulses of high and superhigh voltage, full-scale tests, electrical power objects.