

М.И. Баранов, С.Г. Буряковский, В.В. Князев

МОЩНЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ ГЕНЕРАТОР МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ АМПЛИТУДОЙ ДО ± 2 МВ И ТОКА АМПЛИТУДОЙ ДО ± 150 кА С ЗАПАСАЕМОЙ В КОНДЕНСАТОРАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ДО 1 МДж

Запропонована і апробована нова схема побудови потужного надвисоковольтного сильнострумного генератора імпульсних напруг та струмів ГІНС-2 зовнішньої установки, що формує на активно-індуктивному навантаженні мікросекундні імпульси напруги амплітудою до ± 2 МВ і струму амплітудою до ± 150 кА при електричній енергії, що запасасться, до 1 МДж. Даний генератор побудований на основі розміщеного в польових умовах модернізованого стаціонарного генератора ГІНС-4 на номінальну напругу ± 4 МВ і номінальний струм амплітудою ± 75 кА з електричною енергією, що запасасться в його високовольтних конденсаторах, номінальним значенням 1 МДж. Приведені описи схемних і конструктивних вирішень генератора ГІНС-2, що дозволяють забезпечити при збереженні основної електротехнічної елементної бази генератора ГІНС-4 отримання на довгому розрядному повітряному проміжку двоелектродної системи «золка-плоскість» імпульсів струму мікросекундної тривалості з подвоєною амплітудою в порівнянні з параметрами імпульсів струму, що формуються в розрядному колі генератора ГІНС-4 з використанням аналогічної двоелектродної системи. Переведення генератора ГІНС-4 в режим роботи генератора ГІНС-2 із зменшенням удвічі рівнем вихідної імпульсної напруги і збільшенням удвічі рівнем вихідного імпульсного струму обумовлено вимогами стандартів НАТО АЕСТР-250: 2014 і США MIL-STD-464C: 2010 при випробуваннях технічних об'єктів на електромагнітну сумісність і несприйнятність до дії на них потужних електромагнітних завад від атмосферних грозових сильнострумних електричних розрядів (блискавок). Бібл. 19, рис. 6.

Ключові слова: надвисоковольтний сильнострумний генератор імпульсів напруги і струму, технічні об'єкти військового призначення, стандарти випробувань на електромагнітну сумісність і блискавкостійкість.

Предложена и апробирована новая схема построения мощного сверхвысоковольтного сильноточного генератора импульсных напряжений и токов ГИНС-2 наружной установки, формирующего на активно-индуктивной нагрузке микросекундные импульсы напряжения амплитудой до ± 2 МВ и тока амплитудой до ± 150 кА при запасаемой электрической энергии до 1 МДж. Данный генератор построен на основе размещенного в полевых условиях модернизированного стационарного генератора ГИНС-4 на номинальное напряжение ± 4 МВ и номинальный ток амплитудой ± 75 кА с запасаемой в его высоковольтных конденсаторах электрической энергией номинальным значением 1 МДж. Приведены описания схемных и конструктивных решений генератора ГИНС-2, позволяющих обеспечить при сохранении основной электротехнической элементной базы генератора ГИНС-4 получение на длинном разрядном воздушном промежутке двухэлектродной системы «игла-плоскость» импульсов тока микросекундной длительности с удвоенной амплитудой по сравнению с параметрами импульсов тока, формируемых в разрядной цепи генератора ГИНС-4 с использованием аналогичной двухэлектродной системы. Перевод генератора ГИНС-4 в режим работы генератора ГИНС-2 с уменьшенным вдвое уровнем выходного импульсного напряжения и увеличенным вдвое уровнем выходного импульсного тока обусловлен требованиями стандартов НАТО АЕСТР-250: 2014 и США MIL-STD-464C: 2010 при испытаниях технических объектов на электромагнитную совместимость и невосприимчивость к воздействию на них мощных электромагнитных помех от атмосферных грозовых сильноточных электрических разрядов (молний). Библ. 19, рис. 6.

Ключевые слова: сверхвысоковольтный сильноточный генератор импульсов напряжения и тока, технические объекты военного назначения, стандарты испытаний на электромагнитную совместимость и молниестойкость.

Постановка проблемы. В соответствии с требованиями действующих стандартов НАТО АЕСТР-250: 2014 [1] и США MIL-STD-464C: 2010 [2] при испытаниях различных объектов вооружения и военной техники (ОВВТ) на электромагнитную совместимость (ЭМС) и стойкость к прямому (косвенному) действию на них мощных электромагнитных помех (МЭМП), вызванных атмосферными грозовыми сильноточными искровыми электрическими разрядами (молниями) [3-5], требуется в зоне размещения на испытательной площадке указанных ОВВТ формировать в окружающем их воздушном пространстве за счет протекания в нем искрового канала искусственной молнии с большим импульсным током (БИТ) такие сильные электрические и магнитные поля, которые должны характеризоваться скоростью нарастания БИТ молнии порядка 10^{11} А/с при его амплитуде до (100-200) кА. При этом скорости нарастания напряженностей электрического и магнитного полей в ближней круговой зоне радиусом r_c до (3-10) м от искрового канала искусственной молнии должны составлять соответ-

венно порядка 10^{11} В/(м·с) и 10^9 А/(м·с) [1, 2]. Для обеспечения выполнения таких жестких требований к амплитудно-временным параметрам (АВП) БИТ искусственной молнии и МЭМП необходимы соответствующие мощные сверхвысоковольтные сильноточные испытательные электроустановки, способные на открытом воздухе имитировать вблизи или вдали от испытываемых ОВВТ длинные (длиной 1 м и более) искровые электрические разряды (молнии) с БИТ указанных АВП. Разработка и создание подобного сверхвысоковольтного (на выходное импульсное напряжение амплитудой 1 МВ и более) сильноточного (на выходной импульсный ток амплитудой 100 кА и более) испытательного электрооборудования сопряжено с большими финансовыми и материально-трудовыми затратами. Известно, что стоимость сооружения такого специального испытательного электрооборудования, работающего в микросекундном временном диапазоне генерируемых на электрической нагрузке

импульсов напряжения и тока, составляет порядка 1000 \$ USA за 1 кДж электрической энергии, запасаемой в его емкостном накопителе энергии (ЕНЭ) [6]. Поэтому при энергоемкости требуемого по [1, 2] сверхвысоковольтного сильноточного испытательного электрооборудования порядка 1 МДж для его сооружения в Украине необходимы средства не менее 1 млн. \$ USA. В этой связи целесообразным для его разработчиков техническим решением является соответствующая модернизация действующих генераторов импульсных напряжений и токов (ГИНТ), обеспечивающая выполнение требований нормативных документов [1, 2].

В 1970-х годах для испытаний электрической прочности наружной (внутренней) изоляции объектов электроэнергетики и ОБВТ на ЭМС и молниестойкость на экспериментально-испытательном полигоне НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (пгт Андреевка, Харьковской обл.) был создан мощный генератор типа ГИНТ-4 этажерочного типа, характеризующийся номинальным выходным напряжением $U_{ex}=\pm 4$ МВ при номинальной запасаемой в его высоковольтных конденсаторах электрической энергии, равной 1 МДж [7]. Изоляционная несущая конструкция (ИНК) этого генератора была выполнена на основе 576 шт. фарфоровых опорных изоляторов типа КО-400С, балок и раскосов из древесного слоистого пластика типа ДСПБ-Э-40, а его изоляционная защитная (ограждающая) конструкция – на базе стеклопластиковых труб типа ТСПО и стеклопластикового рулонного электротехнического материала типа РЭМ-0,8 [6, 7]. Принятая в конструкции ГИНТ-4 схема построения его зарядно-разрядного контура (ЗРК), приведенная и описанная в [8, рис. 12], обеспечивала получение на активно-индуктивной нагрузке (например, при электрическом пробое длинного воздушного разрядного промежутка длиной $l_d=3$ м в двухэлектродной системе «игла-плоскость») затухающего синусоидального импульса тока с амплитудой его первой полуволны длительностью до 11 мкс не более $I_{m1}\approx\pm 75$ кА [7, 9]. Следует указать, что ЗРК генератора ГИНТ-4 был выполнен по классической двухполярной схеме Аркадьева-Маркса, содержащей 16 электрических каскадов и соответственно 32 разнополярно заряжаемые его ступени до постоянного номинального напряжения $U_c=\pm 125$ кВ, разделенные между собой 16 двухэлектродными неуправляемыми воздушными коммутаторами, выполненными в виде стандартных шаровых разрядников (ШР) диаметром 125 мм [7]. В состав каждой ступени электрических каскадов входило по 4 шт. высоковольтных конденсатора в металлическом корпусе типа КБМГ-125/1 (номинальное зарядное напряжение $U_c=\pm 125$ кВ; электрическая емкость $C=1$ мкФ) разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». В результате ЗРК генератора ГИНТ-4 имел 128 шт. конденсаторов типа КБМГ-125/1. В этой связи емкость «в разряде» C_d данного генератора составляла около 0,125 мкФ, а номинальное значение запасаемой в его конденсаторах электрической энергии $W_g=0,5C_dU_{ex}^2$ было равным 1 МДж. В двухполярных цепях заряда (по две на каждую электрическую полярность конденсаторов C его ЗРК) указанных кон-

денсаторов генератора ГИНТ-4 были установлены односекционные высоковольтные зарядные резисторы R_c номиналом 500 Ом в количестве 32 шт. (по 8 шт. на каждую из четырех зарядных ветвей ступеней его каскадов), выполненные на основе нихромовой проволоки, намотанной на длинную стеклопластиковую трубу и залитой эпоксидным компаундом [7, 9]. ЗРК генератора ГИНТ-4 содержал 16 разрядных односекционных резисторов R_d (по 8 шт. для каждой из двух разнополярно заряжаемых ветвей ступеней его каскадов) номиналом 110 кОм, каждый из которых был изготовлен на основе последовательно зигзагообразным образом соединенных и закрепленных на прямоугольной гетинаксовой пластине 50 шт. постоянных керамических объемных сопротивлений типа ТВО-10-2,2 кОм и рассчитан на напряжение ± 500 кВ [7, 9]. Все каскады генератора ГИНТ-4 в зоне размещения их ШР были оснащены успокоительными резисторами R_{Ca} номиналом 0,5 Ом, изготовленными путем намотки нихромовой проволоки на короткие стеклопластиковые трубы и заливки ее эпоксидным компаундом [7, 9]. В режиме разряда конденсаторов ЗРК генератора ГИНТ-4 на электрическую нагрузку за счет девяти успокоительных резисторов R_{Ca} в его разрядную цепь включается суммарное активное сопротивление, равное $R_{cx}\approx 4,5$ Ом. АВП формируемых на электрической нагрузке импульсов напряжения (тока) определялись выбором в ЗРК данного генератора уровня и полярности зарядного напряжения U_c ступеней его электрических каскадов, а также используемыми на его выходе схемами формирования требуемых электрических сигналов. Принятая в конструкции генератора ГИНТ-4 схема построения ЗРК приводила к получению на выходе его сверхвысоковольтной разрядной цепи достаточно высокого уровня удельной собственной индуктивности данного типа генератора, составляющего до 20 мкГн/МВ [7, 9]. В этой связи собственная индуктивность L_g разрядной цепи генератора типа ГИНТ-4 при $U_{ex}=\pm 4$ МВ составляла около 80 мкГн [7-10]. Относительно малое значение емкости «в разряде» $C_d=0,125$ мкФ и относительно большое значение собственной индуктивности $L_g\approx 80$ мкГн генератора типа ГИНТ-4 принципиально не позволяют с его помощью выполнить рассматриваемые нами требования стандартов НАТО АЕСТР-250: 2014 [1] и США MIL-STD-464C: 2010 [2] при испытаниях ОБВТ на ЭМС, действие на них МЭМП и молниестойкость. Из приведенных технических характеристик генератора типа ГИНТ-4 видно, что применительно к требованиям, изложенным в [1, 2], его основным недостатком является относительно низкий уровень формируемого им на электрической нагрузке (например, на длинном воздушном разрядном промежутке) БИТ искусственной молнии (не более $I_{m1}\approx\pm 75$ кА). В этой связи актуальной прикладной задачей является та, которая направлена на модернизацию ЗРК сверхвысоковольтного генератора типа ГИНТ-4 с целью реального приближения с его помощью к выполнению в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» основных требований нормативных документов [1, 2] при испытаниях ОБВТ на ЭМС, воздействие на них соответствующих БИТ, МЭМП и молниестойкость.

Целью статьи является разработка и апробация на основе существующего сверхвысоковольтного генератора типа ГИИТ-4 новой схемы построения его ЗРК и создание модернизированного мощного сверхвысоковольтного сильноточного генератора типа ГИИТ-2 для формирования на электрической нагрузке микросекундных импульсов напряжения амплитудой до ± 2 МВ и тока амплитудой до ± 150 кА при запасаемой в его ЕНЭ электрической энергии до 1 МДж.

1. Результаты разработки новой схемы ЗРК модернизированного мощного сверхвысоковольтного сильноточного генератора ГИИТ-2. При модернизации ЗРК мощного сверхвысоковольтного сильноточного генератора типа ГИИТ-4 наше основное внимание было направлено на увеличение емкости «в разряде» C_d и уменьшение собственной индуктивности L_g данного генератора. За счет таких мероприятий для нас становится реальным достичь цели, определяемой для испытываемых ОВВТ нормативными документами [1, 2]. При этом неперенным условием являлось сохранение в его ЗРК основной электротехнической элементной базы генератора типа ГИИТ-4.

На рис. 1 приведена принципиальная электрическая схема модернизированного мощного сверхвысоковольтного сильноточного генератора типа ГИИТ-2, содержащего в своем ЗРК при его емкости «в разряде» $C_d=0,5$ мкФ восемь электрических каскадов, восемь неуправляемых воздушных ШР диаметром 125 мм, один управляемый ШР тригатронного типа и 128 шт. высоковольтных конденсаторов типа КБМГ-125/1.

В ЗРК генератора типа ГИИТ-2 разрядные односекционные резисторы R_d номиналом 110 кОм (по 4 шт. на каждую полярность его двух ветвей заряда высоковольтных конденсаторов C секций всех каскадов) остались прежними из ЗРК генератора типа ГИИТ-4.

На рис. 2 показан общий вид генератора ГИИТ-2.

На рис. 1 в качестве объекта испытаний (ОИ) выступает двухэлектродная разрядная система «игла-плоскость», длина l_a воздушного промежутка в которой может изменяться от 1 до 4 м. Видно, что в отличие от схемы построения генератора типа ГИИТ-4 новый ЗРК генератора типа ГИИТ-2 в каждой ступени своих электрических каскадов содержит по восемь конденсаторов типа КБМГ-125/1. При параллельном заряде до напряжения U_C соответствующей полярности этих конденсаторов через зарядные резисторы R_C номиналом 30 кОм ступени всех каскадов гальванически соединены между собой посредством заимствованных от ЗРК ГИИТ-4 зарядно-разделительных сопротивлений R_{CO} номиналом 180 Ом, не участвующих в сильноточной цепи разряда генератора типа ГИИТ-2 (см. рис. 1) [11]. В режиме разряда через воздушные ШР F_1-F_8 с успокоительными резисторами R_{Ca} номиналом 0,5 Ом ступени всех каскадов между собой подключаются последовательно, что определяет емкость «в разряде» каждого каскада, равную $C_c=4$ мкФ. С учетом того, что при разряде генератора типа ГИИТ-2 на ОИ все его восемь электрических каскадов

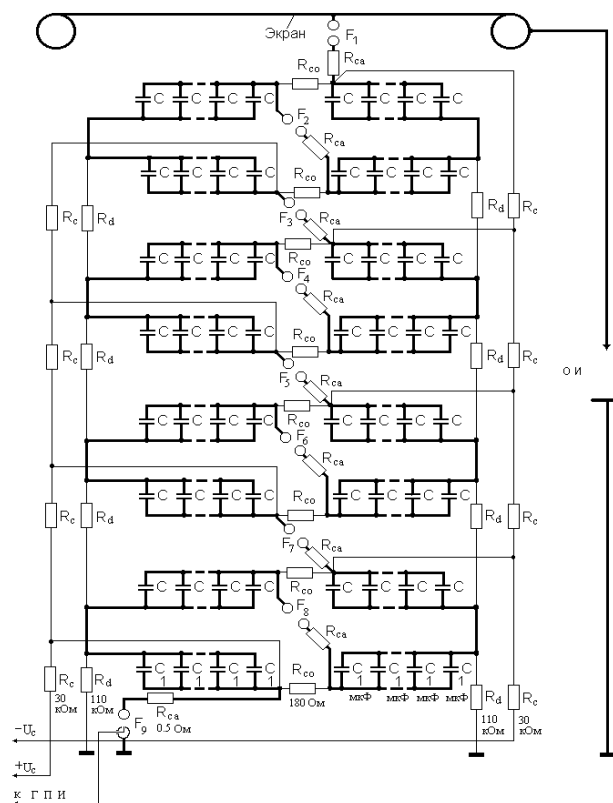


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема модернизированного мощного генератора импульсных напряжений и токов ГИИТ-2 на номинальное напряжение ± 2 МВ, номинальный ток ± 150 кА и номинальную запасаемую в его конденсаторах электрическую энергию 1 МДж, собранного на базе генератора импульсных напряжений и токов ГИИТ-4 на номинальное напряжение ± 4 МВ, номинальный ток ± 75 кА и номинальную запасаемую в его ЕНЭ электрическую энергию 1 МДж (жирной линией показана новая разрядная цепь сверхвысоковольтного сильноточного генератора)



Рис. 2. Внешний вид модернизированного мощного сверхвысоковольтного сильноточного генератора типа ГИИТ-2, содержащего плоский со скатом стальной экран-крышу прямоугольной формы площадью 60 м^2 с круглыми закраинами (на переднем плане для измерения АВП формируемых на объекте испытаний импульсов напряжения установлен омический делитель напряжения на $\pm 2,5$ МВ типа ОДН-2)

соединяются в восходящую к стальному экрану-крыше (см. рис. 1) последовательную цепь, то значение емкости «в разряде» C_d такого генератора становится равным 0,5 мкФ. Видно, что значение этой емкости генератора ГИИТ-2 в четыре раза стало большим по сравнению с емкостью «в разряде» C_d генератора типа ГИИТ-4. Важно указать то, что в ЗРК генератора типа ГИИТ-4 разрядная цепь его 16 шт. электрических каскадов происходила по восходящей снизу-вверх к экрану-крыше спирали относительно большого диаметра (до 6 м) [7, 9]. При этом на один виток данной спирали приходилось четыре электрических каскада этого генератора. В модернизированном ЗРК генератора ГИИТ-2 (рис. 3) разрядная цепь его восьми электрических каскадов осуществляется по восходящему снизу-вверх к экрану-крыше линейно-бифилярному петлевому пути относительно малой ширины (до 3 м). В результате такой предложенной конструкции нового ЗРК удельная собственная индуктивность сверхвысоковольтного генератора типа ГИИТ-2 стала составлять до 10 мкГн/МВ. При номинальном выходном напряжении $U_{ex} = \pm 2$ МВ собственная индуктивность L_g данного генератора уменьшилась в четыре раза по сравнению с собственной индуктивностью $L_g \approx 80$ мкГн генератора типа ГИИТ-4 и стала не превышать 20 мкГн (при высоте ИНК рассматриваемых мощных генераторов до 12 м [7, 9]).



Рис. 3. Внешний вид основных элементов модернизированного ЗРК генератора типа ГИИТ-2, состоявших ранее электротехническую элементную базу генератора ГИИТ-4

Зарядные сопротивления R_C в ЗРК генератора ГИИТ-2 по технологическим и техническим причинам (для возможности использования в дальнейшем ЗРК генераторов ГИИТ-4 и ГИИТ-2 при создании сверхвысоковольтного генератора аperiodических коммутационных импульсов напряжения стандартной временной формы 250 мкс/2500 мкс [12]) пришлось заменить на «новые» двухсекционные сопротивления номиналом 30 кОм и длиной около 1500 мм (рис. 4).



Рис. 4. Общий вид круглых цилиндрических «старых» (внизу) и плоских прямоугольных «новых» (вверху) зарядных резисторов R_C соответственно номиналом 500 Ом и 30 кОм, входящих в состав ЗРК соответственно мощных сверхвысоковольтных генераторов типа ГИИТ-4 и типа ГИИТ-2

Каждая секция «новых» зарядных сопротивлений R_C в ЗРК генератора ГИИТ-2 была изготовлена из последовательно и зигзагообразно соединенных 50 шт. керамических объемных резисторов ТВО-5-300 Ом, размещенных на плоской прямоугольной гетинаксовой пластине и залитых эпоксидным компаундом [12].

Укажем, что при достижении на конденсаторах C ЗРК генератора типа ГИИТ-2 (см. рис. 1) заданного уровня зарядного напряжения $\pm U_C$ от генератора пусковых импульсов (ГПИ) на управляемый воздушный разрядник F_9 тригatronного исполнения [13] подается запускающий микросекундный импульс напряжения амплитудой ± 10 кВ (полярность этого импульса определяется полярностью заряда первой от земли электрической секции каскада генератора). После срабатывания управляемого ШР F_9 диаметром 125 мм из-за последовательного возникновения в каскадах разрядной цепи ЗРК генератора ГИИТ-2 перенапряжений происходит срабатывание по его высоте воздушных ШР $F_1 - F_8$ всех каскадов, что приводит к формированию на ОИ требуемых импульсов напряжения и тока. Причем, полярность выходного импульса напряжения U_{ex} генератора ГИИТ-2 будет противоположной полярности заряда его первой от земли секции электрического каскада, подключаемой напрямую к ШР F_9 .

2. Результаты расчетной и опытной апробации новой схемы ЗРК мощного сверхвысоковольтного сильноточного генератора ГИИТ-2. Согласно закономерностям теоретической электротехники известно, что в RLC -цепи применительно к ЗРК модернизированного генератора типа ГИИТ-2, характеризующемуся уменьшенным вдвое уровнем номинального выходного напряжения U_{ex} (до ± 2 МВ) и уменьшенной в четыре раза собственной индуктивностью L_g (до 20 мкГн) по сравнению с ЗРК генератора типа ГИИТ-4 [7], при условии $R_{C2} < 2(L_g/C_d)^{1/2}$ амплитуда I_{m1} разрядного синусоидального тока на ее выходе будет прямо пропорциональна величине $(C_d)^{1/2}$ [14]. Так как емкость «в разряде» C_d генератора типа ГИИТ-2 стала в четыре раза больше соответствующей емкости C_d генератора типа ГИИТ-4, то рассматриваемая амплитуда I_{m1} номинального разрядного тока на выходе ЗРК модернизированного генератора типа ГИИТ-2 должна возрасти в два раза по сравнению с соответствующей амплитудой $I_{m1} \approx \pm 75$ кА тока [7, 9] в разрядной цепи генератора типа ГИИТ-4 и составить примерно ± 150 кА. Характерной особенностью ЗРК модернизированного генератора типа ГИИТ-2 является то, что период T_g колебаний разрядного тока в нем в соответствии с формулой Томсона $T_g \approx 2\pi(L_g C_d)^{1/2} \approx 21$ мкс [14] остается практически неизменным по сравнению с величиной T_g в ЗРК генератора типа ГИИТ-4.

Расчетную оценку максимального значения скорости нарастания разрядного тока i_C в ЗРК модернизированного генератора типа ГИИТ-2 с ОИ в виде воздушной системы «игла-плоскость» можно выполнить по следующему приближенному соотношению:

$$di_C/dt \approx 2\pi T_g^{-1} I_{m1}. \quad (1)$$

При $T_g \approx 21$ мкс и $I_{m1} \approx 150$ кА по (1) искомое расчетное значение максимальной скорости нарастания разрядного синусоидального тока i_C в ЗРК генератора ГИИТ-2 составит около $0,45 \cdot 10^{11}$ А/с. Видно, что полученное численное значение di_C/dt приближается к требованиям нормативных документов [1, 2]. Расчетное значение максимальной скорости нарастания в воздухе напряженности H_C магнитного поля вокруг зоны протекания сильноточного канала разряда от генератора ГИИТ-2 с ОИ в виде разрядной системы «игла-плоскость» можно с учетом закона полного тока определить по следующей приближенной формуле:

$$dH_C/dt \approx (2\pi r_c)^{-1} di_C/dt \approx r_c^{-1} T_g^{-1} I_{m1}. \quad (2)$$

Из (2) при $r_c \approx 4,46$ м, $T_g \approx 21$ мкс и $I_{m1} \approx 150$ кА следует, что численное значение dH_C/dt оказывается примерно равным $1,6 \cdot 10^9$ А/(м·с). Полученное значение dH_C/dt полностью соответствует требованиям из [1, 2].

Что касается расчетной оценки максимальной скорости нарастания в воздушной среде напряженности E_C электрического поля вокруг цилиндрической зоны протекания канала длинного искрового разряда от сверхвысоковольтного генератора типа ГИИТ-2 с ОИ в виде стандартной воздушной разрядной системы «игла-плоскость», то ее, с одной стороны, можно оценить по следующему приближенному выражению:

$$dE_C/dt \approx U_{CU}/(T_C l_a), \quad (3)$$

где U_{CU} – напряжение среза для выходного импульса U_{ex} в разрядной цепи генератора ГИИТ-2 с указанным ОИ в виде системы «игла-плоскость»; T_C – предразрядное время в системе «игла-плоскость»; l_a – длина воздушного промежутка в системе «игла-плоскость».

Укажем, что параметры U_{CU} и T_C , входящие в (3), должны определяться в соответствии с требованиями действующего межгосударственного стандарта ГОСТ 1516.2-97 [15]. При полученных для сильноточной цепи сверхвысоковольтного генератора типа ГИИТ-2 опытных данных с рассматриваемой разрядной системой «игла-плоскость», имеющих численные значения $U_{CU} \approx 1180$ кВ, $T_C \approx 1,7$ мкс и $l_a = 2$ м, из (3) получаем, что в этом случае искомая величина dE_C/dt принимает численное значение, равное около $3,47 \cdot 10^{11}$ В/(м·с). Видно, что полученное расчетное значение dE_C/dt приближается к требуемому по [1, 2] значению.

На рис. 5 для случая опытной апробации новой схемы ЗРК модернизированного мощного генератора типа ГИИТ-2 приведена типичная осциллограмма микросекундного импульса напряжения $U_{ex}(t)$, полученного в сильноточной разрядной цепи этого генератора ($U_C = \pm 100$ кВ) при электрическом пробое на ОИ длинного воздушного промежутка ($l_a = 2$ м) в разрядной системе «игла-плоскость». Видно, что искровой пробой данного воздушного промежутка происходит на нарастающей части формируемого и приложенного к нему импульса сверхвысокого напряжения. При этом импульсное напряжение среза U_{CU} составляет ~ 1180 кВ, а предразрядное время T_C – около 1,7 мкс.

С другой стороны, с учетом классического электродинамического соотношения в воздухе между

напряженностями электрического E_C и магнитного H_C полей в формируемой для испытаний ОБВТ электромагнитной волне ($E_C/H_C \approx 377$ Ом в дальней круговой зоне от источника электромагнитного излучения [6]) для величины dE_C/dt на фронте первой полуволны напряженности E_C -поля в ближней воздушной круговой зоне радиусом $r_c \leq 10$ м от канала искрового разряда искусственной молнии в рассматриваемой сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИИТ-2 можно записать следующее приближенное выражение:

$$dE_C/dt \approx 377 dH_C/dt. \quad (4)$$

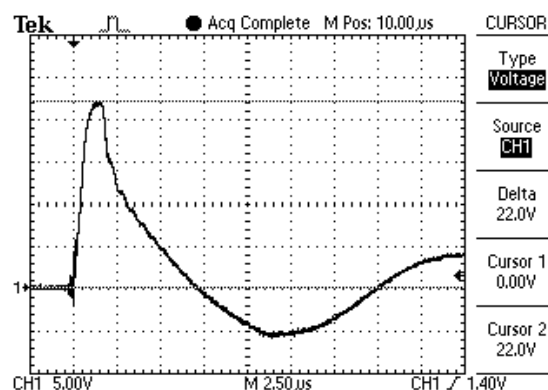


Рис. 5. Осциллограмма срезанного на нарастающей части импульса напряжения, приложенного к длинному воздушному промежутку ($l_a = 2$ м) подключенной к сильноточной цепи сверхвысоковольтного генератора ГИИТ-2 двухэлектродной разрядной системы «игла-плоскость» ($U_C = \pm 100$ кВ; $U_{CU} \approx 1180$ кВ; $T_C \approx 1,7$ мкс; масштаб по вертикали – 268,2 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 2,5 мкс/клетка)

На возможность использования формулы (4) в выполняемой приближенной расчетной оценке величины dE_C/dt указывает то, что расстояние от центра канала искрового разряда имитируемой молнии, на которое распространяется по воздуху первая полуволна напряженности E_C -поля при электрическом пробое воздушного промежутка длиной $l_a \leq (1-4)$ м в двухэлектродной системе «игла-плоскость» для $T_C \leq 2$ мкс (см. рис. 5), численно не превышает 600 м. Такой подход при расчетной оценке dE_C/dt не противоречит требованиям указанных нами выше документов [1, 2]. Кроме того, подобный подход применяется при оценке АВП формируемых в воздушных ближних зонах имитаторов мощных электромагнитных импульсов (ЭМИ) искусственного происхождения (например, микро- и наносекундных ЭМИ ядерных взрывов) [16].

Тогда из (4) при $dH_C/dt \approx 1,6 \cdot 10^9$ А/(м·с), полученному выше по (2) при $r_c \approx 4,46$ м для рассматриваемого случая ($T_g \approx 21$ мкс; $I_{m1} \approx 150$ кА), следует, что dE_C/dt может принимать численное значение, равное примерно $6,03 \cdot 10^{11}$ В/(м·с). Это значение скорости нарастания для dE_C/dt практически соответствует требованиям, изложенным в нормативных документах [1, 2].

На рис. 6 показана типичная осциллограмма затухающего синусоидального разрядного тока $i_C(t)$ ($T_g \approx 21$ мкс) в ЗРК генератора типа ГИИТ-2 при электрическом пробое воздушного промежутка длиной $l_a = 1$ м в разрядной системе «игла-плоскость». Из данных рис. 6 следует, что при увеличении в ЗРК генера-

тора ГИИТ-2 зарядного напряжения U_C конденсаторов до уровня номинального и равного ± 125 кВ становится возможным получение в воздушной разрядной системе «игла-плоскость» импульсов тока с амплитудой его первой полуволны, равной $I_{m1} \approx \pm 150$ кА.

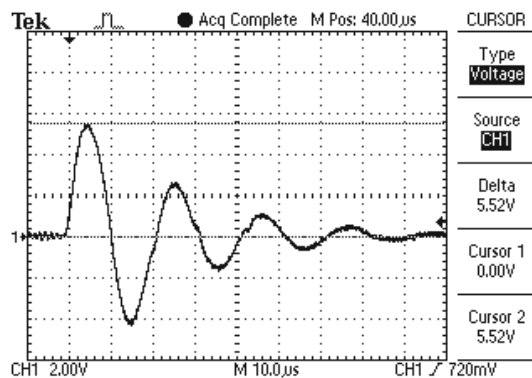


Рис. 6. Осциллограмма импульсного тока в разрядной сильноточной цепи сверхвысоковольтного генератора типа ГИИТ-2 при электрическом пробое воздушного промежутка длиной $l_a = 1$ м в разрядной системе «игла-плоскость» ($U_C \approx \pm 50$ кВ; $I_{m1} \approx 62,1$ кА; $T_g \approx 21$ мкс; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 10 мкс/клетка)

При измерении АВП формируемых в разрядной цепи генератора ГИИТ-2 импульсов напряжения (см. рис. 5) был использован согласованно включенный в измерительную цепь сверхвысоковольтный омический делитель импульсного напряжения на $\pm 2,5$ МВ типа ОДН-2 (см. рис. 2), имеющий коэффициент деления $K_d \approx 53,65 \cdot 10^3$ [17]. От ОДН-2 экранированная кабельная линия связи длиной до 60 м согласованно подключалась к запоминающему цифровому осциллографу Tektronix TDS 1012, размещенному для уменьшения в его рабочем канале электромагнитных наводок и повышения точности измерений указанных АВП вдали от генератора типа ГИИТ-2 и ОИ в заглубленном экранированном измерительном бункере.

При регистрации АВП импульсов разрядного тока i_C в ЗРК генератора ГИИТ-2 в качестве рабочего измерительного средства был использован поверенный государственной метрологической службой коаксиальный шунт типа ШК-300 [18] с экранированной кабельной линией связи длиной до 70 м, имеющий коэффициент преобразования, численно равный $K_s \approx 11,26 \cdot 10^3$ А/В и согласованно включенный в измерительный тракт с запоминающим цифровым осциллографом Tektronix TDS 1012, размещенным для уменьшения паразитного влияния на него внешних МЭМП вдали от испытательной площадки в заглубленном экранированном измерительном бункере [19].

Учитывая отсутствие в открытой печати данных об испытательных сверхвысоковольтных установках стран НАТО, реализующих требования указанных выше стандартов [1, 2], можно заключить, что по своим техническим характеристикам (АВП формируемых на ОИ импульсов напряжения, тока и МЭМП, уровень запасаемой в его ЕНЭ электрической энергии и сравнительно низкой стоимости разработки и сооружения) сверхвысоковольтный генератор типа ГИИТ-2 соответствует высоким мировым требованиям в области высоковольтной импульсной техники.

Выводы.

Разработанный и созданный в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» мощный сверхвысоковольтный сильноточный генератор импульсных напряжений и токов типа ГИИТ-2, формирующий на активно-индуктивной электрической нагрузке, выполненной в виде стандартной двухэлектродной воздушной разрядной системы «игла-плоскость», микросекундные импульсы напряжения амплитудой до ± 2 МВ и тока амплитудой до ± 150 кА с запасаемой в его высоковольтных конденсаторах электрической энергией до 1 МДж позволяет в соответствии с требованиями действующих стандартов НАТО АЕСТР-250: 2014 и США MIL-STD-464C: 2010 проводить натурные испытания объектов вооружения и военной техники на электромагнитную совместимость и стойкость к прямому (косвенному) воздействию на них БИТ и мощных электромагнитных помех, вызванных атмосферными грозовыми искровыми разрядами (молниями).

Примечание.

Работы по разработке и созданию в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» сверхвысоковольтного сильноточного генератора импульсных напряжений и токов типа ГИИТ-2 проводились в рамках двух прикладных научно-технических проектов, финансируемых Министерством образования и науки Украины: «Забезпечення відповідності озброєння та військової техніки України сучасним вимогам стандартів НАТО з електромагнітної сумісності» (номер держреєстрації 0117U000533); «Розробка систем випробувань типових видів озброєння та військової техніки України за стандартами НАТО з електромагнітної сумісності» (номер держреєстрації 0119U002571).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АЕСТР-250: 2014. NATO Standard Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version 1, December 2014, NSO Publ. – 253 p.
2. MIL-STD-464C: 2010. Department of defense. Interface standard. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. USA, 2010. – 165 p.
3. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol. 76, no. 12, pp. 1548-1565. doi: 10.1109/5.16349.
4. Дьяков А.Ф., Кузнецов И.П., Максимов Б.К., Темников А.Г. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 455 с.
5. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. – Х.: НТМТ, 2010. – 292 с.
6. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
7. 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.
8. Баранов М.И., Буряковский С.Г., Князев В.В., Руденко С.С. Анализ характеристик и возможностей высоковольтного электротехнического комплекса НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» для испытаний объектов энергетики, вооружения, авиационной и ракетно-космической техники на электробезопасность и электромагнитную совместимость. *Електротехніка і електромеханіка*, 2020, № 4, С. 37-53. doi: 10.20998/2074-272X.2020.4.06.

9. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 4-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.
10. Баранов М.И., Боcharов В.А., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования. *Электротехника і електромеханіка*, 2003, № 2, С. 75-80.
11. Баранов М.И. Сравнительный анализ работы двух схем построения генераторов высоковольтных поджигающих импульсов напряжения мощных электрофизических установок. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг*, 2006, № 37, С. 100-107.
12. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 653-658. doi: 10.1134/s0020441213050126.
13. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
14. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов в 2-х томах. Том 2. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
15. 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, 1998. – 31 с.
16. Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты / Пер. с англ. под ред. Н.А. Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
17. Баранов М.И., Кобилюшко Г.М., Кравченко В.И. Получение стандартных коммутационных импульсов высокого и сверхвысокого напряжения для натурных испытаний электроэнергетических объектов. *Електротехніка і електромеханіка*, 2013, № 2, С. 52-56.
18. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
19. Баранов М.И., Буряковский С.Г., Рудаков С.В. Инструментальное обеспечение в Украине натурных испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к воздействию импульсного тока искусственной молнии. *Електротехніка і електромеханіка*, 2018, № 4, С. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.

REFERENCES

1. AECTP-250: 2014. NATO Standard Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version 1, December 2014, NSO Publ. – 253 p.
2. MIL-STD-464C: 2010. Department of defense. Interface standard. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. USA, 2010. – 165 p.
3. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol. 76, no. 12, pp. 1548-1565. doi: 10.1109/5.16349.
4. Dyakov A.F., Kuzhekin I.P., Maksimov B.K., Temnikov A.G. *Elektromagnitnaya sovместimost' i molniezashchita v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility and lightning protection in the power]. Moscow, MEI Publishing House, 2009. 455 p. (Rus).
5. Kravchenko V.I. *Molniya. Elektromagnitny faktory i porazhayushchie vozdeystviya na tekhnicheskies sredstva* [Lightning. Electromagnetic factors and their impact on the striking technical objects]. Kharkov, NTMT Publ., 2010. 292 p. (Rus).

6. Knopfel' G. *Sverkhshil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
7. Pekar' I.R., Fertik S.M. The powerful high-voltage electric-discharge setting on 4 MV and 1 MJ. *Lecture collection of inter-institute conference «Electrophysics apparatus and electric isolation»*. Moscow, Energiya Publ., 1970, pp. 22-26. (Rus).
8. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V., Rudenko S.S. Analysis of characteristics and possibilities of high-voltage electrical engineering complex Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya» of NTU «KhPI» for the tests of objects of energy, armament, aviation and space-rocket technique on electric safety and electromagnetic compatibility. *Electrical engineering & electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 37-53. doi: 10.20998/2074-272X.2020.4.06.
9. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Monografiya v 4kh tomakh. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Monograph in 4 Vols. Vol. 3. Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
10. Baranov M.I., Bocharov V.A., Ignatenko N.N., Kolobovskiy A.K. The powerful generators of impulsive voltage and currents of maximum parameters for testing of power electroenergy equipment. *Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no. 2, pp. 75-80. (Rus).
11. Baranov M.I. The comparative analysis of work of two charts of construction of generators of high-voltage incendiary impulses of voltage of powerful electrophysics options. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2006, no. 37, pp. 100-107. (Rus).
12. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 653-658. doi: 10.1134/s0020441213050126.
13. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskii G.S., Nikolayevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tehnika bol'shih impul'snykh tokov i magnitnykh polei* [The technique of large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
14. Neyman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. V 2-h tomah. Tom 2* [Theoretical bases of the Electrical Engineering. In 2 vols. Vol.2]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 416 p. (Rus).
15. GOST 1516.2-97. *Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napriazhenie 3 kV i vyshe. Obshchie metody ispytaniy elektricheskoi prochnosti izolyatsii* [GOST 1516.2-97. Electrical equipment and installations for AC voltages 3 kV and higher. General methods of dielectric tests]. Minsk, Publishing house of standards, 1998. 31 p. (Rus).
16. Ricketts L.U., Bridges J.E., Mayletta J. *Elektromagnitnij impul's i metody zashchity* [Electromagnetic pulse and methods of protection]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 328 p. (Rus).
17. 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. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no. 2, pp. 52-56. (Rus).
18. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
19. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no. 4, pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.

Поступила (received) 17.08.2020

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с.,
Буряковский Сергей Геннадиевич¹, д.т.н., директор,
Князев Владимир Владимирович¹, к.т.н., вед.н.с.,
¹ НИІПКІ «Молнія»
Национального технического университета
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua, sergbyr@i.ua,
knyaz2@i.ua

M.I. Baranov¹, S.G. Buriakovskiy¹, V.V. Kniaziev¹

¹ Research and Design Institute «Molniya»
of National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

Powerful high-current generator of microsecond voltage pulses with voltage amplitude up to ± 2 MV and current amplitude up to ± 150 kA with electric energy stored in capacitors up to 1 MJ.

Purpose. Development and evaluation, on the basis of existing ultra-high-voltage generator of pulsed voltages and currents of GINT-4 type, of the new scheme of design of its charging-discharging circuit (CDC), and creation of modernized powerful ultra-high-voltage high-current generator of GINT-2 type to form microsecond voltage pulses with amplitudes up to ± 2 MV and current with amplitude up to ± 150 kA in the electrical load, with electrical energy stored in its capacitive energy storage (CES) up to 1 MJ. **Methodology.** Fundamentals of theoretical and applied electrical engineering, electrical power engineering, electrophysical principles of high-voltage and high pulsed current engineering, fundamentals of electromagnetic compatibility (EMC), instrument engineering, high-voltage instrumentation and standardization. **Results.** The new scheme of design of CDC of the modernized powerful ultra-high-voltage, heavy-current generator of GINT-2 type of outdoor placement, that allows obtaining, with preservation of the main electrotechnical elemental base of existing powerful prototype generator GINT-4 (rated output voltage ± 4 MV with rated electrical energy stored in CES of 1 MJ and maximal amplitude of output current pulse

in electrical load up to ± 75 kA) pulses of current of microsecond duration with doubled amplitude (up to ± 150 kA) in the long (from 1 to 4 m length) air gap of standard two-electrode discharging «needle-plane» system, in comparison with parameters of current pulses with amplitudes up to ± 75 kA that are formed in the discharging circuit of generator of GINT-4 type with the use of the analogous air discharging system, has been developed. Experimental evaluations of the developed new discharging circuit in CDC of the modernized generator of GINT-4 type has been performed in field conditions, and its advantages over the old discharging circuit in composition of CDC of generator of GINT-4 type have been shown. Calculated evaluations of rise rates of high pulsed current (HPC) in plasma channel of air spark discharge of CES with energy up to 1 MJ of generator of GINT-2 type, and strength of electric and magnetic field that are formed around this high-current channel of spark discharge and are powerful electromagnetic interference (PEMI) for objects of armaments and military equipment (OAME) were performed. It was shown that rise rates of HPC obtained for generator GINT-2 in the channel of long air spark discharge (of artificial lightning) and PEMI around this channel practically satisfy strict requirements of the NATO Standards AESTP-250: 2014 and USA MIL-STD-464C: 2010. **Originality.** The new scheme of design of CDC in composition of the modernized powerful ultra-high-voltage high-current generator of GINT-2 type (developer – Research & Design Institute «Molniya» of NTU «KhPI»), satisfying requirements of the mentioned standards for full-scale tests of OAME for EMC and immunity to action on them of PEMI from long atmospheric spark electric discharges (lightning) was developed for the first time. **Practical value.** Application of the created ultra-high-voltage high-current generator of GINT-2 type in tests of OAME for EMC and immunity to action on them of PEMI from artificial lightning will assist increase in reliability of OAME functioning in conditions of damaging (destabilizing) action on them HPC and PEMI of natural and artificial origin. References 19, figures 6.

Key words: ultra-high-voltage high-current generator of voltage and current pulses, technical objects of military use, standards of tests for electromagnetic compatibility and lightning resistance.