

## ГЕНЕРАТОР АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ С НОРМИРОВАННОЙ ВРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ 10/350 мкс И АМПЛИТУДОЙ $\pm(100-200)$ кА

© 2015 г. М. И. Баранов, Г. М. Колишко, В. И. Кравченко, С. В. Рудаков\*

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт “Молния” Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47

\*Национальный университет гражданской защиты Украины

Украина, 61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94

E-mail: [eft@kpi.kharkov.ua](mailto:eft@kpi.kharkov.ua)

Поступила в редакцию 13.11.2014 г.

После доработки 26.12.2014 г.

Описан мощный высоковольтный генератор, формирующий на низкоомной активно-индуктивной нагрузке апериодические импульсы тока искусственной молнии длительностью 10 мкс/350 мкс и амплитудой  $\pm(100-200)$  кА с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1–2010 допусками. Приведены описания схемных и конструктивных решений, позволяющих с помощью созданного на основе емкостных накопителей энергии генератора обеспечить получение на электрической нагрузке с активным сопротивлением 0.1 Ом и индуктивностью 1.5 мкГн апериодических импульсов тока положительной (отрицательной) полярности имитированной молнии с временем достижения модуля их амплитуды  $I_m$  до 106 кА, равным  $t_m \approx 24$  мкс, с длительностью импульсов на уровне  $0.5I_m$ , составляющей  $\tau_p \approx 340$  мкс, и длительностью их фронта  $\tau_f \approx 15$  мкс. Интеграл действия полученного согласно стандарта IEC 62305-1–2010 импульса тока первого короткого удара искусственной молнии амплитудой  $I_m \approx 106$  кА при этом составил  $J_a \approx 3.03 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ , а протекший через указанную нагрузку электрический заряд –  $q_l \approx 52.2$  Кл.

DOI: 10.7868/S0032816215060038

### ВВЕДЕНИЕ

Прямые удары линейной молнии (л.м.) в технические здания (сооружения) или удары л.м. вблизи них являются серьезным источником опасности как непосредственно для этих сооружений, так и для находящихся внутри людей, различных инженерных и электрических сетей (систем). В этой связи вопросы разработки и практического применения технических мер защиты от воздействия л.м. энергонасыщенных объектов и, в первую очередь, объектов промышленной электроэнергетики (атомных и тепловых электростанций, линий электропередачи, подстанций и др.) имеют повышенную актуальность.

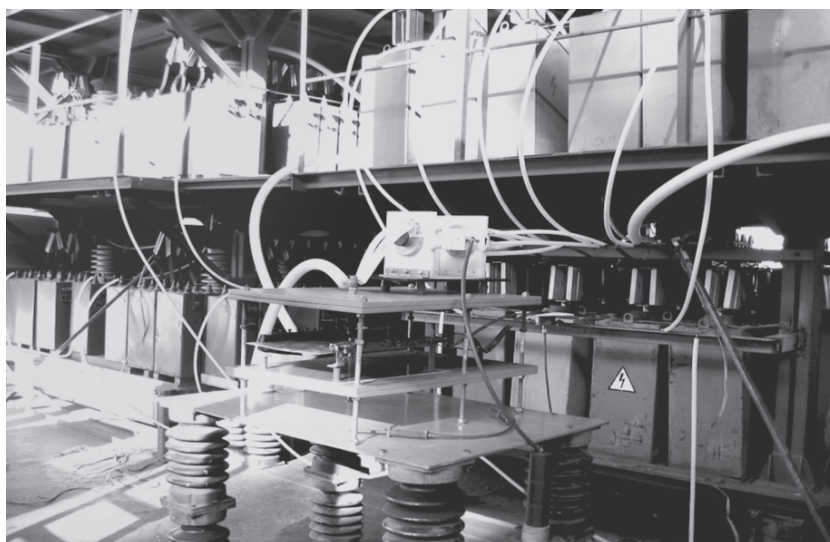
В настоящее время общие принципы защиты от л.м. зданий, сооружений и их частей, включая находящихся в них людей и инженерных коммуникаций, определяются рядом действующих международных и национальных стандартов [1–5]. В соответствии с этими стандартами при испытаниях электротехнических устройств и сетей указанных объектов на молниестойкость к первому короткому удару л.м. должен использоваться апериодический импульс тока молнии с нормируемой вре-

менной формой  $\tau_f/\tau_p = 10 \text{ мкс}/350 \text{ мкс}$ , где  $\tau_f$ ,  $\tau_p$  – соответственно длительность фронта (с допуском  $\pm 20\%$ ) и длительность импульса ( $\pm 10\%$ ) тока, и амплитудой  $I_m = \pm(100-200)$  кА ( $\pm 10\%$ ) [1–5].

В [1–5] установлены четыре уровня защиты от молнии или четыре степени жесткости испытанных объектов на молниестойкость. При этом для каждого уровня защиты от молнии определены следующие параметры импульса тока однокомпонентной л.м. [1–5]: I уровень –  $I_m = \pm 200$  кА (с допуском  $\pm 10\%$ ), удельная энергия (интеграл действия тока молнии)  $J_a = 10 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$  ( $\pm 35\%$ ), протекший заряд  $q_l = \pm 100$  Кл ( $\pm 20\%$ ); II уровень –  $I_m = \pm 150$  кА ( $\pm 10\%$ ),  $J_a = 5.6 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$  ( $\pm 35\%$ ),  $q_l = \pm 75$  Кл ( $\pm 20\%$ ); III–IV уровни –  $I_m = \pm 100$  кА ( $\pm 10\%$ ),  $J_a = 2.5 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$  ( $\pm 35\%$ ),  $q_l = \pm 50$  Кл ( $\pm 20\%$ ). Заметим, что интеграл действия импульса тока молнии  $i_L(t)$  определяется выражением

$$J_a = \int_0^{\tau_p} i_L^2(t) dt, \text{ а протекший заряд } - q_l = \int_0^{\tau_p} i_L(t) dt.$$

Согласно [1–5] при физическом моделировании рассматриваемого импульса тока искусственной молнии его временной параметр  $\tau_f$  носит второ-



**Рис. 1.** Внешний вид мощного высоковольтного ГИТМ-10/350: на переднем плане находится рабочий стол генератора тока искусственной л.м. с размещенным на нем сверху КВГУ-50 (высоковольтным трехэлектродным воздушным управляемым коммутатором с графитовыми электродами) на напряжение  $\pm 50$  кВ и импульсный ток молнии амплитудой  $I_m$  до  $\pm 300$  кА, а на заднем плане — элементы зарядно-разрядных цепей его отдельных г.и.т.

степенный характер, что допускает использование для него диапазона  $10 \text{ мкс} \leq \tau_f \leq 15 \text{ мкс}$  и существенно упрощает на практике его получение.

Из существующих на сегодня в ведущих научно-технических центрах мира высоковольтных сильнооточных электроустановок, воспроизводящих в лабораторных условиях требуемый аperiodический импульс тока искусственной молнии временной формы 10 мкс/350 мкс, следует указать российский имитатор импульсного тока л.м., представленный в [6]. Данный имитатор формирует на электрической низкоомной малоиндуктивной нагрузке испытываемого объекта соответствующие импульсы тока амплитудой  $I_m$  лишь до  $\pm 100$  кА.

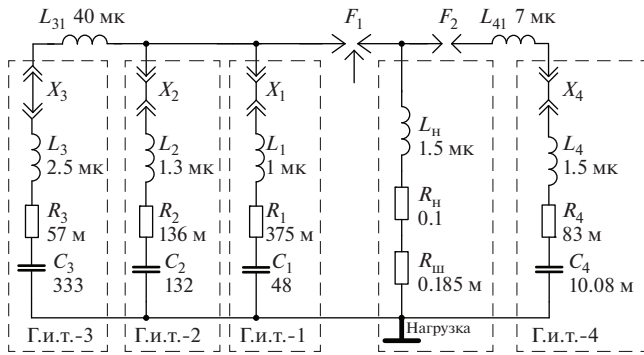
Кроме того, известен немецкий генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии временной формы 8 мкс/20 мкс модульной конструкции, который при напряжении  $\pm 100$  кВ и запасаемой энергии 250 кДж способен формировать на испытываемом объекте указанные импульсы короткого удара л.м. амплитудой  $I_m$  до  $\pm 200$  кА [7].

В [8] был описан созданный в 2007 году в НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” в соответствии с требованиями ряда международных нормативных документов [9–12] украинский генератор тока искусственной молнии, формирующий на бортовых устройствах авиационной и ракетно-космической техники необходимые амплитудно-временные параметры (а.в.п.) импульсной А, повторной импульсной Д, промежуточной В и длительной С компонент импульсного тока л.м.

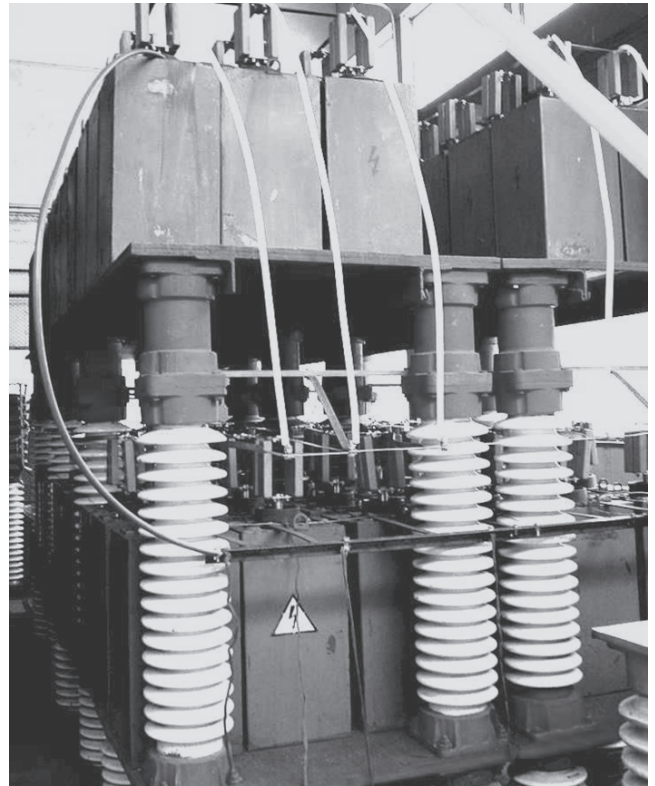
В связи с этим актуальной прикладной задачей в области высоковольтной сильнооточной импульсной техники остается разработка мощного генератора аperiodических импульсов тока искусственной л.м. временной формы 10 мкс/350 мкс с нормированной амплитудой  $I_m$  формируемого на электрической нагрузке испытываемого объекта импульсного тока от  $\pm 100$  до  $\pm 200$  кА. Причем такого генератора, который в своей сильнооточной разрядной цепи не содержит сложного по конструкции, дорогостоящего по цене и ненадежного в работе высоковольтного шунтирующего коммутатора, замыкающего нагрузку в момент достижения током своей амплитуды  $I_m$  [1, 5].

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

В 2014 году нами в соответствии с действующими требованиями международного стандарта IEC 62305-1–2010 [1] был создан и введен в опытную эксплуатацию генератор импульсов тока молнии (далее ГИТМ-10/350), позволяющий проводить натурные испытания электротехнических устройств различных объектов электроэнергетики и иных инженерно-технических сооружений на воздействие аperiodических импульсов тока первого короткого удара искусственной л.м. временной формой 10 мкс/350 мкс при их амплитуде  $I_m$  от  $\pm 100$  до  $\pm 200$  кА с нормированными по указанному стандарту допусками на а.в.п. таких импульсов.



**Рис. 2.** Электрическая схема замещения сильноточных разрядных цепей четырех отдельных высоковольтных г.и.т.-1–г.и.т.-4 и полная электрическая схема ГИТМ-10/350 ( $X_1$ – $X_4$  – массивные токопроводящие перемычки разрядных цепей г.и.т.-1–г.и.т.-4).



**Рис. 3.** Внешний вид высоковольтного г.и.т.-3 (111 параллельно соединенных конденсаторов ИК-50-3 на напряжение  $\pm 50$  кВ).

Данный ГИТМ-10/350, общий вид которого приведен на рис. 1, в своем составе содержит четыре генератора импульсных токов (г.и.т.), позволяющих при своей параллельной работе на общую активно-индуктивную нагрузку испытываемого на молниестойкость устройства получать требуемые согласно международному стандарту IEC 62305-1–2010 [1] а.в.п. аperiodического импульса тока короткого удара имитированной л.м.

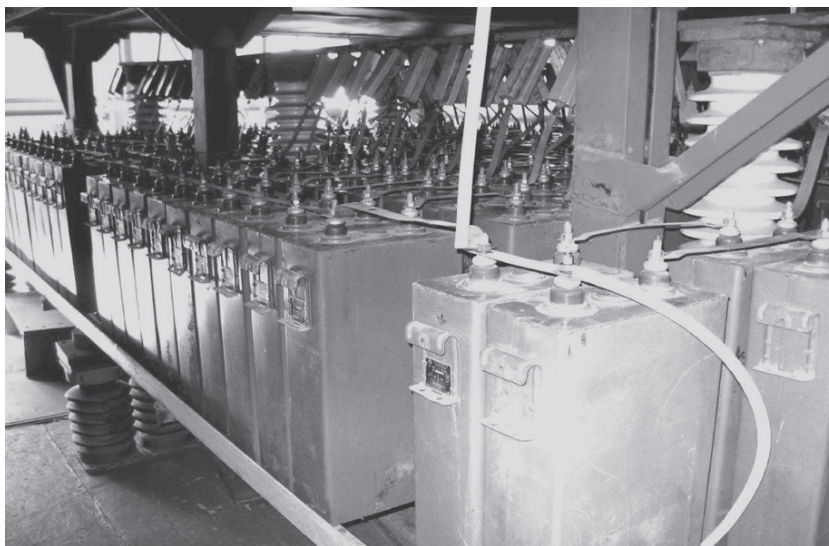
В созданном ГИТМ-10/350 за счет изменения уровня зарядного напряжения  $U_C$  высоковольтных импульсных конденсаторов его отдельных г.и.т. на общей электрической нагрузке могут быть получены указанные испытательные импульсы тока л.м. обеих полярностей и не с нормированными по [1–5] значениями их амплитуд  $I_m$ , а в более широком токовом диапазоне  $\pm(10–200)$  кА.

На рис. 2 представлена электрическая схема замещения ГИТМ-10/350, в состав которого входят сильноточные разрядные цепи его отдельных г.и.т.-1–г.и.т.-4. Из данных рис. 2 видно, что используемые в составе ГИТМ-10/350 высоковольтные г.и.т.-1–г.и.т.-4 выполнены на основе емкостных накопителей энергии. Накопители электрической энергии г.и.т.-1–г.и.т.-3 укомплектованы высоковольтными импульсными конденсаторами ИК-50-3 (номинальное напряжение  $\pm 50$  кВ, номинальная емкость 3 мкФ), а г.и.т.-4 – высоковольтными импульсными конденсаторами ИМ2-5-140 (напряжение  $\pm 5$  кВ, емкость 140 мкФ) [13]. Конденсаторы в зарядно-разрядных цепях г.и.т.-1–г.и.т.-3 включены параллельно, а в г.и.т.-4 – последовательно-параллельно.

Все конденсаторы в ГИТМ-10/350, имеющие металлические корпуса, размещены на двух этажах, образованных его несущими металлическими и изоляционными конструкциями, изолированными у своего основания от земли с помощью

опорных фарфоровых изоляторов КО-400С [8]. Металлические корпуса конденсаторов ИК-50-3 установлены как на металлический пол несущих конструкций г.и.т.-1 и г.и.т.-2, так и на изоляционный пол несущих конструкций г.и.т.-3. Металлические корпуса конденсаторов ИМ2-5-140 изолированы от металлоконструкций пола этажей г.и.т.-4 при помощи уложенных на пол прямоугольных изоляционных балок из древесно-слоистого пластика ДСПБ-Э поперечным сечением  $70 \times 70$  мм<sup>2</sup>.

При этом г.и.т.-1 содержит 16 параллельно соединенных конденсаторов на зарядное напряжение  $\pm 50$  кВ с суммарной номинальной запасаемой энергией 60 кДж (рис. 1), г.и.т.-2 – 44 параллельно соединенных конденсаторов на зарядное напряжение  $\pm 50$  кВ с суммарной номинальной запасаемой энергией 165 кДж (рис. 1), г.и.т.-3 – 111 параллельно соединенных конденсаторов на зарядное напряжение  $\pm 50$  кВ с суммарной номинальной запасаемой энергией 416 кДж (рис. 3), а г.и.т.-4 – 288 последовательно-параллельно соединенных в 144 параллельные секции (по два последовательно включенных конденсатора ИМ2-5-140 в каждой) конденсаторов на зарядное на-



**Рис. 4.** Внешний вид высоковольтного г.и.т.-4 (288 последовательно-параллельно включенных конденсаторов ИМ2-5-140 на суммарное напряжение  $\pm 10$  кВ).

пряжение  $\pm 10$  кВ с суммарной номинальной запасаемой энергией 504 кДж (рис. 4).

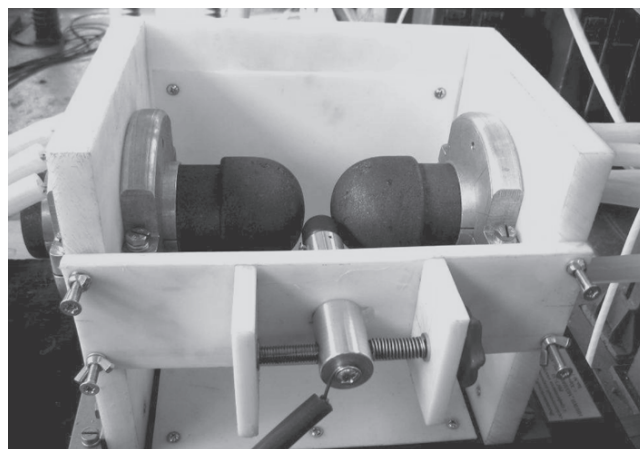
Формирующие электрические элементы разрядных цепей г.и.т.-3 (семивитковый индуктивный элемент  $L_{31} \approx 40$  мкГн, рис. 2) и г.и.т.-4 (одновитковый индуктивный элемент  $L_{41} \approx 7$  мкГн) выполнены в виде катушек, намотанных из крупногабаритного радиочастотного кабеля РК 75-44-17 [14] со снятой защитной полиэтиленовой оболочкой и медной оплеткой. Эти катушки, содержащие круглую сплошную медную жилу высоковольтного кабеля, имеющую диаметр 6.6 мм, практически не влияют на собственные активные сопротивления  $R_3$  и  $R_4$  низкоомных разрядных цепей г.и.т.-3 и г.и.т.-4.

Во избежание разрушительных последствий в ГИТМ-10/350 при аварийном режиме его работы, вызванном электрическим пробоем на стадии заряда (разряда) одного из его высоковольтных конденсаторов, в каждом из используемых в нем генераторов (г.и.т.-1—г.и.т.-4) на всех высоковольтных выводах их конденсаторов установлены защитные резисторы, набранные в виде компактных конструкций из параллельно соединенных высоковольтных графито-керамических объемных постоянных резисторов ТВО-60-24 Ом [8].

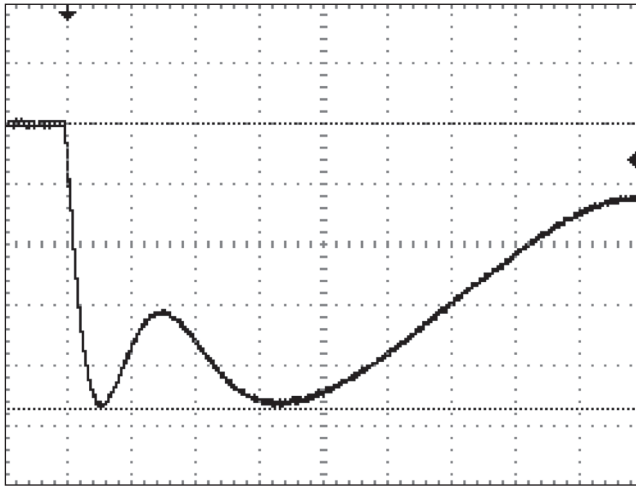
Коммутация в силовых разрядных цепях г.и.т.-1—г.и.т.-3 осуществляется высоковольтным трехэлектродным воздушным управляемым коммутатором с графитовыми электродами КВГУ-50 (на рис. 2  $F_1$ ) на номинальное напряжение  $\pm 50$  кВ и импульсный ток л.м. амплитудой до  $I_m = \pm 300$  кА (рис. 5). Коммутатор КВГУ-50 управляется за счет подачи на его средний графитовый

электрод высоковольтного микросекундного импульса напряжения амплитудой до  $\pm 100$  кВ от высоковольтного пускового генератора ГВПИ-100 [8]. Конструкция коммутатора КВГУ-50 позволяет осуществлять регулировку его двух рабочих воздушных зазоров в пределах от 1 до 20 мм.

Высоковольтный двухэлектродный воздушный неуправляемый коммутатор с графитовыми электродами КВГН-10 (на рис. 2  $F_2$ ) на номинальное напряжение  $\pm 10$  кВ и импульсный ток амплитудой  $I_m$  до  $\pm 100$  кА, предназначенный для коммутации силовых разрядных цепей г.и.т.-4, состоит из двух графитовых эрозионностойких электродов с плоскими рабочими поверхностями



**Рис. 5.** Внешний вид высоковольтного КВГУ-50 на напряжение  $\pm 50$  кВ и импульсный ток искусственной молнии амплитудой  $I_m$  до  $\pm 300$  кА.



**Рис. 6.** Осциллограмма аperiodического импульса разрядного тока высоковольтного ГИТМ-10/350 в цепи низкоомной активно-индуктивной нагрузки ( $R_n \approx 0.1$  Ом,  $L_n \approx 1.5$  мкГн,  $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = -15$  кВ и  $U_{C4} = -2.25$  кВ,  $I_m \approx -106$  кА,  $t_m \approx 24$  мкс,  $\tau_f \approx 15$  мкс,  $\tau_p \approx 340$  мкс). Масштаб по вертикали 22.52 кА/клетка, по горизонтали – 50 мкс/клетка.

ми, зазор между которыми регулируется в пределах от 1 до 10 мм. Запускается КВГН-10 импульсным напряжением, возникающим на элементах электрической нагрузки  $R_n$ ,  $L_n$  при срабатывании КВГУ-50 и начале протекания по данной нагрузке импульсного разрядного тока от г.и.т.-1–г.и.т.-3.

В ГИТМ-10/350 в непотенциальную (“заземленную”) электрическую цепь его сильноточного разрядного контура последовательно с электрической нагрузкой включен прошедший государственную метрологическую аттестацию измерительный коаксиальный малоиндуктивный шунт ШК-300, имеющий собственное активное сопротивление  $R_{ш} \approx 0.185$  мОм (рис. 2) [8]. Данный измерительный шунт в разрядной цепи ГИТМ-10/350 используется с коаксиальным выходом, имеющим коэффициент преобразования  $11.26 \cdot 10^3$  А/В. Шунт ШК-300 по своим электродинамическим и энергетическим характеристикам способен пропускать импульсные токи как микросекундной, так и миллисекундной длительности амплитудой до  $\pm 250$  кА, и заряд до  $\pm 250$  Кл при рассеиваемой на нем тепловой энергии до 650 Дж [8].

Практическая реализация требуемых согласно [1–5] максимальных нормированных а.в.п. аperiodических импульсов тока временной формы 10 мкс/350 мкс искусственной молнии амплитудой  $I_m = \pm 200$  кА в ГИТМ-10/350 с низкоомной активно-индуктивной нагрузкой ( $R_n \approx 0.1$  Ом,  $L_n \approx 1.5$  мкГн) осуществляется при суммарном за-

рядном напряжении высоковольтных конденсаторов для г.и.т.-1–г.и.т.-3 в диапазоне  $\pm(30–31)$  кВ, а для г.и.т.-4 –  $\pm(9.0–9.2)$  кВ. В последнем случае зарядное напряжение  $U_{C4}$  в г.и.т.-4 для его отдельных конденсаторов ИМ2-5-140 не будет превышать  $\pm 4.6$  кВ. Для получения минимальных нормированных по [1–5] а.в.п. рассматриваемых аperiodических импульсов тока имитируемой л.м. амплитудой  $I_m = \pm 100$  кА в ГИТМ-10/350 с указанной электрической нагрузкой зарядное напряжение  $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3}$  отдельных конденсаторов ИК-50-3 для г.и.т.-1–г.и.т.-3 изменяется в диапазоне  $\pm(15–15.5)$  кВ, а зарядное напряжение  $U_{C4}$  отдельных конденсаторов ИМ2-5-140 для г.и.т.-4 –  $\pm(2.25–2.3)$  кВ.

На рис. 6 приведена осциллограмма полученного в разрядной цепи ГИТМ-10/350 с низкоомной активно-индуктивной нагрузкой аperiodического импульса тока искусственной молнии с нормированными а.в.п. в соответствии с требованиями международного стандарта IEC 62305-1–2010 [1]. При зарядном напряжении  $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = -15$  кВ и  $U_{C4} = -2.25$  кВ амплитуда протекшего через указанную электрическую нагрузку импульса тока отрицательной полярности короткого удара имитированной л.м. по модулю составила  $I_m \approx 106$  кА.

При этом время, соответствующее амплитуде  $I_m$  тока искусственной молнии, составило  $t_m \approx 24$  мкс. Длительность фронта полученного нормированного импульса тока л.м. между уровнями  $(0.1–0.9)I_m$  составила  $\tau_f \approx 15$  мкс, а длительность сформированного на выбранной активно-индуктивной нагрузке аperiodического импульса тока л.м. на уровне  $0.5I_m$  оказалась равной  $\tau_p \approx 340$  мкс. Интеграл действия полученного в этом случае аperiodического импульса тока искусственной молнии с модулем нормированной амплитуды  $I_m \approx 106$  кА составил  $J_a \approx 3.03 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с, а модуль протекшего через используемую нагрузку электрического заряда  $-q_l \approx 52.2$  Кл. Численная оценка для представленной на рис. 6 осциллограммы разрядного тока в использованной нагрузке интеграла действия  $J_a$  и заряда  $q_l$  была проведена по следующим приближенным расчетным соотношениям [15]:

$$J_a \approx k_L^2 I_m^2 [0.14 t_m + 0.66 \tau_p + t_m \tau_p (1.52 t_m + 7.4 \tau_p)^{-1}]; \tag{1}$$

$$q_l \approx k_L I_m (1.32 \tau_p + 0.27 t_m), \tag{2}$$

где  $k_L = \left[ (0.21 t_m \tau_p^{-1})^{\frac{0.76 t_m}{3.7 \tau_p - 0.76 t_m}} - (0.21 t_m \tau_p^{-1})^{\frac{3.7 \tau_p}{3.7 \tau_p - 0.76 t_m}} \right]^{-1}$  – нормирующий коэф-

фициент для апериодического импульса тока искусственной молнии (в нашем случае  $k_L \approx 1.082$ ).

Приведенные согласно данным рис. 6, (1) и (2) результаты моделирования в лабораторных условиях при зарядных напряжениях  $U_{C_1} = U_{C_2} = U_{C_3} = -15$  кВ и  $U_{C_4} = -2.25$  кВ отдельных высоковольтных импульсных конденсаторов четырех указанных г.и.т. созданного ГИТМ-10/350 апериодического импульса тока первого короткого удара искусственной л.м. нормированной временной формой 10 мкс/350 мкс и амплитудой  $I_m$  указывают на то, что они соответствуют уровням III–IV защиты от молнии технических объектов, удовлетворяющих требованиям [1–5].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и апробирован в работе мощный высоковольтный генератор, способный формировать на низкоомной активно-индуктивной нагрузке апериодические импульсы тока первого короткого удара искусственной молнии положительной (отрицательной) полярности нормированной временной формы 10 мкс/350 мкс и амплитуды  $I_m = \pm(100–200)$  кА. При получении в лабораторных условиях таких испытательных импульсов тока имитированной л.м. рабочее напряжение высоковольтных импульсных конденсаторов ИК-50-3 общим количеством 171 для его г.и.т.-1–г.и.т.-3 не превышает  $\pm 31$  кВ, а высоковольтных импульсных конденсаторов ИМ2-5-140 в количестве 288 для г.и.т.-4 –  $\pm 4.6$  кВ. Запасаемая энергия четырех параллельно работающих при указанных зарядных напряжениях на общую электрическую нагрузку г.и.т. этого мощного высоковольтного ГИТМ-10/350 достигает 640 кДж. Созданный генератор может быть использован для проверки стойкости различных электротехнических устройств объектов промышленной электроэнергетики и технических сооружений к воздействию токового импульса искусственной л.м. нормированной формой и амплитудой в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов по [1–5].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 62305-1: 2010 “Protection against lightning. Part 1: General principles”. Geneva: IEC, 2010.
2. IEC 62305-2: 2010 “Protection against lightning. Part 2: Risk management”. Geneva: IEC, 2010.
3. IEC 62305-3: 2010 “Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard”. Geneva: IEC, 2010.
4. IEC 62305-4: 2010 “Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures”. Geneva: IEC, 2010.
5. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1–2010. Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы. М.: Стандартинформ, 2011.
6. Сухоруков С.А. Помехозащитные устройства ЗАО “ЭМСОТЕХ”. Калуга: ЭМСОТЕХ, 2014.
7. <http://books.google.com.ua/high.voltage.technique.generator/>
8. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. // ПТЭ. 2008. № 3. С. 81.
9. SAE ARP 5412/ED-84. Нормативный документ США “Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока”. 1985.
10. SAE ARP 5416/ED-84. Нормативный документ США “Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов”. 1997.
11. MIL-STD-464A. Военный стандарт США “Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем”. Изд-во Минобороны США, 2002.
12. КТ-ВВФ/DO-160D. Квалификационные требования РФ “Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний”. М.: Госстандарт РФ, 2004.
13. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н., Ермауратский В.В., Кучинский Г.С., Мезенин О.Л., Назаров Н.И., Перегудова Е.Н., Рудь В.И., Садовников А.И., Смирнов Б.К., Степина К.И. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1987.
14. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. М.: Энергоатомиздат, 1988.
15. Баранов М.И., Кравченко В.И. // Электричество. 2013. № 10. С. 7.