

М.И. БАРАНОВ, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
Г.М. КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
О.С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ, вед. инженер, НТУ «ХПИ»;
А.В. ПЛИЧКО, мл. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
Е.Г. ПОНУЖДАЕВА, зав. лаб., НТУ «ХПИ»

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯДНИК С ГРАФИТОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ РВГУ-50

В статье представлены технические характеристики и описание конструкции высоковольтного искрового разрядника РВГУ-50. Разрядник предназначен для коммутации разрядной цепи имитатора импульсного тока молнии с амплитудой до 220 кА при длительности импульса до 350 мкс. Длительность фронта импульса тока – от единиц до десятков мкс. Графитовые электроды разрядника обеспечивают значительный ресурс эксплуатации имитатора при проведении испытаний технических средств на стойкость к воздействию прямого удара молнии с параметрами, соответствующими максимальным разрушающим факторам. Разрядник РВГУ-50 прошел испытания на действующем имитаторе импульсного тока молнии.

Ключевые слова: управляемый разрядник, графитовые электроды, имитатор импульсного тока молнии.

Введение. Современные требования к обеспечению необходимого уровня надежности и безопасности эксплуатации систем, объектов и элементов электроэнергетики, аэрокосмической техники и иных технических средств (ТС) определяют уровень стойкости к воздействию разрушающих факторов прямого удара молнии (разряда молнии – РМ). Ряд нормативных государственных и международных документов [1–3] регламентируют уровни (степени) жесткости испытаний широкой номенклатуры ТС, определяя параметры воздействия, адекватные РМ, такие как амплитудно-временные параметры импульса тока молнии, количественные показатели переносимого заряда как в отдельных составляющих РМ, так и суммарного.

Проведение различного вида испытаний ТС на воздействие РМ требует разработки, создания и ввода в эксплуатацию сертифицированных испытательных стендов, основой которых являются генераторы импульсных токов (ГИТ), обеспечивающие при работе в заданном алгоритме необходимые параметры импульсов тока РМ в целом, либо их составляющих (компонент), указанных в соответствующих нормативных документах.

Один из таких испытательных стендов был разработан и введен в эксплуатацию в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (г. Харьков) в 2007 г. [4]. Он содержит несколько ГИТ, основой которых являются емкостные накопители

энергии (ЕНЭ), выполненные на базе высоковольтных импульсных конденсаторов. ЕНЭ заряжаются до требуемых уровней зарядного напряжения $U_{зар}$ с последующим разрядом их в цепях разрядного контура, содержащих элементы, формирующие амплитудно-временные параметры импульса тока, испытываемое ТС, а также управляемые и неуправляемые коммутаторы (сильноточные искровые разрядники). Основные технические характеристики и конструктивные особенности разработанных нами разрядников представлены в [5, 6].

Постановка задачи. Опыт эксплуатации управляемого разрядника со стальными электродами [5] в разрядной цепи импульсного тока РМ (компонента А [1, 2]) показал, что для получения имитируемого тока молнии с амплитудой 200 кА, длительностью 350 мкс. и интегралом действия единичного импульса до $10 \cdot 10^6$ Дж/Ом [3] необходимо применение более стойких к разрушающему действию РМ материалов. В этой связи в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» разработан и изготовлен высоковольтный управляемый сильноточный воздушный искровой разрядник с графитовыми электродами типа РВГУ-50. Применение графита для материалов электродов искрового промежутка разрядника прошло апробацию на испытательном стенде [4, 6] и позволяет надеяться, что параметры надежности и долговечности разрядника РВГУ-50 будут удовлетворительны при эксплуатации его в составе имитаторов импульса тока РМ с требованиями, указанными в [3].

Описание разрядника РВГУ-50. На рис. 1 представлен общий вид РВГУ-50 (далее – разрядника).



Рисунок 1 – Общий вид высоковольтного управляемого разрядника с графитовыми электродами РВГУ-50

Основные технические характеристики разрядника РВГУ-50 представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики разрядника РВГУ-50

Наименование характеристики	Величина	Примечания
1. Максимальное постоянное напряжение между основными электродами U_m , кВ	50	Длительно допустимое, обеих полярностей
2. Максимально допустимый ток I_m , кА	220	Форма импульса тока близка к аperiодической экспоненциальной
3. Максимальный заряд, переносимый импульсом тока Q_m , Кл	100	Заряд при коммутации единичного импульса
4. Интеграл действия единичного импульса тока J , $A^2 \cdot c$, не более	$10 \cdot 10^6$	$J = \int_0^t i^2(t) dt$
5. Частота следования импульсов тока $F_{им}$, не более	1 имп. в 2 мин.	
6. Амплитуда напряжения импульсов поджига U_p , кВ	от 30 до 70	Полярность импульса согласуется с полярностью напряжения между основными электродами
7. Длительность фронта импульса напряжения поджига $\tau_{ф}$, мкс	от 1 до 7	
8. Габаритные размеры разрядника, мм x мм x мм	360 x 300 x 320	
9. Масса разрядника, кг, не более	15	

Расчетная величина омического сопротивления разрядника при удельном сопротивлении графита $\rho = 15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – не более 5 мОм.

Конструкция электродной системы разрядника представлена ниже на рис. 2.

Каждый из двух основных графитовых электродов (ОГЭ) 5 (рис. 2) имеет полусферическую рабочую поверхность и цилиндрическую контактную часть, размещенную в разрезной цилиндрической муфте 1. Муфта прижимается разрезными металлическими фланцами 2 и 4 к цилиндрической части ОГЭ, обеспечивая большую площадь переходных контактов, необходимую для передачи импульсных токов с амплитудой до 220 кА. Расстояние «а» между ОГЭ может регулироваться в пределах от 1 мм до 20 мм путем перемещения соосных ОГЭ вдоль оси X. Перемещение ОГЭ осуществляется при ослаблении крепежа стяжки разрезных фланцев.

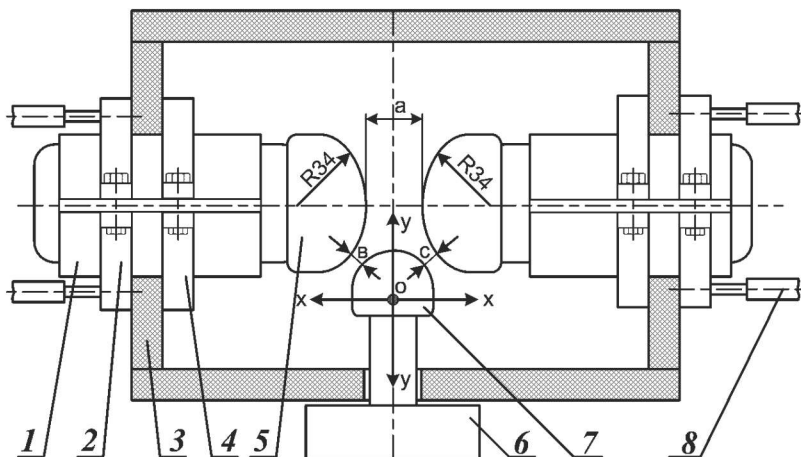


Рисунок 2 – Конструкция электродной системы разрядника: 1 – разрезные муфты; 2, 4 – разрезные фланцы; 3 – изоляционные панели корпуса; 5 – основные графитовые электроды; 6 – устройство перемещения электрода управляемого поджига (ЭУП) по осям x и y ; 7 – графитовый ЭУП; 8 – токопровод разрядного контура ГИТ

ЭУП имеет графитовый электрод с полусферической рабочей поверхностью (радиус сферы 14 мм), закрепленный в устройстве перемещения 6, и может перемещаться по осям X и Y , что позволяет менять размеры поджигающих искровых промежутков « b » и « c » между ЭУП и ОГЭ. Эта операция необходима для обеспечения надежного управляемого запуска в широком диапазоне напряжений $U_{\text{зар}}$ ЕНЭ и поджигающего импульса $U_{\text{п}}$.

Корпус разрядника изготовлен из изоляционного материала (капрлона), обеспечивающего необходимую электрическую прочность изоляции между ОГЭ при максимальном рабочем напряжении $U_{\text{зар}} = 50$ кВ.

Панели корпуса с внутренней стороны, обращенной к искровому промежутку ОГЭ, защищены от воздействия температуры и загрязнений распыленным графитом накладками из листового фторопласта толщиной 1 мм.

Разрядник устанавливается на рабочем столе испытательного стенда на четырех опорных изоляторах BUS-BAR-SM-57 высотой 57 мм.

Токопроводы 8 разрядного контура ГИТ присоединяются специальными крепежными элементами к наружным разрезным фланцам 2 (см. рис. 2). В зависимости от требований к организации токопроводов разрядного контура ГИТ к фланцам 2 могут быть присоединены как кабельные токопроводы, так и плоские медные шины.

Контрольные испытания разрядника. Целью контрольных испытаний разрядника было определение зависимости пробивного постоянного напряжения $U_{\text{пр}}$ от величины искрового промежутка « a » между ОГЭ в режиме самопробоя (при отсутствии импульса напряжения управляемого поджига).

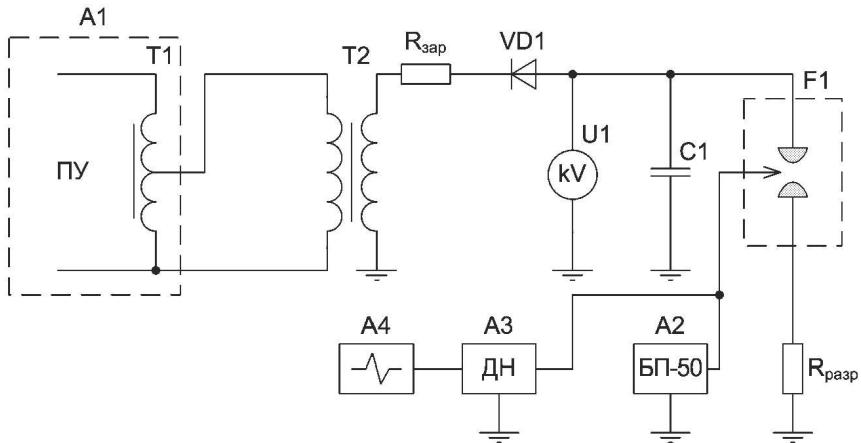


Рисунок 3 – Схема электрическая высоковольтного испытательного стенда: А1 – пульт управления (ПУ); Т1 – регулировочный автотрансформатор ПУ; Т2 – высоковольтный трансформатор ИОМ-100; $R_{зар}$ – зарядный токоограничивающий резистор сопротивлением 4,8 МОм; VD1 – диод высоковольтный; U1 – киловольтметр С-100; С1 – конденсатор ИМН-100-0,4 мкФ; F1 – испытываемый разрядник; $R_{разр}$ – разрядный резистор сопротивлением 8 Ом; А2 – блок поджига БП-50; А3 – делитель напряжения импульсный ДЕД-75; А4 – осциллограф цифровой TDS-1012 "Tektronix"

Испытания проведены на высоковольтном испытательном стенде, принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 3.

В ходе испытаний напряжение пробоя F1 (в режиме самохода или управляемого поджига) контролировалось киловольтметром U1.

Амплитудно-временные параметры импульса поджига фиксировались цифровым осциллографом А4.

На рис. 4 представлен график зависимости пробивного напряжения $U_{пр}$ F1 от расстояния «а» на самоходе, при отрицательной полярности $U_{зар}$ и удаленном поджигающем электроде.

На рис. 5 представлена осциллограмма импульса напряжения поджига $U_{п}$ с пробоем промежутка «с» = 10 мм между основным и поджигающим электродами (основной электрод соединен с $R_{разр}$.); «а»=10 мм. Импульс поджига создавался генератором поджигающих импульсов «Блок поджига БП-50» [7], работающим в режиме ручного управления.

Амплитуда напряжения пробоя промежутка «с» $U_{пр.} = 32$ кВ; время пробоя $t_{пр} = 2,7$ мкс (коэффициент деления ДЕД-75 $K = 1550$)

В ходе проведения испытаний созданного разрядника было установлено, что напряжение пробоя $U_{пр}$ промежутка «а» между ОГЭ в режиме самохода при отрицательной и положительной полярности $U_{зар}$ практически совпадает; зависимость $U_{пр}$ от величины промежутка «а» линейна в диапазоне изменения «а» от 1 мм до 10 мм.

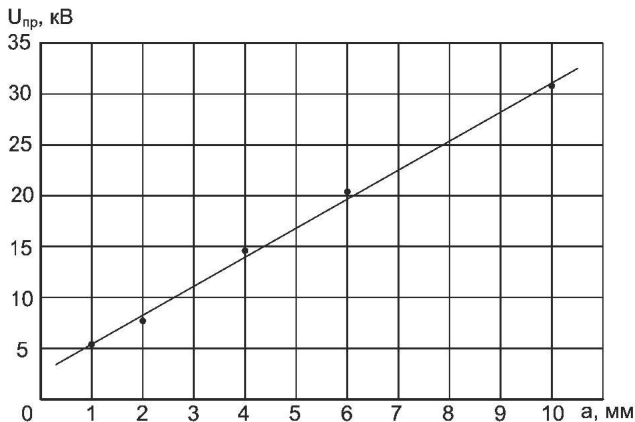


Рисунок 4 – Зависимость пробивного напряжения от расстояния между ОГЭ

Проведена проверка электрической прочности изоляции разрядника; при величине промежутков «а», «б» и «с», равным 20 мм, изоляция разрядника выдержала воздействие напряжения $U_{зар} = 55$ кВ как положительной так и отрицательной полярности в течение трех минут без пробоя.

Результаты экспериментальной апробации работы разрядника РВГУ–50 в составе имитатора импульса тока молнии

Апробация работы разрядника РВГУ-50 произведена на экспериментальной базе НИПКИ «Молния». Разрядник был смонтирован на рабочем столе мощного генератора импульсного тока ГИТМ-10/350, предназначенного для имитации импульсов тока молнии с амплитудой (200 ± 20) кА, длительностью фронта импульса $\tau_{ф} = (10 \pm 2)$ мкс и длительностью импульса $\tau_{и}$ в пределах $(270 - 370)$ мкс. Разрядник РВГУ-50 установлен в разрядную цепь трех параллельно работающих высоковольтных ГИТ:

- ГИТ-1, содержащий 32 параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсатора (ВИК);
- ГИТ-2, содержащий 102 параллельно работающих ВИК;
- ГИТ-3, содержащий 111 параллельно соединенных ВИК;

В качестве ВИК использованы конденсаторы ИК-50-3. В процессе проведения апробации разрядника РВГУ-50 зарядное напряжение $U_{зар}$ конденсаторов – 15 кВ (полярность отрицательная). Синхронно с ГИТ-1 – ГИТ-3 на общую активно-индуктивную нагрузку ($R = 0,1$ Ом, $L = 1$ мкГн) разряжался ГИТ-4, содержащий 288 ВИК типа ИМ2-5-140, заряжаемых в описываемом эксперименте до напряжения 2,1 кВ. Разряд ГИТ-4 коммутировался двух-электродным разрядником с графитовыми электродами РВГ-10 [6], пробой которого осуществлялся синхронно с пробоем основного межэлектродного промежутка разрядника РВГУ-50 при подаче на его управляющий электрод

высоковольтного импульса поджига от генератора поджигающих импульсов ГПИ-100 [4]. Инициация разряда ГИТов на общую нагрузку осуществлялась взрывающимся проводником (медная проволока диаметром 0,2 мм, длиной 50 мм).

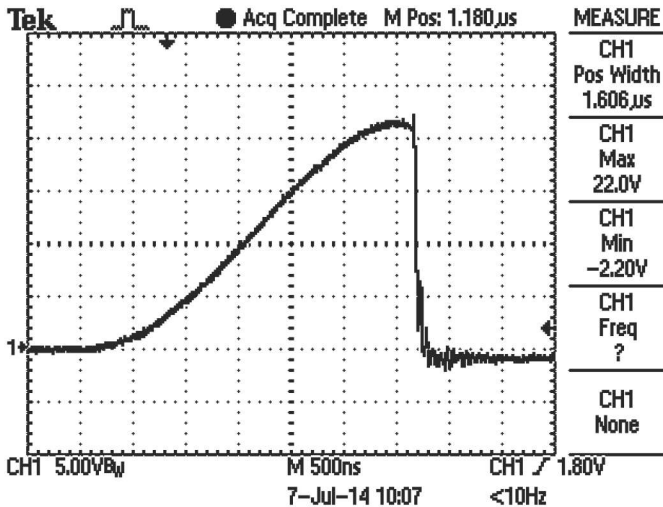


Рисунок 5- осциллограмма импульса напряжения поджига $U_{п}$ с пробоем промежутка «с» = 10 мм между основным и поджигающим электродами (основной электрод соединен с $R_{разр.}$); «а»=10

На рис. 6 представлен внешний вид рабочего стола генератора тока искусственной молнии ГИТМ-10/350 с установленным на нем разрядником РВГУ-50.

На рис. 7 приведена осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии, полученного в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 на стадии его пуско-наладки.

Осциллограмма была зарегистрирована цифровым запоминающим осциллографом Tektronix TDS 1012. Сигнал, пропорциональный амплитудно-временным параметрам импульса тока в нагрузке, подавался на осциллограф от измерительного шунта ШК-300 [8] с коэффициентом преобразования $11,26 \cdot 10^3$ А/В.

Все используемые при испытаниях разрядника измерительные приборы прошли поверку в государственных метрологических службах.

Расшифровка осциллограмм серии импульсов дала следующие результаты:

- амплитуда импульса тока $I_M=160$ кА;
- длительность импульса тока (на уровне $0,5 I_M$) $\tau_{п} = 275$ мкс.

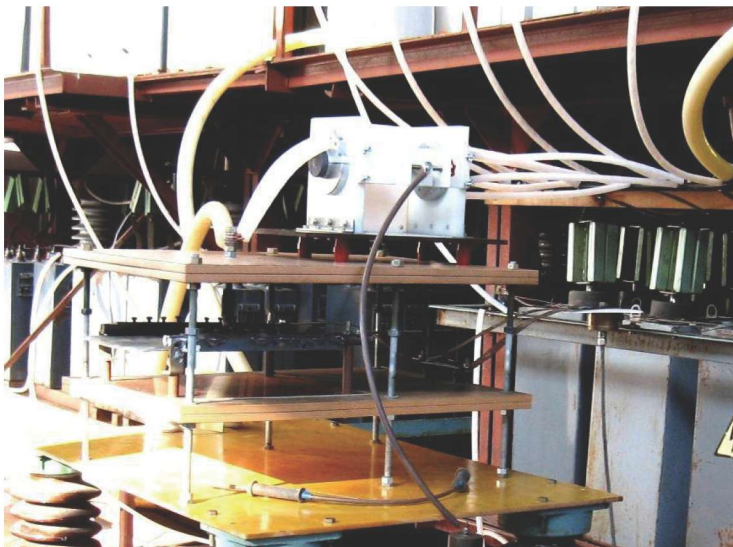


Рисунок 6 – Внешний вид рабочего стола генератора тока молнии ГИТМ-10/350 с установленным на нем разрядником РБГУ-50

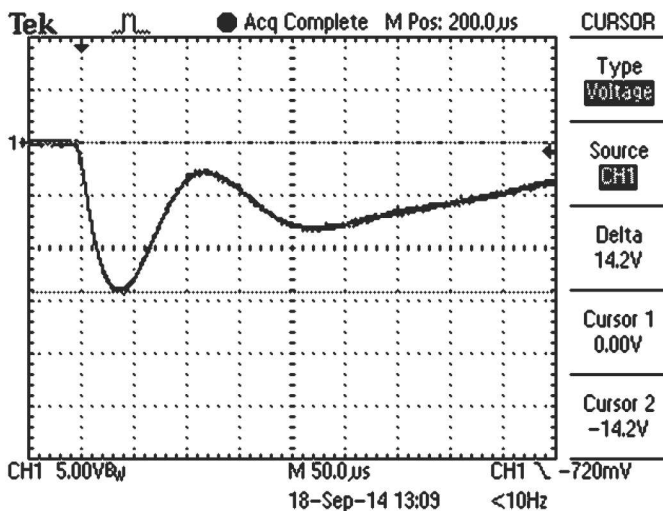


Рисунок 7 – Осциллограмма импульса тока искусственной молнии амплитудой $I_m = 160$ кА

Анализ полученных результатов позволяет предполагать, что при зарядных напряжениях $U_{зар}$ конденсаторов генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 равным 20 кВ и зарядном напряжении конденсаторов генератора ГИТ-4, равном

4,2 кВ (полярность зарядных напряжений - отрицательная), следует ожидать величину τ_n равной (350±35) мкс и величину I_m равной (200±20) кА.

Визуальное обследование состояния двух основных и одного управляющего графитовых электродов испытываемого в разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 сильноточного трехэлектродного разрядника типа РВГУ-50 после коммутаций им пяти аperiodических импульсов тока амплитудой $I_m = 160$ кА показало, что негативного электротермического и электродинамического действия каналов сильноточных искровых разрядов на рабочие поверхности графитовых электродов разрядника не наблюдается. Полученные результаты экспериментальной апробации разработанного и изготовленного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» высоковольтного сильноточного трехэлектродного воздушного управляемого разрядника с графитовыми электродами типа РВГУ-50 подтверждают правильность принятых технических решений при его создании.

Выводы

1. Создан высоковольтный сильноточный трехэлектродный воздушный управляемый разрядник с графитовыми электродами типа РВГУ-50.

2. Экспериментальная апробация на действующем мощном высоковольтном генераторе тока искусственной молнии ГИТМ-10/350 подтвердила работоспособность сильноточного трехэлектродного воздушного управляемого разрядника с графитовыми электродами типа РВГУ-50, разработанного и изготовленного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ».

Список литературы: 1. Нормативный документ SAE ARP 5412/ED84. «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированная составляющая внешнего тока». – США, 1985. – С. 30-39. 2. Нормативный документ КТР-ВВФ/ДО-160Д/ЕД-14Д. Квалификационные требования. Раздел 23.0. «Прямое воздействие молнии». – Россия, 2004. – С. 258-273. 3. Нормативный документ ДСТУ ІЕС62305-01-2003 «Захист від блискавки, частина 1: Загальні положення». – Київ, 2009. 4. Баранов М.И. Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии / М.И. Баранов, Г.М. Колушко, В.И. Кравченко, О.С. Недзельский // *Электротехніка і Електромеханіка*. – 2008. – № 3 – С. 69-75. 5. Баранов М.И. Высоковольтный сильноточный трехэлектродный каскадный воздушный разрядник генератора тока искусственной молнии / М.И. Баранов Г.М. Колушко, В.И. Кравченко, О.С. Недзельский, М.А. Носенко // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2008. – №21 – С. 3-12. 6. Баранов М.И. Мощный высоковольтный малогабаритный двухэлектродный воздушный разрядник генератора тока молнии / М.И. Баранов Г.М. Колушко, В.И. Кравченко, О.С. Недзельский, М.А. Носенко // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 34 – С. 3-8. 7. Доценко В.И. Генератор поджигающих импульсов «Блок поджига БП-50 / В.И. Доценко, В.М. Жижиков, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждава, В.Г. Фоменко // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2006. – № 17 – С. 43-46. 8. Днищенко В.Н. Измерительный шунт ШК-300 для определения амплитудно-временных параметров имитированного импульса тока молнии / В.Н. Днищенко, В.О. Еремеев, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждава // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 20. – С. 75-79.

Bibliography (transliterated): 1. Normativnyj dokument SAE ARP 5412/ED84 «Rekomenduemaya

практика авиационно – космических работ. Идеализированная составляющая внешнего тока». SShA. 1985. 30-39. Print. **2.** Normativnyj dokument KTR VVF/DO-160D/ED-14D. Kvalifikacionnye trebovaniya. Razdel 23.0 «Pryamoe vozdejstvie molnii» Rossiya, 2004. 258-273. Print. **3.** Normativnyj dokument DSTU IEC 62305-01-2003 «Zahist vid bliskavki. Chastina 1 «Zagalni polozhennya», Kijv, 2009. Print. **4.** M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, O.S. Nedzelskij: «Moshchnaya vysokovolt'naya ehlektrofizicheskaya ustanovka dlya imitacii polnogo toka molnii». Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2008. №3. 69-75. Print. **5.** M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, O.S. Nedzelskij, M.A. Nosenko: «Vysokovolt'nyj silnotochnyj trekhelektroodnyj kaskadnyj vozdušnyj rozryadnik generatora toka iskusstvennoj molnii» Vestnik NTU «KhPI». Tem. Vypusk: Tekhnika i ehlektrofizika vysokih napryazhenij. Kharkov: NTU «KhPI». 2008. №21. 3-12. Print. **6.** M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, O.S. Nedzelskij, M.A. Nosenko: «Moshchnyj vysokovolt'nyj malogabaritnyj dvuhelektroodnyj vozdušnyj rozryadnik generatora toka molnii». Vestnik NTU «KhPI». Tem. Vypusk: Tekhnika i ehlektrofizika vysokih napryazhenij. – Kharkov: NTU «KhPI». 2007. №34. 3-8. Print. **7.** V.I. Docenko, V.M. ZHinzhičkov, O.S. Nedzelskij, E.G. Ponuzhdaeva, V.G. Fomenko: «Generator podzhigayushchih impul'sov «Blok podzhiga BP-50». Vestnik NTU «KhPI». Tem. Vypusk: Tekhnika i ehlektrofizika vysokih napryazhenij. Kharkiv: NTU «KhPI». 2006. №17. 43-46. Print. **8.** V.N. Dnishhenko, V.O. Eremeev, O.S. Nedzelskij, E.G. Ponuzhdaeva: «Izmeritel'nyj shunt ShK-300 dlya opredelenija amplitudno-vremennyh parametrov imitirovannogo impul'sa toka molnii». Vestnik NTU «HPI». Tem. vypusk: Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij. – Khar'kiv: NTU «HPI». 2007. №20. 75-79. Print.

Поступила (received) 17.10.2014

УДК 621.316.99

И.Н. БОГАТЫРЕВ, доцент, НТУ «ХПИ»;

В.И. ДОЦЕНКО, канд. техн. наук, вед. инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

А.В. ПЛИЧКО, мл. науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КДЗ-1У

В статье рассмотрена модернизация комплекса КДЗ-1У для диагностики заземляющих устройств, в результате которой было снижено его энергопотребление, уменьшены массогабаритные показатели, повышена эргономичность и точность определения параметров заземляющих устройств. Этого удалось достичь за счет повышения КПД генератора, замены трансформаторного блока питания на импульсный, улучшения измерительной части комплекса, изменения системы управления.

Ключевые слова: модернизация, диагностики заземляющих устройств.

Введение. В электротехнических устройствах (открытые и закрытые распределительные устройства, автоматические телефонные станции, нефтеперекачивающие станции, машинные и компьютерные залы и т.д.) безопас-

© И.Н. Богатырев, В.И. Доценко, А.В. Пличко, 2014