

М.И.БАРАНОВ, докт.техн.наук; **Г.М.КОЛИУШКО**, канд.техн.наук;
В.И.КРАВЧЕНКО, докт.техн.наук; **О.С.НЕДЗЕЛЬСКИЙ**,
М.А.НОСЕНКО; НТУ «ХПИ»

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЙ КАСКАДНЫЙ ВОЗДУШНЫЙ РАЗРЯДНИК ГЕНЕРАТОРА ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Описано конструкцію й технічні характеристики створеного високовольтного сильноточного трьохелектродного каскадного повітряного розрядника атмосферного тиску, який використовувався у складі потужних генераторів імпульсної A і повторної імпульсної D складових повного струму штучної блискавки.

Design and performance data of developed high-voltage high-current three-electrode cascade air discharger on atmosphere pressure which is used in power generators of pulsed A and repetitive pulsed D components of full current on artificial lightning is described .

1 ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних десятилетий активного развития в мире электроэнергетики, авиационной и ракетно-космической техники актуальной научно-технической проблемой в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) остается та, которая связана с разработкой, созданием и практическим применением в указанных технических областях мощных генераторов тока искусственной молнии. Данные генераторы предназначаются для проведения натуральных испытаний важных технических объектов из упомянутых высокотехнологичных наукоемких производственных сфер на электромагнитную совместимость и стойкость к воздействию поражающих факторов молнии. Одним из таких факторов является протекающий в искровом канале молнии электрический ток, вызывающий сильное электротермическое и электродинамическое действие на элементы из металлических (композиционных) материалов поражаемой им техники. Имитируемый в лабораторных условиях с помощью ВИТ полный ток молнии содержит следующие основные компоненты [1]: импульсную A , промежуточную B , длительную C (или C^*) и повторную импульсную D токовые составляющие. При этом каждая из указанных токовых компонент молнии имеет свои нормированные амплитудно-временные параметры (АВП). Импульсная A компонента искусственной молнии характеризуется амплитудой $I_{mA} = (180-220)$ кА с интегралом действия $J_{dA} = (1,6-2,4) \cdot 10^6$ А²·с и длительностью t_0 до 500 мкс. Промежуточная B компонента – амплитудой $I_{mB} = (1,6-2,4)$ кА, длительностью t_0 до 5 мс и электрическим зарядом $q_B = (9-11)$ Кл. Длительная C компонента – ам-

плитудой $I_{mC} = (0,2-0,8)$ кА, длительностью t_0 от 250 до 1000 мс и переносимым электрическим зарядом $q_C = (160-240)$ Кл. Повторная импульсная D компонента – амплитудой $I_{mD} = (90-110)$ кА с интегралом действия $J_{dD} = (0,2-0,3) \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ и длительностью t_0 до 500 мкс. Указанные выше АВП основных токовых компонент молнии свидетельствуют о том, что моделирующее их в отдельности или в требуемой последовательной комбинации высоковольтное электрофизическое оборудование должно содержать в своем составе ряд мощных накопителей энергии (МНЭ), число которых, как правило, должно быть равно числу имитируемых токовых компонент. В 2007 году в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» был разработан и создан на экспериментальной базе института (п. Андреевка, Харьковской обл.) на основе ряда действующих МНЭ конденсаторного типа высоковольтный испытательный комплекс из пяти мощных генераторов импульсного тока (ГИТ), способных на общей активно-индуктивной нагрузке (с активным сопротивлением до 0,05 Ом и индуктивностью до 1 мкГн) генерировать согласно требованиям [1] все основные составляющие (A , B , C и D токовые компоненты плюс дополнительную длительную токовую составляющую C^* со средним током в 400 А и временем его протекания t_0 до 50 мс) полного тока искусственной молнии.

Целью данной работы является краткое описание конструкции и технических характеристик высоковольтного сильноточного трехэлектродного каскадного воздушного разрядника атмосферного давления на номинальное электрическое напряжение ± 50 кВ типа ТКВР-50, используемого в сооруженных в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» генераторах импульсной (A – компонента, генератор ГИТ-А) и повторной импульсной (D – компонента, генератор ГИТ-Д) составляющих полного тока искусственной молнии.

2 СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОГО КАСКАДНОГО РАЗРЯДНИКА ТИПА ТКВР-50 В ГЕНЕРАТОРЕ ТОКА МОЛНИИ

На рис. 1 приведена электрическая схема включения высоковольтного сильноточного трехэлектродного каскадного воздушного разрядника на номинальное напряжение ± 50 кВ типа ТКВР-50 в разрядной цепи генератора ГИТ-А с МНЭ конденсаторного типа, предназначенного для формирования на RL -нагрузке (например, в испытываемом листовом образце металлической обшивки летательного аппарата) A – компоненты тока искусственной молнии. Согласно рис. 1 МНЭ конденсаторного типа генератора импульсной A составляющей тока молнии (емкостью $C_{ГА} = 336$ мкФ, активным сопротивлением $R_{ГА} = 0,061$ Ом и индуктивностью $L_{ГА} = 2,05$ мкГн) после своего заряда до высокого номинального напряжения $U_{ЗА} = \pm 50$ кВ, дальнейшего срабатывания сильноточного трехэлектродного каскадного воздушного разрядника P_3 типа ТКВР-50 в цепи генератора ГИТ-А и электрического пробоя воздушного промежутка в электродной системе (ЭС) разряжается на испы-

тываемый технический объект, например, на листовом образце металлической обшивки летательного аппарата, и формирует в нем соответствующую токовую A – компоненту искусственной молнии.

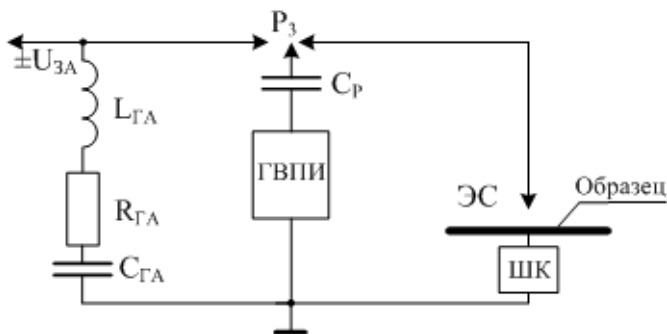


Рисунок 1 – Электрическая схема включения в разрядной цепи генератора импульсной A составляющей тока искусственной молнии с ЭС и испытываемым образцом высоковольтного сильноточного каскадного воздушного разрядника P_z типа ТКВР-50

Синхронное срабатывание в цепи генератора ГИТ-А разрядника типа ТКВР-50 (с рабочей длиной воздушного промежутка между его основными электродами до 15 мм, а между управляющим электродом и непотенциальным электродом – до 5 мм) и электрический пробой в воздушном промежутке ЭС над испытываемым образцом (с длиной промежутка до 10 мм) при этом обеспечиваются одновременной подачей на управляющий электрод разрядника P_z и разрядный воздушный промежуток ЭС от генератора высоковольтных поджигающих импульсов типа ГВПИ-100 импульсного напряжения микросекундной длительности амплитудой до 100 кВ. Для развязки генератора управляющих импульсов напряжения типа ГВПИ-100 со схемой генератора ГИТ-А в его электрической цепи использован разделительный конденсатор $C_p = 180$ пФ на 120 кВ, собранный из 12 последовательно соединенных дисковых керамических емкостей типа КВИ-3-2200 пФ на 10 кВ [2].

3 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОГО КАСКАДНОГО РАЗРЯДНИКА ТИПА ТКВР-50

На рис. 2 представлен общий вид высоковольтного сильноточного каскадного воздушного разрядника на номинальное напряжение ± 50 кВ типа ТКВР-50. Данный разрядник содержит: два основных стальных полусферических электрода диаметром 123 мм и один управляющий стальной сферический электрод диаметром 30 мм, размещенный между основными электродами разрядника типа ТКВР-50 и закрепленный при помощи специального

механического приспособления на продольной прямоугольной пластине из оргстекла СОЛ-10 длиной 290 мм. Потенциальный основной электрод электрически подсоединяется к МНЭ генератора ГИТ-А или генератора ГИТ-Д, а его непотенциальный основной электрод – к верхнему электроду ЭС, расположенному над испытываемым элементом технического объекта (например, над листовым образцом металлической обшивки летательного аппарата). Управляющий сферический электрод разрядника типа ТКВР-50 через стальной шток с прижимом длиной 130 мм посредством радиочастотного кабеля типа РК-50-7-11 (без медной оплетки) подсоединяется к выходу разделительного конденсатора C_p , вход которого подключается к высоковольтному генератору поджигающих импульсов напряжения типа ГВПИ-100.

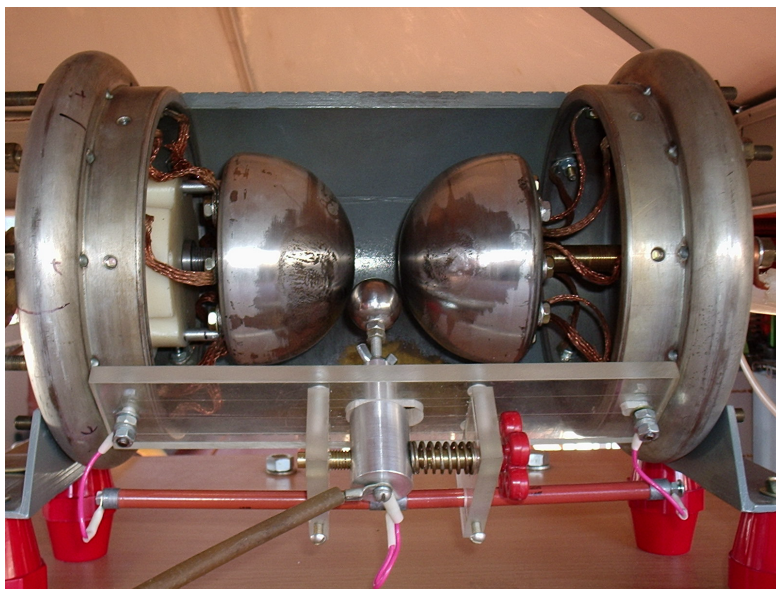


Рисунок 2 – Общий вид после модернизации высоковольтного сильноточного каскадного воздушного разрядника на номинальное напряжение ± 50 кВ типа ТКВР-50, обеспечивающего коммутацию разрядных цепей генераторов нормированных импульсной A и повторной импульсной D составляющих тока искусственной молнии амплитудой до $I_{mA} = 220$ кА с интегралом действия до $J_{dA} = 2,4 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c}$

Конструкция управляющего электрода при неподвижных основных электродах разрядника допускает надежную регулировку воздушных зазоров между его сферой $\text{Ø}30$ мм из стали марки Ст.3 и основными полусферическими металлическими электродами $\text{Ø}123$ мм также из стали марки Ст.3 трехэлектродного разрядника типа ТКВР-50, что существенно облегчает на-

стройку этого типа разрядника при изменении зарядного напряжения U_3 МНЭ в генераторах ГИТ-А или ГИТ-Д. Из-за примененной и ранее предложенной в [3] конструкции электродов высоковольтного трехэлектродного воздушного разрядника атмосферного давления созданный разрядник типа ТКВР-50 может быть отнесен к разрядникам каскадного типа, описанным в [4]. Кроме того, конструкция непотенциального основного электрода данного разрядника позволяет производить прямую регулировку длины воздушного промежутка между его основными электродами. На краях разрядника типа ТКВР-50 размещены соединенные медными гибкими шинами с основными стальными электродами круглые массивные стальные фланцы наружным диаметром 236 мм, закрепленные на изоляционном корпусе разрядника, выполненном для удобства в обслуживании разрядника в виде части продольной стеклопластиковой трубы наружным диаметром 226 мм и длиной 290 мм. Для повышения надежности работы системы электрического запуска разрядника типа ТКВР-50 его управляющий электрод через идентичные высоковольтные «плечи» резисторов типа КЭВ-5-510 МОм гальванически подсоединен к основным электродам (рис. 2). Описываемый разрядник с помощью алюминиевых уголков и фигурных изоляторов высотой 76 мм закреплен на плоском массивном горизонтальном изоляционном основании из СТЭФ-20 рабочего стола генератора тока искусственной молнии. Габаритные размеры сильноточного разрядника типа ТКВР-50 составляют: высота-312 мм; ширина-250 мм; длина-430 мм. Вес созданного и апробированного в реальной работе мощного высоковольтного сильноточного разрядника типа ТКВР-50 не превышает 40 кг.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ РАБОТЫ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОГО КАСКАДНОГО РАЗРЯДНИКА ТИПА ТКВР-50

На рис. 3 приведена осциллограмма нормированной импульсной A составляющей тока искусственной молнии (A – компоненты), получаемой в разрядной цепи МНЭ конденсаторного типа генератора ГИТ-А согласно рис. 1, коммутируемой воздушным разрядником типа ТКВР-50. АВП данной токовой компоненты молнии отрицательной полярности были зарегистрированы с помощью встроенного в непотенциальную («земляную») электрическую цепь генератора A – компоненты полного тока молнии и прошедшего государственную метрологическую аттестацию измерительного коаксиального малоиндуктивного шунта (ШК) типа ШК-300, имеющего входное активное сопротивление 0,185 МОм и два согласованных выхода с коэффициентами преобразования соответственно 5642 А/В (выход № 1, для измерения B , C и C^* – компонент тока молнии) и 11261 А/В (выход № 2, для измерения A и D – компонент тока молнии) [5], и цифрового осциллографа типа *Tektronix* TDS 1012. В соответствии с данными рис. 3 следует, что амплитуда первой

токовой полуволны I_{mA} формируемой A – компоненты генератором ГИТ-А тока искусственной молнии, в состав которого входит рассматриваемый разрядник типа ТКВР-50, при $U_{3A} = -27,4$ кВ составляет: $I_{mA} = 18,8 \times 11261 = 212$ кА и полная длительность сформированной затухающей синусоидальной нормированной A – компоненты искусственной молнии составляет не менее $t_0 = 300$ мкс, а максимум ее первой полуволны соответствует времени t_m , равному около $t_m = 32$ мкс.

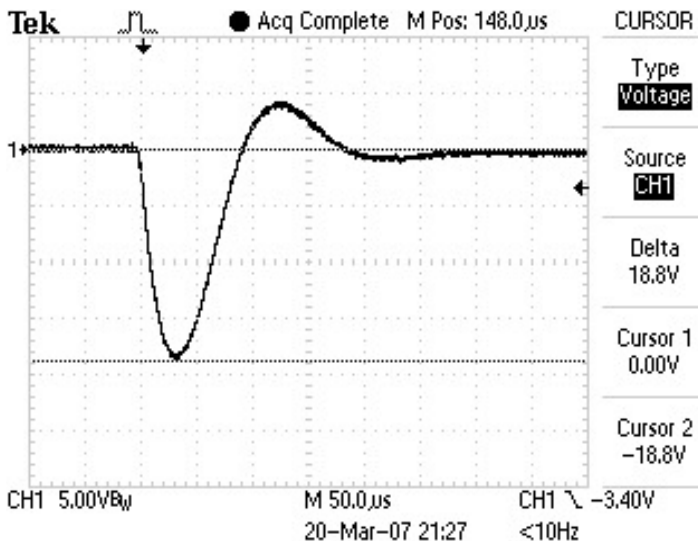


Рисунок 3 – Осциллограмма коммутируемой каскадным разрядником типа ТКВР-50 нормированной импульсной A компоненты тока искусственной молнии отрицательной полярности амплитудой $I_{mA} = 212$ кА с интегралом действия $J_{dA} = 2,07 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$

Расчетная оценка по осциллограмме на рис. 3 электрического заряда q_A , переносимого при этом импульсной A составляющей полного тока искусственной молнии, показала, что его ненормированное численное значение оказывается приблизительно равным $q_A = 15,6$ Кл. Это количество электричества может быть использовано при расчетной оценке согласно [6] электрической эрозии стальных основных и управляющего электродов сильноточного воздушного разрядника рассматриваемого типа при прохождении через них одиночного токового импульса. Имеющийся у нас «банк» экспериментальных данных, полученных при физическом моделировании с использованием генератора ГИТ-А сильноточных грозовых разрядов, применяемых для натурных испытаний различных технических объектов на молниестойкость, свидетельствует о том, что при этом в разрядной цепи МНЭ стальные элект-

троды разрядника типа ТКВР-50 испытывают сильные термические удары. Эти удары приводят к активным электроэрозионным процессам на поверхностях указанных электродов разрядника, разрушающим в зоне привязки сильноточного канала разряда (при используемых АВП тока диаметром до 60 мм согласно формуле Брагинского [7]) приповерхностные слои стальных электродов, приводящим к микроструктурным изменениям в смежных с ними слоях металла и изменяющим пробивное электрическое напряжение воздушных промежутков разрядника (см. рис. 4, где изображен разрядник после работы в составе генератора ГИТ-А до своей модернизации). Кстати, эти следы от термоударов *A* и *D* – компонент молнии видны и на зачищенных и отполированных основных электродах разрядника типа ТКВР-50, показанного на рис. 2 и прошедшего по результатам реальных испытаний технических объектов на молниестойкость.

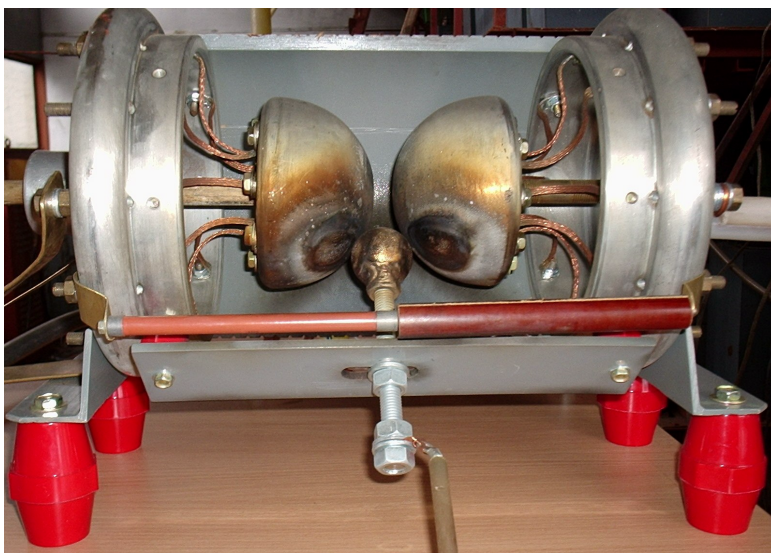


Рисунок 4 – Общий вид мощного высоковольтного сильноточного воздушного разрядника типа ТКВР-50 после 30 срабатываний в составе ГИТ-А и ГИТ-Д с явными электроэрозионными разрушениями на основных стальных сферических электродах

Отметим, что рассматриваемый здесь сильноточный каскадный разрядник типа ТКВР-50 в описанной электрической схеме генератора ГИТ-А импульсной *A* составляющей тока искусственной молнии выдержал без повреждений не менее 300 срабатываний его МНЭ конденсаторного типа при единичной запасаемой в нем электрической энергии, равной около 126 кДж. Из опыта эксплуатации следует, что после примерно 30 срабатываний разрядни-

ка типа ТКВР-50 в режиме формирования с его помощью нормированных A и D – компонент полного тока молнии участки стальных электродов разрядника, подвергаемые сильному импульсному термическому действию этих токовых составляющих грозовых электрических разрядов, необходимо обрабатывать абразивными материалами.

При выполнении ряда испытаний технических объектов на молниестойкость требуется в двухэлектродной конструкции ЭС генераторов ГИТ-А или ГИТ-Д, размещенной над испытываемым объектом, для моделирования канала сильноточного разряда осуществлять электрический взрыв (ЭВ) тонких проводников. На рис. 5 в режиме формирования в полевых условиях на испытательном комплексе A – компоненты тока искусственной молнии для проверки молниестойкости алюминиевой обшивки летательного аппарата приведена осциллограмма импульсного электрического напряжения U_{P3} на непотенциальном основном электроде разрядника типа ТКВР-50 в случае ЭВ в зоне ЭС медной проволоочки диаметром 0,2 мм и длиной 50 мм.

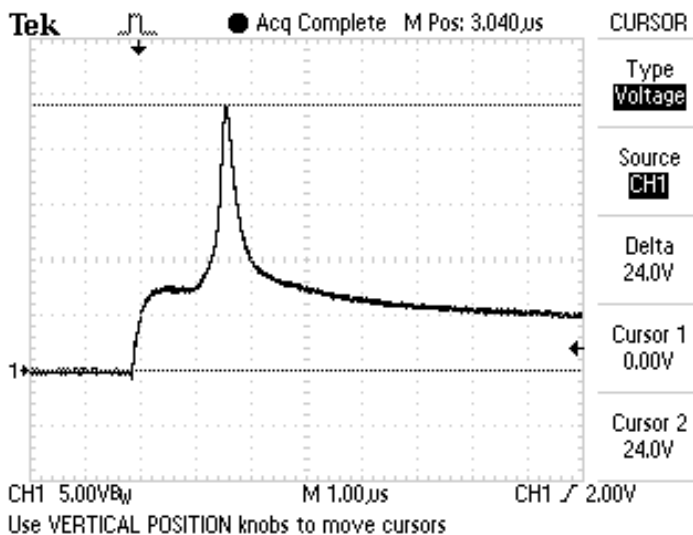


Рисунок 5 – Осциллограмма напряжения U_{P3} на непотенциальном электроде сильноточного каскадного воздушного разрядника P_3 типа ТКВР-50 при воздушном ЭВ в рабочей зоне ЭС тонкой луженой медной проволоочки диаметром 0,2 мм и длиной 50 мм

При измерении высокого напряжения U_{P3} на непотенциальном основном электроде разрядника типа ТКВР-50 в момент ЭВ в атмосферном воздухе в рабочей зоне ЭС медной проволоочки указанных размеров и срабатывания генератора ГИТ-А были использованы емкостный делитель напряжения

на ± 75 кВ типа ЕДН-75 с кабельной линией передачи электрического сигнала, имеющий коэффициент деления равный 1600, и цифровой осциллограф типа *Tektronix* TDS 1012. Заметим, что при этом зарядное напряжение емкостного МНЭ в генераторе ГИТ-А было равно $U_{3A} = +27,3$ кВ. Из данных рис. 5 видно, что в момент воздушного ЭВ медной проволоочки (диаметром 0,2 мм и длиной 50 мм), отсчитываемый от момента электрического пробоя воздушных промежутков разрядника типа ТКВР-50 (от момента срабатывания генератора ГИТ-А и начала разряда его МНЭ на ЭС и испытываемый объект) и соответствующий времени t_B , происходит пикообразное возрастание электрического напряжения U_{P3} на непотенциальном основном электроде рассматриваемого разрядника P_3 а также на верхнем металлическом электроде ЭС, достигающего максимального численного значения, равного около $U_{P3} = 24 \times 1600 = +38,4$ кВ. Согласно осциллограмме рис. 5 время t_B для электрически взрывающегося в разрядной цепи генератора ГИТ-А с разрядником типа ТКВР-50 тонкого медного проводника численно составляет примерно 1,9 мкс. Расчетная оценка этого времени t_B , выполненная для нашего случая в соответствии с приведенными в [8] приближенными аналитическими соотношениями, показывает, что момент ЭВ медного проводника, примененного для инициирования над испытываемым на молниестойкость листовым алюминиевым элементом обшивки летательного аппарата канала сильноточной искры, наступает приблизительно при $t_B = 2,1$ мкс. Сопоставление полученных опытного и расчетного значений для t_B свидетельствует о том, что они согласуются в пределах допустимой погрешности инженерных расчетов и измерений, составляющей не более 10 %.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана, создана и апробирована в реальной работе в составе мощных генераторов импульсной A и повторной импульсной D составляющих полного тока искусственной молнии новая конструкция высоковольтного сильноточного трехэлектродного каскадного воздушного разрядника атмосферного давления на номинальное напряжение ± 50 кВ типа ТКВР-50. Практическая апробация разрядника типа ТКВР-50 при испытаниях на молниестойкость опытных образцов металлической (композиционной) обшивки летательного аппарата авиационной техники подтвердила его работоспособность при коммутации им нормированных токовых A (D) компонент имитированной молнии соответственно амплитудой $I_{mA} = 212$ кА ($I_{mD} = 105$ кА) и с интегралом действия $J_{dA} = 2,07 \cdot 10^6$ А² · с ($J_{dD} = 0,26 \cdot 10^6$ А² · с).

Список литературы: 1. SAE ARP 5412/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока". – США, 1985. – С. 30-39. 2. Бочаров В.А., Пекарь И.Р. Генератор высоковольтных пусковых импульсов // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск: Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 1981. – Вып. 9. – С. 39-41. 3. Патент України

№63749, МКИ Н01Т9/00. Високовольтний повітряний розрядник // *Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К.* – Заявл. 10.06.2003. Опубл. Бюл. № 8, 15.08.2005. – 3 с. **4.** Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. *В.С.Комелькова.* – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. **5.** *Дныщенко В.Н., Еремеев В.О., Недельский О.С. и др.* Измерительный шунт ШК-300 для определения амплитудно-временных параметров имитированного импульса тока молнии // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. - Харків: НТУ «ХПІ». –2007. – № 20. – С. 75-79. **6.** *Баранов М.И.* Приближенный расчет электрической эрозии металлических электродов высоковольтных сильноточных искровых коммутаторов // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 11-14. **7.** *Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б.* Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с. **8.** *Баранов М.И.* Аналитический расчет времени электрического взрыва проводников под воздействием больших импульсных токов высоковольтных электрофизических установок // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 4. – С. 95-99.

Поступила в редколлегию 29.01.2008

УДК 620.19:389.14

В.Е.БОНДАРЕНКО, докт.техн.наук; **О.В.ШУТЕНКО**; **Н.В.АУЛОВА**;
НТУ «ХПИ»

ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Запропоновано метод оцінки статистичної однорідності результатів періодичного контролю стану трансформаторного масла. Метод базується на використанні дисперсійного аналізу лінійних моделей показника на час експлуатації. Процедуру оцінки статистичної однорідності розглянуто на прикладі такого показника як температура спалаху масла. Надана інтерпретація отриманих результатів.

The method of an estimation of statistical uniformity of results of the periodic control of a condition of transformer oil is offered. The method is based on use of the dispersive analysis of linear models of a parameter for the period of operation. Procedure of an estimation of statistical uniformity it is considered by the example of temperature of flash of oil. Interpretation of the received results is given.

Постановка задачи. Использование современных алгоритмов распознавания, как правило, базируется на широком применении обучающих выборок (последовательностей верифицированных образцов). Для формирования подобных выборок используют однотипные объекты с известным состоянием (диагнозом). Естественно, что они должны соответствовать целому ряду требований, основным из которых по нашему глубокому убеждению является адекватное отображение функционирования объекта контроля. Обеспечение такой адекватности, при использовании результатов периодическо-