



ВЕСТНИК

**НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
«ХПИ»**

21'2008

Харьков

ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА «ХПИ»

Сборник научных трудов
Тематический выпуск

21'2008

«ТЕХНИКА И
ЭЛЕКТРОФИЗИКА
ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»

Издание основано Национальным техническим университетом
«Харьковский политехнический институт» в 2001 году

Государственное издание

Свидетельство Госкомитета по информационной политике Украины
КВ № 5256 от 2 июля 2001 года

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель: Л.Л.Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

Секретарь координационного совета: К.А.Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П.Марченко, д-р техн. наук, проф.;
Е.И.Сокол, д-р техн. наук, проф.;
Е.Е.Александров, д-р техн.наук, проф.;
А.В.Бойко, д-р техн.наук, проф.;
М.Д.Годлевский, д-р техн. наук, проф.;
А.И.Грабченко, д-р техн. наук, проф.;
В.Г.Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Д.Дмитриенко, д-р техн.наук, проф.;
В.В.Епифанов, д-р техн.наук, проф.;
П.А.Качанов, д-р техн. наук, проф.;
А.Ф.Кириченко, д-р техн. наук, проф.;
В.Б.Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
В.И.Кравченко, д-р техн. наук, проф.;
О.К.Морачковский, д-р техн.наук,проф.;
В.И.Николаенко, канд.ист.наук, проф.;

П.Г.Перерва, д-р техн. наук, проф.;
Н.И.Погорелов, д-р техн. наук, проф.;
М.И.Рыщенко, д-р техн. наук, проф.;
В.Б.Самородов, д-р техн. наук, проф.;
В.П.Себко, д-р техн. наук, проф.;
В.И.Таран, д-р техн. наук, проф.;
Н.А.Ткачук, д-р техн.наук, проф.;
М.П.Требин, д-р фил. наук, доц.;
Ю.В.Тимофеев, д-р техн. наук, проф.;
Е.И.Юносова, д-р фил. наук, проф.

Адрес редколлегии: 61002, Харьков,
ул. Фрунзе, 21. НТУ «ХПИ».
НИПКИ «Молния», Тел.(057)707-63-09

Харьков 2008

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. № 21 – 150 с.

В збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор: В.И.Кравченко, д-р техн.наук, проф.

Ответственный секретарь: Л.В.Ваврив, канд.физ.-мат наук, с.н.с.

М.И.Баранов,	д-р техн. наук, с.н.с.;
Н.И.Бойко,	д-р техн. наук, доц.;
А.Г.Гурин,	д-р техн. наук, проф.;
Б.В.Клименко,	д-р техн. наук, проф.;
Г.М.Колиушко,	канд. техн. наук, с.н.с.;
В.С.Лупиков,	д-р техн. наук, доц.;
В.М.Михайлов,	д-р техн. наук, проф.;
В.В.Князев,	канд. техн. наук, с.н.с.;
Е.И.Сокол,	д-р техн. наук, проф.;
В.В.Рудаков,	д-р техн. наук, проф.;
И.В.Яковенко,	д-р техн. наук, с.н.с.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 6 від 6 червня 2008 р.

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 листовой образец металлической обшивки летательного аппарата, и формирует в нем соответствующую токовую A – компоненту искусственной молнии.

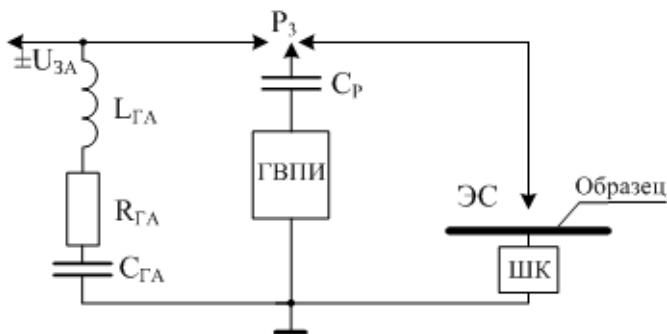


Рисунок 1 – Электрическая схема включения в разрядной цепи генератора импульсной A составляющей тока искусственной молнии с ЭС и испытываемым образцом высоковольтного сильноточного каскадного воздушного разрядника P_z типа ТКВР-50

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.

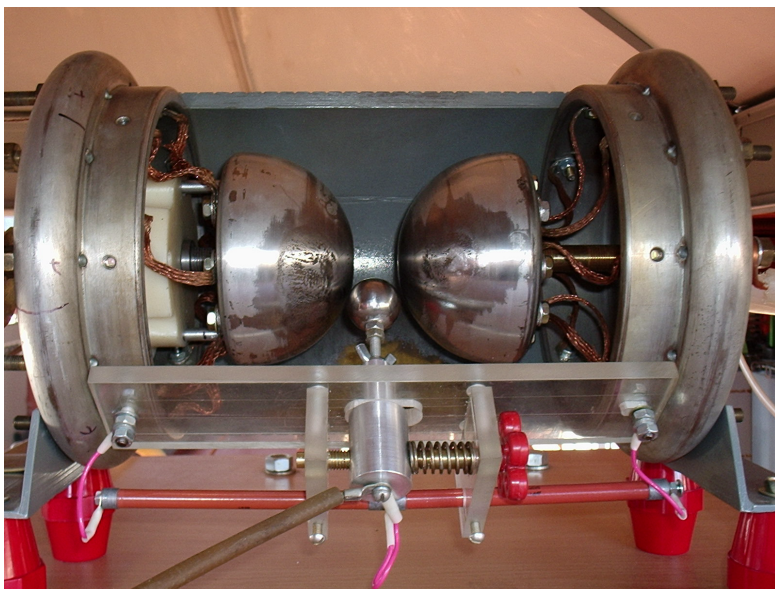


Рисунок 2 – Общий вид после модернизации высоковольтного сильноточного каскадного воздушного разрядника на номинальное напряжение ± 50 кВ типа ТКВР-50, обеспечивающего коммутацию разрядных цепей генераторов нормированной импульсной A и повторной импульсной D составляющих тока искусственной молнии амплитудой 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.

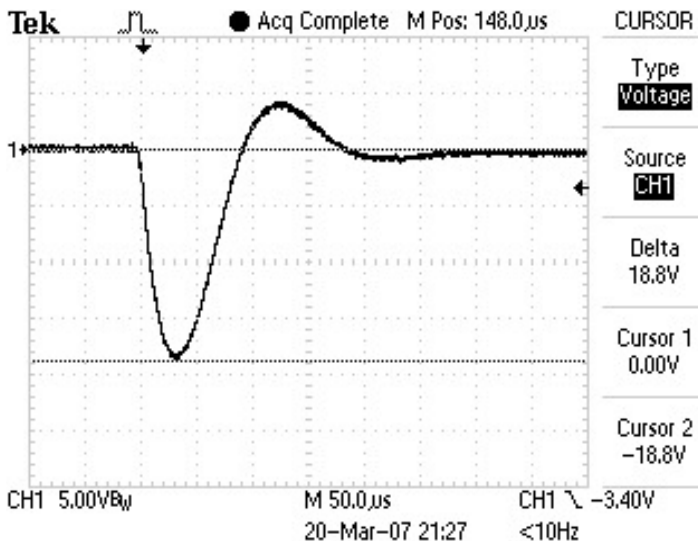


Рисунок 3 – Осциллограмма коммутируемой каскадным разрядником типа ТКВР-50 нормированной импульсной A компоненты тока искусственной молнии отрицательной полярности амплитудой $I_{mA} = 212$ кА с интегралом действия $J_{dA} = 2,07 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c}$

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.

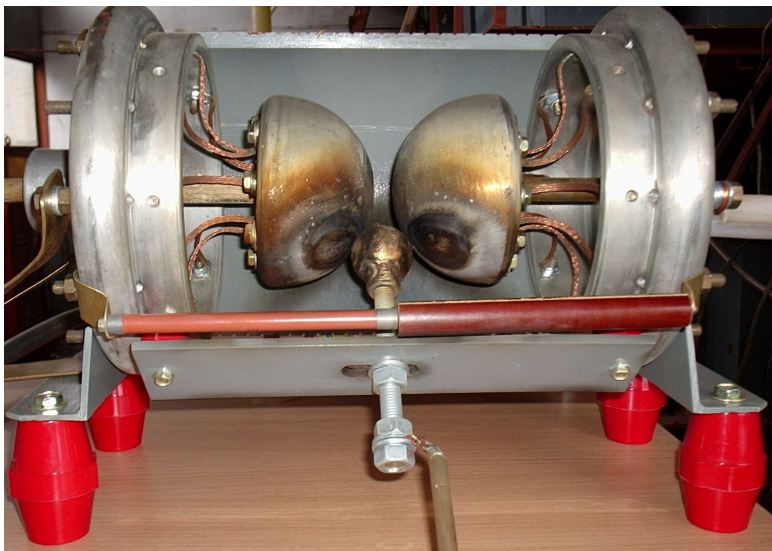


Рисунок 4 – Общий вид мощного высоковольтного сильноточного воздушного разрядника типа ТКВР-50 после 30 срабатываний в составе ГИТ-А и ГИТ-Д с явными электроэрозионными разрушениями на основных стальных сферических электродах

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.

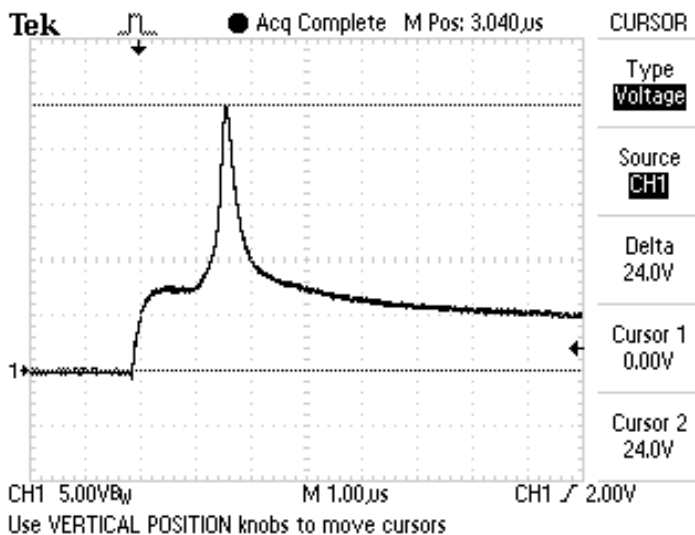


Рисунок 5 – Осциллограмма напряжения U_{P3} на непотенциальном электроде сильноточного каскадного воздушного разрядника P_3 типа ТКВР-50 при воздушном ЭВ в рабочей зоне ЭС тонкой луженой медной проволоочки диаметром 0,2 мм и длиной 50 мм

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 $J_{dA} = 2,07 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ ($J_{dD} = 0,26 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$).

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. Процедура 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-

го контроля состояния трансформаторного масла в качестве обучающей выборки, подразумевает выполнения целого комплекса процедур статистической обработки результатов измерений. Важное место в данном комплексе занимает формирование статистически однородных временных рядов показателей.

Цель статьи. Данная статья посвящена описанию метода оценки статистической однородности, результатов периодического контроля состояния трансформаторного масла. Данный метод основан на дисперсионном анализе линейных моделей, показателя на время эксплуатации.

Анализ публикаций. В работе [1] предложен интегральный критерий для оценки статистической однородности, временных рядов показателей качества масла. Однако данный критерий наиболее эффективен при ограниченном объеме выборочных значений. В работе [2] для оценки статистической однородности временных рядов использовался коэффициент парной корреляции показателя на время. Недостатком такого критерия является то, что низкие значения коэффициента парной корреляции может быть обусловлено не только неоднородностью временных рядов образующих данное подмножество, но и незначительным значением углового коэффициента (слабой интенсивностью исследуемого процесса). В связи с этим, вопросы оценки статистической однородности временных рядов являются актуальными и требуют дополнительного рассмотрения.

Метод решения. Условия однородности временных рядов можно сформулировать следующим образом: дисперсия результатов измерений в каждый момент времени должна быть минимальной. Очевидно, что однородность временных рядов будет определяться их взаимным расположением друг относительно друга. Другими словами минимум дисперсии в каждый момент времени будут обеспечивать временные ряды лежащие на одной линии тренда и параллельные друг другу. Информацию о взаимном расположении временных рядов показателей качества трансформаторного масла можно получить, используя методику дисперсионного анализа линейных моделей (ковариационного анализа) [3]).

Допустим, что временные ряды показателей описываются линейной регрессией, при этом характеристики регрессии меняются от группы к группе. Тогда соответствующая модель имеет вид:

$$Y_{ji} = \alpha_j + \beta_j \cdot t_{ji} + Z_{ji}, \quad (1)$$

где i – номер измерения ($i = \overline{1, n_j}$) для j -го показателя; t_{ji} – время i -го измерения значений j -го показателя; α_j, β_j – частные коэффициенты регрессии для значений j -й группы результатов измерения; Z_{ji} – случайный неконтролируемый остаток, для которого $M[Z_{ji}] = 0$ и $M[Z_{ji}^2] = \sigma_z^2$.

Кроме этого, остатки Z_{ji} взаимно независимы. Если A_j, B_j МНК – оценки неизвестных коэффициентов a_j, b_j то будет естественным рассмотреть может ли одно линейное уравнение

$$y = a + b \cdot x, \quad (2)$$

представить все k регрессий (1)

Такая линейная $2(k-1)$, гипотеза $H_0: (a_1 = a_2 = \dots = a_k = a; b_1 = b_2 = \dots = b_k = b)$ соответствует выводу об одинаковой скорости дрейфа значений показателей качества масла на всем наблюдаемом интервале эксплуатации, что идентично полной однородности временных рядов показателей.

Эту гипотезу удобно разбить на четыре части каждую, из которых можно проверять в отдельности.

$H_0^{(1)}$: линии регрессии параллельны, то есть $(b_1 = b_2 = \dots = b_k)$;

$H_0^{(2)}$: групповые средние лежат на прямой;

$H_0^{(3)}$: угловой коэффициент этой прямой равен b_c , то есть совпадает с (b_1, b_2, \dots, b_k) ;

$H_0^{(4)}$: групповые свободные члены совпадают, то есть $(a_1 = a_2 = \dots = a_k)$.

Для проверки данных гипотез найдем разложение полной суммы квадратов отклонений величин Y_{ji} от общего среднего. Такое разложение имеет вид [3]:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ji} - \bar{y})^2 &= w_0 \cdot B_0^2 + \frac{W_c \cdot W_m}{w_0} (B_c - B_m)^2 + \sum_{j=1}^k n_j [\bar{y}_j - \bar{y} - B_m \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})]^2 + \\ &+ \sum_{j=1}^k w_j \cdot (B_j - B_c)^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [y_{ji} - \bar{y}_j - B_j \cdot (x_{ji} - \bar{x}_j)]^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты ковариационного анализа для полученного разложения представлены в табл. 1.

Значение параметров a_m и b_m определяются уравнениями:

$$\begin{aligned} a_m &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^k n_j \cdot a_j; \\ b_m &= \frac{1}{W_m} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x}) \cdot (a_j + b_j \cdot \bar{x}_j). \end{aligned}$$

Учитывая результаты табл. 1 рассмотрим три дополнительные статистики: $S_{\Sigma 0} = S_{WG} + S_G + S_W$; $S_\alpha = S_G + S_{WG}$; $S_{Ra} = S_W + S_R$, которые связаны со следующими значениями степеней свободы: $v_{\Sigma 0} = v_{WG} + v_G + v_W$; $v_\alpha = v_{WG} + v_G$; $v_{Ra} = v_W + v_R$.

Для проверки выдвинутых гипотез выполним расчет средних квадратов которые определяются как:

$$\bar{S}_0 = \frac{S_0}{v_0}; \bar{S}_{WG} = \frac{S_{WG}}{v_{WG}}; \bar{S}_G = \frac{S_G}{v_G}; \bar{S}_W = \frac{S_W}{v_W}; \bar{S}_\alpha = \frac{S_\alpha}{v_\alpha}; \bar{S}_{Ra} = \frac{S_{Ra}}{v_{Ra}}; \bar{S}_R = \frac{S_R}{v_R}.$$

Таблица 1 – Результаты ковариационного анализа

Источник изменчивости результата измерений показателя качества	Число степеней свободы	Сумма квадратов отклонений	Математическое ожидание среднего квадрата
Общий угловой коэффициент регрессии	$\nu_0 = 1$	$S_0 = \omega_0 B_0^2$	$\sigma^2 + \omega_0 B_0^2$
Угловой коэффициент групповых средних по сравнению со средневзвешенным коэффициентом	$\nu_{WG} = 1$	$S_{WG} = \frac{\omega_c \cdot \omega_m}{\omega_0} \cdot (B_c - B_m)^2$	$\sigma^2 + \frac{\omega_c \cdot \omega_m}{\omega_0} \cdot (b_c - b_m)^2$
Относительно линейной регрессии групповых средних	$\nu_G = k-2$	$S_G = \sum_{i=1}^k n_j \cdot [\bar{y}_j - \bar{y} - B_m \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})]^2$	$\sigma^2 + \frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k n_j \cdot [a_j - a_m - b_m \cdot \bar{x}_j]^2$
Между угловыми коэффициентами внутри групп	$\nu_W = k-1$	$S_W \sum_{j=1}^k \omega_j (B_j - B_c)^2$	$\sigma^2 + \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k \omega_j (b_j - b_c)^2$
Остаток	$\nu_R = N-2$	$S_R = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [y_{ji} - \bar{y} - B_j (x_{ji} - \bar{x})]^2$	σ^2
Общий	$\nu = N - 1$	$S_R = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ji} - \bar{y})^2$	–

Полученные значения средних квадратов при известных значениях числа степеней свободы позволили рассчитать значения F -статистик:

$$F_0 = \frac{\overline{S_0}}{S_R}; F_{WG} = \frac{\overline{S_{WG}}}{S_R}; F_G = \frac{\overline{S_G}}{S_R}; F_W = \frac{\overline{S_W}}{S_R}; F_\alpha = \frac{\overline{S_\alpha}}{S_{Ra}}$$

Проверка гипотезы $H_0^{(1)}$ осуществлялась путем сравнения значения статистики F_w с F -распределением с $k - 1$ и $N - 2k$ степенями свободы; гипотезы

$H_0^{(2)}$ путем сравнения статистики F_G с F распределением с $k - 2$ и $N - 2k$ степенями свободы; гипотезы $H_0^{(3)}$ путем сравнения статистики F_{WG} с F -распределением с 1 и $N - 2k$ степенями свободы; а проверка гипотезы выполнялась $H_0^{(4)}$ путем сравнения статистики F_α с F -распределением с $k - 1$ и $N - k - 1$ степенями свободы. Для оценки суммарных изменений в параметрах a_i и b_i модели используем тестовую статистику F_{Σ_0} :

$$F_{\Sigma_0} = \frac{\bar{S}_G + \bar{S}_{WG} + \bar{S}_W}{2 \cdot \bar{S}_R} \cdot \left(\frac{N - 2 \cdot k}{k - 1} \right).$$

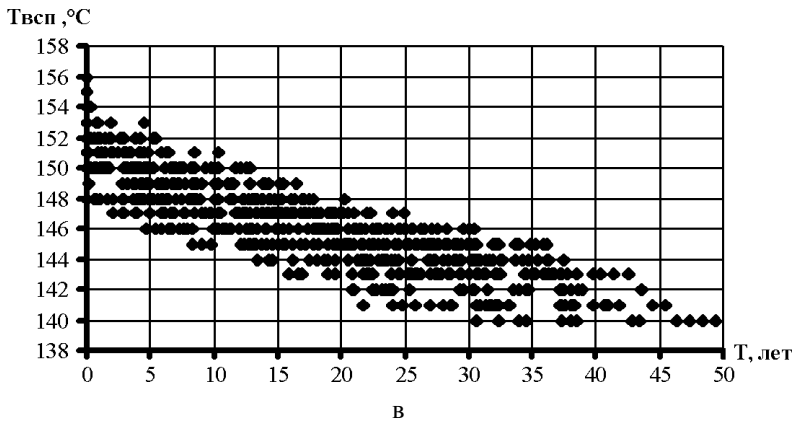
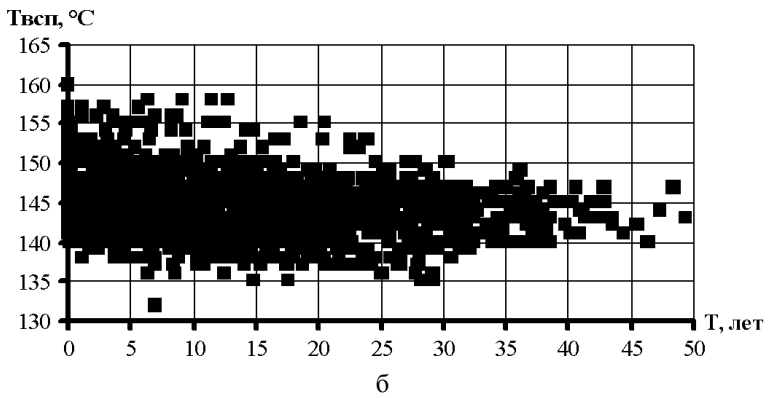
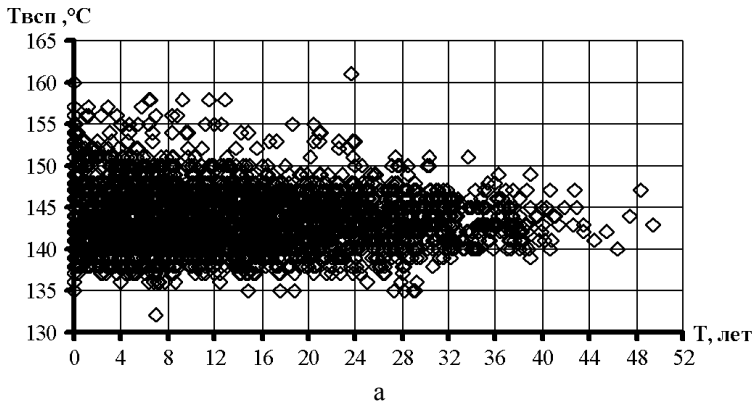
Систематическое изменение математического ожидания любого из показателей контроля под влиянием времени эксплуатации Y можно оценить с помощью тестовой статистики F_0 .

Таким образом, для оценки статистической однородности временных рядов показателей качества трансформаторного масла достаточно выполнить ковариационный анализ линейных моделей и проверить выдвинутые гипотезы.

Практические результаты. Рассмотрим процедуру оценки статистической однородности на примере такого показателя как температура вспышки масла. Для сравнения используем три массива данных. Массив **Ma** – исходные данные без предварительной обработки. Массив **Mf** – массив исходных данных, из которого с помощью процедуры тестовой фильтрации [4] были удалены временные ряды, имеющие положительный знак коэффициента парной корреляции со временем и стационарные временные ряды. Массив **Mo** – массив однородных данных, полученный из массива данных **Mf** с помощью критерия максимума корреляционного отношения [5]. Результаты дисперсионного разложения приведены в табл. 2, графически данные массивы приведены на рисунке.

Выводы. Анализируя результаты ковариационного анализа из табл. 2 можно сделать следующие выводы:

- 1 Для всех трех массивов температуры вспышки трансформаторного масла, значение статистики F_0 намного превосходит свои табличные значения, что свидетельствует о преобладании систематической составляющей результатов измерений над случайной;
- 2 Из трех анализируемых массивов данных гипотеза о том, что линии регрессии параллельны (старение масла протекает с приблизительно одинаковой скоростью), не была отвергнута только для массива данных **Mo**, для массивов **Ma** и **Mf** гипотеза $H_0^{(1)}$ была отвергнута, что свидетельствует о наличии мультипликативного смещения между рядами показателя, то есть о различной скорости старения масла в разных трансформаторах;



Зависимости температуры вспышки трансформаторного
 масла от времени эксплуатации;
 а – для массива **Ma**; б – для массива **Mf**; в – для массива **Mo**

Таблица 2 – Результаты дисперсионного разложения

Результаты разложения	Массив данных		
	Ma	Mf	Mo
Объем выборки, N	3746	1957	783
Число рядов, k	230	102	31
Значения сумм дисперсионного разложения			
S	48956,60	30099,9	7674,436
S_o	293,460	1982,5	5768,665
S_{WG}	2236,27	2311,6	6,400
S_G	31908,40	20027,8	292,340
S_w	5880,60	2068,8	483,716
S_R	8637,80	3708,9	1123,313
S_α	34144,70	22339,5	298,740
$S_{R\alpha}$	14518,43	5777,83	1607,030
$S_{\Sigma o}$	40025,33	24408,41	782,457
Число степеней свободы			
ν_o	1	1	1
ν_{WG}	1	1	1
ν_G	228	100	29
ν_w	229	101	30
ν_R	3286	1753	721
ν_α	229	101	30
$\nu_{R\alpha}$	3515	1854	751
Значения F -статистик (расчетное /табличное при $p = 0,95$ и соответствующих значениях ν)			
F_o	111,638 / 3,845	937,04 / 3,855	3702,623 / 3,855
F_{WG}	850,72 / 3,845	1092,5 / 3,855	4,108 / 3,855
F_G	53,239 / 1,19	94,659 / 1,26	6,470 / 1,49
F_w	9,768 / 1,18	9,681 / 1,24	1,349 / 1,47
F_α	36,098 / 1,18	70,973 / 1,24	4,653 / 1,47
$F_{\Sigma o}$	33,245 / 1,17	57,111 / 1,81	8,370 / 1,48

- 3) Гипотеза $H_0^{(2)}$ о том, что групповые средние лежат на прямой была отвергнута для всех трех анализируемых массивов. Это свидетельствует о том, что зависимость температуры вспышки масла от времени эксплуатации имеет сложный не линейный характер, то есть скорость старения различна на разных интервалах эксплуатации;
- 4) Гипотеза $H_0^{(3)}$ о том, о равенстве межгрупповых угловых коэффициентов также была отвергнута для всех трех анализируемых массивов. Это свидетельствует о воздействии на интенсивность старения масла целого ряда неучтенных факторов;

- 5 Гипотеза $H_0^{(4)}$ о равенстве групповых свободных членов также была отвергнута для всех трех анализируемых массивов данных. Данное обстоятельство свидетельствует о наличии аддитивного смещения между рядами показателей, что свидетельствует о значимом различии в качестве трансформаторных масел на момент их заливки в баки трансформаторов;
- 6 Превышение статистиками $F_{\Sigma 0}$ своих граничных значений говорит о значимом суммарном влиянии параметров a_i и b_i на изменение температуры вспышки масла. То есть имеет место взаимное влияние как условий эксплуатации так и качества заливаемого масла на интенсивность дрейфа значений температуры вспышки масла;
- 7 Сравнивая значения F -статистик по всем трем массивам данных следует отметить, что максимальное значение статистики F_0 (характеризующей систематическую составляющую) и минимальные значения статистик F_{WG} , F_G , F_w , F_{α} , и $F_{\Sigma 0}$ (характеризующих рассеяние) имеет массив данных **Мо**. Несмотря на то что гипотезы $H_0^{(2)}$, $H_0^{(3)}$ и $H_0^{(4)}$ для данного массива были отвергнуты, как и для двух остальных, минимальные значения статистик F_{WG} , F_G , F_{α} и $F_{\Sigma 0}$ свидетельствует о статистической однородности временных рядов образующих данный массив.

Направления дальнейших исследований. Полученные результаты (в частности наличие как мультипликативного, так и аддитивного смещения между рядами показателей, в исходных массивах данных) показывают, что одним из наиболее важных направлений дальнейших исследований является анализ факторов, влияющих на интенсивность старения трансформаторного масла.

Список литературы: 1. *Щапов П. Ф.* Проверка однородности измерительной информации при параметрическом контроле процессов старения энергетического оборудования // Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ «ХП». – 2005. – № 3. – С. 22–28. 2. *Бондаренко В.Е., Щапов П.Ф., Шутенко О. В.* Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. Монография. – Харьков.: НТУ «ХПИ», 2007. – 452 с. 3. *Джонсон Н., Лион Ф.* Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. – М.: Мир, 1981. – 520 с. 4. *Бондаренко В. Е., Шутенко О. В.* Метод выделения оптимального числа наиболее информативных показателей качества при синтезе регрессионных моделей для оценки степени старения жидкой изоляции трансформаторов // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 5. – К., 2006. – С. 88–93. 5. *Шутенко О. В.* Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний // Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – № 4. – С. 42–50.

Поступила в редколлегию 14.05.2008

А.В.БОРЦОВ, НТУ «ХПИ»

**УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ КОММУТАЦИИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА ФОРМУ
ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА НАГРУЗКЕ ИМПУЛЬСНОГО
ТРАНСФОРМАТОРНОГО ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ**

Розглянуто вплив часу комутації напівпровідникових приладів на форму, амплітудні і часові параметри імпульсів напруги на навантаженні трансформаторного джерела. Встановлена залежність тривалості фронту імпульсу від власних параметрів джерела і часу комутації напівпровідникових приладів.

Influence of time of commutation of semiconductor devices is considered on a form, peak and temporal parameters of pulses of voltage in a load of transformer source. Dependence of duration of pulse front is set on the own parameters of source and time of commutation of semiconductor devices.

Постановка задачи. Импульсный высоковольтный трансформаторный источник для электрофизических установок содержит следующие узлы (рис. 1): источник энергии – однофазная или трехфазная сеть, сетевой выпрямитель, сглаживающий фильтр, однотактный или двухтактный инвертор напряжения, импульсный трансформатор, системы управления и измерений, нагрузка.

Сетевой выпрямитель, как правило, выполняется по мостовым схемам выпрямления – схема Грета для однофазной сети, схема Ларионова для трехфазной сети. В качестве выпрямителей можно использовать регулируемые одно – и трехфазные выпрямители.

Основными узлами силового контура импульсного трансформаторного источника являются: инвертор напряжения, преобразующий постоянное напряжение в импульсное и импульсный трансформатор, обеспечивающий в нагрузке требуемые параметры импульсов тока и напряжения.

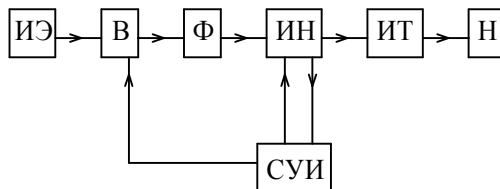


Рисунок 1 – Блок – схема импульсного трансформаторного источника:
 ИЭ – источник энергии; В – сетевой выпрямитель; Ф – сглаживающий фильтр;
 ИН – инвертор напряжения; ИТ – импульсный трансформатор; Н – нагрузка;
 СУИ – системы управления и измерений

Для новых электрофизических установок, таких как высоковольтные генераторы импульсных напряжений с субнаносекундной длительностью фронта импульса, высокочастотные установки на основе импульсного коронного разряда предъявляются достаточно жесткие требования к собственным параметрам силового контура импульсного трансформаторного источника – минимальные значения активного сопротивления, собственной индуктивности и паразитной емкости. Разработка и широкое внедрение новых ферромагнитных материалов позволило существенно снизить указанные параметры и актуальным становится учет влияния времени коммутации полупроводниковых приборов на форму, амплитудные и временные характеристики импульсов напряжения в нагрузке.

Схема замещения силового контура импульсного трансформаторного источника отличается от известных [1] тем, что в ней наряду с параметрами схемы замещения импульсного трансформатора учитывается время включения и выключения полупроводникового ключа (рис. 2).

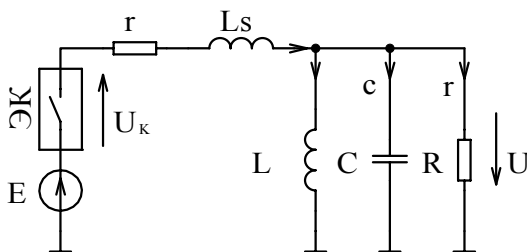


Рисунок 2 – Схема замещения силового контура импульсного трансформаторного источника: E – напряжение источника энергии; ЭК – полупроводниковый ключ (тиристор, транзистор); U_k – напряжение на ключе; $r = r_1 + r_n + r'_2$, r_1 – активное сопротивление первичной обмотки ИТ, r_n – сопротивление соединительных проводов, r'_2 – приведенное к первичной обмотке активное сопротивление вторичной обмотки; $L_s = L_{S1} + L_n + L'_{S2}$, L_{S1} – индуктивность рассеивания первичной обмотки, L_n – индуктивность соединительных проводов, L'_{S2} – приведенная к первичной обмотке индуктивность рассеивания вторичной обмотки; L_μ – индуктивность намагничивания ИТ; $C = C_1 + C'_2 + C_T + C'_H$, C_1 – емкость первичной обмотки ИТ, C'_2 – приведенная к первичной обмотке емкость вторичной обмотки ИТ, C_T – межобмоточная емкость ИТ, C'_H – приведенная к первичной обмотке емкость нагрузки; R – приведенное к первичной обмотке сопротивление нагрузки; U – приведенное к первичной обмотке напряжение на нагрузке

Время включения и выключения полупроводникового ключа будем учитывать заданием закона изменения напряжения на ключе:

$$U_k(t) = \begin{cases} E, t < 0; \\ E(1 - \frac{t}{t_{\text{вкл}}}), 0 < t < t_{\text{вкл}}; \\ 0, t_{\text{вкл}} < t < T_{\text{И}} - t_{\text{выкл}}; \\ E(1 - \frac{T_{\text{И}} - t}{t_{\text{выкл}}}), T_{\text{И}} - t_{\text{выкл}} < t < T_{\text{И}}; \\ E, t > T_{\text{И}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}$ – время включения и выключения полупроводникового ключа;
 $T_{\text{И}}$ – длительность импульса.

Осциллограмма изменения во времени напряжения на ключе имеет вид (рис. 3).

Переходной процесс в силовом контуре импульсного трансформаторного источника описывается системой интегро-дифференциальных уравнений [2]:

$$\begin{cases} ri(t) + L_S \frac{di(t)}{dt} + u(t) = f(t); \\ i(t) = i_{\mu}(t) + i_c(t) + i_r(t); \\ i_{\mu}(t) = \frac{1}{L_{\mu}} \int_0^t u(t) dt + i_{\mu}(0); \\ i_c(t) = C \frac{du(t)}{dt}; \\ i_r(t) = \frac{u(t)}{R}, \end{cases} \quad (2)$$

и начальными условиями

$$\begin{cases} u(0) = 0; \\ i(0) = 0; \\ i_{\mu}(0) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$f(t) = \begin{cases} 0, t < 0; \\ \frac{E}{t_{\text{вкл}}} t, 0 < t < t_{\text{вкл}}; \\ E, t_{\text{вкл}} < t < T_{\text{И}} - t_{\text{выкл}}; \\ \frac{E}{t_{\text{выкл}}} (T_{\text{И}} - t), t > T_{\text{И}}. \end{cases} \quad (4)$$

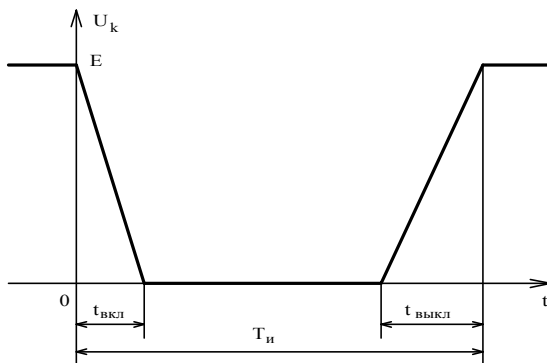


Рисунок 3 – Закон изменения во времени напряжения на ключе

Из (2) и (3) несложно получить дифференциальное уравнение и начальные условия для напряжения на нагрузке

$$\frac{d^3 u}{d\tau^3} + 2\xi \frac{d^2 u}{d\tau^2} + [1 + k_R(k_L - 1)] \frac{du}{d\tau} + \eta u = k_R \frac{df}{d\tau}; \quad (5)$$

$$u(0) = \frac{du(0)}{d\tau} = \frac{d^2 u(0)}{d\tau^2} = 0, \quad (6)$$

где $k_R = \frac{R}{r + R}$ – коэффициент передачи напряжения по сопротивлениям;

$k_L = \frac{L_\mu}{L_\mu + L_S}$ – коэффициент передачи напряжения по индуктивностям;

$\xi = \frac{\sqrt{k_R}}{2} \left(\frac{r}{\rho} + \frac{\rho}{R} \right)$ – коэффициент затухания контура;

$\rho = \sqrt{\frac{L_S}{C}}$ – характеристическое сопротивление контура;

$\theta_\theta = \sqrt{(k_R L_S C)}$ – высокочастотная постоянная времени контура;

$\tau = \frac{t}{\theta_\theta}$ – безразмерное время;

$\theta_\eta = L_\mu \frac{r + R}{rR}$ – низкочастотная постоянная времени контура;

$\eta = \frac{\theta_\theta}{\theta_\eta}$;

$$\frac{df}{d\tau} = \begin{cases} 0, \tau < 0; \\ \frac{E}{\tau_{вкл}}, 0 < \tau < \tau_{вкл}; \\ 0, \tau_{вкл} < \tau < \tau_{II} - \tau_{выкл}; \\ -\frac{E}{\tau_{выкл}}, \tau_{II} - \tau_{выкл} < \tau < \tau_{II}; \\ 0, \tau > \tau_{II}. \end{cases} \quad (7)$$

При решении уравнения (5) используем пакет прикладных программ *Electronics Work Bench Pro* [3]. Для удобства вычислений при использовании пакета *Electronics Work Bench Pro* понизим порядок уравнения (5) и введем безразмерное напряжение на нагрузке $v(\tau) = \frac{u(\tau)}{k_R E}$. В результате получим

безразмерное интегро-дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 v}{d\tau^2} + 2\xi \frac{dv}{d\tau} + [1 + k_R(k_L - 1)]v + \eta \int_0^{\tau} v d\tau = g, \quad (8)$$

с начальными условиями

$$v(0) = \frac{dv(0)}{d\tau} = 0, \quad (9)$$

где

$$g(\tau) = \begin{cases} 0, \tau < 0; \\ \frac{\tau}{\tau_{вкл}}, 0 < \tau < \tau_{вкл}; \\ 1, \tau_{вкл} < \tau < \tau_{II} - \tau_{вкл}; \\ \frac{\tau_{II} - \tau}{\tau_{вкл}}, \tau_{II} - \tau_{вкл} < \tau < \tau_{II}; \\ 0, \tau > \tau_{II}. \end{cases} \quad (10)$$

В среде *Electronics Work Bench Pro* уравнению (8) с начальными условиями (9) соответствует расчетная модель (рис. 4). Расчетная модель (рис. 4) позволяет с минимальными затратами времени исследовать влияние параметров полупроводникового ключа и импульсного трансформатора на переходной процесс в силовом контуре высоковольтного импульсного источника.

Для важного на практике случая $L_S / L_\mu \ll 1$, что соответствует случаю правильно спроектированного и изготовленного импульсного трансформатора, с помощью расчетной модели (8) исследована зависимость длительности фронта импульса напряжения на нагрузке T_ϕ от времени включения полупроводникового ключа $T_{вкл}$ и коэффициента затухания контура ξ (рис. 5). В

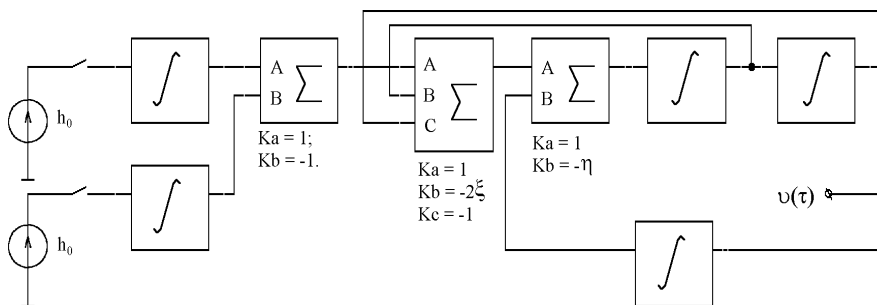


Рисунок 4 – Расчетная модель уравнения (8): Σ – суммирующий блок; \int – интегрирующий блок; k_a , k_b , k_c – масштабирующие множители.

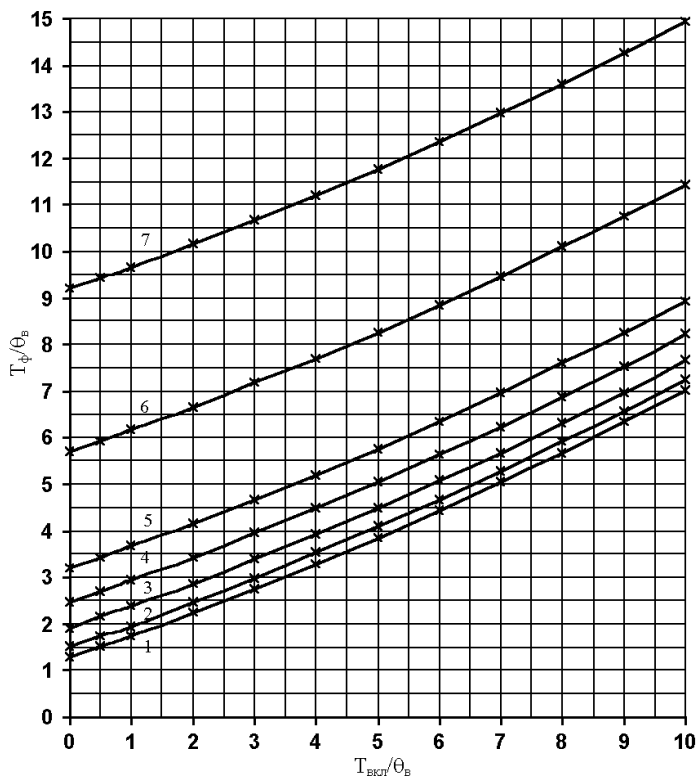


Рисунок 5 – Зависимость длительности фронта T_ϕ от времени включения полупроводникового ключа $T_{вкл}$ и коэффициента затухания ξ (в единицах высокочастотной постоянной времени θ_B): 1 – $\xi = 0,2$; 2 – $\xi = 0,4$; 3 – $\xi = 0,6$; 4 – $\xi = 0,8$; 5 – $\xi = 1,0$; 6 – $\xi = 1,5$; 7 – $\xi = 2,0$.

случае $T_{\text{вкл}} \ll \theta_v$ (для быстродействующих полупроводниковых ключей) зависимость $T_{\phi}(T_{\text{вкл}}, \xi)$ совпадает с зависимостью $T_{\phi}(\xi)$, полученной в [4].

Выводы.

1. В работе уточнена схема замещения импульсного трансформаторного источника. Для этого использована модель полупроводникового ключа с конечными временами включения и выключения.

2. Для уточненной схемы замещения получены интегро-дифференциальное уравнение для напряжения на нагрузке и расчетная модель в среде *Electronics Work Bench Pro*.

3. С помощью расчетной модели установлена зависимость длительности фронта импульса от коэффициента затухания и времени включения полупроводникового ключа.

Список литературы: 1. С.С.Водвин Проектирование импульсных трансформаторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. 2. Л.А.Бессонов Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. – М., Высшая школа, 1973. – 752с. 3. В.И.Карлаицук. Электронная лаборатория на IBM PC. Издание 2-е, дополненное и переработанное. – М.: Солон-Р, 2001. – 726 с. 4. Я.С.Иццоки Импульсные устройства. – М.: Советское радио, 1959 – 728 с.

Поступила в редколлегию 26.04.2008

УДК 621.315

В.С.БЫКОВ; НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ СВЯЗЕЙ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ СЕТИ ЮЖНОЙ ЭЭС УКРАИНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УПРАВЛЯЕМЫХ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В статті виконано розрахунки режимів роботи кільцевої мережі частини Південної ЕЕС з включенням електропередачі нового типу – УСВЛ, які показали доцільність їх застосування для посилення системоутворюючої мережі ОЕС України.

In given paper the calculations of modes of operations of a circle network of a part of Southern EES with inclusion of transmission line of a new type - USVL were executed which have shown expediency of their application for amplification of a system-forming network OES of Ukraine.

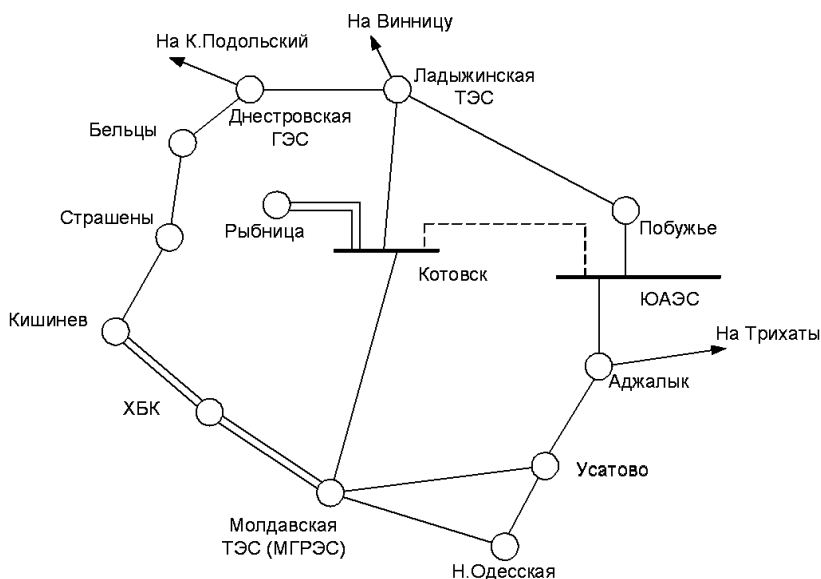
Введение и постановка задачи

Системообразующие сети ОЭС Украины обеспечивают необходимое распределение потоков мощности и выдачу мощности генерирующих источ-

ников. Однако в некоторых энергосистемах существуют «проблемные» участки сетей, пропускная способность которых недостаточна и необходимо усиление системообразующих связей. Одной из таких систем является Южная ЭЭС. В феврале 2001 г. в результате аварийного возмущения (отключения ЛЭП Аджалык – Усатово) произошло полное погашение данной ЭЭС, а также ЭЭС Молдовы. Данный факт подтверждает необходимость развития сетей в ОЭС Украины.

Целью данной статьи является исследование возможности применения управляемых самокомпенсирующихся электропередач в ОЭС Украины на примере новой ЛЭП ЮАЭС –Котовск напряжением 330 кВ.

В расчетах детально анализировалась схема кольцевой сети, состоящая из 12 узлов, входящих в Южную, Юго-Западную ЭЭС Украины и ЭЭС Молдовы (см. рисунок).



Расчет режимов производился для зимнего максимума нагрузок ОЭС Украины и ЭЭС Молдовы, а также части ЕЭС России и Беларуси. Общая генерация по энергосистемам составляет 160323 МВт, нагрузка – 160150 МВт.

Общие потери составляют 196 МВт активной мощности и 855 МВар реактивной [4].

Питание анализируемой сети осуществляется от Южноукраинской АЭС (3 x 1000 МВт), Молдавской ТЭС(МГРЭС) (2 x 200 МВт), Ладыжинской ТЭС (6 x 300 МВт), Днестровской ГЭС (6 x 117 МВт) и некоторых других

источников. В схеме Южной ЭЭС имеется дефицитный район: ПС Н.Одесская, Усатово, Аджалык.

Результаты расчетов режимов кольцевой сети 330 кВ

В нормальном режиме питание осуществляется по линиям ЮАЭС – Аджалык – Усатово – Н.Одесская и Молдавская ТЭС – Н.Одесская, Молдавская ТЭС – Усатово. Напряжения в узлах рассматриваемой части сети находятся в пределах допустимых значений ($\pm 5\%$). Перетоки по линиям также находятся в допустимых пределах, но ряд линий являются перегруженными. Так, например, по линиям ЮАЭС – Аджалык и Аджалык – Усатово протекают значительные мощности: 620 и 780 МВт соответственно, что почти в 2 раза больше их натуральной мощности. Также значительный переток наблюдается на линии ЮАЭС – Побужье – 535 МВт. Необходимо отметить, что натуральная мощность одноцепной ЛЭП 330 кВ с проводами 2 x 300 составляет 360 МВт [2].

Общеизвестно, что перегрузка ЛЭП выше ее натуральной мощности связана с повышенными потерями и неоптимальным распределением потоков мощностей в сетях. Ситуация усугубляется тем, что при выводе в ремонт или аварийном отключении отдельных ЛЭП, перетоки мощности по некоторым из оставшихся в работе возрастают, что свидетельствует о необходимости развития сетей.

При отключении линии Аджалык – Усатово потокораспределение в сети существенно изменяется. Линия ЮАЭС – Побужье загружается до 700 МВт, Побужье – Ладыжинская ТЭС – до 560 МВт. ПС Усатово и Н.Одесская оказываются в условиях дефицита мощности. Питание осуществляется через ЛЭП Молдавская ТЭС – Н.Одесская и Молдавская ТЭС – Усатово, которые загружаются до значений 230 МВт и 250 МВт соответственно. Однако во всех узлах сети значения напряжений находятся в пределах, выходящих за допустимые. Так, например, на ПС Котовск – 253 кВ, Молдавская ТЭС – 234 кВ, Ладыжинская ТЭС – 284 кВ, ПС Н.Одесская – 225 кВ. Режим в этих условиях существовать не может. Для сохранения устойчивости и предотвращения выхода генераторов из синхронизма в условиях снижения напряжения и изменения частоты, необходимо значительное погашение нагрузки потребителей в районе, что недопустимо.

Другим расчетным был рассмотрен вариант отключения линии Ладыжинская ТЭС – Котовск. При этом наблюдается значительное утяжеление режима. Переток по ЛЭП Молдавская ТЭС – Котовск меняет направление и становится равным 150 МВт. Линии Ладыжинская ТЭС – Днестровская ТЭС загружается до величины 410 МВт; ЮАЭС – Аджалык и Аджалык – Усатово загружаются до значений 700 и 900 МВт соответственно. Уровни напряжений в узлах схемы значительно снижаются.

Анализ выполненных расчетов показывает, что рассматриваемая часть

ЭЭС не удовлетворяет соответствующим требованиям. Вывод электрооборудования или ЛЭП в ремонт в некоторых случаях вызывает утяжеление режима, нарушения устойчивости и, как следствие, вынужденное отключение части потребителей. Кроме того, аварийное отключение определенных ЛЭП сопровождается недопустимым снижением параметров режима и возможным нарушением работы генерирующих источников. При возможных аварийных отключениях электрооборудования или ЛЭП, а также при наличии ремонтных схем в сети режим значительно утяжеляется.

Проведенный анализ показал, что интерес может представлять рассмотрение варианта ввода новой линии 330 кВ ЮАЭС – Котовск. Данную электропередачу можно выполнить обычной двухцепной трехфазной ЛЭП, но целесообразнее будет выполнить ее управляемой самокомпенсирующейся ВЛ (УСВЛ) [1]. Данные линии обладают рядом преимуществ и позволяют устранить описанные трудности.

Управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (УСВЛ) относятся к категории гибких электропередач. Но, в отличие от гибких электропередач переменного тока, регулирование характеристик ЭП достигается не за счет использования различных сосредоточенных средств управления и компенсации, а за счет регулирования параметров самих линий электропередачи, благодаря чему появляется возможность управления режимами работы и техническими показателями ЭП. УСВЛ, по сравнению с традиционными линиями, обеспечивают повышение пропускной способности на 30-50 % а также управление величиной и направлением потоков мощности по линиям и в замкнутых контурах электрической системы.

Повышенная пропускная способность достигается за счет новых конструкций, предусматривающих сближения фаз различных цепей и выбор оптимальной конфигурации расположения фаз и цепей линии, при которой сближенные цепи оказывают значительное взаимное электромагнитное влияние (наблюдается эффект самокомпенсации параметров электромагнитного поля одной цепи полем другой цепи) и, как следствие, изменение эквивалентных параметров линии, а их регулирование осуществляется за счет изменения величины углового сдвига между трехфазными системами векторов напряжений цепей [3].

Кроме того, данные электропередачи позволяют на 20-30 % снизить удельные капитальные вложения в строительство линий в расчете на единицу передаваемой мощности, и для них требуется существенно меньшая площадь отчуждения земельных угодий.

Предлагаемая электропередача УСВЛ – 330 кВ ЮАЭС – Котовск является двухцепной ЛЭП и выполнена проводами 3 x AC-240/32. Конструктивно линия выполнена на порталных опорах специальной конструкции, которые обеспечивают сближение фаз разных цепей на минимально допустимое по

электрической прочности расстояние. Фазы в пролетах фиксируются друг относительно друга с помощью изоляционных распорок (или стяжек), которые практически снимают проблему пляски и вибрации проводов линии. Фазовый сдвиг систем напряжений цепей обеспечивается специальными средствами фазового регулирования – фазорегуляторами [1].

Результаты расчетов режимов кольцевой сети 330 кВ с включенной УСВЛ -330 кВ ЮАЭС – Котовск

Анализ режимов при включенной УСВЛ – 330 кВ ЮАЭС – Котовск был произведен для трех характерных случаев, отличающихся различными значениями эквивалентных параметров УСВЛ: при нулевом угле сдвига между трехфазными системами векторов напряжений цепей (θ), а также при углах 120° и 180° .

Режим при $\theta = 180^\circ$ необходимо использовать в режиме максимальных нагрузок, когда требуется передача значительной мощности по линии. В данном режиме пропускная способность линии максимальна. В режимах, близких к х.х., большая пропускная способность ЛЭП не требуется. Поэтому достаточным является режим $\theta = 0^\circ$. Режим $\theta = 120^\circ$ – промежуточный.

Результаты расчетов приведены в таблице.

Напряжения в узлах сети во всех режимах при изменении угла θ находятся в пределах допустимых значений.

Изменение величин перетоков активной мощности (МВт)
по анализируемым линиям сети, а также потери мощности
в зависимости от различных значений угла θ

	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 120^\circ$	$\theta = 180^\circ$
ЮАЭС– Аджалык	496	468	460
Аджалык–Усатово	576	529	518
ЮАЭС – Котовск	590	733	767
ЮАЭС– Побужье	400	365	357
Молдавская ТЭС – Котовск	210	253	263
Молдавская ТЭС – Усатово	96	116	130
Молдавская ТЭС – ПС Н.Одесская	166	184	192
Потери, МВА	171,83+ +j476,31	175,2+ +j346,18	175,4+ +j306,3

В режиме $\theta = 0^\circ$ в интересующих узлах – ПС Н.Одесская и Усатово – напряжения составили 333 кВ и 333,4 кВ, соответственно. Напряжений ниже 333 кВ в узлах сети не наблюдается. Несколько завышенными оказываются напряжения на ПС ЮАЭС, Побужье, Ладъжинская ТЭС, а также на ПС Котовск. Они составляют 351,4 кВ, 351,2 кВ, 350,8 кВ и 347,4 кВ соответственно.

Потери в сети по сравнению с нормальным режимом при отсутствии

линии ЮАЭС – Котовск снизились на 25,13 МВт активной мощности и на 378,94 МВар реактивной.

В режимах $\theta = 120^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ напряжения в узлах сети практически не отличаются от режима $\theta = 0^\circ$. Потери в сети в режиме $\theta = 180^\circ$ составили: 175,4 МВт активной мощности и 306,3 МВар реактивной, что на 548,7 МВар меньше по сравнению с нормальным режимом при отсутствии линии ЮАЭС – Котовск.

При плановых выводах электрооборудования в ремонт или же аварийном его отключении, линия ЮАЭС – Котовск оказывает значительное влияние на потокораспределение в сети. Послеаварийный режим будем рассматривать для режима работы ЛЭП, при котором она обладает минимальной пропускной способностью, то есть для $\theta = 0^\circ$.

При отключении самой загруженной из линий – Аджалык – Усатово, режим возможен. Дефицитный район Южной ЭЭС – ПС Н.Одесская и Усатово – получает питание со стороны Молдавской ТЭС. Линии Молдавская ТЭС – Усатово и Молдавская ТЭС – ПС Н.Одесская загружены до 327 МВт и 315 МВт. По линии Молдавская ТЭС – Котовск протекает 423 МВт активной мощности, по УСВЛ-330 кВ ЮАЭС – Котовск – 795 МВт. Также загруженной становится ЛЭП ЮАЭС – Побужье – 460 МВт. По остальным линиям рассматриваемой сети протекают мощности, меньшие или равные натуральной. Питание Молдавской ЭЭС осуществляется в полном объеме.

Напряжения в узлах сети находятся в допустимых пределах. На ПС Котовск – 340,6 кВ, ПС Молдавская ТЭС – 329 кВ, ПС Побужье – 349 кВ. Незначительно понижены напряжения на ПС Н.Одесская и Усатово 320,2 и 320 кВ. В остальных узлах сети напряжения соответствуют норме.

Режимы УСВЛ – 330 кВ ЮАЭС – Котовск при $\theta = 120^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ могут обеспечить нормальные параметры режимов энергосистемы и при более тяжелых аварийных ситуациях.

Заключение

Анализируя результаты выполненных расчетов, можно сделать вывод, что строительство новой ЛЭП ЮАЭС – Котовск необходимо не только с точки зрения сохранения режима при аварийных возмущениях, плановых выводах линий в ремонт и обеспечении при этом электроснабжения потребителей, но и с точки зрения перераспределения потоков мощности в сети и снижении потерь. Данную линию электропередачи целесообразнее выполнить с регулируемыми параметрами, т.е. управляемой (УСВЛ), что даст возможность повысить эффективность ее работы и режимные показатели энергосистемы.

Список литературы: 1. Астахов Ю.Н., Постолатий В.М., Комендант И.Т., Чалый Г.В.. Управляемые линии электропередачи // Под ред. В.А. Веникова, изд-во «Штиинца». – Кишинев 1984. – 296 с. 2. Справочник по проектированию электроэнергетических систем // Под ред. С.С.

Рокотяна и И.М.Шапиро – 3-ое изд., перераб. и доп. – М.: Энергия. 1985. – 350 с. 3. Управляемые электропередачи // Выпуск № 8 (23), труды Института энергетики АН Молдовы за 2001-2007 гг. Составители: Постолатий В.М., Быкова Е.В. – Кишинев, 2007. – С. 7-16. 4. Программный комплекс «RASTR», разработанный в УПИ (УГТУ), кафедра автоматизированных электрических систем (Екатеринбург) и файл исходных данных для расчетов установившихся режимов объединенной энергосистемы стран СНГ.

Поступила в редколлегию 14.05.2008

УДК 681.51:537.528

О.І.ВОВЧЕНКО, докт.техн.наук; ***С.С.КОЗИРЄВ***;

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв

ПОБУДОВА ІНВЕРСНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОВИБУХОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЗАСОБАМИ FUZZY-АПРОКСИМАЦІЇ

На основі експериментального дослідження електровибухового перетворення енергії як об'єкта керування побудовано його інверсну модель засобами fuzzy-апроксимації.

The experimental research of the discharge energy conversion as an object of control was done. The inverse model of discharge energy conversion was built using fuzzy-approximation method.

Вступ. Реалізація основної переваги електровибухового перетворення енергії - керованості, потребує синтезу адаптивного керування, яке забезпечує необхідні режими в умовах нестационарності параметрів середовища та невизначеності зовнішніх збурень. Механізм адаптації можна реалізувати за рахунок використання інверсної моделі, яка генерує реакцію на збурення, що гарантує підтримку заданих режимів перетворення енергії.

Мета роботи – побудова інверсної моделі керування електровибуховим перетворенням енергії на основі експериментальних даних із застосуванням сучасних методів fuzzy-апроксимації, що базуються на теорії нечітких множин. Використання інверсної моделі при синтезі системи керування забезпечить адаптивність в умовах значних змін параметрів середовища і невизначеності збурюючих впливів, результатом чого стане розширення зони керованості, підвищення точності підтримки оптимальних технологічних режимів в реальних умовах.

Побудова інверсної моделі. Аналіз існуючих моделей та систем керування електровибуховим перетворенням енергії показав, що вони побудовані на основі лінеаризації об'єкта і забезпечують керування тільки в околі точки

номінального режиму при певних припущеннях відносно збурень.

Забезпечення керованості електровибухового перетворення енергії у всьому просторі станів потребує введення механізмів адаптації для врахування нестационарності та стохастичності об'єкта. Адаптивність можна забезпечити, використовуючи системи керування на основі інверсних моделей, які генерують реакцію на збурення, обчислюючи значення керуючого впливу, який забезпечить відповідне значення вихідної координати. Достовірність інверсної моделі забезпечується точністю та повнотою опису властивостей об'єкта та його статистичних характеристик. Побудова інверсної моделі передбачає отримання зворотної функції об'єкта керування, тобто функції, що дає змогу знаходити таке значення керуючого впливу, яке забезпечить задане значення вихідної інформаційної координати, а відповідно і заданий режим електровибухового перетворення енергії та необхідний технологічний вплив, при поточному стані контрольованих параметрів об'єкта.

Аналітично пряму та інверсну модель електровибухового перетворення енергії, які адекватно описують об'єкт у всьому просторі станів, побудувати складно, так як фізичні процеси, що відбуваються в каналі розряду неоднорозмірні, недостатньо вивчені, погано піддаються формалізації, тому пропонуємо для отримання цих залежностей застосувати сучасні методи fuzzy-апроксимації на основі нечіткої логіки, використовуючи бази експериментальних даних для побудови нечітких моделей керування.

З метою отримання бази експериментальних даних для побудови нечіткої інверсної моделі процесу електровибухового перетворення енергії, адекватної на всьому просторі станів, проведено експериментальне дослідження залежності найбільш статистично ефективної вихідної інформаційної координати

$$\Sigma[n] = i_m[n] + k U_{\text{пр}}[n]/i_m[n],$$

яка отримана як лінійна комбінація корельованих вихідних координат $i_m[n]$ – амплітуди розрядного струму і $U_{\text{пр}}$ – пробивної напруги, від змін координат вхідного вектора $X < l[n], \rho[n] >$, де $l[n]$ – довжина розрядного проміжку або керована координата, та $\rho[n]$ – питомий опір рідини або контрольована параметрична координата. Враховуючи стохастичний характер процесу електровибухового перетворення енергії, для синтезу системи керування проведено також дослідження залежності статистичних характеристик інформаційної координати $\Sigma[n]$ (σ_{Σ} – середньоквадратичного відхилення) від координат вхідного вектора. Для цього поставлено дробовий факторний експеримент при одночасному варіюванні усіх незалежних змінних $l[n], \rho[n]$ на усіх вибраних рівнях значень з використанням методів планування експерименту. При проведенні експерименту значення інформаційної координати $\Sigma[n]$ береться у відносних одиницях, за базове значення прийнято амплітудне значення розрядного струму при короткому замиканні $I_{\text{кз}}$, а середньоквадратичне відхилення σ_{Σ} приводиться до математичного очікування інформацій-

ної координати $M_{\Sigma}[n]$.

Інверсну модель будуюмо у вигляді $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$, для чого необхідна база навчальних даних у вигляді множини груп сигналів $(\Sigma[n], \rho[n])$, що будуть поступати на вхід системи керування, та відповідно очікувані (еталонні) значення керуючого сигналу $l[n]$. Такі групи сигналів формуємо, використовуючи базу експериментальних даних, наведену в [1].

Першим кроком при побудові нечіткої інверсної моделі є розподіл простору вхідних і вихідних сигналів на діапазони, які будуть слугувати термами при побудові функцій приналежності. Використаємо прямий метод побудови функцій приналежності, який не вимагає абсолютно точного визначення функцій приналежності, а лише тип функції та характерні значення, в даному випадку – значення в експериментальних точках за планом експерименту, які є опорними для діапазонів, прийнятих в якості термів. Приймаємо трикутну форму функцій приналежності. Одна з вершин ФП знаходиться в центрі кожного числового діапазону значень координати і їй відповідає значення функції $\mu^T(x)$, рівне 1, дві інші вершини лежать в центрах сусідніх діапазонів, їм відповідає значення функції, рівне 0.

В якості лінгвістичних вхідних змінних приймаємо координати $\rho[n]$, $M_{\Sigma}[n]$. Кількість термів (лінгвістичних значень, а у нашому випадку термів – числових діапазонів) для кожної змінної вибираємо рівною кількості рівнів значень за планом факторного експерименту. В даному випадку кількість термів дорівнює 5 та 4. Нерівномірний поділ числових значень координат на терми прийнято з метою більш точного врахування нелінійності властивостей електровибухового перетворення енергії як об'єкта керування.

Функції приналежності (ФП – $mf_i - \mu^T(x)$) координат вектора стану $\rho[n]$, $M_{\Sigma}[n]$ апроксимуємо трикутною функцією (рис. 1).

Процедура фазуфікації вхідних сигналів, тобто визначення приналежності поточного значення координат вхідного вектора до того чи іншого діапазону, проводиться за максимальним значенням функції приналежності $\mu^T(x)$.

Для вихідної координати, тобто керуючого сигналу $l[n]$, виконуємо такі ж процедури: розподіл простору значень сигналу на діапазони, які будуть слугувати термами при побудові функцій приналежності; побудова трикутних функцій приналежності, координати вершин яких є еталонними очікуваними значеннями вихідної координати $l[n]$ (рис. 2).

Побудувати нечітку інверсну модель означає синтезувати базу правил, яка забезпечить алгоритм пошуку адекватної реакції об'єкта на збурення. База правил нечіткої інверсної моделі формується на основі бази навчальних даних, в якості якої використано експериментальні дані, за алгоритмом побудови бази нечітких правил на основі чисельних даних [2]. Спочатку визначаються ступені приналежності навчальних даних ($\rho[n]$, $M_{\Sigma}[n]$ та $l[n]$) до кожного виділеного діапазону, які будуть виражатися значеннями функцій

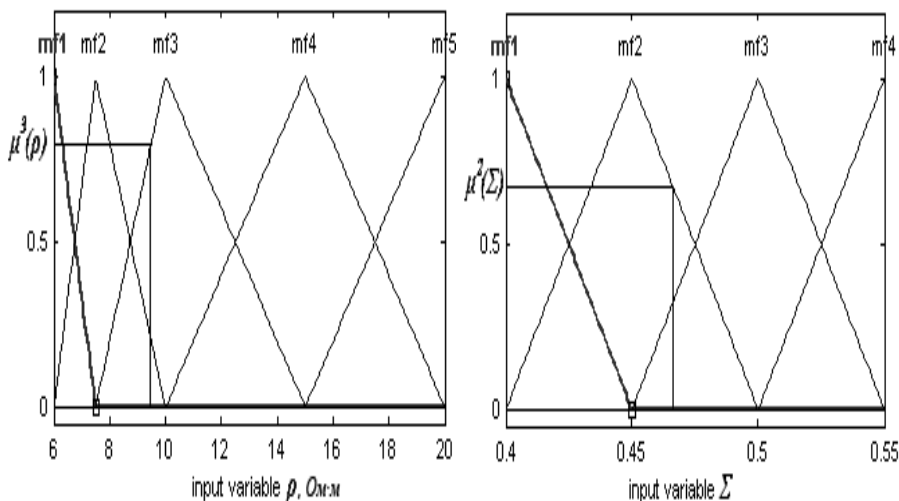


Рисунок 1 – Функції приналежності $\rho[n]$, $M_\Sigma[n]$

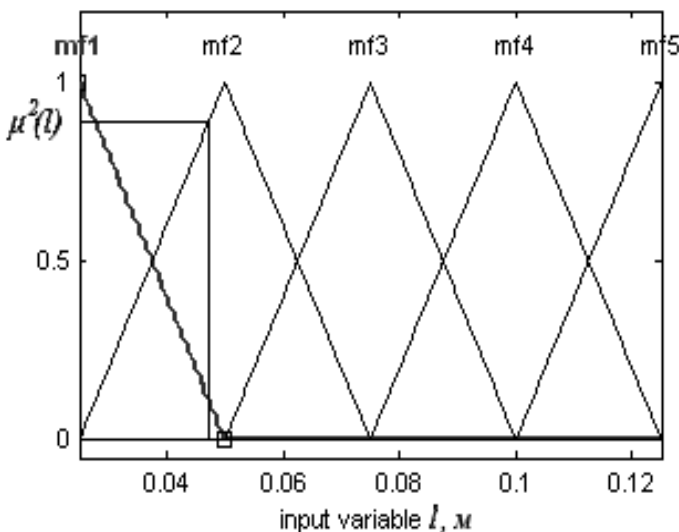


Рисунок 2 – Функція приналежності вихідної змінної $I[n]$

приналежності відповідних нечітких множин для кожної групи даних $\mu^T(x)$. Вибираючи діапазони з максимальним значенням функцій приналежності, отримуємо остаточно для кожної групи навчальних даних правило: П: Якщо ($\Sigma_i = R_j$) і ($\rho_i = D_j$), то ($I_i = B_j$). В базі даних знаходиться велика кількість груп навчальних даних, по кожній з яких може бути сформоване одне правило. Іс-

нує висока ймовірність, що деякі з них виявляться суперечливими, коли одні і ті ж умови приводять до різних висновків. Розв'язати таку проблему можна, приписуючи кожному правилу ступінь істинності:

$$SR(\Pi) = \mu^{Dj}(\rho_i) \cdot \mu^{Rj}(\Sigma_i) \cdot \mu^{Bj}(l_i).$$

До бази правил включається правило, яке має найвищу ступінь істинності. Таким чином розв'язується проблема суперечливості правил, а також значно зменшується їх загальна кількість. Блок-схема алгоритму побудови бази правил на основі чисельних даних наведена на рис. 3.

Після застосування наведеного алгоритму до бази даних, отриманих при експериментальному дослідженні електровибухового перетворення енергії, отримано несуперечливу базу знань (табл. 1), яка є табличною формою запису бази правил нечіткої інверсної моделі. Значення інформаційної координати $\Sigma[n]$ дано у відносних одиницях, за базове значення прийнято амплітудне значення розрядного струму при короткому замиканні $I_{кз}$.

Таблиця 1 – Значення координати $l[n]$, м

M_{Σ}	ρ , Ом м				
	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0
0,40	0,047	0,050	0,056	0,094	0,100
0,45	0,040	0,042	0,048	0,081	0,090
0,50	0,032	0,035	0,038	0,069	0,082
0,55	0,025	0,027	0,030	0,052	0,065

База правил у вигляді нечітких логічних рівнянь дозволяє пов'язати вихідний сигнал $l[n]$ та ФП координат вектора стану $\rho[n]$, $M_{\Sigma}[n]$, в результаті чого отримуємо значення керуючого впливу для певних діапазонів числових значень координат вектора стану:

База правил нечіткої інверсної моделі $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$:

Якщо ($\rho = \text{trimf}[5,5 \ 6 \ 7,5]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$), **то** ($l = 0,047$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[6 \ 7,5 \ 10]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$), **то** ($l = 0,05$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[7,5 \ 10 \ 15]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$), **то** ($l = 0,056$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[10 \ 15 \ 20]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$), **то** ($l = 0,094$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[15 \ 20 \ 25]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$), **то** ($l = 0,1$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[5,5 \ 6 \ 7,5]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$), **то** ($l = 0,04$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[6 \ 7,5 \ 10]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$), **то** ($l = 0,042$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[7,5 \ 10 \ 15]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$), **то** ($l = 0,048$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[10 \ 15 \ 20]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$), **то** ($l = 0,081$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[15 \ 20 \ 25]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$), **то** ($l = 0,09$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[5,5 \ 6 \ 7,5]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,45 \ 0,5 \ 0,55]$), **то** ($l = 0,032$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[6 \ 7,5 \ 10]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,45 \ 0,5 \ 0,55]$), **то** ($l = 0,035$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[7,5 \ 10 \ 15]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,45 \ 0,5 \ 0,55]$), **то** ($l = 0,038$), **інакше**

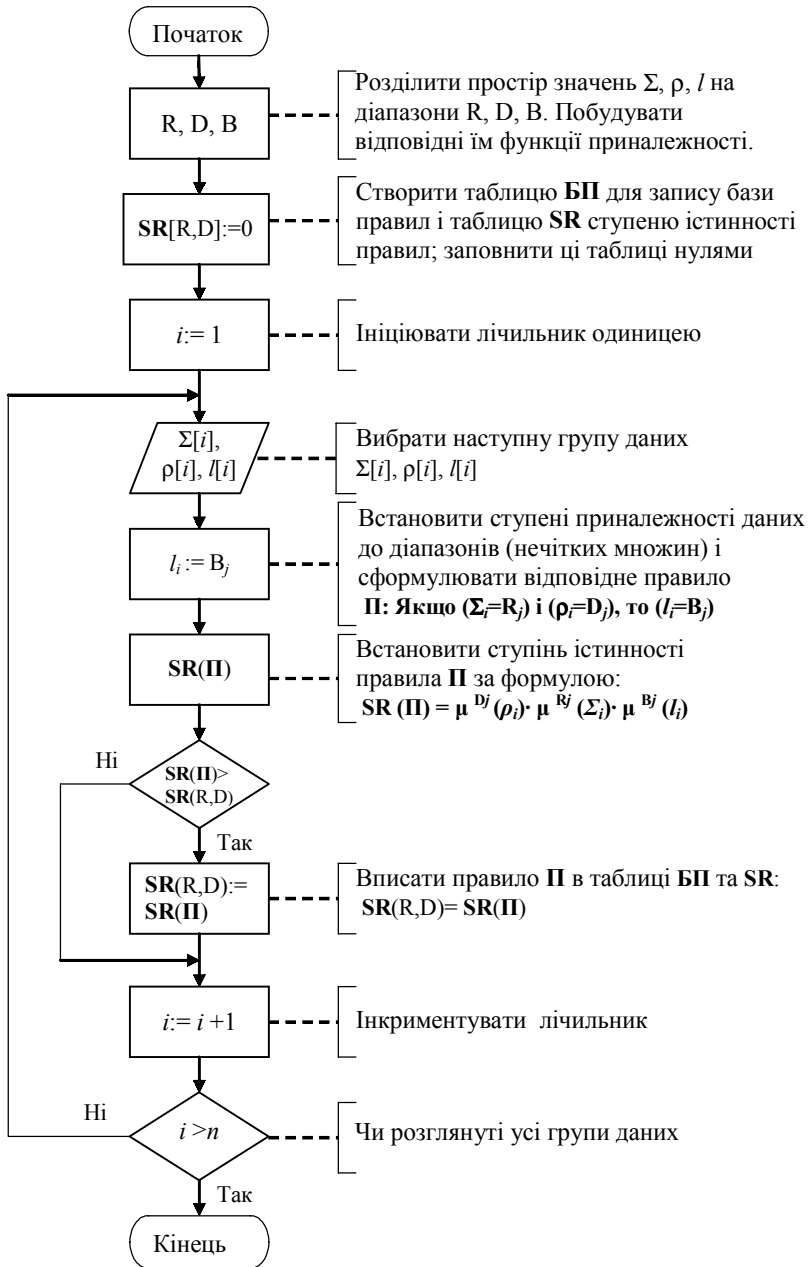


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму побудови інверсної моделі

Якщо ($\rho = \text{trimf}[10\ 15\ 20]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,45\ 0,5\ 0,55]$), **то** ($l = 0,069$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[15\ 20\ 25]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,45\ 0,5\ 0,55]$), **то** ($l = 0,082$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[5,5\ 6\ 7,5]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$), **то** ($l = 0,025$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[6\ 7,5\ 10]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$), **то** ($l = 0,027$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[7,5\ 10\ 15]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$), **то** ($l = 0,03$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[10\ 15\ 20]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$), **то** ($l = 0,052$), **інакше**
Якщо ($\rho = \text{trimf}[15\ 20\ 25]$) **і** ($\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$), **то** ($l = 0,065$).

Базу правил нечіткої залежності $\sigma_{\Sigma} = F(l[n], \rho[n])$ синтезуємо на основі експериментальної бази даних (табл. 2). Значення середньоквадратичного відхилення σ_{Σ} приведені до математичного сподівання.

Таблиця 2 – Середньоквадратичне відхилення σ_{Σ} координати Σ

$l, \text{ м}$	$\rho, \text{ Ом м}$				
	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0
0,025	0,028	0,024	0,023	0,015	0,010
0,050	0,037	0,036	0,036	0,014	0,012
0,075	0,042	0,040	0,039	0,015	0,013
0,100	0,074	0,069	0,044	0,017	0,016
0,125	0,085	0,072	0,055	0,032	0,024

Інверсну нечітку модель електровибухового перетворення енергії на основі отриманої бази правил будуємо в середовищі MATLAB, використовуючи пакет Fuzzy Logic Toolbox [3], який має простий інтерфейс для проектування і діагностики нечітких моделей. Графічні засоби Fuzzy Logic Toolbox дають змогу інтерактивно відслідковувати поведінку системи. Результати моделювання: $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$ електровибухового перетворення енергії та залежності статистичних характеристик інформаційної координати від положення об'єкта у факторному просторі: $\sigma_{\Sigma} = F(l[n], \rho[n])$ за допомогою fuzzy-апроксиматора представлені на рис. 4, 5.

Висновки. Засобами fuzzy-апроксимації побудовано інверсну модель керування електровибуховим перетворення енергії $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$ на основі бази навчальних даних, в якості якої використано результати експериментальних досліджень з застосуванням методів планування експерименту. Для синтезу несуперечливої бази правил нечіткої інверсної моделі застосовано метод fuzzy-апроксимації та алгоритм побудови бази нечітких правил на основі чисельних даних, який приписуючи кожному правилу ступінь істинності дозволяє відібрати правило, що має найвищу ступінь істинності. Таким чином розв'язується проблема суперечливих правил, а також значно зменшується їх загальна кількість. Побудовано нечітку модель залежності середньостатистичне відхилення інформаційної координати σ_{Σ} , від положення об'єкта в просторі станів $\sigma_{\Sigma} = F(l[n], \rho[n])$.

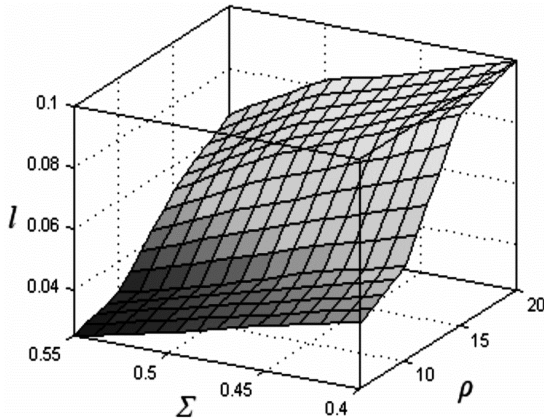


Рисунок 4 – Інверсна модель: $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$

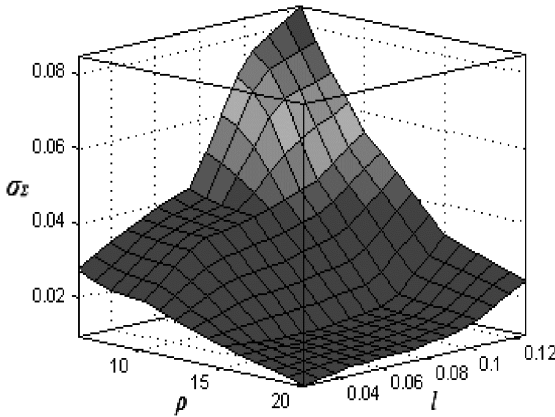


Рисунок 5

Синтезовані на основі нечіткої інверсної моделі системи керування електровибуховим перетворення енергії забезпечать адаптивність керування у всьому просторі станів при нестационарності параметрів середовища та непередбачуваних збурюючих впливах. Така система керування зможе генерувати адекватну реакцію на збурення за рахунок визначення відповідного керуючого впливу за допомогою інверсної моделі.

Список літератури: 1. Козирев С.С. Удосконалена модель керування електровибухового перетворення енергії / Збірник наукових праць НУК. – № 4 (415). – Миколаїв. – 2007. – С. 101-109. 2. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с. 3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.

Надійшла до редколегії 03.06.2008.

Ю.Н.ГИРКА, НТУ «ХПИ»

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО РАССТОЯНИЯ В ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ ЭТАЛОНА РЭМП

У роботі представлена оригінальна методика визначення між електродної відстані в смугових лініях Еталону РЕМП у випадку коли, потенційний електрод в них є набором паралельних провідників натягнутих на діелектричних стійках, а заземлені електроди робочої зони – листовая мідь, закріплена на плитах дельта-деревини.

In the work the original method of definition of inter-electrode distance is presented in the strip lines of Etalon PEMF in the case when the potential electrode in them is a set of parallel conductors rigged on dielectric bars, and the earthed electrodes of working zone are a sheet copper, fastened on slabs from delta-wood.

Постановка задачи. Полеобразующей системой в Эталоне РЭМП является замкнутая симметричная полосковая линия (ПЛ), в которой формируется плоская ТЕМ-волна электромагнитного поля. Параметры такой волны достаточно легко рассчитываются, что и обусловило ее практическое применение для метрологической аттестации и проверки средств измерения импульсных электрических и магнитных полей.

Расчет напряженности электрического поля в такой системе проводится по формуле:

$$E = U/h, \quad (1)$$

где U – напряжение между электродами ПЛ, В;

h – расстояние между электродами ПЛ, м.

Поэтому данная работа посвящена точному определению расстояния между электродами h .

Для определения этого расстояния было решено провести метрологическую аттестацию величины межэлектродного зазора в рабочей зоне ПЛ Эталона РЭМП с привлечением специалистов ГП «Харьковстандартметрология».

Рабочая зона ПЛ представляет собой ТЕМ-ячейку, потенциальный электрод которой – это набор проволочных проводников натянутых пружинами между диэлектрических стоек, а в качестве заземленного электрода выступает лист электротехнической меди. Несколько упрощенно внешний вид ТЕМ-ячейки показан на рис. 1.

Трудность данного вида работ состоит в том, что, во-первых, лист меди, который выступает в качестве заземленного электрода, имеет некоторое отклонения от плоскости, а во-вторых, проволочный потенциальный электрод может иметь провисания, а также необходимо было решить в каком сечении

проводников проводить условную плоскость, ограничивающую измеряемое расстояние. Для такой работы необходимо было разработать методику метрологической аттестации.

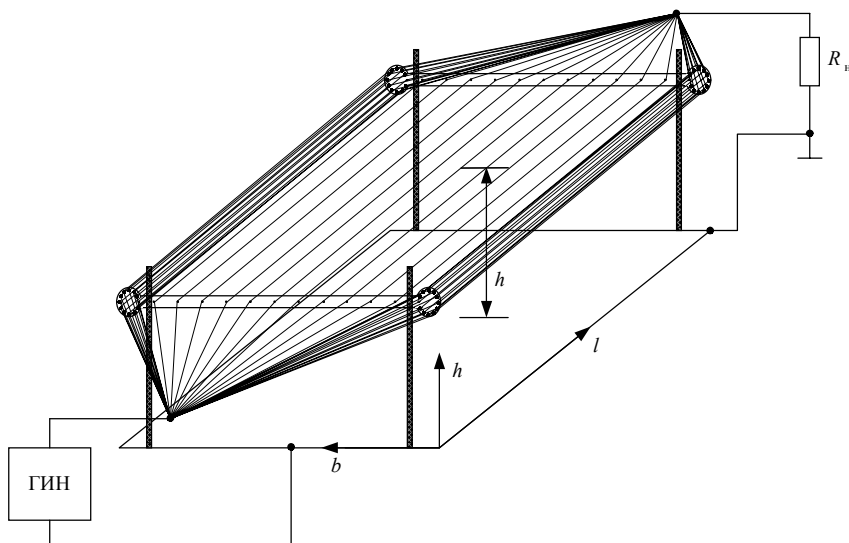


Рисунок 1 – Рабочая зона ПЛ Эталона РЭМП:

ГИН – генератор импульсов напряжения; R_n – согласованная нагрузка;
 h – межэлектродное расстояние

Такая методика была разработана и внедрена на практике сотрудниками ГП «Харьковстандартметрология» и НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». Она включает в себя три этапа измерений.

1. Определение области аттестации. На этом этапе мы определяли область однородности поля – рабочий объем ТЕМ-ячейки. Согласно РЭ на Эталона РЭМП таковой считается область рабочего объема ТЕМ-ячейки за исключением краев шириной 100 мм по ее периметру. Таким образом, аттестуемая область – это прямоугольник со сторонами 1147×1000 мм для ПЛ-48 и 900 × 500 мм для ПЛ-24.

2. Определение рельефа поверхности медного листа. Этот этап осуществлялся с помощью индикаторного плоскомера с ценой деления 0,01 мм [1]. Было определено несколько десятков точек, в которых измерялось отклонение от выбранной нулевой. Поверхности аттестуемых областей изображены на рис. 2 (координатные оси соответствуют рис. 1). Отклонения от плоскости в последующем будут учитываться при расчетах напряженности электромагнитного поля в конкретной точке.

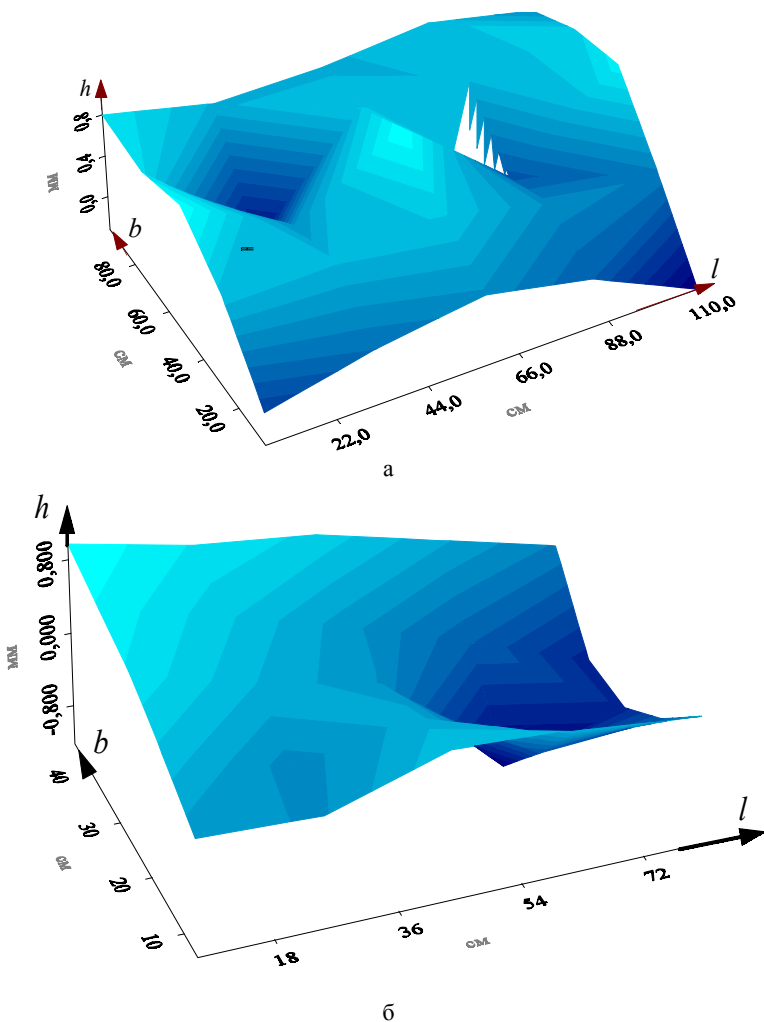


Рисунок 2 – Рельеф поверхности заземленного электрода ПЛ-48 (а) и ПЛ-24 (б)

3. Непосредственное измерение межэлектродного зазора. Проводилось с помощью угловых линеек длиной 0,5 м (для ПЛ-48) и 0,3 м (для ПЛ-24). Измерялось расстояние от поверхности заземленного электрода до нижней касательной к цилиндру ближайшего проволочного проводника потенциального электрода, так как частота проводимого тока колеблется от десятков до сотен МГц, а значит, резко выражен скин-эффект [2]. Точки, где проводились измерения, выбирались в центрах квадратов, на которые условно разбита аттестуемая поверхность.

Было рассмотрено возможное искажение расстояния между электродами из-за провисания проволочных проводников. Но так как они имеют небольшой вес (диаметр скрутки 1,7 мм), протяженность подвеса менее полутора метров и сила натяжения достаточно велика, то такое провисание практически не влияет на величину погрешностей данных измерений [3].

Результаты измерений. После обработки результатов измерений были получены следующие цифры: отклонение от условного нуля для полосковой линии ПЛ-48 составило от плюс 0,95 мм до минус 0,3 мм, а для ПЛ-24 – от плюс 0,77 мм до минус 1,67 мм. Максимальное отклонение расстояния между электродами от номинального составило: для ПЛ-48 – 1,2 мм, для ПЛ-24 – 0,7 мм.

Поскольку в ТЗ на Эталон РЭМП указана максимально допустимая погрешность 1 %, то и отклонения геометрических размеров от декларируемых должны укладываться в эти пределы. Таким образом, максимальная абсолютная погрешность для ПЛ-48 – 4,8 мм, для ПЛ-24 – 2,4 мм. Полученные выше результаты измерений по сумме модулей не превышают указанных величин.

В результате работы ГП «Харьковстандартметрология» было выдано свидетельство о метрологической аттестации межэлектродных промежутков полосковых линий Эталона РЭМП.

Список литературы: 1. МИ 2007-89. Рекомендация. ГСИ. Плиты поверочные и разметочные. Методика поверки. 2. *Атабеков Г.И.* Теоретические основы электротехники. Часть I. – М.: Энергия, 1964.– 312 с. 3. Элементарный учебник физики: Механика. Теплота. Молекулярная физика / Под ред. *акад. Г.С. Ландсберга.* – М.: Наука, 1967. – 576 с.

Поступила в редакцию 03.06.2008.

УДК 621.373.2

В.С.ГЛАДКОВ, канд. техн. наук; **А.А.ГУЧЕНКО**; **В.Я.ХАЙЛО**;
НТУ «ХПИ»

КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА ЭНЕРГИЕЙ 50 КЭВ

Наведено опис компактного джерела живлення прискорювачів іонів гелію та водню (КДЖП) енергією 50 кеВ, яке складається з генератора високої випрямленої напруги величиною 50 кВ та перетворювачів напруги живлення апаратури інжекторів іонів гелію та водню. Основною відмінністю КДЖП від раніше створених є дуже малий коефіцієнт пульсацій напруги та суха (на основі епоксидної смоли) ізоляція на напругу 50 кВ вторинної обмотки відносно первинної роздільних трансформаторів перетворювачів напруги.

The description of the compact power source of the accelerators of ions of helium and hydrogen (CPSA) with energy of 50 keV, consisting of the generator of high rectified voltage with magnitude of 50 keV and converters of supply of equipment of injectors of ions of helium and hydrogen is presented. Main distinction of CPSA from those created earlier is very small, voltage pulsation factor and dry (on the base of epoxy resin) insulation on voltage of 50 kV of secondary winding relative to primary one of isolation transformers of voltage converters.

Компактные источники питания ускорителей (КИПУ) ионов гелия и водорода, как правило, состоят из генератора высокого выпрямленного напряжения (ГВВН) и преобразователей напряжения питания аппаратуры инжекторов (ИПЖ) с изоляцией на полное напряжение ГВВН.

Основная проблема, которую необходимо было решить при создании описываемого КИПУ, – это обеспечение высокой электрической прочности по поверхности ГВВН и ИПЖ при ограниченных габаритах (по высоте) рабочего помещения, исключения из конструкции оргстекла и очень малых величин пульсаций выпрямленного напряжения.

В результате проведенных расчетов и экспериментов были разработаны и созданы:

- генераторы высокого выпрямленного напряжения величиной 50 кВ (ГВВП-50);
- источники питания инжектора ионов гелия (ИПЖ-Г) и ионов водорода (ИПЖ-В).

ГВВП-50 представляет собой высоковольтный выпрямитель, состоящий из повышающего трансформатора, блока выпрямления и сглаживания напряжения, омического делителя напряжения и короткозамыкателя. Принципиальная электрическая схема ГВВП-50 представлена на рис. 1.

После подачи напряжения на входные клеммы Т1 последнее повышается, выпрямляется, удваивается С1- VD1-VD2-С4 и поступает на выход ГВВП-50. Измерение выходного напряжения производится через делитель R1 с помощью микроамперметра РА1, шкала которого проградуирована в киловольтах. Для обеспечения безопасности работы ГВВП-50 оборудован короткозамыкателем QK1, состоящим из тягового электромагнита QK1.1, подключенного к клеммам питающего пульта управления ИПУ напряжением 220 В, и контактной системы QK1.2, обеспечивающей механическое короткое замыкание.

Конструктивно ГВВП-50 состоит из изоляционного стеклопластикового корпуса и расположенных внутри элементов схемы выпрямления с удвоением. Общий вид ГВВП-50 приведен на рис. 2.

Внутренняя часть ГВВП-50 показана на рис. 3.

ГВВП-50 имеет следующие технические характеристики:

выпрямленное напряжение, кВ	50;
ток нагрузки, 10^{-6} А	500;
пульсации напряжения, %	$\pm 0,016$;
напряжение питания, В/Гц	220/50;

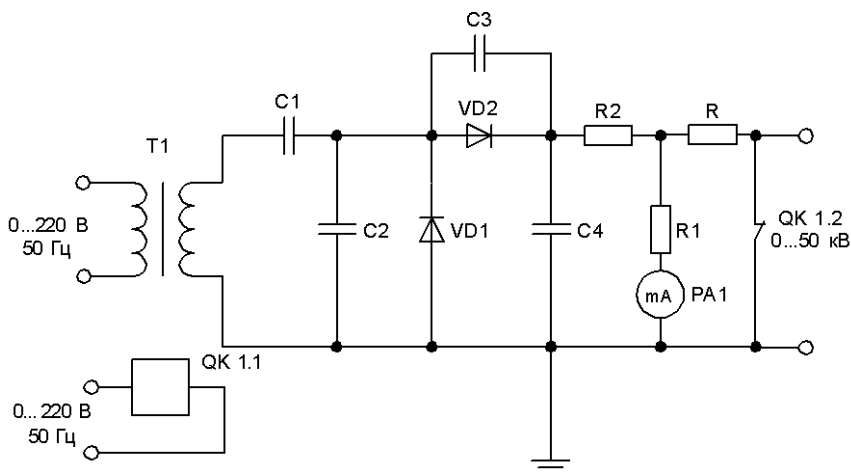


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема ГВВП-50:

T1 – повышающий трансформатор 220/23500В, C1, C4 – высоковольтные конденсаторы, 0,7 мкФ 50 кВ; C2, C3 – выравнивающие конденсаторы; VD1, VD2 – диоды высоковольтные; R1 – омический делитель напряжения сопротивлением 1 Гом; QK1.1-QK1.2 – короткозамыкатель; PA1 – микроамперметр; R – гасящий резистор



Рисунок 2 – Общий вид ГВВП-50:

1 – изоляционный корпус, 2 – вывод +50 кВ, 3 – короткозамыкатель, 4 – ввод напряжения на высоковольтный трансформатор, 5 – ввод напряжения на КЗ.

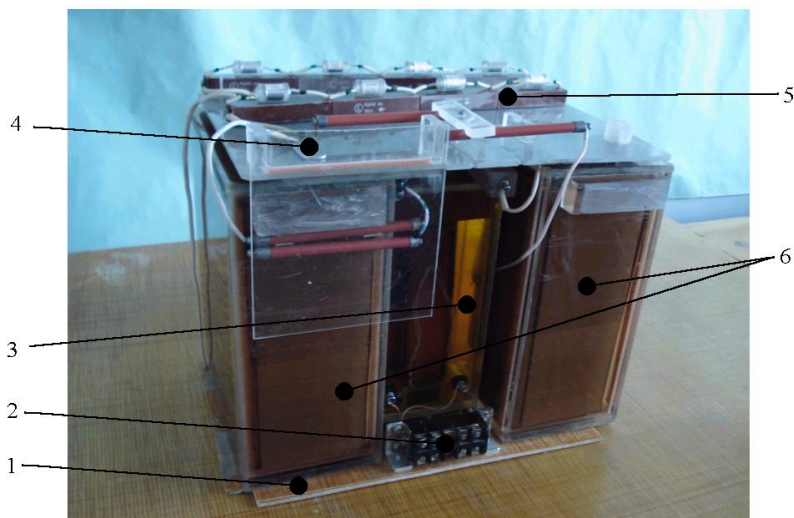


Рисунок 3 – Общий вид внутренней части ГВВП-50

1 – фальшпанель, 2 – клеммы для подачи напряжения на высоковольтный трансформатор, 3 - высоковольтный трансформатор 220/23500 В, 4 –вывод, 5 – высоковольтные выпрямители, 6 – высоковольтный конденсатор.

ИПЖ-Г и ИПЖ-В представляют собой изоляционные блоки, состоящие каждый из трех каналов. Канал № 1 является выпрямителем на напряжение 3000 В, канал № 2 – на 100 В, а канал № 3 – на напряжение 10000 В. Все каналы питаются от трансформаторов 220/220 В, вторичная обмотка которых изолирована от первичной на ± 50 кВ постоянного тока. Принципиальная электрическая схема каналов идентична и приведена на рис. 4.

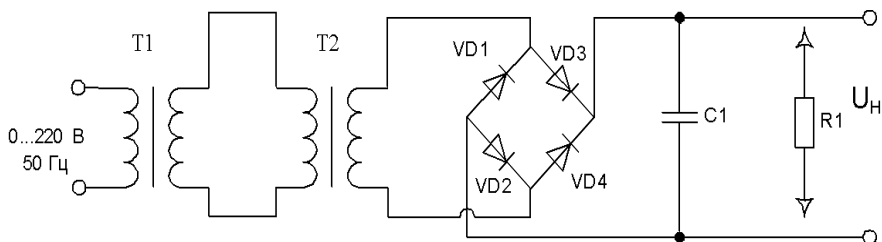


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема ИПЖ-Г и ИПЖ-В: T1 – изолирующий трансформатор, T2 – выходной трансформатор, VD1-VD4 – выпрямительный мостик (на каналах № 1 и № 3 выпрямители зашунтированы выравнивающими конденсаторами), C1 – сглаживающий конденсатор, R1 – разрядный резистор в каналах № 1 и № 2 (в канале №3 разряд C1 производится специальной закорачивающей штангой).

После подачи от автотрансформатора напряжения на входные клеммы Т1 каналов, последнее прикладывается к первичной обмотке трансформатора Т2, затем повышается (или понижается в канале № 2), выпрямляется, сглаживается и поступает на выходные клеммы ИПЖ-Г и ИПЖ-В.

Конструктивно ИПЖ-Г и ИПЖ-В состоят из изоляционного корпуса, внутри которого находится выемная часть с элементами каналов 1...3. Общий вид ИПЖ-Г и ИПЖ-В приведен на рис. 5.

Внутренняя выемная часть ИПЖ-Г и ИПЖ-В показана на рис. 6.

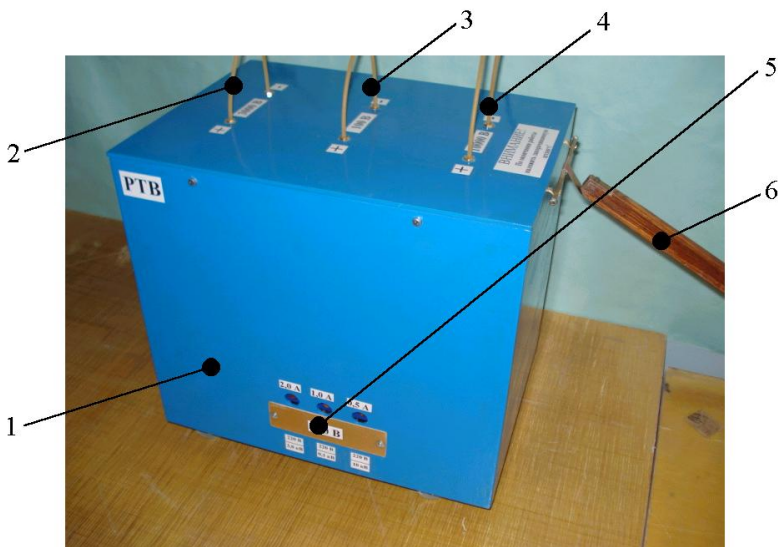


Рисунок 5 – Общий вид ИПЖ-Г и ИПЖ-В:

1 – изоляционный корпус, 2 – выводы канала № 1, 3 – выводы канала № 2, 4 – выводы канала №3, 5 – клеммы для подачи напряжения на первичные обмотки изолирующих трансформаторов, 6 – закорачивающая штанга

Основное отличие ИПЖ-Г и ИПЖ-В от ранее созданных состоит в том, что изолирующие трансформаторы 220В/220В (п.2, рис. 6) выполнены с сухой (на основе эпоксидной смолы) изоляцией вторичной обмотки относительно первичной на напряжение 50 кВ.

ИПЖ-Г и ИПЖ-В имеют следующие технические характеристики:

изоляция относительно земли, кВ	50;
число независимо регулируемых напряжений (каналов)	3;
параметры регулируемых напряжений и токов:	
питание магнита (канал 2), В/10 ⁻³ А	0...100/0...100;

поджиг разряда (канал 1), В/10 ⁻³ А	0...3000/0...10;
вытягивание (канал 3), В/10 ⁻⁶ А	0...10000/0...50;
пульсации напряжения, %	± <0,4;
напряжение питания, В/Гц	220/50.

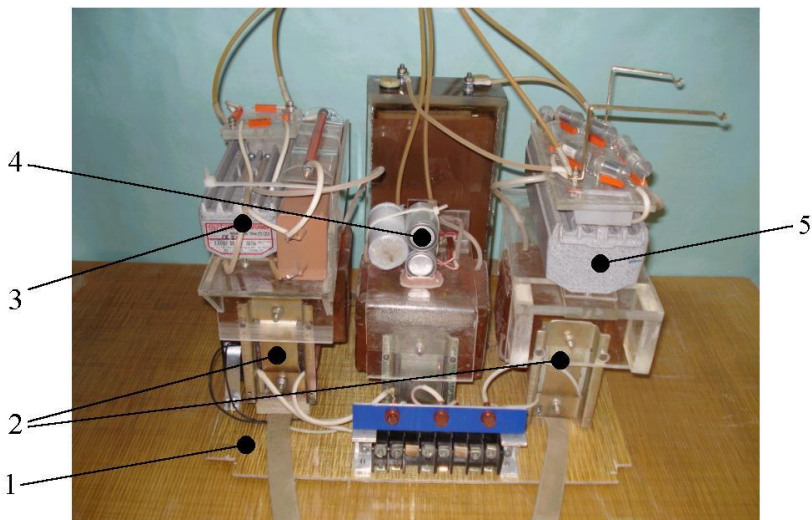


Рисунок 6 – Общий вид выемной части ИПЖ-Г и ИПЖ-В:

1 – фальшпанель, 2 – изолирующие трансформаторы каналов, 3 – повышающий трансформатор канала № 1 с блоком выпрямления и сглаживания, 4 – понижающий трансформатор канала № 2 с блоком выпрямления и сглаживания, 5 – повышающий трансформатор канала № 3 с блоком выпрямления и сглаживания

Проведенный комплекс прямо-сдаточных и длительных испытаний КИПУ показал его высокие работоспособность и надежность функционирования.

Авторы выражают особую благодарность Главному метрологу НИПКИ «Молния» Немченко Ю.С. и ведущему инженеру Сомхиёву С.Б. за помощь в организации и проведении измерений параметров ИПЖ-Г и ИПЖ-В.

Поступила в редколлегию 05.03.2008

В.С.ГЛАДКОВ, канд.техн.наук; **О.А.ГУЧЕНКО**;
В.Я.ХАЙЛО; **О.В.ШЕСТЕРІКОВ**; НТУ «ХПІ»

ЗАЛЕЖНІСТЬ РУЙНУВАННЯ БЕТОНІВ ПРИ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПРОБІВІ ВІД АМПЛІТУДНО-ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСІВ НАПРУГИ

На базі результатів експериментальних досліджень показано, що при дії імпульсів наносекундного діапазону руйнування бетонів при електричному пробі відбувається в 5-6 разів ефективніше, ніж при дії мікросекундних імпульсів.

On the base of the results of experimental studies, it is shown that, under the action of voltage pulses of nanosecond range, concrete failure during electrical breakdown is 5-6 times more efficient than under the action of microsecond pulses.

Аналіз наявних літературних даних, а також результатів попередніх досліджень ефективності руйнування занурених у воду бетонів при електричному пробі показав, що відсутні будь-які відомості про вплив на руйнування бетонів амплітудно-часових параметрів (АЧП) імпульсів напруги, що діють на зразки бетону. А вибір оптимальних АЧП імпульсів напруги дозволяє кваліфіковано вибрати номінальну напругу високовольтної установки для електрофізичної утилізації залізобетонних та бетонних виробів.

З метою отримання кількісних характеристик АЧП імпульсів напруги наносекундного діапазону і порівняння їх з існуючими даними для імпульсів мікросекундного діапазону [1] були проведені експериментальні дослідження, що пов'язані з виявленням залежності ступеня руйнування зануреного у воду бетону від амплітудно-часових параметрів (АЧП) імпульсу напруги.

Для проведення експериментальних досліджень та порівняння з існуючими результатами досліджень в мікросекундному діапазоні були виготовлені досліджувані зразки з бетону діаметром 80 мм та завтовшки 9 мм. Зразки виготовлялись з портландцементу різних марок та заповнювача у вигляді піску (зерна різної величини від 0,14 мм до 0,5 мм) та гравію розміром 1,5-2,5 мм. Бетонна суміш мала відношення «цемент-заповнювач» 1:3 при водоцементному відношенні В/Ц = 0,4. Зразки виготовлялися у спеціальних формах та витримувалися в нормальних умовах твердіння (відносна вологість 90-100 % при температурі 20-25 °С) 28 діб. Перші чотири доби після виготовлення зразки щодня зволожувалися. Після закінчення процесу твердіння зразки покривалися тонким шаром парафіну з метою запобігання їх зволоженню при зануренні у воду.

Дослідження проводились на спеціально створеній установці.

Електричну схему установки наведено на рис. 1, а її загальний вигляд наведено на рис. 2.

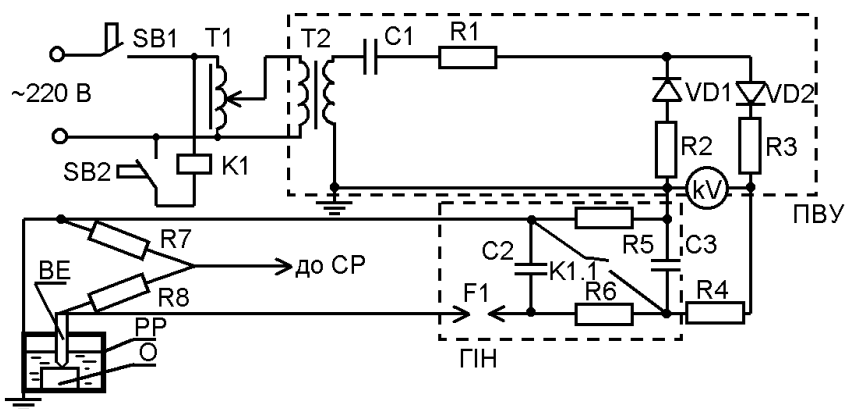


Рисунок 1 – Принципова електрична схема дослідницької установки:
 SB1 – кнопка вмикання; T1 – регульовальний автотрансформатор; ПВУ – підвищува-
 льно-випрямний пристрій; T2 – підвищувальний трансформатор; C1 – ємність
 подвоєння; R1, R2, R3 – струмообмежувальні резистори; VD1, VD2 – випрямні діоди;
 R4, R5, R6 – зарядні резистори; ГН – генератор імпульсів напруги; C2, C3 –
 накопичувальні конденсатори; F1 – відсікальний розрядник; SB2 – кнопка керування
 розрядом; K1 – керувальний контактор; R7, R8 – резистори подільника напруги;
 BE – високовольний електрод; PP – робочий резервуар; O – об’єкт руйнування;
 CP – система реєстрації



Рисунок 2 – Загальний вигляд дослідницької установки

З метою порівняння результатів експериментальних досліджень з ре-
 зультатами досліджень, проведених при дії імпульсів напруги мікросекунд-
 ного діапазону, електрична схема налаштована так, щоб електричний розряд
 у товщі бетонного зразка здійснювався на фронті імпульсу напруги. Треба

відмітити, що під терміном «імпульс напруги мікро- та наносекундного діапазону» розуміється додатний імпульс напруги з мікро- та наносекундною тривалістю фронту.

Установка генерує імпульси напруги двох форм (див. рис. 3 та 4).

Типову осцилограму імпульсу напруги при електричному пробіі бетонного зразка наведено на рис. 5.

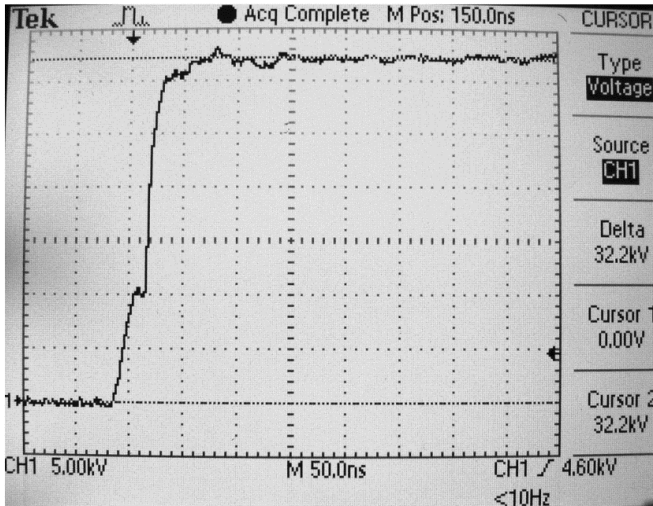


Рисунок 3 – Осцилограма наносекундного імпульсу напруги

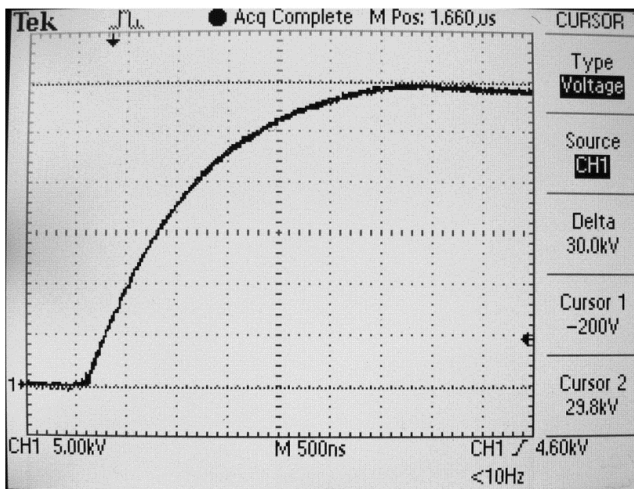


Рисунок 4 – Осцилограма мікросекундного імпульсу напруги

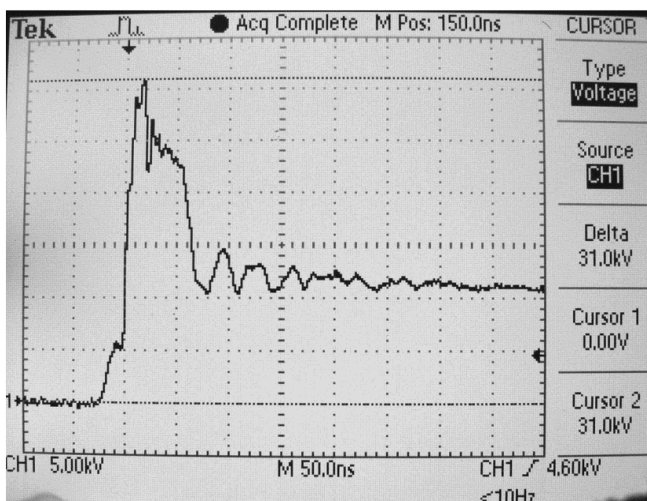


Рисунок 5 – Типова осцилограма імпульсу напруги

Критеріями оцінювання ступеня руйнування бетонних зразків при електричному пробі в системі електродів «стержень-площина» та «стержень-стержень» є:

- діаметр отвору (після того, як складено шматочки зруйнованого бетонного зразка);
- кількість шматків;
- середній розмір шматків бетонного зразка та їх кількість.

При проведенні експериментальних досліджень електричного пробом кожного бетонного зразка фіксувалася величина напруги пробом. Результати експериментальних досліджень руйнування бетонів у залежності від амплітудно-часових параметрів імпульсів напруги, що прикладаються, зведені до таблиці.

Результати експериментальних досліджень руйнування бетону

№	Тривалість фронту імпульсу 40 нс						
	Товщина зразка Δ , см	Амплітуда проб. напр., кВ	Ефект. міцн., кВ/см	Діам. отвору, мм	Орієн. кільк. шматків, шт	Орієн. середн. розмір шматків, мм x мм	Середня електр. міцн. E, кВ/см
1	2	32	26,7	7	10	20 x 30	26,84
2	1,2	33	27,5	8	11	->-	26,84

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8
3	1,25	32	25,6	9	12	-»-	26,84
4	1,15	32	26,7	7	11	-»-	26,84
5	1,2	33	27,5	8	12	-»-	26,84
6	1,25	34	27,2	8	12	-»-	26,84
7	1,2	32	26,7	9	13	-»-	26,84
8	1,2	32	26,7	9	13	21 x 25	26,84
9	1,18	31	26,3	9	12	20 x 30	26,84
10	1,2	33	27,5	9	13	-»-	26,84
Електроди «стержень-стержень»							
1	1,25	31	24,8	9	15	20 x 30	25,3
2	1,25	32	24,8	9	14	-»-	
3	1,2	30	25	10	14	-»-	
4	1,2	31	25,8	11	14	-»-	
5	1,2	30	25	10	14	-»-	
6	1,2	31	25,8	9	15	-»-	
7	1,2	30	25	10	14	-»-	
8	1,2	30	25	10	15	-»-	
9	1,2	31	25,8	11	15	-»-	
10	1,15	30	26,1	10	14	-»-	
Тривалість фронту імпульсу 2524 нс							
Електроди «стержень-площина»							
1	1,2	42	2	3	40x50	35	35
2	1,2	43	2	3	-»-	36	
3	1,25	41	2	3	-»-	34	
4	1,15	43	2	3	-»-	36	
5	1,2	42	2	3	-»-	35	
6	1,25	41	2	3	-»-	34	
7	1,2	41	2	3	-»-	34	
8	1,2	42	2	3	-»-	35	
9	1,18	43	2	3	-»-	36	
10	1,2	41	2	3	-»-	34	
Електроди «стержень-стержень»							
1	1,25	40	2	3	-»-	32	33
2	1,25	41	2	3	-»-	34	
3	1,2	40	2	3	-»-	32	
4	1,2	42	2	3	-»-	35	
5	1,2	40	2	3	-»-	32	
6	1,2	40	2	3	-»-	32	

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8
7	1,2	41	2	3	->-	34	
8	1,2	41	2	3	->-	34	
9	1,2	42	2	3	->-	35	
10	1,15	40	2	3	->-	32	

Характер руйнування бетону при дії імпульсів напруги наносекундного та мікросекундного діапазонів наведений на рис. 6.



Рисунок 6 – Характер руйнування бетону: а – при дії імпульсу наносекундного діапазону; б – при дії імпульсу мікросекундного діапазону.

З аналізу даних таблиці можна зробити висновок, що електрична міцність бетонів при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону при всіх типах електродів дорівнюється $E_{np\text{ }cp} \approx (25...27) \pm 10$ кВ/см, а при дії імпульсів напруги мікросекундного діапазону при всіх типах електродів $E_{np\text{ }cp} \approx 33...38$ кВ/см, тобто в першому випадку електрична міцність бетонів значно нижче.

Були проведені також експериментальні дослідження впливу на руйнування бетону конфігурації електродів.

З аналізу результатів роботи можна зробити такі висновки:

- вперше отримані кількісні характеристики електричної міцності бетонів при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону;
- при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону руйнування бетону значно більше, ніж при дії імпульсів напруги мікросекундного діапазону;
- експериментально підтверджено, що оптимальними конфігураціями електродів є «стержень-стержень» та «стержень-площина».

Список літератури: 1. Вершинин Ю.Н., Электрический пробой твердых диэлектриков. – Новосибирск, «Наука», 1968. – 210 с.

Надійшла до редколегії 05.03.2008

В.М.ЗОЛОТАРЕВ, канд.техн.наук;
В.П.КАРПУШЕНКО, канд.экон.наук; **А.Ф.КРИВЕНКО**;
В.В.ЗОЛОТАРЕВ; **А.А.НАУМЕНКО**, канд.техн.наук;
ЗАО «Завод «Южкабель», Харьков

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СХЕМЫ ИСПЫТАНИЙ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Запропоновано вирішення проблеми випробувань новітніх вітчизняних кабелів зі зшитою поліетиленою ізоляцією з допомогою економічних резонансних схем.

The solution of the problem of testing novel Ukrainian cables with insulation of sheathed polyethylene using economical resonance circuits.

Введение. Освоение массового производства силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 110 КВ включительно потребовало применения новых подходов к их испытаниям для обеспечения необходимого уровня качества и, в первую очередь, для проведения приемосдаточных испытаний на воздействие переменного высокого напряжения (ВН) и определения уровня частичных разрядов (ЧР).

Решение проблемы. Проведенные фундаментальные исследования электрофизических и тепловых явлений в полимерных диэлектрических и полупроводящих средах таких кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжений на основе математических моделей и численных методов расчета позволили определить факторы, влияющие на надежность конструктивно-технологических элементов этих кабелей. К этим факторам, в первую очередь, необходимо отнести триингостойкость и теплостойкость в широком диапазоне напряжений (6÷330 кВ). Необходимо отметить, что эти исследования позволили разработать усовершенствованные по надежности элементы конструкций разнообразной кабельно-проводниковой продукции, промышленные технологии переработки полученных полимерных соединений, необходимую отечественную нормативную базу системы испытаний и менеджмента качества, включающего входной контроль материалов, активный контроль параметров непосредственно в технологических линиях, а также приемосдаточные, периодические и типовые испытания.

Нормативная база устанавливает ряд требований по конструкции, геометрическим размерам и выдерживаемым испытательным воздействиям различного характера. В этой связи можно выделить следующие три вида испытаний.

1. Испытания каждой строительной длины, включающих измерение со-

противления токопроводящей жилы, воздействие испытательного напряжения в течение установленного времени, его формы и величины, а также определение величины амплитуды импульсов частичных разрядов при нормируемом напряжении;

2. Выборочные испытания, охватывающие 10% строительных длин одной партии одинаковых типов кабелей. Образцы отбираются от обоих концов кабеля. Эти исследования касаются проверки конструкции токопроводящей жилы, ее полупроводящего экрана, изоляции жилы, полупроводящего экрана по изоляции и других конструктивных элементов кабеля. Проводятся также испытания на тепловое расширение изоляции и на усадку полимерной оболочки кабеля;

3. Типовые испытания, которые проводятся на образцах длиной от 10 до 15 м. В этих испытаниях проводят:

- 3.1. измерение амплитуды импульсов частичных разрядов при нормируемом напряжении;
- 3.2. испытание на изгиб (три цикла навивки кабеля на оправку диаметром $20(D + d) \pm 5\%$ в одну и другую сторону (D – диаметр кабеля по наружной оболочке, d – диаметр токопроводящей жилы);
- 3.3. повторный контроль амплитуды импульсов частичных разрядов;
- 3.4. измерение тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от температуры. Этот процесс должен соответствовать нормируемым величинам и включать испытание кабеля напряжением, измерение $\text{tg } \delta$ при комнатной температуре, нагрев кабеля и выдержку не менее 2 часов и измерение $\text{tg } \delta$ после нагрева;
- 3.5. испытание переменной нагрузкой -3 цикла длительностью по 8 часов (нагрев до $95-100^\circ\text{C}$ в течение не более 3 часов, выдержка – не менее 2 часов при этой температуре, охлаждение до комнатной температуры – 3 часа);
- 3.6. контроль амплитуды импульсов частичных разрядов после испытания переменной нагрузкой;
- 3.7. испытание импульсным напряжением (по 10 импульсов каждой полярности);
- 3.8. испытание нормируемым повышенным напряжением в течение 4 часов;
- 3.9. продолжительные испытания, включающие:
 - 3.9.1. определение начального пробивного напряжения ($U_{\text{пр}} \geq 15 \times U_0$);
 - 3.9.2. длительное старение при установленном нормируемом напряжении ($U = 4 \times U_0$ в течение 0,5 года, 1 года и 2 лет. В каждой серии используется по 5 образцов длиной по 10 м);
 - 3.9.3. определение остаточной электрической прочности для каждой серии старения (должно быть $U_{\text{пр}} \geq 12 \times U_0$). Минимальное пробивное напряжение должно быть $U_{\text{пр.min}} \geq 9 \times U_0$;

- 3.9.4. измерение длины водных триингов после испытаний в течение 2 лет (их длина должна быть менее 1 мм);
- 3.9.5. разнообразные неэлектрические измерения изоляции (механических свойств, водопоглощения, усадки и др.).

Как видно из требований вышеприведенной нормативной базы к испытаниям для их реализации требуется целый ряд специализированных электрических установок при производстве кабельно-проводниковой продукции:

во-первых, внутрицеховые установки – для испытаний повышенным переменным напряжением $I_{исп} = 2,5 U_0$, и контроля амплитуды импульсов частичных разрядов при $U_{ч.р.} = 2 U_0$;

во-вторых, лабораторные установки двух видов (для реализации кратковременных и длительных электрических воздействий на образцах кабелей).

Проведенный нами анализ проблемы создания специализированных комплексов для испытаний кабельно-проводниковой продукции на соответствие требованиям надежности и технико-экологической безопасности указывает на необходимость испытания каждой строительной длины, проведение выборочных испытаний и части типовых испытаний, не связанных с кратковременными длительными электрическими воздействиями высоких уровней испытательных напряжений. Все эти испытания целесообразно проводить в заводских условиях. Остальные же испытания, зачастую по экономическим соображениям, наиболее целесообразно выполнять на договорной основе силами сторонних специализированных организаций.

Для создания специализированных электрических установок в заводских условиях необходимо было учесть целый ряд осложняющих факторов:

- высокая электрическая емкость кабелей высокого класса напряжений затрудняет использование мостовых схем измерений амплитуды импульсов частичных разрядов, так как эти измерения требуют высокой помехозащищенности;
- ограниченность свободного пространства в цехе требует совмещения нескольких видов испытаний на одной установке;
- наличие рядом расположенных потребителей электроэнергии, которые служат мощным источником помех. Отсюда следует необходимость тщательной экранировки измерительной камеры;
- необходимость выполнения заземлителей глубокого залегания для силовых и измерительных цепей;
- необходимость защиты измерительных цепей от мощных импульсных помех внутреннего происхождения, например, в результате развития скользящего разряда по поверхности разделки кабеля или пробоя;
- обеспечение необходимой пропускной способности установки, исходя из производственной программы завода (до 5 тыс. км в год);
- обеспечение норм охраны труда, техники безопасности и экологии

окружающей среды при эксплуатации высоковольтных маслонаполненных установок в условиях полностью экранированных камер.

Для обоснованного выбора требований к созданию специализированных электрических испытательных установок был выполнен аналитический обзор современных способов решения аналогичных задач в отечественной и зарубежной практике и используя, в первую очередь, накопленный научно-практический опыт.

Остановимся на конкретных подходах к решению самой сложной проблемы энергосберегающего испытательного оборудования воздействия переменным повышенным испытательным напряжением и измерения амплитуды импульсов частичных разрядов в изоляции кабельно-проводниковой продукции, так как по большинству других испытаний на заводе обычно имеется ЦЗЛ и цеховые испытательные станции.

Заводские испытания традиционных кабелей всегда проводились на кабельных предприятиях при помощи переменного напряжения. Испытания же кабелей в полевых условиях или на месте монтажа обычно проводились только при помощи постоянного напряжения. Электрический кабель представляет собой, главным образом, емкостную нагрузку, что требует сравнительно высокой мощности для испытания высоким напряжением в соответствии с Международными стандартами.

В качестве альтернативной энергосберегающей технологии испытания кабельно-проводниковой продукции предложены теоретические основы и методы применения резонансных испытательных систем на переменном напряжении. Примерно 30 лет назад традиционные трансформаторные системы начали заменяться параллельными резонансными системами для проведения стандартных заводских испытаний, которые также имеют свои недостатки. Сегодня параллельные резонансные системы заменяются последовательными резонансными системами, как наиболее технически совершенными и более дешевым средством достижения высоких испытательных напряжений. Для испытания кабелей повышенным испытательным напряжением и определения величины амплитуды импульсов частичных разрядов была предложена последовательная резонансная система.

В основу построения высоковольтных испытательных комплексов (ВИК), позволяющих проводить весь спектр испытаний таких кабелей в соответствии с международными нормами и действующими системами менеджмента качества продукции, была положена концепция резонансного возбуждения последовательного индуктивно-емкостного (L-C) контура с переменной индуктивностью на стороне высокого напряжения с использованием явления последовательного резонанса.

Рассмотрим краткое описание принципа работы системы, основные особенности конструкции и способов применения.

Согласно определению для поддержания резонанса количество энергии

на входе системы должно быть равно количеству энергии, потерянной в течение полупериода на выходе и внутри самой системы. Практически это означает, что в случае электрической схемы на вход системы должно подаваться количество энергии, равное только омическим потерям. На рис. 1 показана принципиальная практическая схема замещения системы с последовательным резонансным контуром.

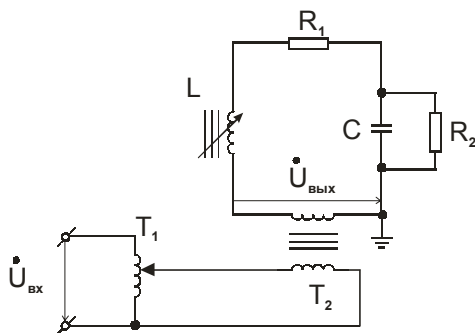


Рисунок 1 – Схема испытаний кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с использованием резонанса напряжений

Переменный автотрансформатор T_1 контролирует возбуждающий трансформатор T_2 , который снабжает электроэнергией резонансный контур и изолирует испытуемый кабель от остальной цепи. Конденсатор C – это емкость испытуемого кабеля, а также другие емкости контура (емкостного делителя напряжения и емкость выходного проходного изолятора). Индуктивность L – переменный реактор, где индуктивное сопротивление меняется в соответствии с емкостным сопротивлением C , таким образом настраивая цепь на резонанс.

Эквивалентная схема замещения показана на рис. 2.

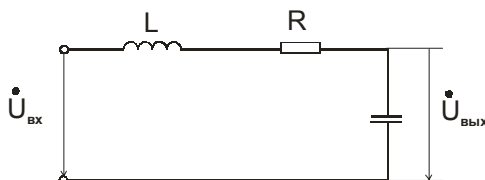


Рисунок 2 – Упрощенная эквивалентная схема замещения испытательной установки для испытания кабелей с использованием резонанса напряжений

Предполагается, что возбуждающий трансформатор не имеет потерь. Индуктивность (L) представляет собой общую индуктивность возбуждающего трансформатора и реактора. Сопротивление R представляет собой все ак-

тивные потери системы. Эквивалентную схему замещения, изображенную на рисунке, можно описать следующим уравнением в комплексной форме:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = -\frac{jX_L \dot{U}_{\text{вх}}}{R + j(X_L - X_C)}.$$

При резонансе, $X_L = X_C$, тогда

$$\dot{U}_{\text{вых}} = -jX_L \dot{U}_{\text{вх}}/R = Q \dot{U}_{\text{вх}},$$

где

$$Q = \omega L/R = 1/\omega RC.$$

Параметр (Q) является добротностью резонансной системы. Добротность (Q) типичной системы последовательного резонанса колеблется в пределах от 50 до 80 для высококачественных емкостных нагрузок. При резонансе фаза силы тока (I) совпадает с фазой напряжения возбуждающего трансформатора ($I_{\text{вх}}$). Следовательно, входная мощность является полностью активной ($\cos \phi = 1$).

$$P = U_{\text{вх}} I \cos \phi = U_{\text{вх}} I = QP \quad (\text{при резонансе}).$$

Реактивная мощность подается в емкостную нагрузку (C) при тех же условиях:

$$P_p = U_{\text{вх}} I = QU_{\text{вх}} I = QP,$$

где P_p – реактивная мощность; P – активная мощность.

Следовательно, сама входная мощность оказывается в (Q) раз меньше, чем кажущаяся (реактивная) выходная мощность. Это приводит к значительному сокращению входной мощности при высоковольтных испытаниях, то есть к экономии электроэнергии.

Типичная векторная диаграмма выглядит следующим образом (рис. 3).

На этой диаграмме (U_L) является напряжением на выводах регулируемого реактора, а (U_C) является напряжением на кабеле. Соотношение реактивных векторов (U_L) или (U_C) с результирующей этих векторов (U_p) является добротностью (Q) системы.

Предложенная последовательная резонансная система имеет пять основных преимуществ:

- низкая входная мощность;
- низкий ток короткого замыкания;
- низкий уровень нелинейных искажений;
- отсутствие переходных перенапряжений при отказе испытуемого кабеля;
- низкий уровень разбалансировки фаз.

Рассмотрим эти преимущества:

1. Низкая входная мощность, объясняется тем, что в последовательных резонансных системах мощность теряется только в виде омических потерь,

следовательно, входная мощность таких систем очень небольшая.

Например, допустим, что требуется создать испытательное напряжение ($U_{\text{вых}}$) 500 кВ на емкостной нагрузке 0,0127 мкф при силе тока 2А ($P_{\text{вых}} = 1000$ кВА). Также допустим, что (Q) системы равно 50 (типичная добротность для нагрузок с низкими потерями).

Исходя из этих данных определяем необходимое напряжение возбуждения

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}}}{Q} = \frac{500 \cdot 10^3}{50} = 10 \text{кВ}$$

и мощность входная

$$P_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вых}}}{Q} = \frac{1000 \cdot 10^3}{50} = 20 \text{кВА}.$$

Таким образом, мощность возбуждающего трансформатора должна составлять только 20 кВА и такая система может питаться от сети 0,4 кВ.

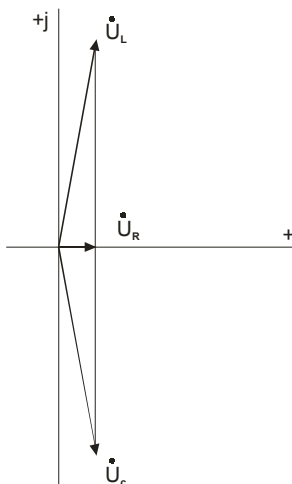


Рисунок 3 – Векторная диаграмма для схемы испытаний кабелей с использованием резонанса напряжений

2. Низкий ток короткого замыкания (для примера выбираем емкостную нагрузку 0,0127 мкф, выходное напряжение – 500 кВ, ток – 2А).

Если во время испытания кабеля происходит дуговое перекрытие или пробой изоляции, система теряет высокое значение добротности Q , которое она имела до пробоя. Из рисунка видно, что при коротком замыкании ток равен напряжению возбуждения ($U_{\text{вых}}$), разделенному на полное сопротивление реактора (L).

$$X_L = \frac{U_{\text{вых}}}{I} = \frac{500 \cdot 10^3}{2} = 250 \text{кОм},$$

а ток короткого замыкания равен

$$I_{кз} = U_{\text{вых}} / X_L = 10 \cdot 10^3 / 250 \cdot 10^3 = 0,04 A .$$

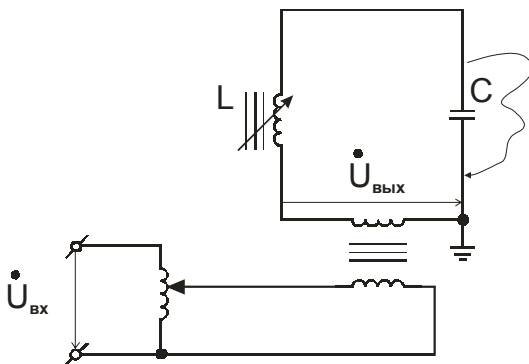


Рисунок 4 – Практическая реализация схемы с испытаний кабелей с использованием резонанса напряжений. (В качестве переменной индуктивности \$L\$ применен мощный линейный реактор переменного напряжения)

3. Низкий уровень нелинейных искажений

Регулируемый реактор последовательного резонансного контура настроен на частоту входного напряжения и, благодаря высокой величине добротности (\$Q\$) все другие гармоники значительно затухают. Сам регулируемый реактор должен иметь очень низкий уровень нелинейных искажений ввиду низкой плотности магнитного потока, что обеспечивает низкий уровень звукового шума.

Это основано на наличии устойчивого входного напряжения без искажений. Соотношение (\$U_{\text{вых}}\$) к (\$U_{\text{вх}}\$) может быть выражено следующим образом:

$$\frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вх}}} = \frac{1}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega RC} = Q(\omega) .$$

Эта функция может быть приведена к следующему виду:

$$Q_n = \frac{1}{n^2 - 1}, n > 1,$$

где \$n\$ – номер гармоники входного напряжения. Следовательно, в то время, как последовательная резонансная система производит существенное увеличение напряжения при заданной частоте (\$n = 1\$), этот процесс ослабляет гармоники искажения. Уровень нелинейного искажения намного меньше 0,5 % типично для этой системы, даже если входное напряжение искажено.

4. Переходные перенапряжения

При использовании обычных трансформаторов или параллельных резо-

нансных систем дуговое перекрытие изоляции испытуемого устройства может вызвать переходные перенапряжения, которые при определенных условиях могут превысить испытательное напряжение в 2 раза. При использовании последовательных резонансных систем переходные перенапряжения практически отсутствуют, что видно при испытаниях на мониторе (затухающие колебания).

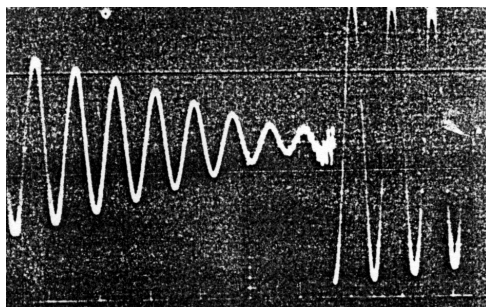


Рисунок 5 – Копия оциллограммы переходного процесса при пробое кабеля. (Переходный процесс характеризуется затухающей кривой напряжения при резонансе напряжений в последовательной цепи, после чего напряжение в схеме быстро восстанавливается.)

5. Низкий уровень разбалансировки фаз

Так как входная мощность резонансных систем значительно ниже выходной мощности, то обор мощности с одной фазы трехфазной сети вызывает очень незначительную разбалансировку фаз. Если используются обычные трансформаторы, то происходит значительная разбалансировка фаз, что влияет на работу других источников потребления энергии, питающихся от сети с трансформатором. Вместе с тем, традиционные системы особенно оказывают разбалансирующее действие, когда подстанции не имеют достаточной мощности для подключения испытательного трансформатора, а строительство новой линии подачи питания может быть недоступно по стоимости или не разрешено местной электроэнергетической компанией.

Итак, вышеперечисленные преимущества дали полное основание для выбора испытательной установки по принципу последовательного резонанса.

На основании вышеизложенного и необходимости испытания кабелей не только повышенным напряжением, но и измерения величины амплитуды частичных разрядов была выбрана многокомпонентная система, изображенная на следующей схеме. Параметры элементов системы не приводятся, так как для испытания энергетических кабелей на рабочее напряжение 220-330 кВ требуют создания последовательной резонансной системы, базирующейся не на реакторе камерного типа, а каскадного.

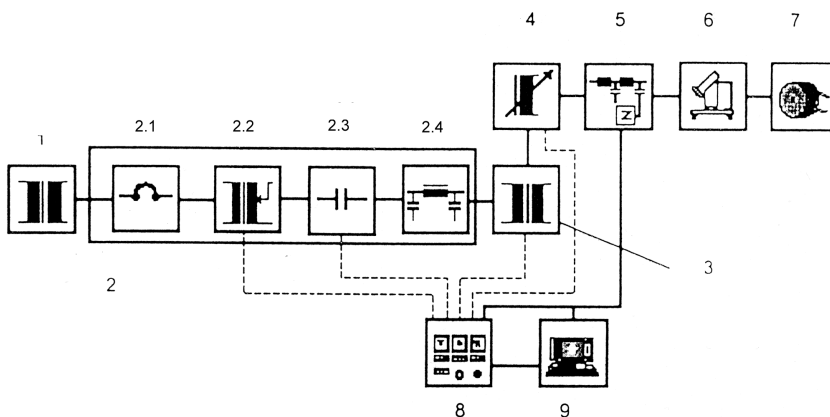


Рисунок 6 – Схема измерения амплитуды частичных разрядов и обнаружения места пробоя с использованием резонанса напряжений

В состав предложенной системы последовательного резонанса с оборудованием для измерения величины амплитуды частичных разрядов и локализации мест повреждений входят:

1. разделительный трансформатор с двойным экраном;
2. силовой электрический шкаф, включающий в себя:
 - 2.1. главный силовой автоматический выключатель;
 - 2.2. регулятор напряжения;
 - 2.3. высоковольтный двухпозиционный контактор;
 - 2.4. низковольтный сетевой фильтр;
3. возбуждающий трансформатор;
4. высоковольтный реактор;
5. высоковольтный фильтр;
6. масляные кабельные вводы или вводы с деионизированной водой;
7. силовой кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена (объект испытания);
8. микропроцессорный блок управления;
9. цифровой детектор частичных разрядов.

1. Разделительный трансформатор с двойным экраном

Предназначен для обеспечения двух функций: гальванической развязки испытательной системы от системы заземления цеха и ослабления высокочастотных шумов которые могут появляться в системе питания. Это позволяет достигать максимально возможной чувствительности при измерении частичных разрядов. Первичная и вторичная обмотки экранированы с подсоединением через проходные изоляторы с контуром заземления системы.

Катушки намотаны проводом с усиленной изоляцией для защиты от бросков напряжения и переходных процессов. Катушки и сердечник размещаются в стальной, заземленной камере, заполненной изоляционным маслом. Коэффициент трансформации равен 1.

2. Силовой электрический шкаф, конструктивно выполненный в виде стойки, защищенной от электромагнитных полей и включающий:

2.1. главный силовой автоматический выключатель подает питание к системе и обеспечивает защиту, как системы электропитания, так и испытательный комплекс при авариях;

2.2. регулятор напряжения используется для регулирования напряжения на входе возбуждающего трансформатора и соответственно выходного напряжения всей системы. Имеет электропривод и управляется с панели управления. В качестве регулятора напряжения рекомендуется использовать регулируемый трансформатор Пашеля, у которого разрешение регулирования меньше 1 %;

2.3. высоковольтный двухпозиционный контактор обеспечивает соединение выхода регулятора напряжения с испытательной системой. Включается только тогда, когда все внешние блокировки системы замкнуты и регулятор напряжения находится в нулевом положении. Контактор может быть разомкнут либо вручную посредством кнопок на пульте, либо по сигналу схемы дугового разряда;

2.4. низковольтный фильтр предназначен для ослабления помех в диапазоне измерения частичных разрядов. Диапазон рабочей частоты 50-60 Гц. Ослабление более чем 40 дБ в диапазоне 30 кГц – 1 МГц.

3. Возбуждающий трансформатор. Включается между силовой сетью и реактором.

Предназначен для повышения питающего напряжения и обеспечения активной мощности, требуемой системе, гальванической развязки и электростатического экранирования высоковольтной измерительной схемы от питания. На выходе возбуждающего трансформатора включен разрядник для защиты от перенапряжений. Конструктивно размещен в корпусе реактора.

4. Высоковольтный реактор

Это ключевой компонент резонансной испытательной системы. Расположен в стальной заземленной камере, заполненной изоляционным маслом, и снабженной выходным проходным изолятором. По этой причине реактор называется камерным. На обоих плечах сердечника выполнены воздушные зазоры. Имеется механизм подъема и опускания сердечника. При этом изменяется величина воздушного зазора сердечника, а в результате и индуктивность реактора. Две высоковольтные катушки, соединенные параллельно перекры-

вают зазор, даже в полностью открытом положении, что предотвращает отклонение силовых магнитных линий.

5. Высоковольтный фильтр и делитель напряжения

Предназначен для системы измерения частичных разрядов. В фильтре используются высоковольтные конденсаторы и катушки индуктивности. Фильтр представляет собой многоступенчатую конструкцию. Выходная ступень также функционирует как делитель напряжения и силовой разделительный фильтр. В этой ступени установлен четырехполюсник для обеспечения сигналов киловольтметра, детектора дугового разряда, фазовых синхронизатора и детектора ЧР, что обеспечивает ослабление помех более 40 дБ в диапазоне частот 15-500 кГц.

Выводы. Разработанные на основе предложенных схем установки позволяют осуществить испытания новейших образцов разработанных отечественных кабелей в соответствии с международными требованиями при экономически приемлемых показателях.

Список литературы: 1. Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Золотарев В.В. Отечественные разработки кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжений // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 20. – 2007. – С. 87

Поступила в редколлегию 21.05.2008

УДК 621.316.9

С.В.КИПРИЧ; А.А.ПЕТКОВ, канд. техн. наук;

Д.Г.КОЛИУШКО, канд. техн. наук; НТУ «ХПИ»;

В.М. КУПРИЕНКО, канд. техн. наук; Научно-исследовательский центр
26 ЦНИИ МО РФ

МЕТОДИКА АНАЛИЗА МОЛНИЕЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ СЛОЖНОМ РЕЛЬЕФЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ

У роботі запропонована методика розрахунку блискавководів, зони захисту яких утворюють складну поверхню. Показана ефективність розробленої методики на прикладі зони захисту подвійного стрижневого блискавководу.

In work the design procedure of lightning-rods which zones of protection form a difficult surface is offered. Efficiency of the developed method on an example of a protection zone of the double lightning-rods is shown.

Постановка проблемы. Среди проблем жизнеобеспечения различных технических объектов, зданий и сооружений одной из самых важных и актуальных сегодня является обеспечение молниезащищенности. Это объясняется рядом причин, основными из которых являются:

- 1 необходимость обеспечения безопасности обслуживающего персонала;
- 2 наличие на объектах значительного количества дорогостоящей микропроцессорной техники, которая может выйти из строя от удара молнии, что, в свою очередь, может привести к крупному материальному ущербу из-за нарушения сложного технологического процесса, простоя оборудования и т. п.

Решение задачи защиты от прямого поражения молнией требует постоянного совершенствования методов проектирования молниеотводов, в том числе и методик их расчета.

Анализ публикаций. Зоны защиты молниеотводов, обеспечивающих защиту зданий и сооружений от прямого поражения молнией, определяются согласно действующих нормативных документов [1, 2] по методикам, в основу которых положен графический способ. Однако при большом количестве и различном сочетании молниеотводов, защищающих объект, в соответствии с требованиями приведенных выше нормативных документов, возникают следующие проблемы при анализе молниезащищенности:

- отсутствуют методики построения некоторых сочетаний молниеотводов;
- сложность геометрических построений общей зоны защиты и большая вероятность возникновения ошибок, обусловленных человеческим фактором;
- отсутствует возможность визуального представления результатов анализа молниезащищенности объектов в трехмерном виде.

Некоторые недостатки можно устранить с помощью применения вычислительной техники: ускорить и упростить процесс расчета молниезащищенности объектов, снизить количество ошибок, а также получить наглядные результаты в двухмерном и трехмерном виде. Однако существующие в нормативных документах методики ориентированы на графические построения, что затрудняет непосредственное использование ЭВМ. Для алгоритмизации расчетов необходимо разработать математическое описание зон защиты, например, как изложено в публикациях [3, 4], в которых приведены аналитические соотношения для расчета зон защиты стержневого и тросового молниеотводов. Однако, чем сложнее тип молниеотвода (двойной или многократный стержневой, двойной тросовый и т. д.), тем сложнее рельеф поверхности, а, следовательно, и аналитические выражения для расчета его зоны защиты. Поэтому, принимая во внимание уже имеющийся опыт [3, 4], целесообразным является разработка более простого способа построения зон

защиты для молниеотводов, перечисленных выше, и определения защищенности объектов.

Учитывая, что любой объект может быть представлен набором объектов-стержней [3], с практической точки зрения задача расчета молниезащищенности объекта-стержня с заданными координатами (X_T , Y_T) и высотой Z_T может иметь два варианта решения:

- 1 путем сравнения заданной координаты объекта Y_T и координаты y границы зоны защиты на заданной высоте анализа (Z_T);
- 2 путем определения высоты зоны защиты в точке с координатами (X_T , Y_T) и сравнения ее с заданной высотой объекта Z_T .

Целью настоящей работы является разработка методики анализа молниезащищенности объектов при сложном рельефе поверхности зоны защиты.

Материалы и результаты исследований. Анализ общих видов зон защиты молниеотводов различных типов, приведенных в нормативных документах [1, 2], показывает, что все поверхности зон защиты могут быть образованы путем перемещения параллельно плоскости XOY в положительном направлении оси OZ одной или нескольких замкнутых линий, состоящих из отрезков прямой линии и/или дуг окружности. Причем при перемещении каждому значению высоты анализа соответствуют свои значения координат концевых точек фигур, составляющих замкнутую линию, и радиуса дуг окружности, например для двойного стержневого молниеотвода (см. рис. 1).

Соотношения для определения величин h_0 и R_0 двойного стержневого молниеотвода в зависимости от его высоты и надежности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Надежность защиты, Pз	Высота молниеотвода h, м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса на уровне грунта R_0 , м	
0,9	от 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$	[2]
	от 100 до 150	$0,85h$	$[1,2 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$	
0,95	от 0 до 150	$0,92h$	$1,5h$	[1]
0,99	от 0 до 30	$0,8h$	$0,8h$	[2]
	от 30 до 100	$0,8h$	$[0,8 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$	
	от 100 до 150	$[0,8 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$	$0,7h$	
0,995	от 0 до 150	$0,85h$	$(1,1 - 0,002h)h$	[1]
0,999	от 0 до 30	$0,7h$	$0,6h$	[2]
	от 30 до 100	$[0,7 - 7,14 \cdot 10^{-4}(h - 30)]h$	$[0,6 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$	
	от 100 до 150	$[0,65 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$	$[0,5 - 2 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$	

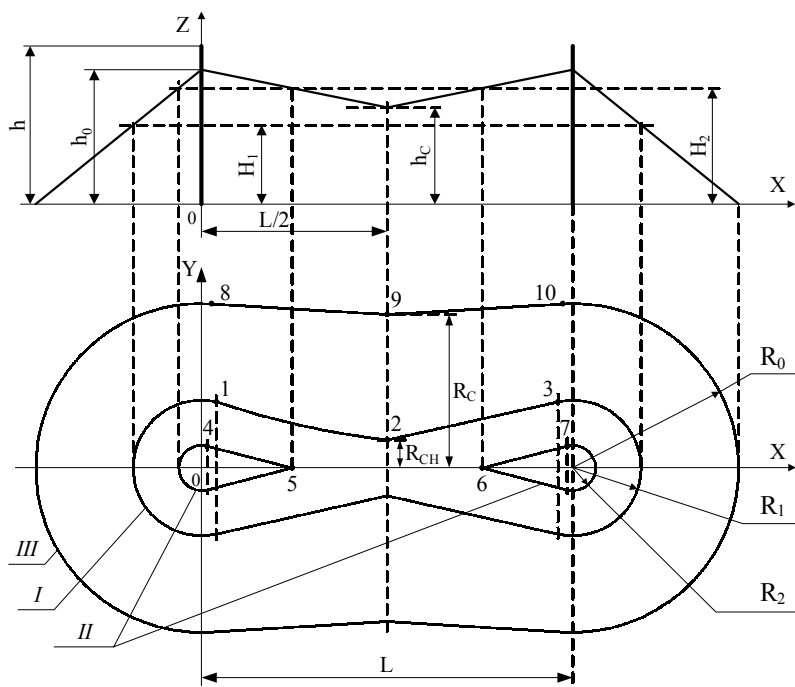


Рисунок 1 – Зона защиты двойного стержневого молниеотвода и ее границы на трех характерных уровнях анализа (H_1 , H_2 и на уровне грунта) для случая при $2h < L \leq 4h$ для надежности защиты 0,995:

h – высота молниеотвода; L – расстояние между стержнями молниеотвода; h_0 – максимальная высота зоны защиты; R_0 – радиус конуса на уровне грунта; R_C – полуширина внутренней области на уровне грунта (зависит от надежности защиты, высоты молниеотвода и расстояния между его стержнями); R_1 и R_2 – радиусы конуса на высотах анализа H_1 и H_2 соответственно; R_{CH} , h_C – параметры зоны защиты молниеотвода, зависящие от надежности защиты, высоты молниеотвода, расстояния между его стержнями и высоты анализа; I , II и III – границы зоны защиты на высотах анализа H_1 , H_2 и на уровне грунта соответственно; 1 – 10 – концевые точки фигур при различных уровнях анализа

При заданном типе молниеотвода значение координат концевых точек определяется как высотой анализа HA , так и местом расположения фигуры относительно оси OX , принятой за горизонтальную ось (в нижней при $Y < 0$ или верхней при $Y > 0$ полуплоскости плоскости XOY), а радиус дуги окружности только высотой анализа.

Рассмотрим часть фигуры, составляющей границу зоны защиты, расположенную в верхней полуплоскости.

Пусть на высоте анализа $HA = Z$ граница зоны защиты молниеотвода

при изменении координаты x от X_1 до X_2 имеет в сечении параллельном плоскости XOY вид отрезка прямой линии (см. рис. 2, а). Пусть также часть плоскости, лежащая между осью OX и отрезком прямой принадлежит зоне защиты, а другая часть, лежащая над отрезком прямой, находится вне зоны защиты. Отрезок имеет следующие координаты концов 1(X_1 ; Y_1 ; Z) и 2(X_2 ; Y_2 ; Z). Причем координаты X_1 , Y_1 и X_2 , Y_2 определяются высотой Z .

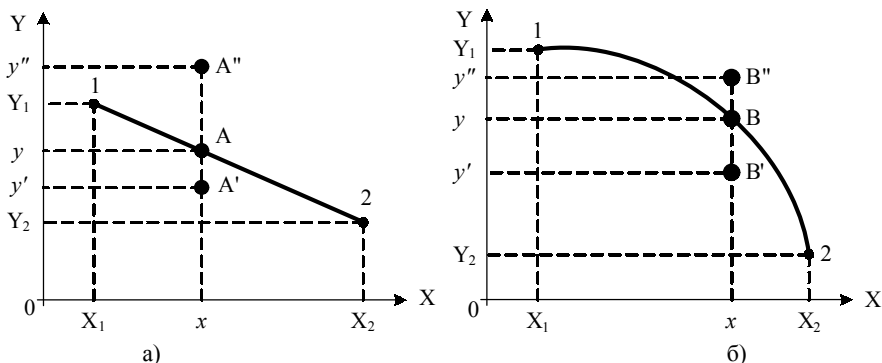


Рисунок 2 – Нахождение координат точки, лежащей на границе зоны защиты

Рассмотрим точки A , A' и A'' , лежащие на одной прямой, параллельной оси OY , и в той же плоскости, что и отрезок (1, 2), причем точка $A(x; y; Z)$ лежит на границе зоны защиты. Тогда, задаваясь координатой $x \in (X_1, X_2)$, можем определить координату y границы зоны защиты по формуле (1), вытекающей из геометрических построений, показанных на рис. 2а:

$$y = Y_1 + (x - X_1) \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}. \quad (1)$$

Аналогично для варианта, когда фигура, составляющая границу зоны защиты, имеет вид дуги окружности, рассмотрим точки B , B' и B'' , лежащие в той же плоскости, что и дуга (1, 2) (см. рис. 2, б). И для заданной координаты x точки $B(x; y; Z)$, лежащей на границе зоны защиты, можно найти координату y по формуле:

$$y = Y_0 + \sqrt{R_H^2 - (x - X_0)^2}, \quad (2)$$

где X_0 , Y_0 – координаты центра дуги окружности;

R_H – радиус дуги окружности на уровне анализа HA , определяется по формуле:

$$R_H = \frac{R_0}{h_0} (h_0 - HA). \quad (3)$$

Очевидно, что для точек A' и B' (см. рис. 2), лежащих внутри зоны защиты $y' < y$, а для точек A'' и B'' , лежащих вне зоны защиты $y'' > y$.

При расположении фигуры, составляющей границу зоны защиты в нижней полуплоскости, соотношения, аналогичные (1) и (2) имеют вид:

$$y = - \left[Y_1 + (x - X_1) \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \right]; \quad (4)$$

$$y = Y_0 - \sqrt{R_H^2 - (x - X_0)^2}. \quad (5)$$

Предположим, что зона защиты расположена симметрично оси OX таким образом, что в любом ее сечении плоскостью, параллельной плоскости XOY зона защиты охватывает часть оси, например, как показано на рис. 1.

Тогда решение задачи определения защищенности точки $T(X_T, Y_T, Z_T)$ производится в следующем порядке:

- 1 для заданной надежности защиты, характеристик молниеотвода и высоты анализа $HA = Z_T$ определяются геометрические параметры зоны защиты;
- 2 определяются координаты концевых точек фигур и радиусы дуг окружностей, образующих границу зоны защиты;
- 3 ось OX разбивается на $n + 2$ интервала, границы которых соответствуют X -координатам каждой фигуры, входящей в состав границы зоны защиты: $(-\infty, X_1)$, $[X_1, X_2]$, $(X_2, X_3]$, ... $(X_{n-1}, X_n]$, (X_n, ∞) , где n – количество фигур;
- 4 определяется интервал, содержащий координату точки X_T . Если $X_T \in (-\infty, X_1)$ или $X_T \in (X_n, \infty)$, то заданная точка T находится вне зоны защиты и расчет считается оконченным;
- 5 определяется координата y границы зоны защиты в данном сечении при $x = X_T$ и сравнивается ее значение с Y_T :
 - если $Y_T > 0$ и $y \geq Y_T$ или если $Y_T < 0$ и $y \leq Y_T$, то заданная точка T лежит внутри зоны защиты, т. е. защищена;
 - если $Y_T > 0$ и $y < Y_T$ или если $Y_T < 0$ и $y > Y_T$, то заданная точка T лежит вне зоны защиты, то есть не защищена.

Предложенная методика справедлива также для определения молниезащищенности бесконечно тонкого объекта-стержня высотой Z_T . Если необходимо определить защищенность реального объекта, то его необходимо представить стержневой структурой, определяющей габариты [3] и каждый объект-стержень проверить на защищенность. Если хотя бы один из них окажется незащищенным, то объект незащищен в целом.

Определение высоты зоны защиты над точкой, расположенной в плоскости XOY , с заданными координатами $T(X_T, Y_T)$ с использованием (1) – (5) при условии, что точка принадлежит зоне защиты, построенной на уровне грунта, производится в следующем порядке:

- 1 вычисляется координата y границы зоны защиты для высоты уровня анализа HA и заданной координаты X_T ;

- 2 сравнивается полученное значение y с заданным значением Y_T :
- если $Y_T = y$, то текущее значение высоты анализа НА и есть искомая высота зоны защиты в заданной точке;
 - если $Y_T < y$ – необходимо увеличивать высоту анализа НА с шагом Δh до выполнения условия $Y_T > y$, пересчитывая на каждом шаге координату y границы зоны защиты, после чего искомое значение высоты зоны защиты (h_{33}) в точке с заданными координатами (X_T ; Y_T) определяется как:

$$h_{33} = NA_T - \Delta h, \quad (6)$$

где NA_T – значение высоты анализа при $Y_T > y$;

- если $Y_T > y$ – необходимо уменьшать высоту анализа с шагом Δh до выполнения условия $Y_T \leq y$, при этом текущее значение высоты анализа НА и есть искомое значение высоты зоны защиты в точке с заданными координатами.

Для проверки предложенной методики рассмотрим расчет зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, обладающей сложным рельефом поверхности.

Форма зоны защиты (a , следовательно, и координаты концевых точек фигур и радиусы дуг окружностей, образующих границу зоны защиты) изменятся в зависимости от надежности защиты и соотношения высоты и расстояния между стержнями молниеотвода (см. табл. 2 и табл. 3) [1, 2].

В зависимости от надежности защиты, параметров молниеотвода, соотношения значений высоты анализа НА и высоты h_C , изменяются значения координат концевых точек фигур, составляющих замкнутую линию. Выражения, определяющие их, для границы зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, расположенной в положительной полуплоскости XOY , приведены в табл. 4, а радиусы дуг окружностей определяются по (3).

$$R_{CH} = R_C \frac{h_C - NA}{h_C}, \quad (7)$$

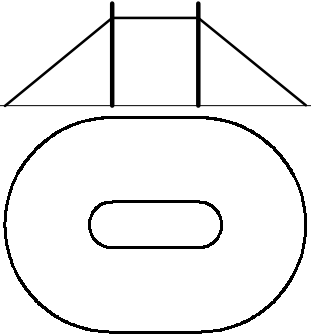
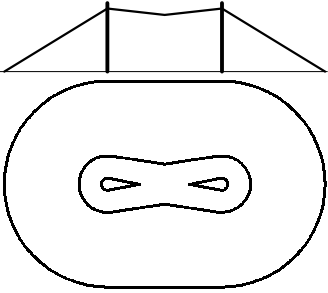
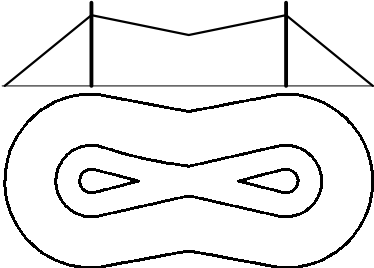
где R_C и h_C – параметры зоны защиты, определяемые по табл. 5;

$$A = \frac{R_H L \sqrt{L^2 + 4R_{CH}^2 - 4R_H^2} + 4R_H^2 R_{CH}}{L^2 + 4R_{CH}^2}; \quad (8)$$

$$B = \frac{L(h_0 - NA)}{2(h_0 - h_C)}; \quad (9)$$

$$C = \frac{R_0 \cdot L \sqrt{L^2 + 4R_C^2 - 4R_0^2} + 4R_0^2 R_C}{L^2 + 4R_C^2}. \quad (10)$$

Таблица 2

Надежность защиты, Pз	Условие	Форма зоны защиты на различных уровнях анализа	Прим.
0,9	$L \leq L_C$		[2]
0,95	$L \leq h$		[1]
0,99	$L \leq L_C$		[2]
0,995	$L \leq h$		[1]
0,999	$L \leq L_C$		[2]
0,9	$L_C < L \leq L_{max}$		[2]
0,95	$h < L \leq 6h$		[1]
0,99	$L_C < L \leq L_{max}$		[2]
0,995	$h < L \leq 2h$		[1]
0,999	$L_C < L \leq L_{max}$		[2]
0,995	$2h < L \leq 4h$		[1]

Примечание: L_C и L_{max} – предельные расстояния двойного стержневого молниеотвода [2], вычисляются по эмпирическим формулам табл. 3.

Соотношения, приведенные в табл. 4, 5 и (7) – (10), для определения координат конечных точек фигур, образующих границу зоны защиты двойного стержневого молниеотвода справедливы для случаев:

- при $L \leq 4h$ для надежности защиты 0,995 [1];
- при $L \leq 6h$ для надежности защиты 0,95 [1];
- при $L \leq L_{max}$ для надежностей защиты 0,9, 0,99 и 0,999 [2].

Таблица 3

Надежность защиты P_3	Высота молниеотвода h , м	L_C , м	L_{max} , м
0,9	от 0 до 30	2,5h	5,75h
	от 30 до 100	2,5h	$[5,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	от 100 до 150	2,5h	5,5h
0,99	от 0 до 30	2,25h	4,75h
	от 30 до 100	$[2,25 - 0,0107(h - 30)]h$	$[4,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	от 100 до 150	1,5h	4,5h
0,999	от 0 до 30	2,25h	4,25h
	от 30 до 100	$[2,25 - 0,0107(h - 30)]h$	$[4,25 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	от 100 до 150	1,5h	4,0h

Таблица 4

№ точки	Координата X	Координата Y
1	$\sqrt{R_H^2 - A^2}$	A
2	L/2	R_{CH}
3	$L - \sqrt{R_H^2 - A^2}$	A
4	$\frac{R_H^2}{B}$	$\sqrt{B^2 - R_H^2} \cdot \left(\frac{R_H}{B}\right)$
5	B	0
6	L - B	0
7	$L - \frac{R_H^2}{B}$	$\sqrt{B^2 - R_H^2} \cdot \left(\frac{R_H}{B}\right)$
8	$\sqrt{R_0^2 - C^2}$	C
9	L/2	R_C
10	$L - \sqrt{R_0^2 - C^2}$	C

Примечание: Номера точек соответствуют обозначению на рис. 1.

Таблица 5

Надежность защиты, Pз	Условие	h_c	R_c
0,9	$L \leq L_c$	h_0	R_0
0,9	$L_c < L \leq L_{\max}$	$\frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_c} h_0$	R_0
0,95	$L \leq h$	h_0	R_0
0,95	$h < L \leq 6h$	$h_0 - 0,14 (L - h)$	R_0
0,99	$L \leq L_c$	h_0	R_0
0,99	$L_c < L \leq L_{\max}$	$\frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_c} h_0$	R_0
0,995	$L \leq h$	h_0	R_0
0,995	$h < L \leq 2h$	$h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$	R_0
0,995	$2h < L \leq 4h$	$h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$	$R_0 \left[1 - \frac{0,2(L - 2h)}{h} \right]$
0,999	$L \leq L_c$	h_0	R_0
0,999	$L_c < L \leq L_{\max}$	$\frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_c} h_0$	R_0

При этом в соотношениях изменяются лишь габаритные размеры (h , L , h_0 , R_0 , h_c , R_c , R_{CH} , R_H) зоны защиты.

При расстоянии между молниеотводами:

- $L > 4h$ для надежности защиты 0,995 [1];
- $L > 6h$ для надежности защиты 0,95 [1];
- $L > L_{\max}$ для надежностей защиты 0,9, 0,99 и 0,999 [2],

их следует рассматривать как одиночные молниеотводы.

Для реализации предложенной методики расчета молниезащищенности заданной точки двойным стержневым молниеотводом с известными параметрами была разработана программа в приложении Microsoft Excel с использованием Visual Basic for Applications.

Блок-схема для программы определения защищенности точки представлена на рис. 3, а интерфейс программы на рис. 4.

На рис. 4 показано рабочее окно разработанной программы для определения защищенности стержневого объекта с координатами (2; 10) и высотой 15 м двойным стержневым молниеотводом высотой 30 м с расстоянием между стержнями 70 м, при условии, что заданный молниеотвод должен обеспечить для объекта зону защиты типа А. Координаты расположения стержней молниеотвода: (0; 0) и (70; 0).

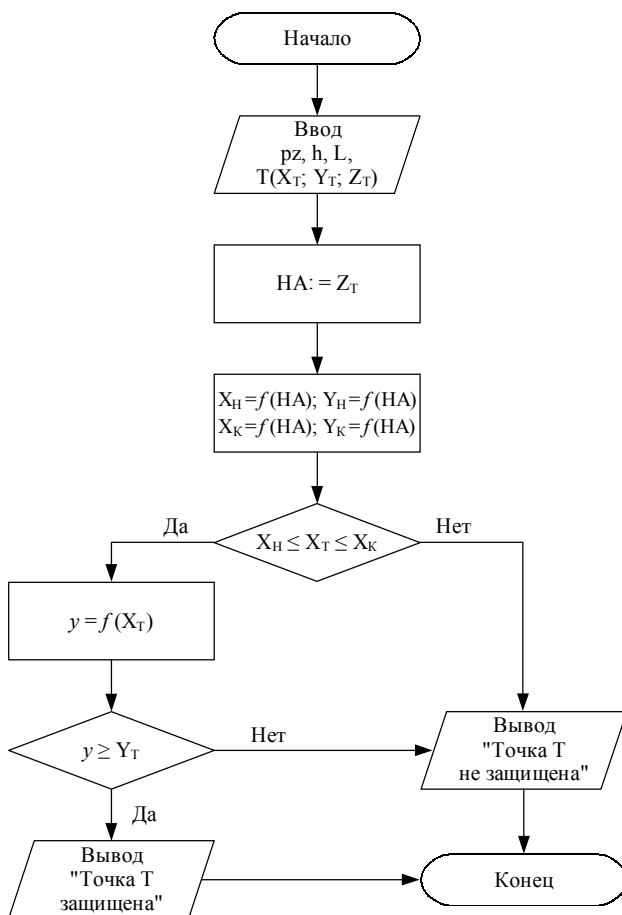


Рисунок 3 – Блок-схема для программы расчета молниезащищенности заданной точки двойным стержневым молниеотводом

В ячейках C1-C4 и C14-C16 представлены значения исходных данных, необходимые величины для расчета – в ячейках C6-C11 и C19, вывод о защищенности – в ячейке A15.

Выводы:

- 1 Предложена методика анализа молниезащищенности объектов при сложном рельефе поверхности зон защиты молниеотводов.
- 2 На примере двойного стержневого молниеотвода приведен порядок расчета защищенности объекта-стержня с заданными координатами молниеотводом произвольного типа.

- 3 Разработана методика определения высоты зоны защиты над точкой, расположенной в плоскости XOY , с заданными координатами.
- 4 Разработана программная реализация и приведен пример расчета молниезащищенности заданной точки двойным стержневым молниеотводом с известными параметрами.

	A	B	C	D
1	Надежность защиты	pz	0,995	
2	Высота молниеотвода	h	30	
3	Расстояние между стержнями молниеотвода	L	70	
4	Высота уровня анализа	HA=Z	15	
5				
6	Радиус на уровне грунта	R0	31,2	
7	Полуширина зоны на уровне грунта	RC	29,12	
8	Высота конуса (максимальная высота зоны защиты)	H0	25,5	
9	Радиус на уровне анализа	RH	12,847	
10	Ширина горизонтального сечения на уровне анализа	RCH	5,3032	
11	Высота зоны в середине пролета	hc	18,34	
12				
13				
14		X	2	
15	Точка защищена	Y	10	
16		Z	15	
17				
18				
19	Координата на границе зоны защиты	y	12,69	
20				
21		Зона I		
22	<i>Концевая точка</i>	1	2	3
23	X	2,8164	35	67,184
24	Y	12,535	5,3032	12,535
25				
26	Определение молниезащищенности			
27				

Рисунок 4 – Интерфейс программы расчета молниезащищенности заданной точки двойным стержневым молниеотводом с заданными параметрами

Список литературы: 1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений (РД 34.21.122-87). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 2. Инструкция по устройству молниезащиты

зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 57 с. 3. *Петков А.А., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М.* Выбор оптимальных параметров одиночного стержневого молниеотвода // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 35. – С. 64-71. 4. *Кирпич С.В., Петков А.А., Колиушко Д.Г.* Выбор оптимальных параметров одиночного тросового молниеотвода // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 49. – С. 36-45.

Поступила в редколлегию 19.03.2008.

УДК 621.31.048.015

В.В.КНЯЗЕВ, канд.техн.наук; ***В.И.КРАВЧЕНКО***, докт.техн.наук;
И.П.ЛЕСНОЙ, ***П.Н.МЕЛЬНИКОВ***; ***С.В.ПЕСТРЕЦОВ***, студент;
А.Ю.ЧЕРНУХИН, студент; НТУ «ХПИ»

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНЫХ МОЛНИЕПРИЕМНИКОВ И РАССЕИВАТЕЛЕЙ

Розглянуто результати дослідження базових параметрів активних приймачів блискавки та розсіювачів заряду. Дослідження активних приймачів здійснено відповідно до методики, що міститься у стандарті Франції NF C 17-102. Розсіювачі заряду досліджено за параметрами току корони. Наведено результати стосовно дев'яти зразків різних виробників. Запропоновано підхід до оцінки якості досліджуваних зразків.

Results of a study on basic parameters of lightning active receivers and charge scatters are considered. The study of the active receivers has been performed according to French standard NF C 17-102. The charge scatters have been investigated in terms of parameters of corona current. Results for nine samples of different producers are presented. An approach to the estimation of the quality of studied samples is proposed.

Основой систем молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии являются металлические конструкции в виде стержневых, тросовых и сеточных молниеприемников. Требования к устройству таких систем в Украине до сегодняшнего дня регламентируются РД 34.21.122-87 [1]. Этот документ явно устарел, поскольку не отражает новых знаний, содержащихся в соответствующих стандартах Международной электротехнической комиссии (МЭК), например, [2-5], гармонизированных во всех промышленно развитых государствах. В РД 34.21.122-87 [1] вопросы молниезащиты рассматриваются главным образом с точки зрения предотвращения возгорания объектов и поражения людей в результате удара молнии. В упомянутых стандартах МЭК освещаются все аспекты риска, включая повреждение электронного и

электрического оборудования. Отметим, что стандарты [3-5] включены в план Национальной стандартизации Украины на 2008 год.

В отличие от упомянутых выше систем, которые условно можно назвать «пассивными», в мире предпринимаются настойчивые попытки создания «активных» устройств, обеспечивающих существенное увеличение размеров зоны защиты, по сравнению с зоной защиты классического молниеприемника Франклина (далее для идентификации будем называть его «пассивный штыревой молниеприемник» (ПШМ)). К числу таких устройств относятся, так называемые «Early streamer emission air terminals» (ESE), которые обеспечивают более быстрое по сравнению с ПШМ создание встречного стримера, способствующего перехвату молнии. Декларируемый радиус защиты ESE молниеприемников прямо пропорционален времени опережения, и определяется по следующей формуле [6]:

$$R = \sqrt{h(2D - h) + \Delta L(2D + \Delta L)},$$

где R – радиус зоны защиты, м;

$h > 5$ – м высота молниеприемника;

D – расстояние поражения (20, 45, 60 м);

$\Delta L = V \cdot \Delta T$;

ΔT – время опережения, мкс; $V = 1$ м/мкс.

Методика определения времени опережения регламентируется стандартом Франции NF C 17-102: 1995 [6]. Поскольку этот стандарт не является легко доступным для читателей, а суть методики принципиально важна для понимания обсуждаемой темы, с ней можно ознакомиться в работе [7]. Далее, для удобства читателя, приведем лишь основные моменты этой методики.

ПШМ и ESE молниеприемник испытываются один за другим в одинаковых электрических и геометрических условиях, реализуемых в лаборатории, которые моделируют природные условия инициирования восходящего лидера (положительный восходящий лидер). Естественное электрическое поле создаваемое грозовой тучей, существующее перед ударом молнии, влияет на условия формирования короны и существующих пространственных зарядов. Поэтому, в лабораторных условиях естественное поле должно быть смоделировано: его значения выбираются в диапазоне от 10 кВ/м до 25 кВ/м.

Моделирование природного явления наиболее близко к действительности, если форма импульсной волны имеет время нарастания в пределах от 100 мкс до 1000 мкс. Скорость нарастания волны должна быть между $2 \cdot 10^8$ и $2 \cdot 10^9$ В·с/м. Для создания постоянного и импульсного электрических полей используется плоский конденсатор в виде двух металлических пластин, расстояние между которыми H , должно быть более 2 м. На заземленной пластине размещается испытываемый образец молниеприемника. Расстояние (d)

от конца молниеприемника до верхней потенциальной пластины должно быть более 1 м. Значение отношения d/H должно находиться в диапазоне от 0,25 до 0,5. Размеры пластин должны быть не менее значения H . Сравнимые молниеприемники должны устанавливаться в межэлектродном промежутке идентично.

При проведении испытаний регистрируется время пробоя воздушного промежутка, которое отсчитывается от момента начала нарастания импульсного электрического поля. Для каждого образца производится одинаковое число разрядов (от 50 до 100). Критерием оценки эффективности ESE молниеприемника является среднее значение ΔT , отнесенное к базовой форме импульсного поля, представленной в стандарте в виде графика, достигающей максимального значения при 650 мкс.

Схема испытательного комплекса НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», на котором были проведены исследования, приведена на рис. 1. а его фотография в момент пробоя воздушного промежутка на рис. 2. Технические параметры комплекса полностью соответствует требованиям стандарта [6].

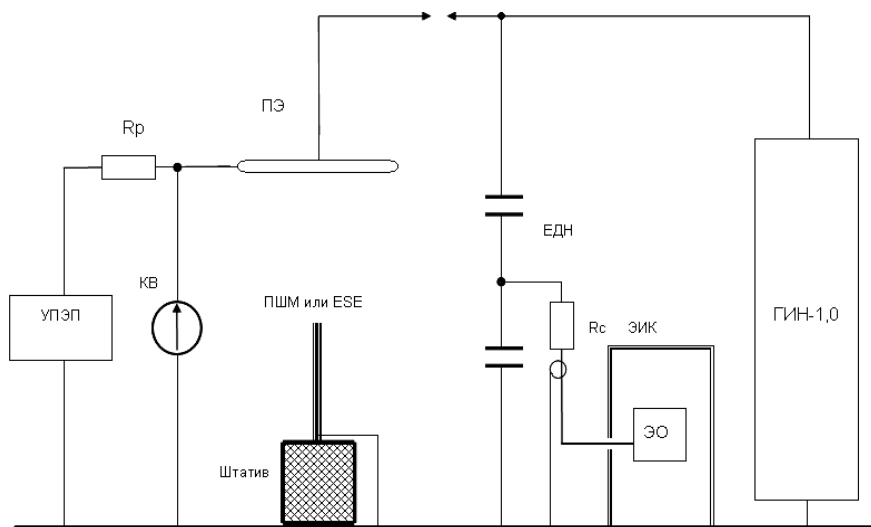


Рисунок 1 – Схема испытательного комплекса для измерения времени опережения:

УПЭП – установка постоянного электрического поля; КВ – киловольтметр; ГИН-1,0 – генератор импульсов напряжения до 1 МВ; ПЭ – полеобразующий электрод; ИЭК – измерительная экранированная кабина; ПШМ – пассивный штыревой молниеприемник; ESE – испытываемый образец ESE; ЕДН – емкостной делитель напряжения с коэффициентом деления 43000; ЭО – запоминающий цифровой осциллограф типа ТЕКТРОНИХ TDS 2024; F – отсекающий коммутатор; Rp – разделительный резистор; Rc – согласующий резистор

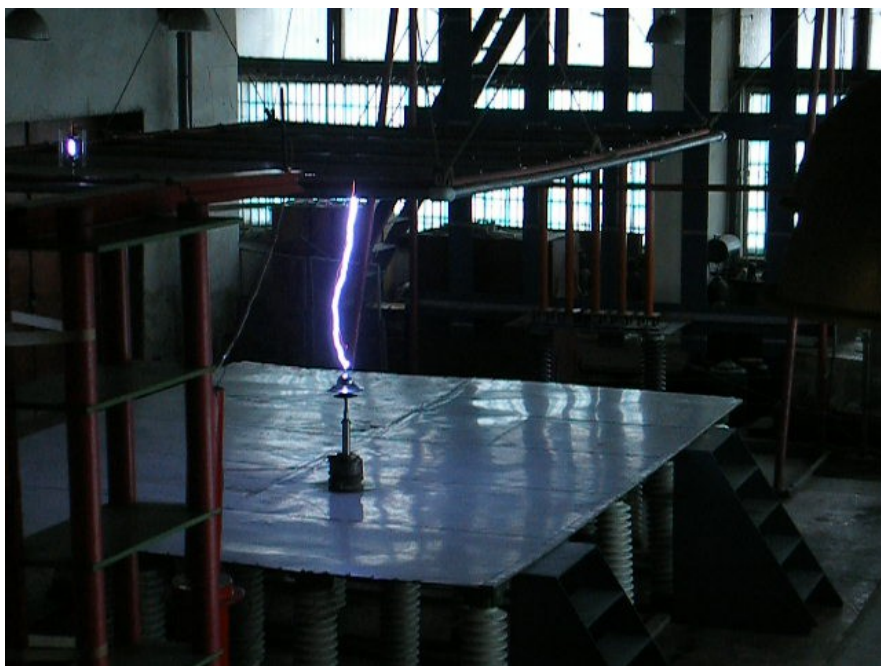


Рисунок 2 – Фотография испытательного комплекса
(пробой воздушного промежутка)

Испытательный комплекс включает в себя следующие основные части:

- генератор импульсов высокого напряжения типа ГИН-1,0 в режиме генерирования коммутационной волны;
- установка постоянного электрического поля (УПЭП), напряжение на потенциальном электроде до 100 кВ;
- схема измерения испытательных импульсов напряжения - полных и срезанных;
- металлические пластины (размер верхней 4 x 4 м, расстояние между пластинами может варьироваться от 2 м до 4 м);
- пассивный штыревой молниеприемник (диаметр 20 мм), выполненный из алюминиевого сплава Д16.

Установка позволяет сформировать импульс напряжения до 1 МВ с вариацией временных параметров (время достижения максимума, длительность полуспада) в широком интервале значений. Последние испытания молниеприемников (февраль 2008) проведены при значении времени достижения максимума 436 мкс (см. рис. 3). Осциллограммы срезанного напряжения (при пробое воздушного промежутка) имеют вид, как показано на рис. 4. Для каждого образца исследуемого молниепри-

емника регистрировалось не менее 50 таких осциллограмм. Значения времени среза импульса фиксируются, потом по ним находится среднее арифметическое (T). Аналогично определяется среднее значение времени среза для ПШМ. Эти значения переносятся на базовую кривую [6], и с ее помощью определяется ΔT . Естественно, если форма испытательного импульса совпадает с формой базовой кривой, то разница между полученными значениями T сразу дает искомое ΔT .

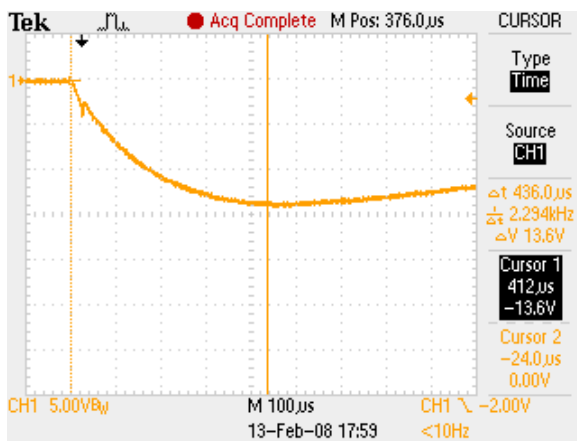


Рисунок 3 – Форма испытательного импульса (время достижения максимума 436 мкс)

На исследования были представлены:

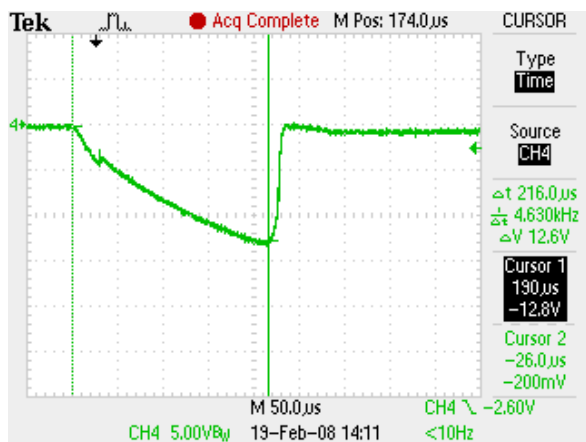
- пять типов молниеприемников;
- образцовый ПШМ – штырь диаметром 20 мм и длиной 1 м, сплав Д16;
- четыре типа рассеивателей.

Каждый из испытываемых образцов устанавливался так, что его вершина находилась на высоте 0,8 м над землей, а высота подвеса ПЭ составляла 2,0 м.

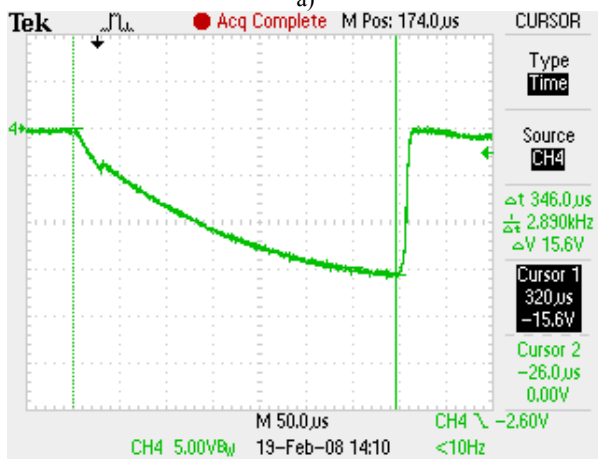
Среди испытываемых образцов представлены так называемые «рассеиватели», которые по утверждению разработчиков, обеспечивают создание зоны коронного разряда, препятствующей прорастанию встречного лидера, и тем самым как бы «отталкивая» молнию от места установки рассеивателя. Для количественного сравнения свойств рассеивателей в Миссисипском государственном университете (США) предложена методика, основанная на измерении тока короны. Эта методика реализована в НИПКИ «Молния», в соответствии со схемой, представленной на рис. 5.

Со всеми упомянутыми выше образцами проведены исследования по обеим методикам. Это позволило выявить ряд новых особенностей в исследуемых процессах. В таблице представлены результаты определения значе-

ний ΔT для ряда новых молниеприемников и рассеивателей в сравнении с уже имеющимися на рынке.



а)



б)

Рисунок 4 – Примеры срезанного напряжения, определяющего время пробоя воздушного промежутка (а) 216 мкс; б) 346 мкс)

Анализ представленных в таблице результатов показывает, что новый молниеприемник, обозначенный New-3, обеспечивает время опережения 32 мкс, несколько превосходя ESE-40, и несколько уступая LPA 2005A. Следуя указаниям стандарта [6], согласно приведенной выше формуле, можно утверждать, что при высоте установки $h = 6$ м, молниеприемник ESE-40 теоретически обеспечивает радиус зоны защиты класса I ($D = 20$ м) не менее 20 м,

что значительно превышает размеры зоны А защиты ПШМ, установленного на такой же высоте (радиус не более 6 м). Конечно, полученные цифры весьма заманчивы.

Кроме того, представленные в таблице результаты, показывают, что у рассеивателя типа TS-4 момент пробоя запаздывает по отношению к ПШМ на 90 мкс. Фактически, это означает повышение пробивного напряжения воздушного промежутка. В тоже время, TS-1 и TS-5 такими свойствами не обладают, напротив, ведут себя как активные молниеприемники. Анализ параметров токов импульсной короны, в зависимости от напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке, высоты подвеса ПЭ и ряда других факторов будет представлен в следующей статье.

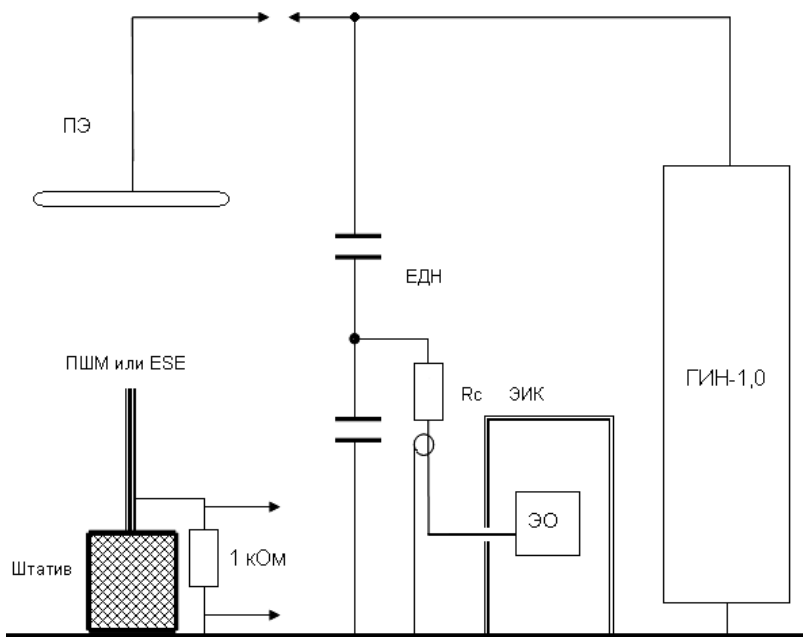


Рисунок 5 – Схема испытательного комплекса для измерения тока короны
 ГИН-1,0 – генератор импульсов напряжения до 1 МВ; ПЭ – полеобразующий электрод; ИЭК – измерительная экранированная кабина; ПШМ – пассивный штыревой молниеприемник; ESE – испытываемый образец рассеивателя; ЕДН – емкостной делитель напряжения с коэффициентом деления 43000; ЭО – запоминающий цифровой осциллограф типа ТЕКТРОНИХ TDS 2024; Rс – согласующий резистор

Для интерпретации свойств молниеприемников в работе [7] предложено результаты исследований представлять в виде гистограмм вероятности на-

хождения времени пробоя в заданных временных интервалах. Такая гистограмма позволяет визуализировать качество конкретного молниеприемника. Для примера, такая гистограмма представлена на рис. 6.

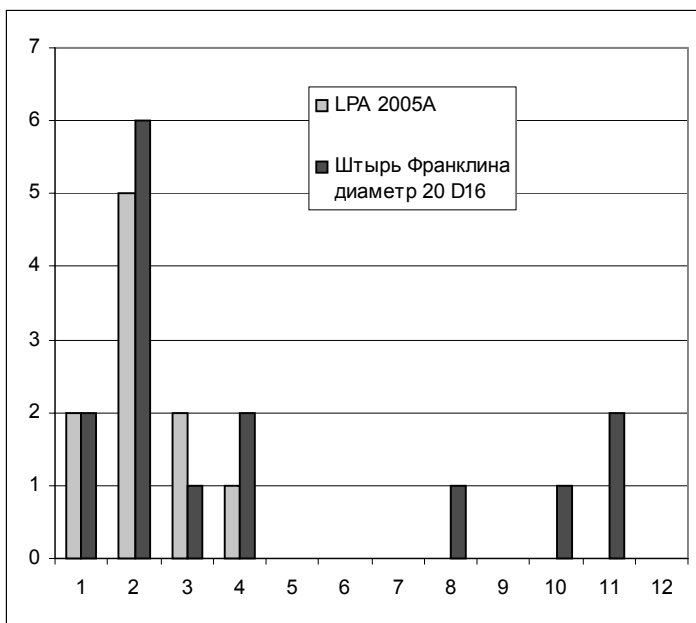


Рисунок 6 – Гистограмма вероятности нахождения времени пробоя в заданном временном интервале (по оси ординат – вероятность в процентах)

Признание полученных результатов, в качестве таковых, на основании которых можно проектировать систему молниезащиты в Украине на сегодняшний день неправомерно. Причина заключается в отсутствии нормативного документа, аналогичного стандарту Франции [6]. Прямая гармонизация этого стандарта в Украине возможна, однако, на этом пути есть принципиальные трудности. Эти трудности состоят в том, что физические принципы и численные значения величин, положенные в основу стандарта Франции, вызывают критику со стороны значительной части ученых, работающих в области высоких напряжений. Объем этой критики настолько велик, а возражения настолько убедительны, что международное научное сообщество приняло решение не принимать доклады об ESE молниеприемниках на научных конференции, например на ICLP (International Conference on Lightning Protection). Попытки сторонников Французского стандарта придать ему статус международного под эгидой МЭК, также не увенчались успехом. В качестве примеров последних публикаций с критикой можно указать работы [8,9].

Основные возражения, которые отмечают противники стандарта, следующие:

- Нет научного обоснования экстраполяции результатов лабораторных испытаний на реальные условия.
- Скорость восходящего лидера по мере удлинения канала увеличивается от 0,12 до 0,65 м/мкс, но не достигает значения 1 м/мкс.
- Нет аргументов в пользу выбранного значения стандартной длительности фронта импульса 650 мкс.
- Начальные коронные процессы практически не влияют на значение разрядного напряжения в длинных воздушных промежутках.
- Нет научно организованных натуральных испытаний, подтверждающих правоту сторонников ESE.

Подробную информацию о механизмах пробоя длинных воздушных промежутков и всех базовых значениях параметров можно найти в уже ставших классическими трудах Ю.П.Райзера и Э.М.Базеляна [10, 11].

Кроме того, есть еще один аспект, который проявился при обработке результатов испытаний, проведенных в нашем институте [7]. Речь идет о сравнительных гистограммах распределения времени пробоя ESE и ПШМ. Пример гистограммы для ESE типа LPA 2005A, имеющего параметры лучшие из всех исследованных образцов, представлен на рисунке 6. Напомним, что для этого молниеприемника установлено (см. таблицу) среднее время пробоя 213 мкс, а время опережения 39 мкс. Анализ гистограммы показывает, что в диапазон 205-220 мкс попадает 14 % всех разрядов в ПШМ и 20 % ударов в LPA 2005A. Таким образом, в этом наиболее важном с точки зрения обеспечения защиты объекта диапазоне параметры упомянутых выше образцов практически одинаковые.

Образец	Среднее время пробоя, мкс	Время опережения ΔT , мкс
ESE-40	225	30
New 1	235	15
New 2	238	8
New 3	222	32
LPA 2005A	213	39
ПШМ	247	0
IPG	271	- 32
New TS-4	305	- 90
New TS-1	235	15
New TS-5	228	23

Выводы

Из всего сказанного выше вытекают следующие выводы:

- 1 Экспериментальные исследования в лабораторных условиях (при

длинах промежутка до 10 м) подтверждают, что существуют конструкции ESE молниеприемников, которые обеспечивают более быстрое время пробоя воздушного промежутка, то есть фактически, уменьшают пробивную прочность это промежутка.

2. Необходимо создать такой образец ESE, который будет иметь гистограмму, сдвинутую влево (в сторону меньших времен) настолько, что ни один разряд в ПШМ не будет попадать в диапазон этой гистограммы.
3. Необходимо провести натурные испытания с образцами, удовлетворяющими п.2, для определения реальных размеров зоны защиты.
4. Разработать теорию этого процесса, позволяющую определять размеры зоны защиты на основании результатов исследований в лабораторных условиях.

Только после этого, можно создать стандарт, на основании которого проводить государственную сертификацию молниеприемников.

Авторы данной статьи выражают благодарность всем сотрудникам Научно-исследовательского отдела № 2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», принимавшим участие в поведении исследований. Особо отмечаем вклад Лантушко Б.Н., Немченко Ю.С. и Сомхиева С.Б.

Список литературы: 1. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 2. IEC 61024-1-2:1998. Protection of structures against lightning – Part 1-2: General principles – Guide B – Design, installation, maintenance and inspection of lightning protection systems. 3. IEC 62305-1: 2006. Protection against Lightning – Part 1: General Principles. 4. IEC 62305-3: 2006. Protection against Lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. 5. IEC 62305-4: 2006. Protection against Lightning – Part 4: Electrical and electronic system within structures. 6. NF C 17-102: 1995. Lightning protection. Protection of structures and open areas against lightning using early streamer emission air terminals. 7. Князев В.В., Кравченко В.И. Лесной И.П. Тестирование активных молниеприемников // Сб. научных трудов НТУ «ХПИ». Тематический выпуск «Электроэнергетика и преобразовательная техника» – № 1, т.1. – 2003. – С. 80-88. 8. Marley Becerra and Vemon Cooray. "Laboratory experiments cannot be utilized to justify the action of early streamer emission terminals" Journal of Physics D: Applied Physics. v.41, 2008. 9. Корявин А.Р., Волкова О.В. К вопросу об эффективности действия активных молниеприемников // Электротехника. – №2/04 (Россия). – С. 1-6. 10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – 2-е изд. – М.: Наука, 1992. – 590 с. 11. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. – М.: «МФТИ», 1997. – 320 с.

Поступила в редколлегию 18.05.2008

В.В.КНЯЗЕВ, канд.техн.наук; **Ю.С.НЕМЧЕНКО**; **И.П.ЛЕСНОЙ**;
С.Б.СОМХИЕВ; **Т.Н.ОСТРОВЕРХ**; НТУ «ХПИ»

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОГО АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ К ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ, ВЫЗВАННЫМ МОЛНИЕЙ («КОНТАКТНЫЙ ВВОД»)

Описано конструкцію та результати атестації генератора, призначеного для випробувань бортового авіаційного обладнання на сприйнятливості до перехідних процесів, викликаних блискавкою, відповідно до вимог міжнародних стандартів. Генератор виробляє імпульси напруги форм 3, 4, 5 А по п'ятьох рівнях випробувань, ці випробування проводяться методом «контактного введення».

The construction and the results of the attestation of the generator intended for testing of the on-board aircraft equipment on susceptibility to fast transient/burst, caused lightning, according to International standards are described. The apparatus generates the test voltage pulses of the forms 3, 4, 5A on five levels, test are conducted by method «Pin Injection Test».

В настоящее время обязательным видом испытаний бортового электро-технического и электронного оборудования (БАО) летательных аппаратов являются испытания на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией. Эти процессы возникают при прямом ударе молнии в корпус летательного аппарата и последующем растекании токов молнии по различным металлическим узлам этих аппаратов, в частности, по межблочным линиям связи (МЛС).

Высокая поражающая эффективность токов растекания объясняется тем, что при этом в МЛС возникают различного вида наведенные высокие импульсные напряжения и большие токи, представляющие собой серьезную угрозу для современной слаботочной электроники БАО.

Поэтому стойкость к переходным процессам, вызванным молнией, выделена в отдельный вид испытаний, который регламентируется нормативным документом EUROCAE ED-14D/ RTCA-DO-160D «Условия окружающей среды и методики испытаний бортового оборудования», Раздел 22: «Восприимчивость к переходным процессам, наведенным молнией» (отечественный аналог этого документа КТР-ВВФ/DO-160D/ED-14D/ [1]). Этот НД с 2004 года распространяется и на все типы БОА, выпускаемые в Украине и странах СНГ.

Данный вид испытаний содержит три независимых метода испытаний:

- испытания «контактным вводом»;
- испытания «кабельной инъекцией»;
- испытания «вводом в заземление».

В данной статье мы остановимся только на методе испытаний «контактным вводом», при котором испытательный импульс заданной формы и амплитуды подается непосредственно в определенные контакты разъемов БАО, к которым подходят МЛС, подпавшие под действие токов растекания. Наведенные при этом на проводниках МЛС импульсные напряжения прикладываются обычно между каждым контактом разъема БАО и заземленным корпусом.

Ниже описаны требования к испытательным импульсам напряжения и испытательный генератор ИГЛА-КВ, который по своему назначению и своей конструкции полностью отличается от ранее применяемой у нас для испытаний на молниестойкость БАО по ОСТ 1 01160-88 установки УИМ [2, 3].

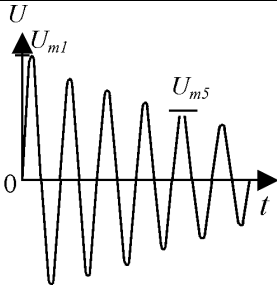
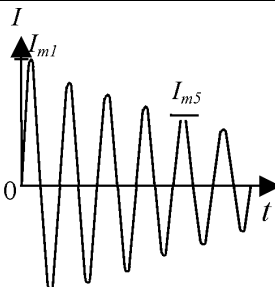
Разработанный и изготовленный в сотрудничестве Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» НТУ «ХПИ» и ООО «Терра-АВТ» генератор ИГЛА-КВ предназначен для проведения испытаний «контактным вводом» БАО в полном объеме с требованиями НД [1] импульсами напряжения форм 3, 4, 5 А обеих полярностей по пяти уровням испытаний.

Испытательные импульсы напряжений холостого хода форм «3», «4» и «5А» и соответствующих им токов короткого замыкания генератора ИГЛА-КВ приведены в табл. 1-3.

Генератор ИГЛА-КВ представляет собой высоковольтную электроразрядную установку с программируемым таймером-коммутатором, которая имеет следующие режимы генерирования испытательных импульсов:

- генерирование однократных импульсов положительной полярности;
- генерирование однократных импульсов отрицательной полярности;
- генерирование периодических импульсов положительной полярности с регулируемым количеством импульсов: от 1 до 10 (с интервалом 1) и от 10 до 100 (с интервалом 10);
- генерирование периодических импульсов отрицательной полярности с регулируемым количеством импульсов: от 1 до 10 (с интервалом 1) и от 10 до 100 (с интервалом 10);
- генерирование периодических импульсов положительной полярности с расстоянием между импульсами: от 1 с до 10 с (с интервалом 1 с) и от 10 с до 60 с (с интервалом 10 с);
- генерирование периодических импульсов отрицательной полярности с расстоянием между импульсами: от 1 с до 10 с (с интервалом 1 с) и от 10 с до 60 с (с интервалом 10 с);
- генерирование однократных или периодических импульсов со сдвигом фазы между началом синусоиды питания БАО (115 В, 400 Гц) и импульсом поджига генератора ИГЛА-КВ от 0° до 360° через 15°;
- генерирование всех вышеперечисленных импульсов по пяти уровням испытаний.

Таблица 1

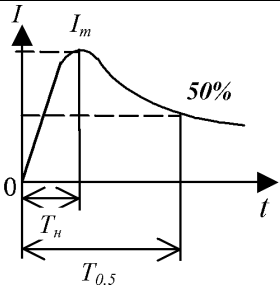
Параметр	Напряжение U_{xx}	Ток $I_{кз}$
1	2	3
1. Испытательный импульс напряжения формы 3		
2. Уровни испытаний:		
– 1	(100 + 10) В	(4 + 0,4) А
– 2	(250 + 25) В	(10 + 1) А
– 3	(600 + 60) В	(24 + 2,4) А
– 4	(1500 + 150) В	(60 + 6) А
– 5	(3200 + 320) В	(128 + 13) А
3. Частота колебаний, МГц	$1 \pm 0,2$	$1 \pm 0,2$
4. Степень затухания, δ	$U_{m5} = (0,25 \div 0,75) U_{m1}$	$I_{m5} = (0,25 \div 0,75) I_{m1}$
5. Сдвиг по фазе при напряжении питания 115 В 400 Гц, φ_i	$90^\circ \pm 10^\circ$ $270^\circ \pm 10^\circ$	$90^\circ \pm 10^\circ$ $270^\circ \pm 10^\circ$

Общий вид генератора ИГЛА-КВ приведен на рис. 1.



Рисунок 1 – Общий вид генератора ИГЛА-КВ

Таблица 2

Параметр	Напряжение U_{xx}	Ток $I_{кз}$
1	2	3
1. Испытательный импульс напряжения формы 4		
2. Уровни испытаний:		
– 1	(50 + 5) В	(10 + 1) А
– 2	(125 + 13) В	(25 + 2,5) А
– 3	(300 + 30) В	(60 + 6) А
– 4	(750 + 75) В	(150 + 15) А
– 5	(1600 + 160) В	(320 + 32) А
3. Время нарастания, T_n , мкс	$6,4 \pm 1,28$	40 ± 8
4. Время спада, $T_{0,5}$, мкс	$69 \pm 13,8$	120 ± 24
5. Сдвиг по фазе при напряжении питания 115 В 400 Гц, φ_i	$90^\circ \pm 10^\circ$ $270^\circ \pm 10^\circ$	$90^\circ \pm 10^\circ$ $270^\circ \pm 10^\circ$

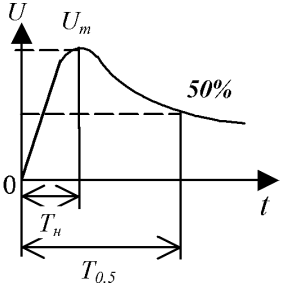
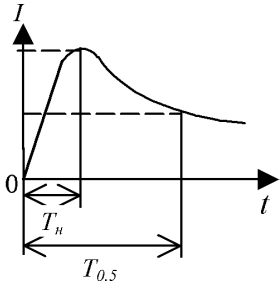
Генератор ИГЛА-КВ собран в металлическом корпусе с габаритами 480x500x255 мм и включает в себя повысительно-выпрямительное устройство (ПВУ), блок емкостных накопителей (БЕН), блок коммутаторов (БК), блок нагрузки (БН) и программируемый таймер-коммутатор (ПТК). На рис. 2 показан генератор ИГЛА-КВ со снятой верхней крышкой, а на рис. 3 – передняя панель генератора ИГЛА-КВ.

На передней панели генератора ИГЛА-КВ расположены следующие органы управления и контроля установки:

- клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор ИГЛА-КВ и для его отключения после окончания работы;
- переключатель УРОВЕНЬ служит для установления уровня выходного напряжения генератора ИГЛА-КВ и имеет пять положений: «1», «2», «3», «4», «5»;
- переключатель ПОЛЯРНОСТЬ служит для установления полярности

- выходного напряжения генератора ИГЛА-КВ и имеет три положения: «+», «0» и «-»;
- регулятор $U_{зар}$ служит для корректировки напряжения на выходе генератора ИГЛА-КВ (красные риски на микроамперметре);
 - ТАБЛО ПТК служит для отображения параметров циклограмм работы генератора ИГЛА-КВ;
 - кнопка СТАРТ/СТОП служит для запуска и остановки генератора ИГЛА-КВ;
 - кнопки «↑» и «↓» КОЛ. ИМП. служат для изменения количества выходных импульсов;
 - кнопки «↑» и «↓» ФАЗА служат для изменения фазы выходных импульсов;
 - кнопки «↑» и «↓» ИНТЕРВ. служат для изменения расстояния между импульсами выходного напряжения;
 - световой индикатор справа от ТАБЛО ПТК служит для контроля отработки циклограмм на генераторе ИГЛА-КВ;
 - переключатель ФОРМА ИСПЫТ. НАПРЯЖЕНИЯ служит для установления формы выходного напряжения генератора ИГЛА-КВ: «3», «4» или «5А»;
 - разъем $\sim 2 В 400 Гц$ служит для привязки к фазе при определении сдвига по фазе при внешнем напряжении питания $\sim 115 В 400 Гц$;
 - разъем ИМП.СИНХР. служит для определения сдвига фазы по отношению к напряжению питания $\sim 115 В 400 Гц$.
 - На задней панели генератора ИГЛА-КВ (рис. 4) расположены следующие органы управления и контроля:
 - разъем ВЫХОД служит для подключения генератора ИГЛА-КВ к испытываемому оборудованию;
 - переключатель ИСТОЧНИК $U_{зар}$ служит для установления источника зарядного напряжения для выходного напряжения генератора ИГЛА-КВ и имеет два положения: «ВНУТР.» и «ВНЕШН.»;
 - разъем $\sim 220 В$ служит для подключения к генератору ИГЛА-КВ сетевого кабеля;
 - разъем $\sim 115 В 400 Гц$ служит для подключения к генератору ИГЛА-КВ кабеля от внешнего источника переменного напряжения 115 В частотой 400 Гц;
 - разъем ВНЕШН. ИСТ. $U_{зар}$ служит для подключения к генератору ИГЛА-КВ внешнего источника зарядного напряжения;
 - «1А» и «3А» – предохранители;
 - клемма \perp служит для подключения генератора ИГЛА-КВ к контуру заземления.

Таблица 3

Параметр	Напряжение $U_{кх}$	Ток $I_{кз}$ (форма не нормируется)
1	2	3
1 Испытательный импульс напряжения формы 5 А		
2. Уровни испытаний:		
– 1	(50 + 5) В	(50 + 5) А
– 2	(125 + 13) В	(125 + 13) А
– 3	(300 + 30) В	(300 + 30) А
– 4	(750 + 75) В	(750 + 75) А
– 5	(1600 + 160) В	(1600 + 160) А
3. Время нарастания, T_n , мкс	40 ± 8	-
4. Время спада, $T_{0,5}$, мкс	120 ± 24	-
5. Сдвиг по фазе при напряжении питания 115 В 400 Гц, φ_i	$90^\circ \pm 10^\circ$ $270^\circ \pm 10^\circ$	$90^\circ \pm 10^\circ$ $270^\circ \pm 10^\circ$

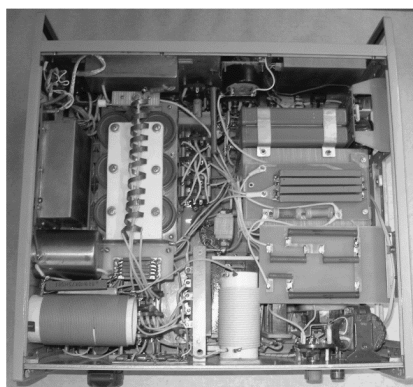


Рисунок 2 – ИГЛА-КВ со снятой верхней крышкой



Рисунок 3 – Передняя панель ИГЛА-KB

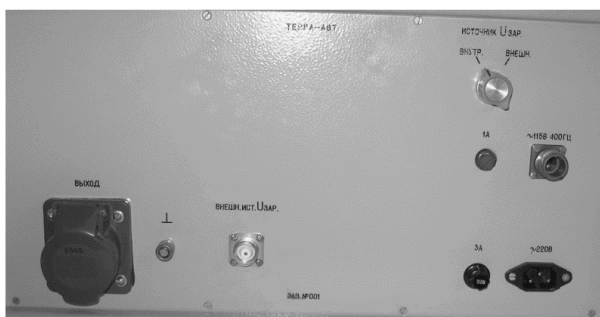


Рисунок 4 – Задняя панель генератора ИГЛА-KB

На рисунках 5 - 10 приведены осциллограммы выходных импульсов напряжения и тока форм «3», «4» и «5А» положительной полярности для 5 уровня испытаний.

Схемы испытаний всех цепей БАО приведены на рисунках 11 – 13.

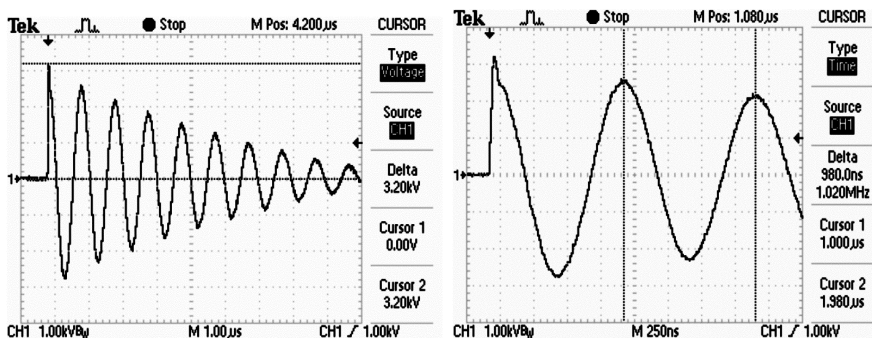


Рисунок 5 – Типовые осциллограммы выходного напряжения U_{XX} формы «3» положительной полярности уровня 5

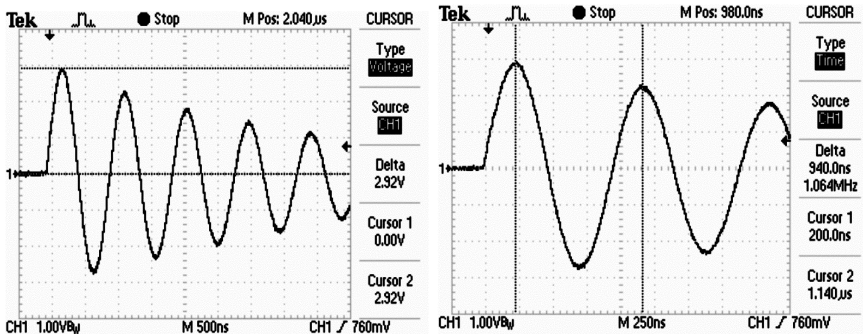


Рисунок 6 – Типовые осциллограммы выходного тока I_{K3} формы «3» положительной полярности уровня 5

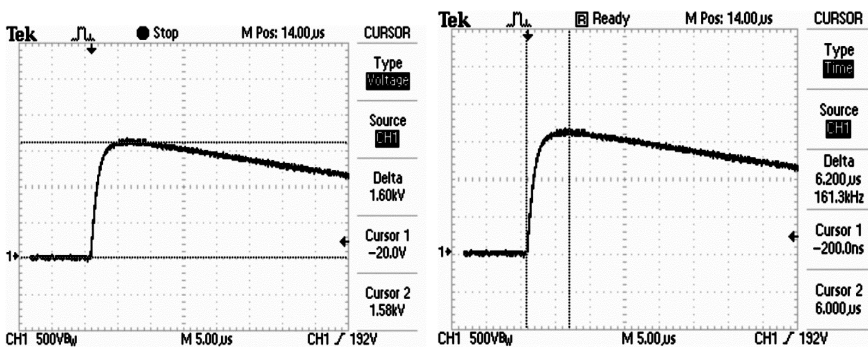


Рисунок 7 – Типовые осциллограммы выходного напряжения U_{XX} формы «4» положительной полярности уровня 5

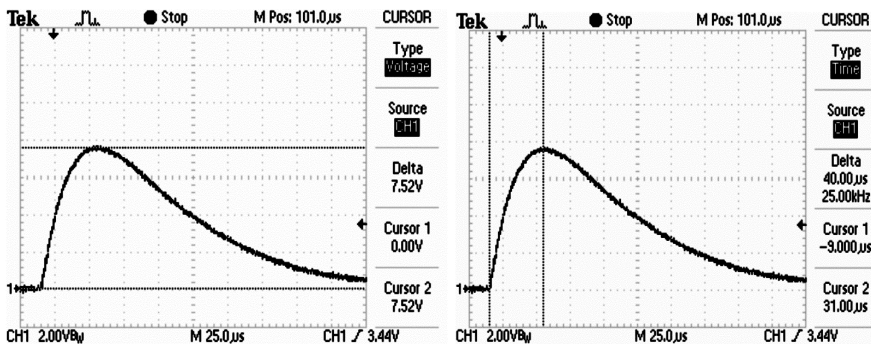


Рисунок 8 – Типовые осциллограммы выходного тока I_{K3} формы «5А» положительной полярности уровня 5

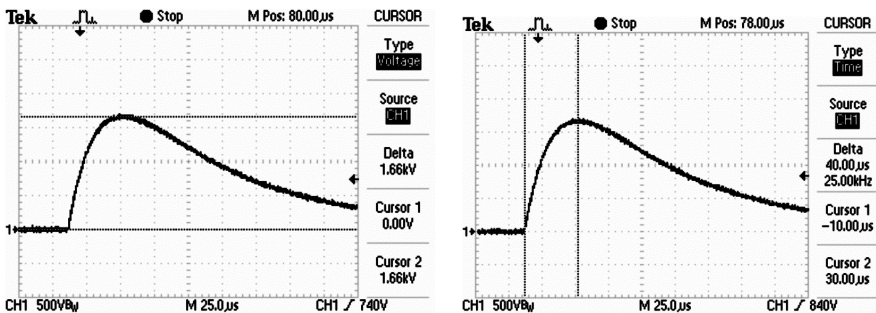


Рисунок 9 – Типовая осциллограмма выходного напряжения U_{XX} формы «5А» положительной полярности уровня 5

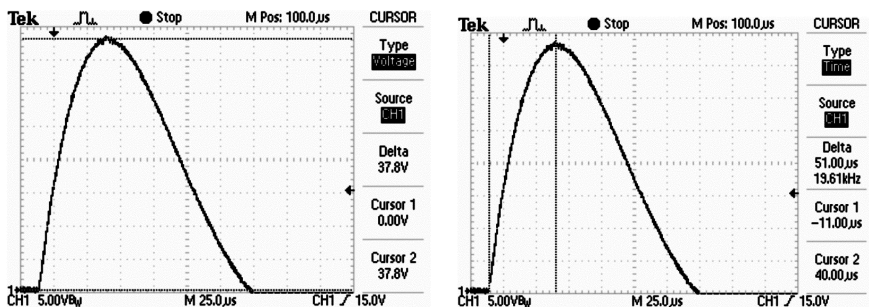


Рисунок 10 – Типовые осциллограммы выходного тока I_{K3} формы «5А» положительной полярности уровня 5

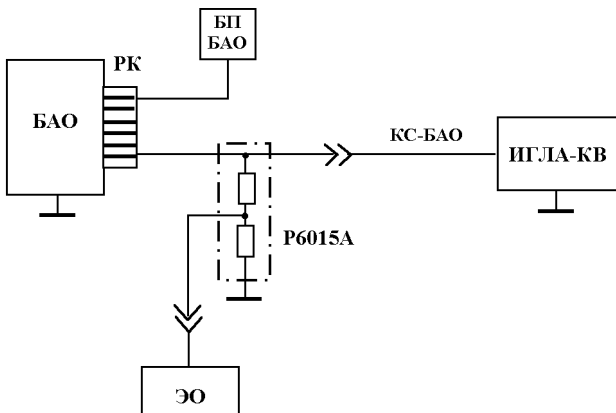


Рисунок 11 – Схема испытаний БАО по всем цепям, за исключением цепей питания:

ПК – разъем с нагружаемыми контактами; БП БАО – блок питания БАО; ИГЛА-КВ – испытательный генератор; P6015A – высоковольтный делитель напряжения; КС-БАО – кабель соединительный к БАО; ЭО – осциллограф TEKTRONIX TDS1012

Д.Г.КОЛИУШКО, канд. техн. наук; НТУ «ХПИ»

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГООБЪЕКТОВ

У статті наведено розроблені способи для прискорення розрахунку заземлювальних пристроїв електроенергооб'єктів з великою кількістю вузлів сітки.

In article the developed methods for acceleration of calculation of the power industry objects grounding systems with a considerable quantity of the grounding grid nodes are resulted

Введение. Диагностика заземляющих устройств (ЗУ) объектов электроэнергетики включает в себя три этапа [1]:

- 1 экспериментальный этап, позволяющий получить картину реального расположения ЗУ электроэнергообъекта;
- 2 расчетный этап, с помощью которого анализируется реакция ЗУ в аварийных режимах;
- 3 этап выдачи рекомендаций, основанный на результатах первого и второго этапов, служащий для приведения ЗУ электроэнергообъекта в соответствие с требованиями существующих нормативных документов.

Существует большое многообразие электроэнергообъектов, которые различаются по своим характеристикам, которые влияют на продолжительность расчетного этапа в той или иной степени:

- 1 назначение, занимаемая площадь и количество установленного оборудования – влияет на количество узлов при аппроксимации ЗУ объекта;
- 2 слоистость грунта и соотношение сопротивлений и толщины различных слоев – на время расчета матрицы коэффициентов. Чем больше соотношение удельных сопротивлений слоев отличается от единицы – тем дольше расчет;
- 3 величина токов короткого замыкания и времена срабатывания основной и резервной защит – на количество пересчетов после введения рекомендаций. То есть, чем больше значение тока короткого замыкания и медленнее защита, тем сложнее выработать рекомендации для приведения напряжения прикосновения на оборудовании к норме.

Практика проведения расчетов ЗУ в течение восьми лет показала, что при расчете ЗУ, находящегося в двухслойной земле, для объектов, занимающих большую площадь (более 100000 м²) и имеющих значительное количество оборудования время расчета одного аварийного режима достаточно велико и может достигать нескольких часов. Учитывая большое количество аварийных режимов (на некоторых объектах это число достигает 500-700) полное время расчета достигает 25-35 суток при использовании одной ПЭВМ.

Целью настоящей работы является разработка способов для увеличения быстродействия расчета аварийных режимов электроэнергообъектов.

Материалы и результаты исследования. Алгоритм работы расчетной части программы приведен на рис. 1.

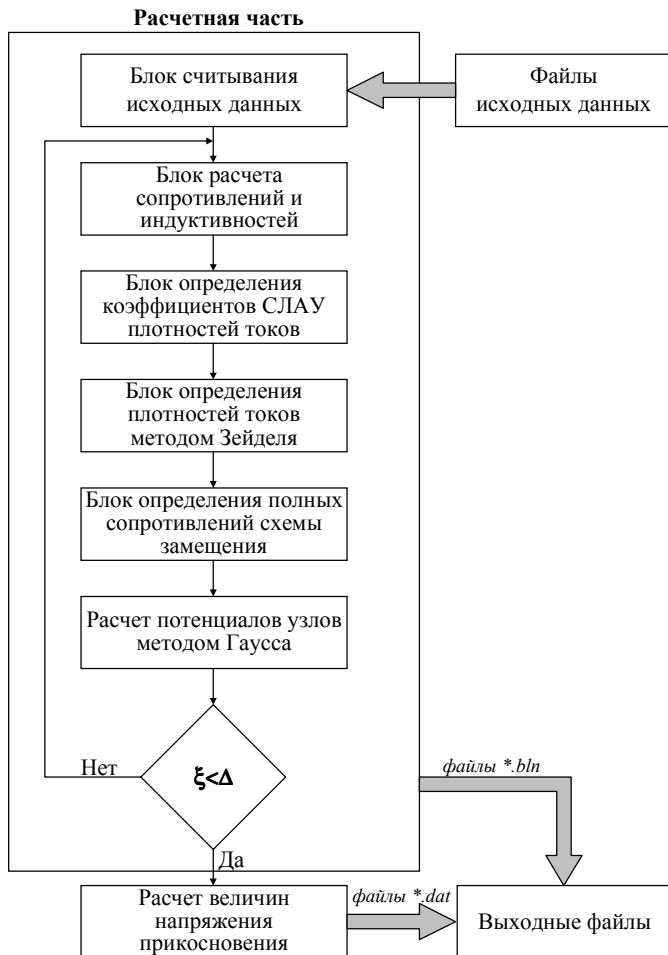


Рисунок 1 – Алгоритмическая схема расчетной части программы

Расчет осуществляется следующим образом. В блоке считывания исходных данных происходит запись в массивы геометрических (размеры подстанции, координаты узлов и порядок их соединения, глубина залегания и ширина заземлителей) и электрических (величина тока короткого замыкания,

удельное электрическое сопротивление грунта, удельное сопротивление материала, из которого выполнен заземлитель) параметров, которые формируются в соответствующие массивы данных.

После заполнения массивов происходит расчет продольных активных и индуктивных сопротивлений связей и определяются коэффициенты системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для расчета плотностей токов, стекающих с заземлителя.

Затем, путем решения системы алгебраических уравнений определяется значение плотности стекающего в землю тока с каждого электрода заземлителя в зависимости от потенциалов этих электродов.

После вычисления плотностей токов, стекающих с элементов заземлителя, определяем характеристики элементов электрической схемы замещения ЗУ. Результатом ее работы являются двумерный массив комплексных полных сопротивлений ветвей схемы замещения и одномерный массив задающих токов, используемый в качестве правых частей системы линейных алгебраических уравнений.

Далее решаем систему линейных алгебраических уравнений методом Гаусса. Это решение представляет собой матрицу-столбец комплексных значений напряжений в узлах электрической схемы замещения ЗУ.

При найденных значениях потенциалов в узлах подставляем их вместо заданных и продолжаем итерационный процесс до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое значение ошибки расчета ($\xi < \Delta$).

Затем, по найденным потенциалам узлов, рассчитываются значения напряжения прикосновения по формуле:

$$U_{\text{кпр}} = |U_{\text{k0}} - \Phi_{0,8}| \frac{R_{\text{т}}}{R_{\text{т}} + R_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $\Phi_{0,8}$ – потенциал на поверхности земли, определенный по результатам вычислений, произведенных на первом этапе на расстоянии 0,8 м от k-того узла;

$R_{\text{т}}$ – сопротивление тела человека 1000 Ом [2];

$R_{\text{пр}}$ – сопротивление растеканию с двух ног человека при прикосновении, равное среднему значению измеренных сопротивлений, выполненных с использованием специальной пластины [3] на экспериментальном этапе, в нескольких точках электроэнергообъекта.

При аппроксимации ЗУ электроэнергообъекта при помощи интерфейса программного комплекса Grounding 1.0 [4] используются узлы и соединения. Чем крупнее ЗУ объекта и чем больше на нем установлено оборудования, тем больше будет результирующее число аппроксимирующих узлов. Необходимо заметить, что в расчете применяется пять двумерных массивов данных (2 – для активных и индуктивных сопротивлений связей и 3 – для коэффициентов систем линейных уравнений в полевой и цепной задачах), а также

16 одномерных. Поэтому, при расчете ЗУ, схема которых насчитывает большое количество узлов (более 5000) возникают проблемы, связанные с временем расчета каждого режима. Это обусловлено тем, что массивы данных занимают весь объем оперативной памяти, а затем, при ее нехватке происходит процесс обмена данных с жестким диском, что резко замедляет производительность расчетных операций (время доступа к оперативной памяти современных ПЭВМ 1-1,5 нс, в то время как обращение к жесткому диску занимает время около 8-9 мс). Например, двумерный массив чисел с форматом числа Extended, у которого $N_{\text{строк}} = 5000$ строк и $N_{\text{столбцов}} = 5000$ столбцов будет занимать следующий объем памяти:

$$\text{MEM} = N_{\text{строк}} \times N_{\text{столбцов}} \times n_{\text{ч}} = 2,5 \times 10^7 \text{ байт} = 250 \text{ Мб},$$

где $n_{\text{ч}} = 10$ – количество байт, занимаемое числом с плавающей запятой формата Extended.

Чтобы сократить объем занимаемый массивами в оперативной памяти и, как следствие, время расчета, были рассмотрены структуры массивов, в которых находятся значения активных сопротивлений связей. Они формируются при вводе исходных данных. В результате анализа выяснилось, что так как отдельный узел имеет связь только с ограниченным числом узлов, то каждая строка этого массива будет иметь вид:

$$|0 \quad r_{12} \quad 0 \quad r_{14} \quad \dots \quad 0| . \quad (2)$$

Формулой (2) представлена первая строка массива. Первый узел имеет две связи: с узлом № 2 и узлом № 4. Остальные элементы этой строки заполнены нулями. Следовательно, чтобы сэкономить оперативную память, необходимо исключить из массива нулевые элементы. Каждый узел схемы ЗУ, исходя из данных, полученных при обследовании объектов электроэнергетики, имеет, как правило, от одной до четырех и в редких случаях пять связей. Рассчитаем процентное соотношение нулевых элементов ко всем элементам массива, исходя из предположения, что узел имеет в среднем 4 связи, а число узлов 5000:

$$\Delta_{\%} = \frac{5000 \cdot (5000 - 4)}{5000^2} \cdot 100 \% = 99,92 \% .$$

Следовательно, при исключении нулей массив уменьшит занимаемый в памяти объем на 99,92 % для 5000 элементов, а для 1000 элементов – на 99,6 %. При этом исключение нулей из массива должно произойти так, чтобы не изменились номеров узлов, которые связаны с данным соединением для однозначного соответствия файлов исходных данных выходным файлам и сохранения геометрической конфигурации ЗУ. В первоначальном массиве величина сопротивления, то есть значащий элемент строки стоял в том столбце, с которым и был связан узел. Например, если узел № 1 соединен с узлом № 2, то величина активного сопротивления встречается в массиве дважды и имеет индексы $r_{12} \ r_{21}$. Следовательно, при смещении значащих ко-

эффицентов, необходимо помнить их настоящее размещение в разреженном массиве.

Для решения этой задачи используются два массива: один – сжатый массив коэффициентов, число строк которого равно числу строк разреженного массива, а число столбцов – максимальному количеству связей узла, который участвует в исследуемой расчетной схеме. Второй массив – индексный, такой же размерности как и сжатый массив активных сопротивлений, который в качестве коэффициентов содержит номер столбца разреженного массива (рис. 2), то есть коэффициент строки $N_{\text{строки}} = 200$ первого столбца имеет связь с шестым узлом и в разреженной матрице стоит именно на шестой позиции.

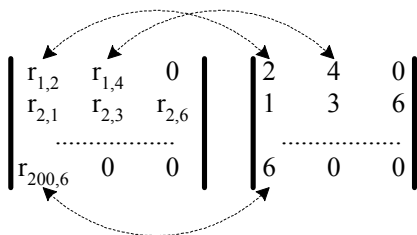


Рисунок 2 – Схема индексации элементов сжатого массива

Аналогично можно исключить нулевые элементы из массива индуктивных сопротивлений, расположение значащих элементов которого будет соответствовать ранее созданному индексному массиву для активных сопротивлений. Проведя преобразования, мы получаем три сжатых массива вместо двух, которые занимают при 5000 узлов $\approx 0,24$ % оперативной памяти по сравнению с начальными массивами.

При решении системы алгебраических уравнений для определения значения плотности стекающего в землю тока с каждого электрода заземлителя в зависимости от потенциалов этих электродов применялся итерационный метод Зейделя [5]. Он выбран по ряду причин. Во-первых, он значительно быстрее метода Гаусса при больших порядках матриц, а по точности практически не уступает ему. Во-вторых, он может работать с массивом построчно. Так как коэффициенты массива остаются неизменными, то если вся матрица не помещается в оперативной памяти, можно использовать так называемую блочно-строковую схему расчета. Смысл ее заключается в следующем. Сначала рассчитывается размер блока коэффициентов, который может разместиться в оперативной памяти не вызывая операции обмена с диском. После этого оставшаяся часть построчно просчитывается методом Зейделя, при этом от каждой строки остается лишь только значение решения, а сама строка коэффициентов заменяется следующей (рис. 3).

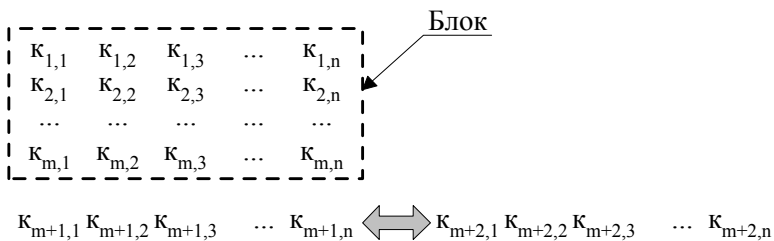


Рисунок 3 – Схема блочно-строковой структуры расчета системы линейных алгебраических уравнений методом Зейделя

На рис. 3 m – количество строк, которые помещаются в оперативной памяти. Можно применить тот же алгоритм, только вместо строк использовать блоки, то есть от рассчитанного блока остается столбец решений, а сам блок заменяется следующим, равным ему по размеру.

Применение разработанных способов ускорения расчета позволило сократить время расчета подстанций с большим количеством узлов сетки (5000 и более) от 5 % до 20 %. Однако, если количество узлов не настолько велико и все массивы размещаются в оперативной памяти одновременно, применение сжатых массивов нецелесообразно, так как время расчета увеличивается за счет увеличения количества арифметических действий, связанных с обработкой сжатых массивов.

Выводы.

Сделаны усовершенствования, позволяющие существенно снизить время расчета при большом количестве узлов ЗУ за счет:

- создания сжатых массивов путем исключения нулей из них и освобождения оперативной памяти для обеспечения отсутствия обращения к жесткому диску;
- применения итерационного метода Зейделя для решения системы алгебраических уравнений с использованием разработанной блочно-строковой схемы расчета.

Список литературы: 1. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И., Васьюковский А.П., Чевычелов В.А., Колиушко Д.Г. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 4. – С. 29-32. 2. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений и токов. – Введ. 01.07.83. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 6 с. 3. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с. 4. Колиушко Д.Г. Интерфейс программного комплекса для расчета заземляющих устройств электроэнергообъектов. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 34. – С. 71-79. 5. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

Поступила в редколлегию 18.02.2008

В.И.КРАВЧЕНКО, докт.техн.наук; **Ю.С.НЕМЧЕНКО**;
Ю.Н.ГИРКА; НТУ «ХПИ»

ПРОЦЕДУРА И РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ СЛИЧЕНИЙ ЭТАЛОНА РЭМП И ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭТАЛОНА РФ

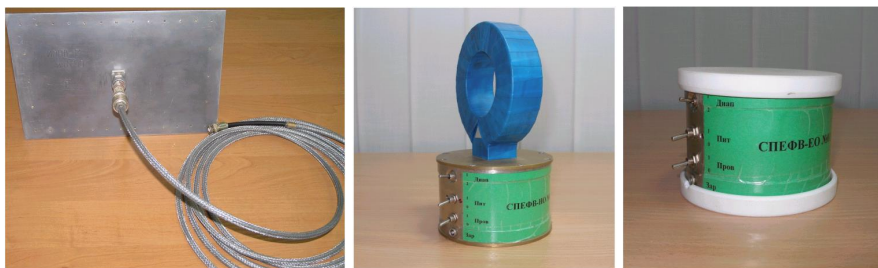
Описана методика процедуры та висновки міжнародних двосторонніх звірень еталонів імпульсних електричних та магнітних полів України та Російської Федерації.

The method of procedure and conclusions of international two-sided comparisons of standards the pulsed electrical and magnetic fields of Ukraine and Russian Federation is described.

Постановка задачи. В 2007 году возникла идея о проведении сличения нашего Эталона единиц максимальных значений напряженности импульсного электрического – вольт на метр (В/м) и магнитного – ампер на метр (А/м) полей (Эталон РЭМП) и Государственного специального эталона единиц максимальных значений импульсного электрического и магнитного полей Российской Федерации (ГЭТ 148-93). Организацией-пилотом в проведении таких сличений выступил Национальный научный центр «Институт метрологии», являвшийся в то время председателем международного комитета по метрологии КОOMET. Он координировал работы по согласованию темы, подготовке технического протокола и проведению экспериментальной части сличений.

Для проведения сличений, согласно Положению о сличениях эталонов национальных метрологических институтов КОOMET [1], был разработан Технический протокол (ТП) – программа, согласно которой проводятся работы на всех объектах, участвующих в сличениях. В разработке ТП принимали участие сотрудники НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГУП «ВНИИОФИ») и Национального научного центра «Институт метрологии» (ННЦ «Институт метрологии»).

Сами эталоны – стационарные сооружения достаточно громоздких размеров, полеобразующие полосковые линии имеют протяженность в несколько метров. Поэтому, было принято решение, в соответствии с Положением о сличениях эталонов национальных метрологических институтов КОOMET, о придании статуса «эталон сравнения» компараторам единиц максимальных значений электрического и магнитного полей: СПЕФВ-ЕК, СПЕФВ-ЕО и СПЕФВ-НО (рис. 1), которые имеют небольшие размеры и пригодны для транспортировки в соответствии с их техническими требованиями.



а б в

Рисунок 1 – Средства переноса единиц физических величин:

а – СПЕФВ-ЕК; б – СПЕФВ-НО; в – СПЕФВ-ЕО

Таким образом, была разработана методика сличений, которая описана в ТП.

Эта методика включает три основных этапа сличений:

- 1 Измерение выходных характеристик ГЭТ 148-93, которые проходили в конце ноября 2007 года в Москве.
- 2 Транспортировка комплекса эталонов сравнения из Москвы в Харьков с соблюдением всех технических требований по упаковке, транспортировке и распаковке, которые так же описаны в ТП.
- 3 Измерение выходных характеристик Эталона РЭМП в декабре 2007 года.

Измерения выходных характеристик эталонов проводились при установке одинаковых входных параметров, так как оба эталона выдавались согласно одному стандарту [2] и имеют практически одинаковую конструкцию. По рассчитанным и экспериментально подтвержденным ранее зависимостям между зарядным напряжением генератора и амплитудой напряженности электрического и магнитного полей [3] устанавливались одинаковые уровни зарядного напряжения и измерялись амплитудные значения создаваемого в рабочей зоне электрического и магнитного полей. Процедура повторялась на трех уровнях напряжения заряда. Каждый эксперимент повторялся 10 раз.

Для исключения дополнительных аппаратных погрешностей, в качестве регистратора использовался один и тот же электронный осциллограф Tektronix TDS 784D.

В результате проведенных работ были получены наборы осциллограмм, типичный вид которых представлен на рис. 2.

В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие цифры:

- 1 Средние значения амплитуды импульсов напряжения на экране регистратора с выхода компаратора СПЕФВ-ЕК составили:
 - для российского эталона 1,45 В и 2,9 В в рабочих зонах с межэлектродным зазором 0,48 м и 0,24 м соответственно;

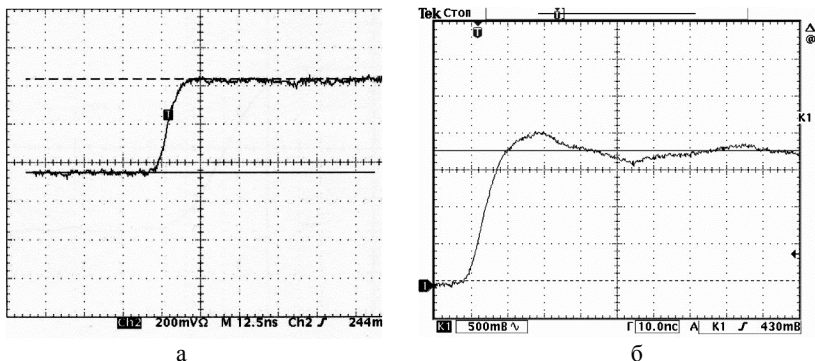


Рисунок 2 – Типичные осциллограммы получаемых импульсов электрического поля ГЭТ 148-93 (а) и Эталона РЭМП (б)

- для украинского эталона 1,48 В и 2,97 В в рабочих зонах с межэлектродным зазором 0,48 м и 0,24 м соответственно.
- 2 Приведенные к калибровке средние значения амплитуды импульсов напряжения на экране регистратора с выхода компаратора СПЕФВ-НО составили:
 - для российского эталона 99,7 (В/В) и 496 (В/В) в рабочих зонах с межэлектродным зазором 0,48 м и 0,24 м соответственно;
 - для украинского эталона 105,1 (В/В) и 513 (В/В) в рабочих зонах с межэлектродным зазором 0,48 м и 0,24 м соответственно.

Таким образом, сличения результатов измерений на двух эталонах дали такие расхождения:

- расхождение среднего значения единиц напряженностей импульсного электрического и магнитного полей в режиме воспроизведения импульсов экспоненциальной формы в рабочей зоне полосковой линии с межэлектродным зазором 0,24 м составило:
 - для электрического поля – 2,4 %;
 - для магнитного поля – 3,4 %;
- расхождение среднего значения единиц напряженности импульсного электрического и магнитного полей в режиме воспроизведения импульсов экспоненциальной формы в рабочей зоне полосковой линии с межэлектродным зазором 0,48 м составило:
 - для электрического поля – 2,1 %;
 - для магнитного поля – 5,4 %.

Деятельностью КООМЕТа не предусмотрена выдача каких-либо заключений о пригодности эталонов, принимавших участие в сличениях, к дальнейшей работе. Поэтому результаты данных сличений принимаются как факт. Организация-пилот ответственна за подготовку отчета по сличениям,

который. после утверждения всеми участниками, размещаются в базе данных Программы сличений КООМЕТ. После этого они публикуются в соответствующих журналах.

На рис. 2, б хорошо прослеживается негладкость импульса Эталона РЭМП. Московские коллеги высказали предположение, что это отражения и предложили провести дополнительные работы по устранению.

Вывод. В результате международных сличений расхождения показаний Эталона РЭМП и ГЭТ 148-93 не превышают 5,4 %. Рабочей группой были высказаны замечания по недостаткам в работе Эталона РЭМП, которые будут устранены в ближайшем будущем.

Список литературы: 1. Рекомендация КООМЕТ. Положение о сличениях эталонов национальных метрологических институтов КООМЕТ. 2. ГОСТ 8.540-2006. государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей. 3. Гирка Ю.Н., Немченко Ю.С. Методические аспекты проведения метрологической аттестации средств измерения электромагнитных полей на Эталоне РЭМП // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – Т. 1, № 34. – С. 29–35.

Поступила в редколлегию 14.05.2008

УДК 621.319.4

Ю.В.КРАВЧЕНКО; НТУ «ХПИ»

РЕСУРС ПРОПИТАННОЙ БУМАЖНО-ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Наведені результати ресурсних випробувань секцій високовольтних імпульсних конденсаторів з різним вмістом поліпропіленової плівки, які були просочені трансформаторним або касторовим маслом.

The resource testing results of the high voltage pulse capacitor sections with different content of polypropylene film impregnated with transformer or castor oil have been given

Постановка задачи. В высоковольтной импульсной технике широкое применение получила комбинированная бумажно-плёночная изоляция (наиболее часто в качестве пленки используют лавсан). В связи с прогрессом, достигнутым в создании новых качественных конденсаторных полимерных пленок (в частности, полипропиленовой с низким тангенсом угла диэлектрических потерь и высокой электрической прочностью) появилась возможность создания высоковольтных импульсных бумажно-полипропиленовых

конденсаторов с большим содержанием пленки в том числе и чисто пленочных. Полипропиленовая пленка уже завоевала прочные позиции при создании силовых конденсаторов переменного напряжения [1].

Имеющиеся экспериментальные данные [2-4] в одном случае [2] свидетельствуют об эффективности применения пленочной изоляции для импульсных конденсаторов, в другом [3,4] – при пропитке полипропиленовой изоляции нефтяным и касторовым маслом, обладающим значительно большей вязкостью, – получены весьма низкие значения ресурса, особенно для касторового масла.

Целью данной работы является сравнительная оценка ресурсных характеристик в импульсном режиме пропитанных конденсаторных секций с различной структурой диэлектрика и уточнение рекомендаций по применению полипропиленовой пленки для импульсных конденсаторов.

Конструкция образцов. Эксперимент проводился в несколько этапов на образцах конденсаторных секций, имеющих следующую структуру изоляции между обкладками (где Б – конденсаторная бумага марки МКОН-1 с толщиной листа 10 мкм; П – односторонне шероховатая полипропиленовая пленка типа TERFILM RER толщиной 12 мкм):

- I этап – испытание образцов ЗБ (10 шт.), 2П (32 шт.) и 3П, ПБП, ПБ, ППБ (по 25 шт. каждого вида), пропитка нефтяным маслом;
- II этап – испытание образцов ПБП, ПБ, ППБ (по 25 шт. каждого вида), пропитка касторовым маслом, допропитка нефтяным;
- III этап – испытание образцов ЗБ, 3П, БПБ, ПБП (по 15 шт. каждого вида), пропитка нефтяным маслом;
- IV этап – испытание образцов Б-2П-Б (9 шт.), Б-3П-Б (10шт.), пропитка касторовым маслом.

Испытуемые секции имели конструкцию (рис. 1) идентичную конденсаторным секциям, которые были использованы при проведении экспериментов в работах [3,4]. Каждая секция состояла из трех параллельно включенных емкостных промежутков (рис. 1, б) для обеспечения условий создания конфигурации электрического поля, близкой к реальной. Активная площадь обкладки секции составила 60 x 90 мм. Друг от друга секции отделялись при помощи 4–10 слоев кабельной бумаги толщиной 120 мкм во избежание пробоя между соседними секциями.

При наличии смежных слоев полипропиленовой пленки (образцы 2П, 3П, ППБ, Б-2П-Б, Б-3П-Б) они укладывались таким образом, чтобы гладкая сторона одного слоя пленки соприкасалась с шероховатой стороной соседнего слоя пленки. Тем самым улучшались условия пропитки за счет повышения возможности проникновения жидкого диэлектрика между соседними слоями пленки.

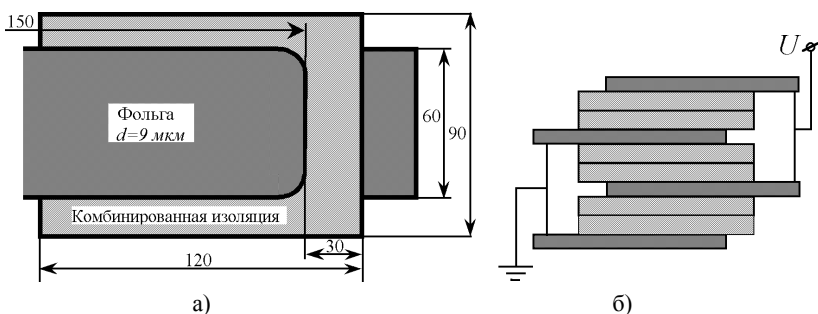


Рисунок 1 – Конструкция секций с бумажно-полипропиленовым диэлектриком, изготовленных для проведения эксперимента

Конденсаторные секции с несимметричной структурой диэлектрика между обкладками (образцы ПБ и ППБ) имели вид представленный на рис. 2. В данных секциях, для улучшения условий проникновения жидкого диэлектрика в ходе пропитки, односторонне шероховатые слои полипропиленовой пленки укладывались таким образом, чтобы шероховатая сторона была обращена к обкладке. Пропитка между гладкой стороной пленки и смежной обкладкой обеспечивалась за счет наличия между ними слоя конденсаторной бумаги.

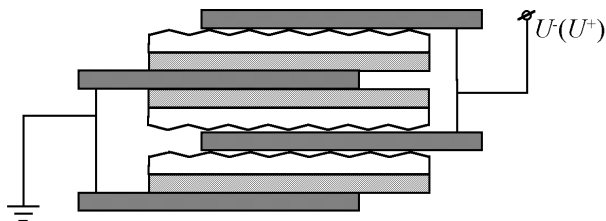


Рисунок 2 – Конструкция секции с несимметричной структурой диэлектрика

После сборки образцы предварительно затягивались и сушились в вакуумной камере при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и вакууме $6,5\text{ Па}$ в течение 6 дней. Далее производилась заливка в бак с образцами предварительно отвакуумированного жидкого диэлектрика.

Пропитка происходила в течение 3 дней при вакууме $6,5\text{ Па}$ и температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ при пропитке нефтяным и $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ при пропитке касторовым маслом. После окончания процесса пропитки производилась окончательная затяжка сборки образцов.

Методика проведения эксперимента. До и после пропитки проводилось измерение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов мостом Е7-8. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерения емкости образцов до и после пропитки

Структура диэлектрика	Пропитывающая жидкость	Количество измеренных образцов, ед.	Тангенс угла диэлектрических потерь до/после пропитки, $tg\delta \cdot 10^4$	Средняя емкость образцов до пропитки, нФ	Средняя емкость образцов после пропитки, нФ	Относительное увеличение емкости после пропитки
ЗБ	тр*	25	$(74 \div 80) / (58 \div 62)$	13,32	23,38	1,76
2П	тр	43	$(12 \div 16) / (8 \div 9)$	10,42	12,78	1,23
3П	тр	40	$(12 \div 13) / (8 \div 9)$	7,71	8,87	1,15
ПБП	тр	38	$(24 \div 25) / (15 \div 16)$	8,94	11,45	1,29
ПБП	к**	27	$(30 \div 36) / (19 \div 20)$	8,11	11,87	1,46
ПБ	тр	24	$(30 \div 35) / (27 \div 29)$	12,94	18,42	1,42
ПБ	к	25	$(33 \div 38) / (26 \div 28)$	12,16	19,94	1,64
ППБ	тр	26	$(23 \div 26) / (17 \div 19)$	8,42	11,09	1,32
ППБ	к	24	$(26 \div 30) / (19 \div 22)$	8,31	12,37	1,49
БПБ	тр	15	$(36 \div 38) / (25 \div 27)$	10,72	15,01	1,40
Б-2П-Б	к	9	$(33 \div 35) / (18 \div 20)$	8,30	11,25	1,35
Б-3П-Б	к	10	$(28 \div 29) / (16 \div 17)$	6,23	8,21	1,32

* тр – нефтяное трансформаторное масло марки Т-1500;

** к – касторовое масло.

Необходимо отметить, что рост значения относительного увеличения емкости образцов после пропитки по сравнению с данными, приведенными в [4] для аналогичных конструкций секций, обуславливается применением предварительной и окончательной затяжки сборок образцов. Так емкость до пропитки измерялась при предварительной затяжке, а после пропитки – при окончательной. В то же время результирующая емкость образцов после пропитки незначительно (в пределах 1-2 %) отличается от данных, приведенных в [4]. Данный факт свидетельствует об отсутствии преимущества нового предложенного метода сушки и пропитки по сравнению со стандартной технологией термовакuumной обработки, примененной в [4]. В ходе проведения эксперимента проводились ресурсные испытания секций в стандартном режиме (частота разрядного тока контура 100 кГц и декремент колебаний 1,38).

Ресурсные испытания образцов проводились с использованием генератора поджигающих импульсов, который генерировал импульсы с частотой $f = 2$ Гц. Подаваемое на образец напряжение контролировалось при помощи электростатического киловольтметра С196.

Результаты испытаний. Как уже было указано выше, ресурсные испытания образцов проводились в несколько этапов. Результаты данных испытаний для образцов конденсаторных секций с различной структурой диэлектрика, проводившиеся на нескольких уровнях напряженности, представлены в табл. 2.

В ходе эксперимента для получения среднего ресурса определенного вида секций при выбранном уровне напряженности проводились идентичные ресурсные испытания не менее чем 4 образцов секций конденсатора.

Секции с несимметричной структурой диэлектрика между обкладками (ПБ и ППБ) испытывались напряжением как положительной, так и отрицательной полярности. Высокое напряжение от источника питания прикладывалось в данных секциях к обкладкам находящимся между листов полипропиленовой пленки (рис. 2). Значения средних ресурсов данных образцов представлены в табл. 2 в виде: ресурс при положительной полярности приложенного напряжения / при отрицательной.

Таблица 2 – Средние значения ресурса образцов конденсаторных секций

Номер этапа	Структура диэлектри- ка	Средний ресурс при различных уровнях напряженности, импульсов			
		E , кВ/мм			
		125	150	200	250
I	ЗБ	-	4600	45	-
	2П	-	11670	3008	470
	3П	-	5072	1200	204
	ПБП	-	12284	1180	298
	ПБ	-	8685 / 10395	1180 / 1008	428 / 78
	ППБ	-	3795 / 4150	1128 / 340	440 / 258
II	ПБП	-	5172	828	292
	ПБ	-	4915 / 9265	1080 / 1700	203 / 88
	ППБ	-	4040 / 4990	235 / 1120	20 / 95
III	БПБ	38616	12291	2050	-
	ПБП	18930	7074	1170	-
	3П	7232	5397	807	-
	ЗБ	5337	2469	45	-
IV	Б-2П-Б	24300	8156	435	-
	Б-3П-Б	15720	5188	270	-

На I этапе в ходе проведения ресурсных испытаний секций с двухслойной чисто пленочной изоляцией была проведена оценка влияния правильности укладки листов односторонне шероховатой полипропиленовой пленки на итоговый ресурс. Необходимо отметить, что используемая для изготовления

обкладок секций фольга имела зеркальную поверхность с одной стороны и матовую (что свидетельствует о наличии шероховатости) – с другой. Таким образом, в качестве «правильного» принимался такой способ укладки слоев пленки, при котором к зеркальной стороне обкладки прилежала шероховатая сторона пленки, а к матовой – гладкая. Испытания проводились на уровне напряженности $E = 150$ кВ/мм. Было испытано по 9 образцов с «правильной» и «неправильной» укладкой пленки и получены следующие значения средних ресурсов: 12380 и 10062 импульса соответственно (коэффициенты вариации k , равные отношению среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию $k = \sigma_{lg M} / (lg M)_{cp}$ полученных значений ресурсов составили соответственно 2,4 % и 3,9 %).

Также на I этапе часть секций (6 образцов) с трехслойным чисто пленочным диэлектриком испытывалась с включенной в разрядный контур дополнительной индуктивностью. Ресурсные испытания данных секций проводились при напряженности электрического поля $E = 150$ кВ/мм. Включенная последовательно с испытываемой емкостью дополнительная индуктивность привела к снижению декремента колебаний в 1,25 раза, а также к снижению в 3,25 раза частоты разрядного тока контура (значения величины декремента колебаний и частоты разрядного тока определялись из осциллограмм, полученных на цифровом запоминающем осциллографе Tektronix – TDS – 1012B). Средний ресурс данных образцов составил 1917 импульсов с коэффициентом вариации 2,6 %.

Испытанные секции были разобраны для определения мест пробоя. Анализ расположения мест пробоя показал, что для образцов, содержащих полипропиленовую пленку (практически независимо от величины процентного содержания) 80-85 % точек разрушения изоляции находятся на краю обкладки. Пробои в однородном поле для данных образцов происходили при напряженности электрического поля $E = 200-250$ кВ/мм. В то же время для образцов с чисто бумажным диэлектриком (ЗБ) места пробоев располагались преимущественно в однородном поле (около 65 %).

Анализ результатов. Согласно с приведенными в табл. 2 результатами наибольшие значения ресурса в диапазоне изменения напряженности $E = 125-200$ кВ/мм относятся к образцам со структурой БПБ. Это объясняется снижением напряженности электрического поля вблизи края обкладки (в самой напряженной области) за счет прилегания к ней слоя изоляции с высокой диэлектрической проницаемостью. Листы конденсаторной бумаги обеспечивают высококачественное заполнение жидким диэлектриком пространства между обкладкой секции и слоем пленки.

Улучшение качества пропитки конденсаторных секций с чисто пленочным диэлектриком можно достигнуть путем соблюдения правильности укладки листов односторонне шероховатой полипропиленовой пленки по от-

ношению друг к другу и обкладке секции, о чем косвенно свидетельствует повышение ресурсов образцов на $\approx 20\%$ и снижение в 1,5 раза коэффициента вариации.

Влияние полярности приложенного к испытываемому образцу напряжения исследовалось на секциях с несимметричной структурой диэлектрика (ПБ и ППБ). Полученные результаты показывают, что на уровне напряженности $E = 150$ кВ/мм, ресурс секций, испытанных при отрицательной полярности приложенного напряжения превышает аналогичную характеристику при напряжении положительной полярности на 10-90%. Для более высоких уровней напряженности ($E = 200-250$ кВ/мм) закономерности в полученных значениях ресурса в зависимости от полярности приложенного напряжения не прослеживается, что связано с изменением механизма разрушения изоляции [4] и, соответственно, увеличением разброса полученных результатов.

Результаты испытаний секций с трехслойным пленочным диэлектриком при подключении добавочной индуктивности в разрядный контур показали, что снижение декремента колебаний в 1,25 раза, а также уменьшение в 3,25 раза частоты разрядного тока контура приводит к снижению наработки образцов в $5072/1917 \approx 2,6$ раза. Такое значительное снижение ресурса противоречит эмпирической формуле для ресурсов секций с чисто полипропиленовой изоляцией приведенной в [2], согласно которой подобное изменение параметров разрядного контура должно привести к росту ресурса образцов в $\approx 1,4$ раза.

Определение показателя степени в формуле «жизни» – зависимости ресурса от напряженности поля – по данным, приведенным в табл. 2, согласно формуле:

$$200 n = \frac{\ln \frac{M_i}{M_j}}{\ln \frac{E_j}{E_i}}, \quad (1)$$

где M_i (M_j) – ресурс i -той (j -той) секции на напряженности E_i (E_j), показало, что значения показателя степени n находится в пределах 2–18.

Максимальные значения показателя степени были получены для образцов с чисто бумажной изоляцией, пропитанной нефтяным маслом. Это обусловлено разрушением изоляции секций при действии одновременно двух механизмов пробоя (как в области равномерного электрического поля, так и на краях обкладок), что подтверждается результатами анализа мест пробоя испытанных секций. Для остальных образцов значение показателя степени преимущественно находится в диапазоне 6-10.

На рис. 3 приведены зависимости удельной энергии испытанных на III этапе эксперимента образцов от ресурса. Для сравнения на данном рисунке также дана зависимость удельной энергии бумажно-касторовых секций (по данным работы [5]).

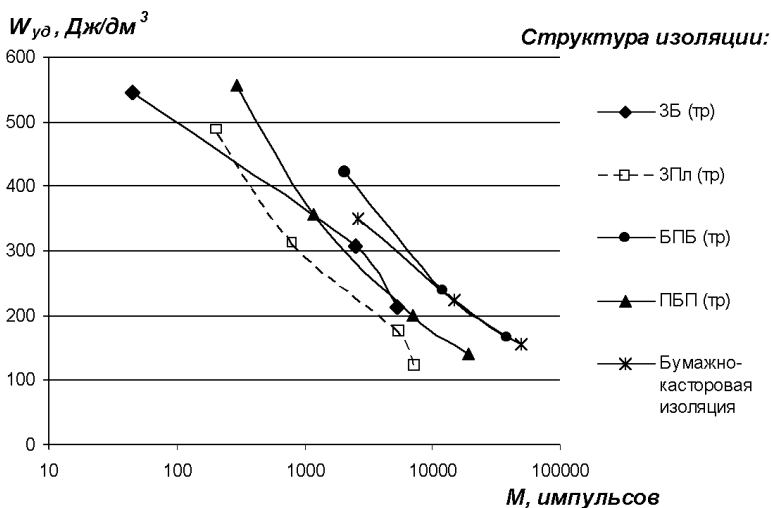


Рисунок 3 – Удельная энергия образцов с пропитанной полипропиленовой, комбинированной и с бумажно-касторовой изоляцией

Анализ кривых (рис. 3) показывает, что образцы с комбинированным диэлектриком структуры БПБ при равных значениях наработки до отказа не уступают по значениям удельной энергии бумажно-касторовой изоляции, а при повышенной напряженности поля $E > 150$ кВ/мм даже превосходят. Образцы со структурой ЗБ, ЗП, ПБП значительно уступают бумажно-касторовой изоляции по ресурсу при равной удельной энергии. Высокие значения удельной энергии для данных образцов $W_{уд} \approx 0,5$ Дж/дм³ достигаются на уровнях напряженности, при которых ресурс секций не превышает 300 импульсов (для образцов ЗБ это уровень напряженности $E = 200$ кВ/мм, для ЗП и ПБП – $E = 250$ кВ/мм).

Следует отметить, что ресурс бумажно-касторовой изоляции на напряженностях 125-150 кВ/мм (по данным [6]) ниже полученных в ходе данного эксперимента значений ресурса для секций с комбинированным диэлектриком (в 1,3 раза для секций ПБП и в 2,5 раза для секций БПБ), но в 2-2,5 раза превышает ресурс секций с чисто полипропиленовой пленкой (ЗП) и конденсаторной бумагой (ЗБ), пропитанных нефтяным маслом.

На рис. 4 приведены значения среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации ресурсов (вычисленных в предположении, что закон распределения образцов по ресурсу является нормально-логарифмическим) испытанных на III и IV этапе эксперимента образцов в зависимости от структуры диэлектрика.

Анализ диаграммы (рис. 4) показывает, что минимальные значения коэффициента вариации и среднеквадратического отклонения относятся к об-

разцам с чисто пленочной изоляцией. Секции с комбинированным диэлектриком, в которых к обкладкам прилегали листы конденсаторной бумаги (БПБ, Б-2П-Б, Б-3П-Б) показали практически равные значения среднеквадратического отклонения ($\sigma = 0,16 \div 0,2$) и коэффициента вариации ($k = 3,8 \div 5,4$ %). Наибольший разброс полученных значений ресурсных испытаний характерен для образцов ПБП (возможно из-за некачественной пропитки промежутка между обкладкой и пленкой) и ЗБ (для которых на напряженности $E = 150$ кВ/мм разрушение изоляции может происходить в результате действия одновременно двух механизмов пробоя).

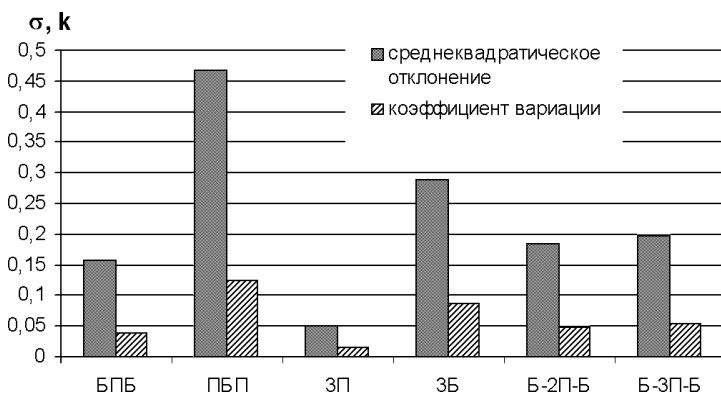


Рисунок 4 – Среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации ресурса испытанных образцов (при $E=150$ кВ/мм)

Выводы:

1. Метод сушки и пропитки, примененный при осуществлении эксперимента, не дал положительного результата, как в отношении повышения емкости, так и улучшения ресурсных характеристик образцов с чисто пленочной изоляцией по сравнению со стандартной технологией термовакуумной обработки, примененной в [4].
2. Наибольшие значения ресурса в диапазоне изменения напряженности $E = 125-200$ кВ/мм относятся к образцам с комбинированным диэлектриком, в которых к обкладкам прилегали листы конденсаторной бумаги (БПБ, Б-2П-Б, Б-3П-Б).
3. Улучшение качества пропитки конденсаторных секций с чисто пленочным диэлектриком можно достигнуть путем соблюдения правильности укладки листов односторонне шероховатой полипропиленовой пленки по отношению друг к другу и обкладке секции.
4. Образцы с комбинированным диэлектриком структуры БПБ при равных значениях ресурса не уступают по значениям удельной энергии

гии бумажно-касторовой изоляции, а при повышенной напряженности поля $E > 150$ кВ/мм даже превосходят. Образцы со структурой ЗБ, ЗП, ПБП значительно уступают бумажно-касторовой изоляции по ресурсу при равной удельной энергии.

Список литературы: 1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / *Богатенков И.М., Бочаров Ю.Н., Гумерова Н.И., Иманов Г.М.* и др.; Под ред. *Кучинского Г.С.* – С.Пб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. 2. *Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я.* и др. Прогнозирование ожидаемого среднего ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком в зависимости от режимов эксплуатации // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XII Межд.науч.школы. – Николаев: КП«Николаевская областная типография», 2005. – С. 125-126. 3. *В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, Д.А.Доценко* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 37. – С. 113-118. 4. *В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной трансформаторным маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2007. – № 20. – С. 167-174. 5. *В.В.Рудаков, О.Ю.Дубийчук, В.П.Кравченко* Предельные удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник НТУ «ХП».Збірник наукових праць.Тематичний випуск. Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХП». – 2004. – № 7. – С. 142-147. 6. *Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В.* Экспериментальное определение показателей надежности секций конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С.71-75.

Поступила в редколлегию 22.05.2008

УДК 621.313

В.В.КРИВУЩЕНКО; А.А.ПЕТКОВ, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

РАСЧЕТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ТОКОВ, ЗАДАННЫХ ИНТЕГРАЛОМ ДЕЙСТВИЯ

У роботі досліджена можливість формування імпульсу струму, заданого набором амплітудно-часових параметрів та інтегралом дії. Розглянуто вибір параметрів традиційної схеми розряду ємнісного накопичувача енергії.

In work capability of the current impulse formation specified by a combination of amplitude-time parameters and action integral is investigated. The parameters selection of the traditional scheme of the energy capacitor storage discharge is considered.

Постановка проблемы. Интеграция Украины в мировую экономику ставит задачу проведения сертификации выпускаемой продукции в соответ-

ствии с международными нормативными документами и, в частности, проведения различных испытаний технических средств.

Одним из видов испытаний электротехнического оборудования является проверка его работоспособности в условиях грозовой деятельности и, в частности, при поражении разрядом молнии. Испытания такого рода проводятся с использованием высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ), создаваемых на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), что требует постоянного усовершенствования ВИИУ, в том числе и их методов расчета.

Анализ публикаций. В настоящее время проведение испытаний объектов регулируется рядом международных и национальных документов [1-3]. Ток разряда молнии представляется в них в виде ряда импульсов, которые в зависимости от целей испытания и типа испытуемых объектов, должны формироваться в комплексе или раздельно.

Наибольшую опасность при поражении объектов молнией представляет первый импульс тока – так называемая А-составляющая тока молнии. Такой импульс характеризуется следующими контролируруемыми параметрами: длительностью нарастания значений импульса от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения – $T_{H(0,1;0,9)}$, длительностью спада значений до уровня 0,01 от максимального значения – $T_{C0,01}$, максимальным значением тока – i_{max} , а также интегралом действия тока, за время $T_{C0,01}$. Аналогичным способом нормируется также D-составляющая импульса тока молнии. Конкретные значения параметров определяются как типом составляющей, так и целью проведения испытаний (проверка на устойчивость к прямому поражению молнией или вторичным проявлениям тока молнии).

Вопросы выбора параметров разрядной цепи ЕНЭ при задании импульса тока набором амплитудно-временных параметров достаточно полно рассмотрены в [4, 5]. Соотношения для расчета интеграла действия по известным параметрам разрядной цепи ЕНЭ приведены в [6]. Однако комплексно вопрос выбора параметров разрядной цепи при комбинированном задании импульса тока в настоящее время не рассмотрен.

Целью настоящей работы является исследование возможности формирования в традиционной схеме разряда емкостного накопителя энергии импульса тока, заданного набором амплитудно-временных параметров и интегралом действия.

Материалы и результаты исследований. Рассмотрим традиционную схему разряда ЕНЭ, показанную на рис. 1.

Как известно [6], интеграл действия импульса тока определяется из отношения

$$J = \int_0^{t_1} i^2(t) dt, \quad (1)$$

где t_1 – время от начала импульса тока.

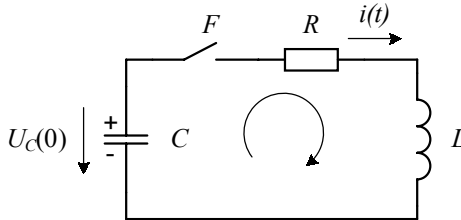


Рисунок 1 – Эквивалентная схема разряда ЕНЭ: $U_C(0)$, C , L , R , – зарядное напряжение конденсатора, емкость конденсатора, индуктивность разрядной цепи, активное сопротивление разрядной цепи

Можно показать, что при полном разряде конденсатора ($t_1 \rightarrow \infty$) в последовательной RLC -цепи, интеграл действия (полный интеграл действия) равен

$$J = \frac{CU_C^2(0)}{2R} = \frac{CU_C^2(0)}{\sqrt{L/C}} j, \quad (2)$$

где $j = \int_0^{\infty} I^2(\tau) d\tau = \frac{1}{2r}$ – безразмерный аналог интеграла действия;

$$I(\tau) = \frac{i(t)}{U_C(0)} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{– безразмерный аналог тока;}$$

$$r = \frac{R}{\sqrt{L/C}} \quad \text{– безразмерный аналог активного сопротивления разрядной цепи.}$$

Пусть заданы следующие контролируемые параметры импульса тока: время, характеризующее нарастание значений импульса тока – t_H , время, характеризующее спад значений импульса тока – t_C , максимальное значение импульса тока – i_{\max} , а также активное сопротивление нагрузки – R_H и интеграл действия J_Z , вычисляемый за время разряда конденсатора.

Если известно активное сопротивление нагрузки R_H , то с использованием соотношений из [4, 5] выражение (2) приводится к виду:

$$2\tau_H r I_{\max}^2 = \frac{i_{\max}^2 t_H}{J_Z}, \quad (3)$$

где $\tau_H = \frac{t_H}{\sqrt{LC}}$ – безразмерный аналог времени нарастания;

i_{\max}, I_{\max} – соответственно максимальное значение тока и его безразмерный аналог.

Из материалов публикаций [4, 5] следует, что левая часть (3) является однозначной функцией отношения временных параметров импульса тока:

$$F\left(\frac{t_C}{t_H}\right) = 2\tau_H r I_{\max}^2. \quad (4)$$

Таким образом, если заданы J_Z, i_{\max}, t_H , то (3) может быть удовлетворено только при единственном значении t_C/t_H , которое в общем случае может не совпадать с требуемым значением. И, наоборот, при заданных t_C и t_H , а значит и $F\left(\frac{t_C}{t_H}\right)$ в общем случае не выполняется отношение $\frac{i_{\max}^2 t_H}{J_Z}$.

Для варианта униполярного аperiodического импульса тока, в случае когда $t_H = T_{H(0,1;0,9)}$ и $t_C = T_{C0,01}$ график функции (4) имеет вид, показанный на рис. 2, и описывается выражением (5)

$$F\left(\frac{T_{C0,01}}{T_{H(0,1;0,9)}}\right) = 3,6454 \left(\frac{T_{C0,01}}{T_{H(0,1;0,9)}}\right)^{-0,861}, \quad (5)$$

где $\frac{T_{C0,01}}{T_{H(0,1;0,9)}} \geq 13,4$.

$F(T_{C0,9} / T_{H(0,1;0,9)})$

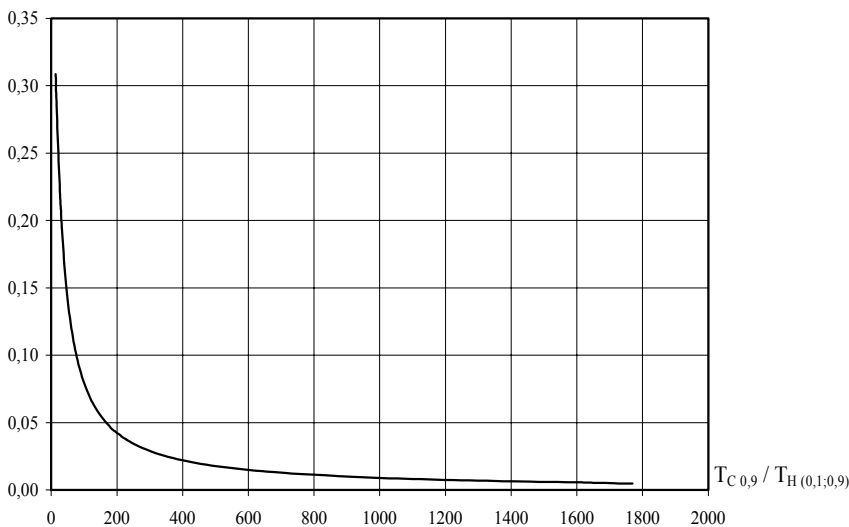


Рисунок 2 – Вид функции (4) для варианта аperiodического разряда ЕНЭ

Для варианта колебательного затухающего импульса тока график функции (4) приведен на рис. 3. В этом случае время спада $T_{H(0,1;0,9)}$ при расчетах определялось для первой полуволны тока.

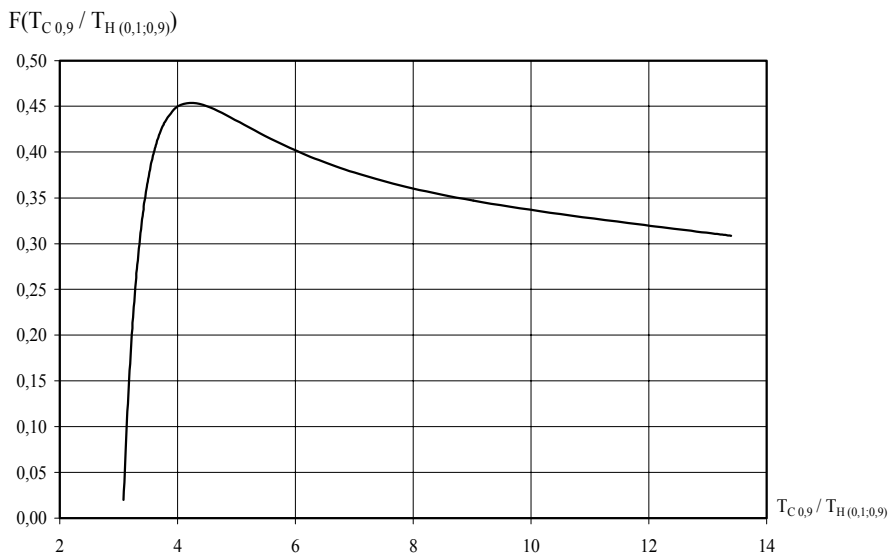


Рисунок 3 – Вид функции (4) для варианта колебательного разряда ЕНЭ

Если интеграл действия вычисляется за некоторое время $t < \infty$, то:

$$J(t_1) = \int_0^{t_1} i^2(t) dt = k(t_1) \frac{CU_C^2(0)}{2R_H}, \quad (6)$$

где $k(t_1) < 1$ – коэффициент уменьшения интеграла действия.

Произведем оценку значений $k(t_1)$. Расчеты показывают, что коэффициент $k(t_1)$ для аperiodического режима разряда ($r > 2$) при $t_1 = T_{C0,01}$ может быть с большой точностью принят равным 1, для колебательного режима – может быть определен с использованием графика, приведенного на рис. 4. Как видно из рисунка, для $r \geq 1$, коэффициент $k(T_{C0,01})$ также близок к 1 (максимальная погрешность 3 %). То есть при $r \geq 1$ для практических расчетов может быть принято, что интеграл действия, вычисленный за время спада значений импульса тока до уровня 0,01 от максимального значения, равен полному интегралу действия $J(T_{C0,01}) = J(\infty)$.

Рассмотрим возможность формирования А–составляющей тока молнии, используемой для испытаний на устойчивость технических средств к прямому поражению молнией (импульс вида 1). Данный импульс характеризуется следующими нормируемыми параметрами [2]: $T_{H(0,1;0,9)} = 50 \pm 5$ мкс,

$T_{C0,01} = 500 \pm 50$ мкс., $i_{\max} = 200 \pm 20$ кА, $J(T_{C0,01}) = 2 \cdot 10^6 \pm 4 \cdot 10^5$ А²·с. Можно показать, что для $T_{C0,01} / T_{H(0,1;0,9)} = 10$ безразмерные параметры принимают следующие значения $r = 1,775$; $\tau_{H(0,1;0,9)} = 0,6$; $I_{\max} = 0,398$. Подставим их в (3) и при $t_H = T_{H(0,1;0,9)}$ рассчитаем зависимость полного интеграла действия от максимального значения тока. График зависимости показан на рис. 5, кривая 1.

$k(T_{C0,01})$

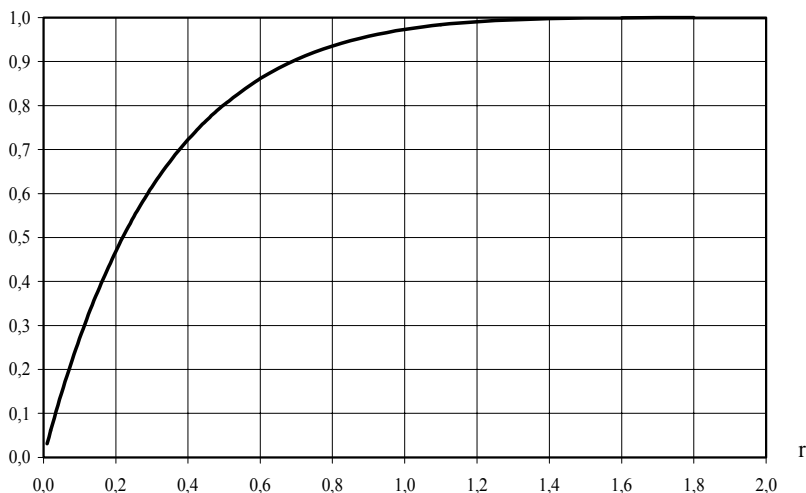


Рисунок 4 – Коэффициент уменьшения интеграла для колебательного режима разряда ЕНЭ

Аналогичная зависимость (рис. 5, кривая 2) рассчитана для А-составляющей тока молнии, используемой для испытаний на устойчивость технических средств к вторичным проявлениям тока молнии (импульс вида 2). Нормируемые параметры данного импульса имеют вид [2]: $T_{H(0,1;0,9)} = 2,85 \pm 0,285$ мкс, $T_{C0,01} = 500 \pm 50$ мкс., $i_{\max} = 200 \pm 20$ кА, $J(T_{C0,01}) = 2 \cdot 10^6 \pm 4 \cdot 10^5$ А²·с. Безразмерные параметры для $T_{C0,01} / T_{H(0,1;0,9)} = 175$ принимают следующие значения $r = 8,516$; $\tau_{H(0,1;0,9)} = 0,221$; $I_{\max} = 0,117$.

Как видно из рис. 5 для импульса вида 1 максимальному значению 200 кА соответствует $J = 6 \cdot 10^6$ А²·с (кривая 1), импульсу вида 2 – $J = 2,2 \cdot 10^6$ А²·с (кривая 2).

Таким образом, импульс тока вида 1 не может быть сформирован в традиционной схеме разряда ЕНЭ, показанной на рис. 1. Импульс тока вида 2 может быть сформирован с заданным интегралом действия в пределах заданных допусков.

$J \cdot 10^{-6}, A^2 \cdot c$

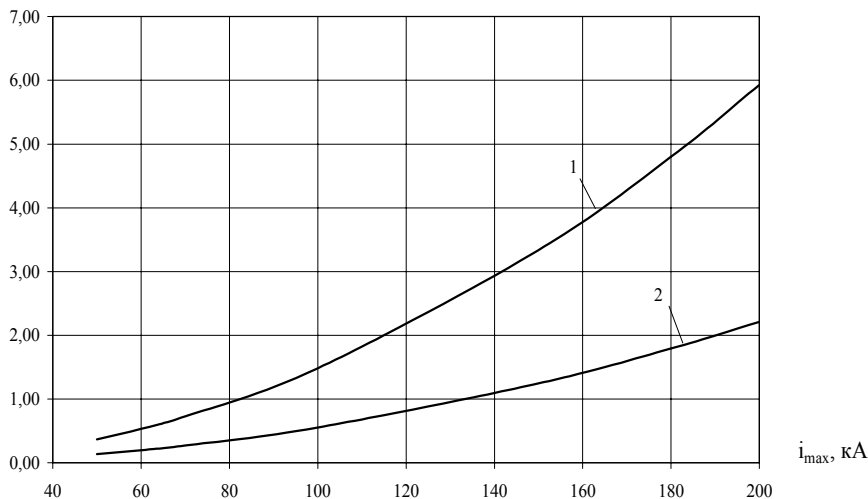


Рис. 5. Зависимость интеграла действия от максимального значения тока для А-составляющих тока молнии

В качестве примера рассмотрим формирование импульса тока вида 2 в активной нагрузке $R_H = 0,1$ Ом с помощью генератора импульсов тока, имеющего следующие параметры: зарядное напряжение $U_C(0) = 100$ кВ; емкость $C = 220$ мкФ; активное сопротивление $R = 0,05$ Ом; индуктивность $L = 0,5$ мкГн.

Расчеты, проведенные с использованием материалов работ [4, 5], показывают, что заданный импульс может быть сформирован в традиционной схеме разряда ЕНЭ, если в цепь разряда последовательно с нагрузкой ввести формирующие элементы: активное сопротивление $R_\Phi = 0,35$ Ом и индуктивность $L_\Phi = 0,25$ мкГн. Техническая реализация ЕНЭ и формирующих элементов с такими параметрами не представляет сложностей [7].

Моделирование переходного процесса с помощью Micro-Cap [8] показало, что параметры формируемого импульса тока в нагрузке принимают следующие значения: $T_{H(0,1;0,9)} = 2,87$ мкс., $T_{C0,01} = 508$ мкс., $i_{max} = 190,9$ кА, $J(T_{C0,01}) = 2,2 \cdot 10^6 A^2 \cdot c$. Как показывает расчет отклонение временных параметров не превышают 2 %, амплитудных – 5 %, интеграла действия – 10 % от заданных значений.

Выводы

- 1 Получены соотношения, связывающие временные контролируемые параметры импульса тока, его наибольшее значение и интеграл действия.

- 2 Показано, что при разряде ЕНЭ для варианта соотношения параметров $R/\sqrt{L/C} \geq 1$ для практических расчетов интеграл действия, вычисленный за время соответствующее спаду значений до уровня 0,01 может быть принят равным полному интегралу действия (погрешность не превышает 3 %).
- 3 Установлено, что импульс А-составляющей тока, используемый для имитации прямого поражения молнии не может быть сформирован в традиционной схеме с одним ЕНЭ в силу несоответствия нормированного интеграла действия реальному, имеющему место при заданных амплитудно-временных параметрах.
- 4 Определены безразмерные параметры разрядного тока ЕНЭ соответствующего временным параметрам А-составляющих тока молнии.

Приведенные материалы могут быть использованы для дальнейшего исследования схем испытательных устройств для формирования токов молнии.

Список литературы: 1. Aircraft Lightning environment and related test waveforms standard. ED 84. Report of Eurocae WG31 and SAE committee AE4L. 2. MIL-STD-464A. Department of defense interface standard. Electromagnetic environmental effects requirements for systems – AMSC F7489, Area EMCS. – 2002. – 121 P. 3. Квалификационные требования России. КТР-ВВФ / DO-160D/ED-14D/. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 23.0 Прямое воздействие молнии. С. 258 – 273. 4. Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы аperiodической формы // Электротехника та електроенергетика. – 2005. – № 1. – С. 65-69. 5. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств при различных способах задания контролируемых параметров испытательных импульсов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – № 17. – 2006. – С. 105-111. 6. Кужескин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с. 7. Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Хромов В.В. Методы и средства испытаний электрооборудования на стойкость к электромагнитным импульсам естественного и искусственного происхождения // Международный симпозиум по электромагнитной совместимости. ЭМС-93. (21-26 июня 1993 г.). Сборник научных докладов. Ч.3 – Санкт-Петербург: ЭЛТУ. – 1993. – С. 630-633. 8. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 368 с.

Поступила в редколлегию 18.04.2008.

О.Н.СИЗОНЕНКО, докт. техн. наук; **Э.И.ТАФТАЙ**; **Р.И.МАЛАЯ**;
Р.П.КОЛМОГорова; **Е.В.ЛИПЯН**; **А.С.ТОРПАКОВ**;

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ В РАСТВОРАХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ИХ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

Наведено результати експериментальних досліджень впливу режиму введення енергії високовольтних імпульсних розрядів в розчинах поверхнево-активних речовин на їх поверхневу активність – поверхневе натягнення, кут змочування, коефіцієнт розтікання і миючу дію .

In report the results of experimental researches of influence of energy input law of high-voltage impulsive discharges in solutions of superficially-active matters on their superficial activity - surface-tension, edge corner of moistening, coefficient of spreading and washing action are represented.

Постановка задачи. Наиболее эффективное воздействие на различные дисперсные системы, с целью изменения их свойств, как показал анализ отечественных и зарубежных источников, оказывают физико-химические методы [1-3]. Эти методы сочетают различные виды волновых воздействий (акустическое, гидроакустическое, вибросейсмическое, электромагнитное, гидроимпульсное и электроразрядное) с химическими, которые предусматривают применение различных поверхностно-активных веществ (ПАВ). ПАВ улучшают агрегативную устойчивость и структурно-механические свойства суспензий, вызывают понижение твердости горных пород и облегчают тем самым их разрушение, обеспечивают возможность увеличения механической скорости и проходки долот, создают условия самозатачивания его режущей кромки при бурении скважин и т.д..

В работах [4-6] показано, что при электроразрядном (ЭР) воздействии на пористые среды использование в качестве рабочей среды растворов ПАВ приводит к синергетическому эффекту в увеличении проницаемости этих сред. При этом, в работах [7-9] было установлено, что высоковольтный ЭР в растворах ПАВ усиливает их способность удалять вязко-пластичные отложения с твердых поверхностей и предотвращать их сорбцию. Эти работы показывают, что физико-химическое воздействие высоковольтного ЭР и раствора ПАВ, сочетающее циклическое импульсное нагружение и адсорбционную способность ПАВ позволит управлять поверхностными явлениями в дисперсных системах. Для этого необходимо установить закономерности связи параметров ЭР с основными показателями свойств ПАВ.

Целью данной работы является исследование влияния режима ввода энергии высоковольтных ЭР в растворах ПАВ на поверхностные явления и

обменные процессы на межфазных границах многофазных сред.

Методика эксперимента. Для исследований были выбраны представители анионных (Сульфонол концентрацией 4 г/дм^3), катионных (Катапин концентрацией 6 г/дм^3), неионогенных (АФ₉ – 12 концентрацией 1 г/дм^3) типов ПАВ и смесь анионных и неионогенных ПАВ (многофункциональная композиция НМК-РХ концентрацией 3 г/дм^3).

Экспериментальные исследования выполнялось на стенде, электрическая схема которого представлена на рис. 1

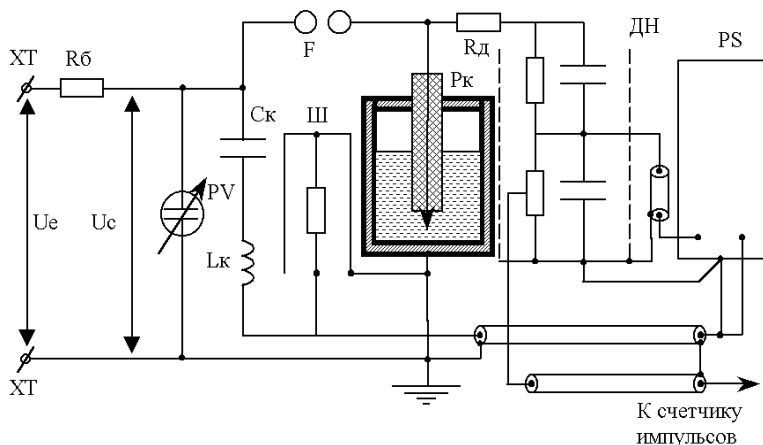


Рисунок 1 – Электрическая схема контура:

Ue – напряжение источника питания; Rб – балластный резистор; Ск – рабочая емкость разрядного контура; Uc – рабочее напряжение; PV – киловольтметр; Lк – индуктивность разрядного контура; Ш – коаксиальный шунт; Рк – рабочая камера; Rд – демпфирующий резистор; ДН – делитель напряжения; PS – запоминающий осциллограф

Исследуемый водный раствор ПАВ с заданной концентрацией, в объеме 1 дм^3 , заливался в нержавеющую разрядную камеру, которая закрывалась крышкой. Камера была оборудована электродной системой острие – плоскость. Межэлектродный промежуток подбирался с целью обеспечения разрядов близких к критическим. Режим ввода энергии в плазменный канал разряда варьировался параметрами элементов разрядного контура. В диапазоне варьируемых значений элементов разрядного контура неизменными были запасаемая энергия, равная 1 кДж, и индуктивность контура, которая составляла 4 мкГн. При этом емкость изменялась ступенями в диапазоне от 1,2 до 4,8 мкФ, а напряжение самопробоя разрядника – от 21 до 41 кВ. Число разрядов для всех растворов ПАВ было неизменным и составляло $n = 300$, при

этом забор проб из разрядной камеры осуществлялся при воздействии 50; 100; 200 и 300 разрядов. В процессе воздействия производилась регистрация разрядных токов и напряжений на запоминающий осциллограф с последующей обработкой данных на компьютере. Варьирование значениями элементов и параметров разрядного контура позволяло изменять скорость нарастания тока от $4,8 \cdot 10^8$ до $2,5 \cdot 10^9$ А/с, а длительность первой полуволны тока от 9,2 до $17 \cdot 10^{-6}$ с, тем самым, изменяя режим ввода энергии в плазменный канал разряда.

Исследование влияния ЭР в растворах ПАВ на поверхностные явления и обменные процессы проводилось методом экспериментального измерения поверхностного натяжения, моющей способности, краевого угла смачивания, а также расчетной оценки коэффициента растекания по Гаркинсу.

Для измерения поверхностного натяжения (σ) на границе жидкость (раствор ПАВ) – газ (воздух) был выбран метод счета капель с использованием сталагмометра [10]. В основе метода лежит условие отрыва капли под действием собственного веса. Для вычисления поверхностного натяжения использовали стандартную жидкость с известным значением σ . В качестве стандартной жидкости для водорастворимых ПАВ использовали воду. Величину поверхностного натяжения σ рассчитывали по формуле:

$$\sigma = \frac{\sigma_0 \cdot \rho_u \cdot n_0}{\rho_0 \cdot n_u}, \quad (1)$$

где σ_0 – поверхностное натяжение воды при исследуемой температуре, мН/м;

ρ_u – плотность исследуемого раствора, кг/м³;

n_0 – число капель воды;

ρ_0 – плотность воды, кг/м³;

n_u – число капель исследуемого раствора.

Принимая ρ_0 и ρ_u близкими по значению, применяли упрощенную формулу:

$$\sigma = \frac{\sigma_0 \cdot n_0}{n_u}, \quad (2)$$

При определении краевого угла смачивания использовали метод измерения линейных размеров капли, нанесенной на поверхность [11]. Суть метода заключается в фотографировании цифровым фотоаппаратом изображения капли, увеличенного с помощью микроскопа МПБ-3. Затем цифровое изображение переносилось в графический редактор с дальнейшим измерением диаметра растекания капли и ее высоты. Расчет значения величины краевого угла смачивания θ производился по формуле:

$$\theta = \arccos \left[\frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - h^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2} \right], \quad (3)$$

где d – диаметр растекания капли, м;
 h – высота капли, м.

По экспериментально полученным значениям σ и θ определялся коэффициент растекания S по Гаркинсу – разность между работой адгезии W_a и работой когезии W_k [11], который характеризует процесс смачивания

$$S = W_a - W_k = \sigma \cdot (\cos \theta - 1) \quad (4)$$

Коэффициент растекания связан со строением жидкостей и с характером ориентации их молекул на границе раздела фаз, при полном смачивании $S \rightarrow 0$. Из уравнения (4) следует, что чем меньше работа когезии жидкости (меньше σ при постоянном $\cos \theta$), тем легче эта жидкость смачивает различные твердые тела. При положительном значении коэффициента жидкость растекается по поверхности, при отрицательном – не растекается.

Моющую способность исследуемых веществ по отношению к асфальто-смоло-парафиновым отложениям нефти определяли по методике "холодного" цилиндра, разработанной во ВНИИнефть г. Москва и изложенной ранее в [7]. Величину эффективности моющей способности \mathcal{E}_m определяли по формуле:

$$\mathcal{E}_m = \left(\frac{m_2}{m_1} \right) \cdot 100\%, \quad (5)$$

где m_2 – масса отмытого осадка, г;

m_1 – масса осадка, образовавшегося на поверхности «холодного» цилиндра, г.

Основные результаты. Ранее, в работах [4, 7-9] было установлено, что электрическая энергия, которая выделяется в разрядном промежутке, оказывает влияние на физико-химические свойства раствора, как на стадии формирования канала, так и на стадии выделения энергии в канале разряда. Экспериментально установлено, что в используемой электродной системе острие – плоскость при межэлектродном промежутке от 33 до 36 мм, средний разброс отношения долей энергии, затраченной на каждую из стадий, лежит в пределах от 0,896 до 1,12. При этом удельное электрическое сопротивление исследуемых растворов ПАВ было различным от $\rho = 5,98 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (Катапин), $\rho = 10,2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (АФ₉-12), $\rho = 10,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (Сульфенол) до $\rho = 38,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (НМК-РХ). Хорошая стабильность отношений долей энергии дает возможность производить сравнение электроразрядного воздействия для данной

группы растворов ПАВ при наработке одинакового числа разрядов.

Для всех исследуемых растворов при разных режимах ввода энергии за счет изменения рабочего напряжения и емкости накопителя при постоянной индуктивности контура сохраняется форма и длительность первого импульса мощности, и незначительно (в пределах разброса до 10 %) изменяется амплитуда (см. рис. 1-4). На этих же рисунках приведены данные о влиянии удельной энергии воздействия при изменении режима ввода энергии на изменение поверхностного натяжения растворов ПАВ на границах с воздухом.

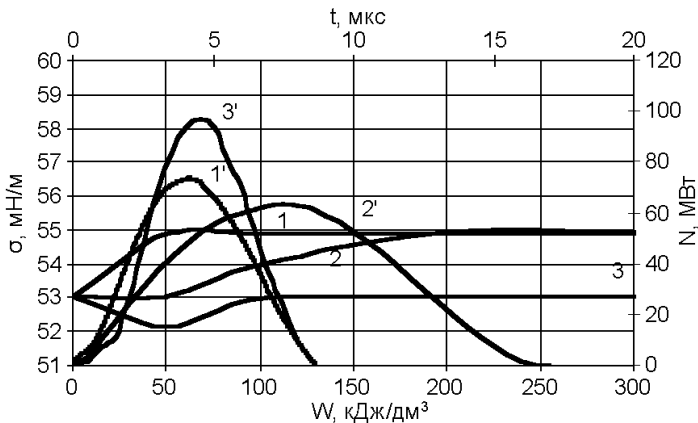


Рисунок 2 – Изменение первого полупериода электрической мощности во времени (1',2',3') и зависимость поверхностного натяжения Катапина от удельной энергии воздействия (1,2,3) при: 1– U= 30 кВ, 2 – U= 21 кВ, 3 – U= 41 кВ

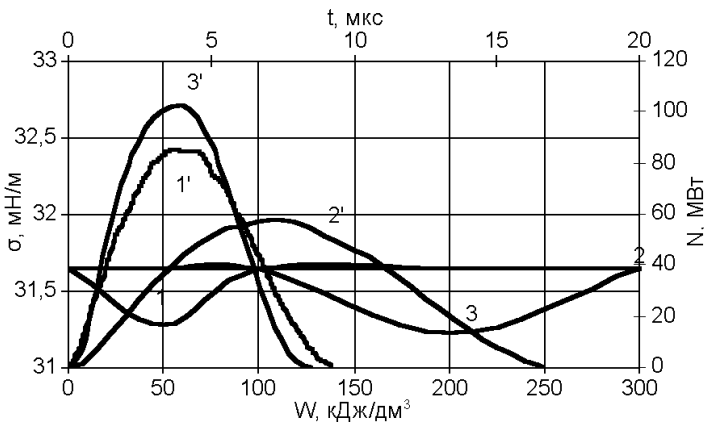


Рисунок 3 – Изменение первого полупериода электрической мощности во времени (1',2',3') и зависимость поверхностного натяжения АФ₉-12 от удельной энергии воздействия (1,2,3) при: 1– U= 30 кВ, 2 – U= 21 кВ, 3 – U= 41 кВ

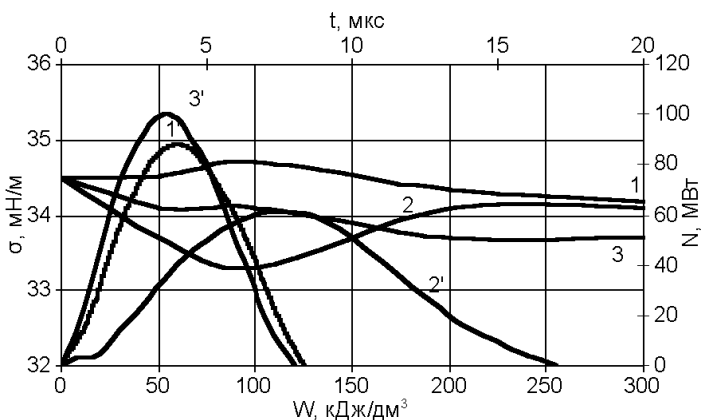


Рисунок 4 – Первый полупериод электрической мощности (1',2',3'), зависимость поверхностного натяжения Сульфанола от удельной энергии воздействия (1,2,3) при: 1– U= 30 кВ, 2 – U= 21 кВ, 3 – U= 41 кВ

Анализ результатов исследований показал, что ЭР воздействие на раствор Катапина (см. рис. 2, кривая 1) при рабочем напряжении 30 кВ ($C = 2,4$ мкФ) удельной энергией 50 кДж/дм^3 приводит к увеличению свободной поверхностной энергии системы, что проявляется в возрастании поверхностного натяжения раствора Катапина на границе с воздухом на $\sim 4 \%$. Дальнейшее увеличение удельной энергии до 100, 200 и 300 кДж/дм^3 практически не приводит к изменению установившегося поверхностного натяжения.

Изменение режима ввода энергии путем снижения рабочего напряжения до 21 кВ и увеличения емкости накопителя до 4,8 мкФ привело к существенному снижению скорости ввода энергии и увеличению длительности импульса приблизительно в 2 раза, но незначительному снижению амплитуды импульса мощности $\sim 5\%$. При этом электроразрядное воздействие на раствор Катапина удельной энергией 50 кДж/дм^3 не оказывает влияния на свободную поверхностную энергию раствора (рис. 2, кривая 2), система остается устойчивой. Количественные изменения наблюдаются лишь при возрастании удельной энергии воздействия до 100 кДж/м^3 и приводят к увеличению поверхностного натяжения на $\sim 2 \%$, а значит и свободной поверхностной энергии системы, возрастание которой продолжается также при последующем импульсном воздействии до 200 кДж/м^3 на $\sim 4 \%$ и сохранении этого показателя при 300 кДж/м^3 .

Увеличение свободной поверхностной энергии системы целесообразно для целей торможения процессов смачивания и адсорбционных процессов. Для задач интенсификации этих процессов необходимо снижение поверхностной энергии системы и, следовательно, ее поверхностного натяжения.

Увеличение рабочего напряжения до 41 кВ (рис. 2, кривая 3) при емко-

сти 1,2 мкФ показало возможность снижения поверхностного натяжения на ~ 2 %, при удельной энергии 50 кДж/дм³, однако последующее увеличение числа импульсов ведет уже к росту свободной поверхностной энергии системы, наблюдается увеличение поверхностного натяжения на те же ~ 2 %, возвращаясь к исходной величине, наблюдаемой до начала воздействия

При электроразрядном воздействии на раствор АФ₉ – 12 (рис. 3, кривая 1) удельной энергией 50 кДж/дм³ (при рабочем напряжении 30 кВ) происходит снижение поверхностного натяжения приблизительно на 2 %. Однако дальнейшее повышение удельной энергии воздействия до 100 кДж/дм³ приводит к росту свободной поверхностной энергии раствора и поверхностное натяжение системы на границе с воздухом повышается до исходного состояния.

Изменение режима ввода энергии путем снижения рабочего напряжения до 21 кВ и увеличения емкости накопителя до 4,8 мкФ не нарушает равновесного состояния системы раствора АФ₉ – 12 во всем диапазоне введенной энергии от 50 до 300 кДж/дм³ (рис. 3, кривая 2).

Удельная энергия воздействия 50 кДж/дм³ при увеличении рабочего напряжения до 41 кВ (рис. 3, кривая 3) и снижении емкости до 1,2 мкФ не приводит к изменению состояния поверхностной энергии системы, а при увеличении удельной энергии до 100 кДж/дм³ начинается сдвиг равновесия в сторону снижения свободной внутренней энергии системы: поверхностное натяжение снижается на ~ 2 %. Однако, это состояние неустойчиво и уже дальнейший рост удельной энергии до 200 кДж/дм³ вызывает обратный процесс и система начинает наращивание свободной поверхностной энергии, выравнивание поверхностного натяжения к возвращению до исходного равновесного значения.

Влияние ЭР воздействия на поведение анионоактивного ПАВ – Сульфанола представлено на рис. 4. В этом случае каждый из используемых режимов ввода энергии приводит к снижению поверхностного натяжения при воздействии 50 кДж/дм³, наибольшая активность снижения свободной поверхностной энергии раствора достигает ~ 2,5 % при напряжении 21 кВ (рис. 4, кривая 1).

Менее выражен спад поверхностного натяжения при снижении напряжения до 30 кВ (кривая 2) и повышении до 41 кВ (кривая 3) – 0,9 % и 0,8% соответственно. При этом наблюдается монотонно убывающая зависимость с увеличением удельной энергии до 200 кДж/дм³ и практически линейна при дальнейшем ее увеличении (до 300 кДж/дм³), что дает основание для прогнозирования поведения этой системы. Тогда как после снижения свободной поверхностной энергии Сульфанола (кривая 1) небольшим количеством удельной энергии (50 кДж/дм³) дальнейшее воздействие (до 200 кДж/дм³) приводит к увеличению свободной поверхностной энергии практически до исходной величины. После этого увеличение энергии до 300 кДж/дм³ уже не

изменяет равновесия системы и возросшее при 200 кДж/дм^3 поверхностное натяжение раствора Сульфанола остается неизменным. Аналогично Сульфолу ведет себя НМК-РХ (рис. 5), только при 21 кВ наблюдается более ощутимое снижение свободной поверхностной энергии раствора до $\sim 10\%$ (кривая 2) при воздействии 100 кДж/дм^3 , а дальнейшее воздействие (до 300 кДж/дм^3) приводит к росту свободной поверхностной энергии, но так и не достигает исходной величины.

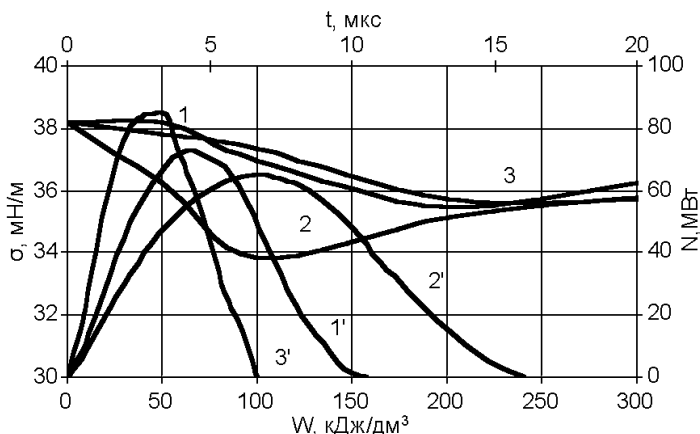


Рисунок 5 – Первый полуцикл электрической мощности (1',2',3'), зависимость поверхностного натяжения НМК-РХ от удельной энергии воздействия (1,2,3) при: 1 – $U = 30 \text{ кВ}$, 2 – $U = 21 \text{ кВ}$, 3 – $U = 41 \text{ кВ}$.

О том, что ЭР воздействие приводит к изменению поверхностной энергии растворов ПАВ свидетельствуют результаты исследований свободной поверхностной энергии этих ПАВ на границах с твердой поверхностью. На рисунках 6-9 представлены результаты влияния удельной энергии ЭР воздействия и режима ввода энергии на изменение коэффициента растекания и моющей способности. Эти данные коррелируют с описанными выше данными по изменению поверхностного натяжения растворов. При снижении поверхностного натяжения снижается краевой угол смачивания и увеличивается коэффициент растекания, Это свидетельствует о том, что в результате ЭР система переходит в состояние с меньшей энергией Гиббса. Жидкость, как известно, растекается, если ее межмолекулярные связи разрушаются в результате адгезии, то есть стремления системы к уменьшению поверхностной энергии [12]. Увеличение свободной поверхностной энергии раствора Катапина (рис. 6) в результате ЭР воздействия на каждом из исследуемых режимов приводит к снижению коэффициента растекания.

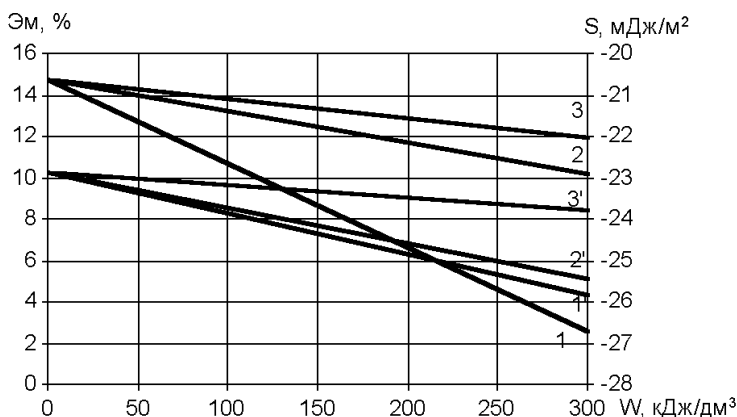


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента растекания (1',2',3') и моющего действия Катапина (1,2,3) от удельной энергии воздействия при напряжении:
1 – U= 30 кВ, 2 – U= 21 кВ, 3 – U= 41 кВ

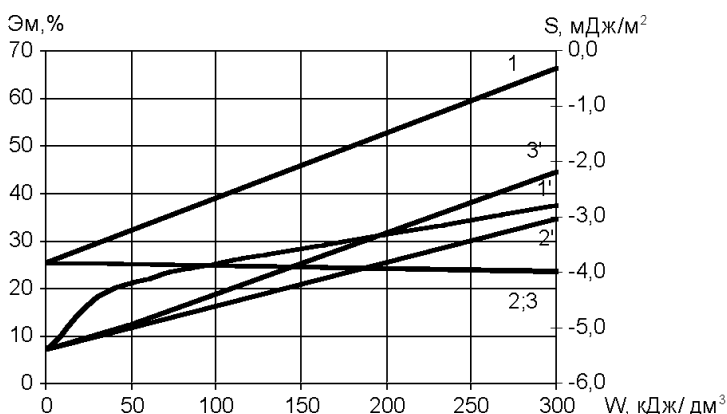


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента растекания (1',2',3') и моющего действия АФ₉-12 (1,2,3) от удельной энергии воздействия при напряжении:
1 – U= 30 кВ, 2 – U= 21 кВ, 3 – U= 41 кВ

Следствием изменения поверхностной энергии исследуемых растворов ПАВ, согласно теории Ребиндера [13], является изменение их способности удалять отложения с твердых поверхностей – моющего действия. В результате увеличения свободной поверхностной энергии, Катапин, после ЭР воздействия на всех режимах, ухудшает моющее действие (рис. 6). Эффективность снижения поверхностной энергии растворов АФ₉ – 12 (рис. 7), Сульфанола (рис. 8) и НМК-РХ (рис. 9) проявляется в усилении их способности удалять отложения с твердых поверхностей.

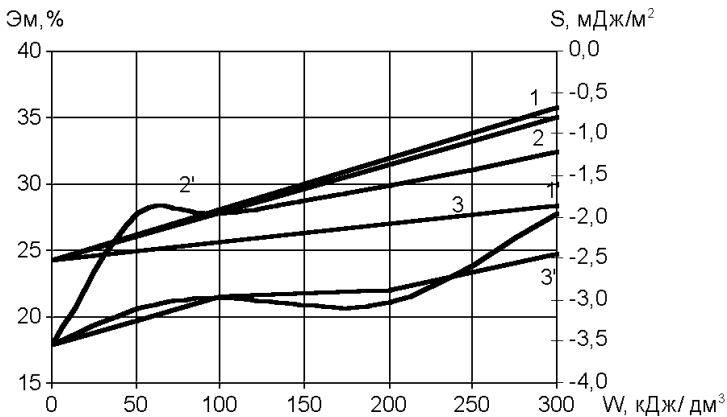


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента растекания (1',2',3') и моющего действия Сульфанола (1,2,3) от удельной энергии воздействия при напряжении:
1 – U = 30 кВ, 2 – U = 21 кВ, 3 – U = 41 кВ

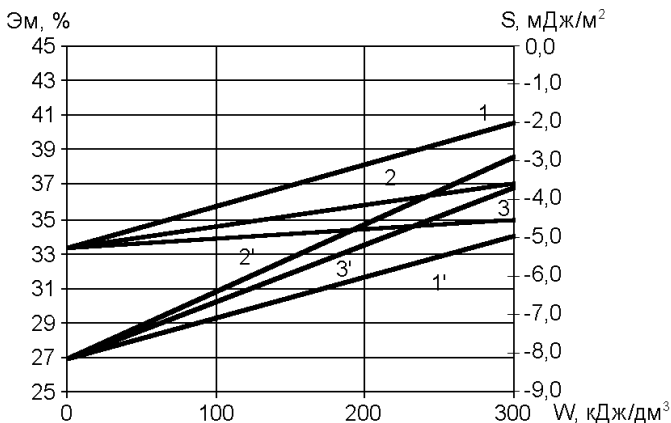


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента растекания (1',2',3') и моющего действия НМК-РХ (1,2,3) от удельной энергии воздействия при напряжении:
1 – U = 30 кВ, 2 – U = 21 кВ, 3 – U = 41 кВ

Выводы. Установлено, что высоковольтные электрические разряды в растворах ПАВ влияют на поверхностные явления и обменные процессы на межфазных границах. Установлена связь между режимом ввода энергии высоковольтных ЭР и изменением поверхностного натяжения, краевого угла смачивания, коэффициента растекания и моющего действия в растворах ПАВ. ЭР воздействие в диапазоне исследуемых режимов ввода приводит к изменению поверхностной энергии исследуемых растворов ПАВ. Наиболее эффективно воздействие проявляется в растворах Сульфанола (анионного

ПАВ), АФ₉ – 12 (неионогенного ПАВ) и НМК-РХ (смеси анионных и неионогенных ПАВ) при длительности импульса мощности не менее $17 \cdot 10^{-6}$ с при удельной энергии воздействия в диапазоне от 50 до 100 кДж/дм³.

Список литературы: 1. Пат. 4506734 США, МКИ² E21 B43/26. Fracturing Fluid Breaker system which is activated by fracture closure / K.G.Nolte. – Заявл. 5.6.84; Опубл. 11.10.85; Бюл № 22. 2. Пат. 3971317 США, МКИ² E21 B43/26. Detonation system and method / F.S.Gemmell, M.A.Fried. – Заявл. 12.2.74; Опубл. 27.07.76; Бюл №5. 3. *Круглицкий Н.Н., Горovenko Г.Г., Малишевский П.П.* Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях. – Киев: Наукова думка, 1983. – 154 с. 4. *Сизоненко О.Н.* Синергетический эффект в изменении фильтрационных характеристик пористых насыщенных жидкостью сред при электроразрядном воздействии // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Вып.42. – Днепропетровск: Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – 2003. – С.173-186. 5. *Сизоненко О.Н., Шерстнев Н.М.* Особенности изменения фильтрационных характеристик пород-коллекторов при реагентно-импульсном воздействии // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 4. – С. 49-51. 6. *Сизоненко О.Н.* Электроразрядное воздействие на структуру капиллярно-пористых материалов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Вып. 69. – Днепропетровск: Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – 2007. – С. 142-153. 7. *Сизоненко О.Н., Колмогорова Р.П., Тафтай Э.И.* и др. Влияние высоковольтного электрического разряда в растворах ПАВ на их моющие и ингибирующие свойства // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 2. – С. 53-55. 8. *Syzonenko O.M., Raychenko O.I.* Transformations in Hydrocarbon-Mineral Mixture Contacting with Tamol Solution at High-Voltage Electric Discharge // High Temperature Materials and Processes. – 2007. – Vol. 26, No. 2. – P. 131-137. 9. *Сизоненко О.Н., Райченко А.И.* Влияние высоковольтного электрического разряда на поведение композиции углеводородно-минеральная смесь / раствор ПАВ // Наукові нотатки: Міжвузівський зб. наук. Праць. – Луцьк: РВВ ЛДТУ. – 2007. – Вип. 20. – С. 447-452. 10. Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение / Под ред. *А.А.Абрамзона.* – Л.: Химия, 1988. – 200 с. 11. *Абрамзон А.А.* Поверхностно-активные вещества: свойства и применение. – Л.: Химия, 1981. – 304 с. 12. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1988. – 464 с. 13. *Ребиндер П.А.* Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия: Избранные труды. – М.: Наука, 1978. – 386 с.

Поступила в редколлегию 29.02.2008

УДК 621.314

О.В.ХВОЩАН; Ю.И.КУРАШКО, канд.техн.наук; **В.В.ЛИТВИНОВ**;
ИИПТ НАН Украины, Николаев

АНАЛИЗ СХЕМ ЗАРЯДНОЙ ЦЕПИ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОГРУЖНЫХ СКВАЖИННЫХ УСТРОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ

Проведено аналіз схем зарядного кола занурювальних свердловинних пристроїв, що відповідають умовам малих габаритних розмірів, високої робочої температури (до 373 К і вище), підвищених потужності і ККД пристрою.

The analysis of charts of charge circuit of submersible mining hole devices, which respond to the conditions of small overall sizes, high working temperature (to 373 K and higher), advanced power and efficiency is conducted.

Введение. Электроразрядный метод обработки скважин в настоящее время достаточно широко используется в промышленности, так как сочетает в себе простоту использования, селективность воздействия, высокую эффективность при низкой стоимости в сравнении с другими методами обработки. Одним из направлений развития метода является дальнейшее совершенствование высоковольтного оборудования для получения электрогидравлического эффекта в скважинных условиях.

Современные погружные скважинные устройства должны отвечать следующим требованиям:

- иметь малые габариты погружаемой в скважину части, что связано с малым диаметром обсадных труб скважины, возможными искривлениями ее ствола, удобством монтажа и транспортировки устройства;
- элементная база погружной части должна стабильно и надежно функционировать в условиях повышенной (~ 373 K) температуры и высокого (до 50 МПа) гидростатического давления, соответствующих значительным (~ 5 км) глубинам залегания продуктивных нефтяных пластов;
- достигать высокой частоты повторения разрядов накопителя для повышения скорости обработки скважины, что обеспечивается увеличением мощности заряда накопителя и коэффициента полезного действия (КПД) зарядной цепи.

Целью настоящей работы является анализ схем зарядной цепи погружных скважинных устройств для определения оптимального варианта, соответствующего предъявляемым к устройствам требованиям.

Особенностью зарядной цепи погружных скважинных устройств является наличие в ее составе каротажного геофизического кабеля, соединяющего наземную и погружную части устройства. Наивысших значений КПД зарядной цепи и передаваемой в накопитель мощности можно достичь, передавая в кабель постоянное напряжение, однако низкое рабочее напряжение кабеля (1000 В) ведет к необходимости использовать многоступенчатую схему преобразования энергии в зарядной цепи [1]. Структурная схема погружного скважинного устройства приведена на рис. 1.

В наземной части устройства (источнике питания) промышленное напряжение 380 В, 50 Гц выпрямляется трехфазным выпрямителем В1 и преобразуется в переменное с частотой 10-15 кГц транзисторным инвертором напряжения ИН1. Регулирование передаваемой мощности осуществляется изменением напряжения в пределах 500-1000 В трансформатором Тр1. Далее

напряжение выпрямляется выпрямителем В2 и передается по кабелю в погружную часть устройства.

В погружной части постоянное напряжение преобразуется в переменное инвертором напряжения ИН2 и повышается высоковольтным трансформатором Тр2, при этом промежуточная частота преобразования напряжения выбирается исходя из необходимости обеспечить малые габариты Тр2 при его допустимом перегреве [2]. Далее напряжение выпрямляется выпрямителем В3 и осуществляется зарядка емкостного накопителя ЕН до 30 кВ.

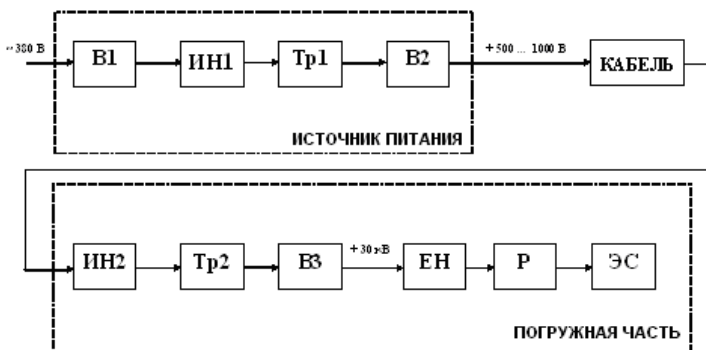


Рисунок 1 – Структурная схема погружного электроразрядного комплекса повышенной мощности

Как было указано выше, особенностью зарядной цепи является наличие кабеля, характеристики которого, в основном, определяют КПД и режим работы устройства. При использовании схемы с передачей по кабелю постоянного напряжения основное влияние на передаваемую мощность и КПД оказывает активное сопротивление жил кабеля и, в меньшей мере, его распределенная емкость. Учитывая прямую зависимость активного сопротивления кабеля от его длины, которая может варьироваться в достаточно широких пределах (2-5 км), и сечения жилы, определяемого маркой кабеля [3], вносимое в зарядную цепь активное сопротивление кабеля может препятствовать работе устройства в требуемом технологическом режиме. Распределенная емкость кабеля в общем случае может ухудшить энергетические характеристики устройства за счет проникновения в кабель переменной составляющей напряжения повышенной частоты от преобразователя, расположенного в погружной части устройства.

Исследование различных вариантов зарядной цепи производилось при помощи пакета программ моделирования электрических цепей Orcad 9.2. Электрическая схема рассматриваемой зарядной цепи приведена на рис. 2. В схеме наземный источник питания представлен источником постоянного напряжения V1, кабель – цепочечной схемой замещения из 10 Т-образных

звеньев. Инвертор напряжения выполнен на транзисторах Q1-Q4, частота выходного напряжения – 10 кГц. Высоковольтный трансформатор представлен схемой замещения с элементами L12, R14, C13, величины которых взяты из опыта проектирования трансформаторов для более ранних погружных устройств. Рассматривались два варианта схем выпрямления: с диодным мостом либо со схемой удвоения напряжения. На рис. 2 изображен еще один возможный вариант – с включением в качестве токоограничивающего элемента индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП). Для уменьшения влияния распределенной емкости кабеля на характеристики устройства в зарядную цепь введен фильтр C11.

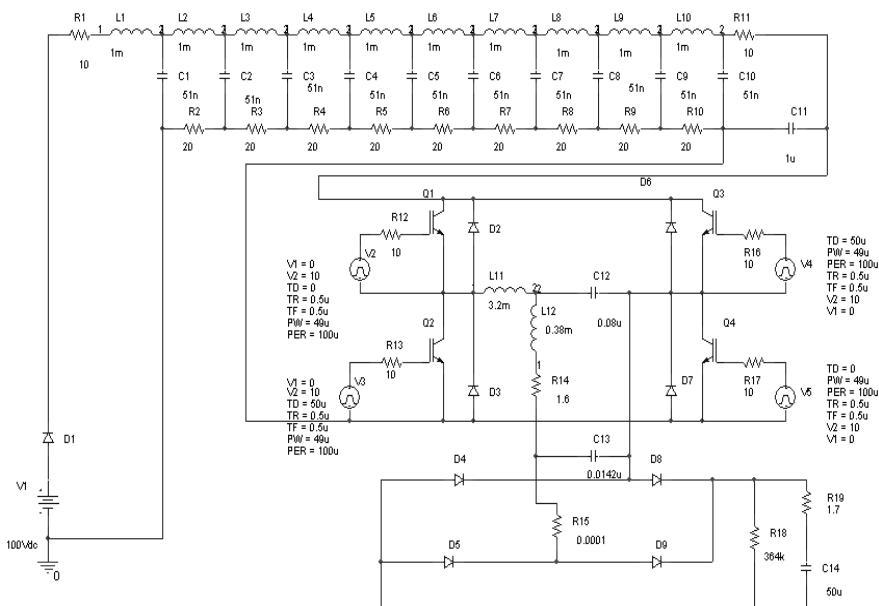


Рисунок 2 – Электрическая схема зарядной цепи погружного устройства повышенной мощности

Результаты исследований. Ранее [2] было выяснено, что для передачи в емкостной накопитель наибольшей мощности через соединительный кабель при использовании ИЕП следует придерживаться соотношения $R_x = \sqrt{L11/C12}$, где R_x – суммарное сопротивление жил кабеля, Ом. Учитывая сложность настройки ИЕП в рабочих условиях, для проведения теоретических исследований было принято решение принять $L11 = 3,2$ мГн, $C12 = 0,08$ мкФ, что соответствует его настройке на $R_x = 200$ Ом. Результаты исследований режимов работы зарядной цепи погружного устройства с ис-

пользованием ИЕП приведены на рис. 3. На этом и дальнейших графиках P_3 – мощность зарядки накопительной емкости, которая определяет режим работы погружного устройства (возможную частоту следования разрядных импульсов); КПД – коэффициент полезного действия рассматриваемой зарядной цепи; $I_{тр}$ – средний ток высоковольтного трансформатора, определяющий сечение провода его обмоток и, соответственно, габаритные размеры.

Одной из задач, которые требуют решения, является передача в нагрузку полезной мощности 1 кВт, что обеспечит режим заряда накопительной емкости $2,4 \cdot 10^{-6}$ Ф до напряжения $3 \cdot 10^4$ В за время 1 с и частоту следования разрядных импульсов 1 Гц. Как видно из рис. 3а, используя зарядную схему с ИЕП, этого режима можно достичь при сопротивлении жил кабеля менее 160 Ом, при этом КПД цепи – 0,34. Введение в схему дополнительной емкости фильтра $C_{11} = 1-2$ мкФ (рис. 3, б) увеличивает P_3 на 20 %, КПД – на 25 %. Положительными чертами схемы является низкое значение среднего тока, протекающего через трансформатор, его близкая к синусоидальной форма, отсутствие выбросов тока на элементах схемы в начале зарядного процесса.

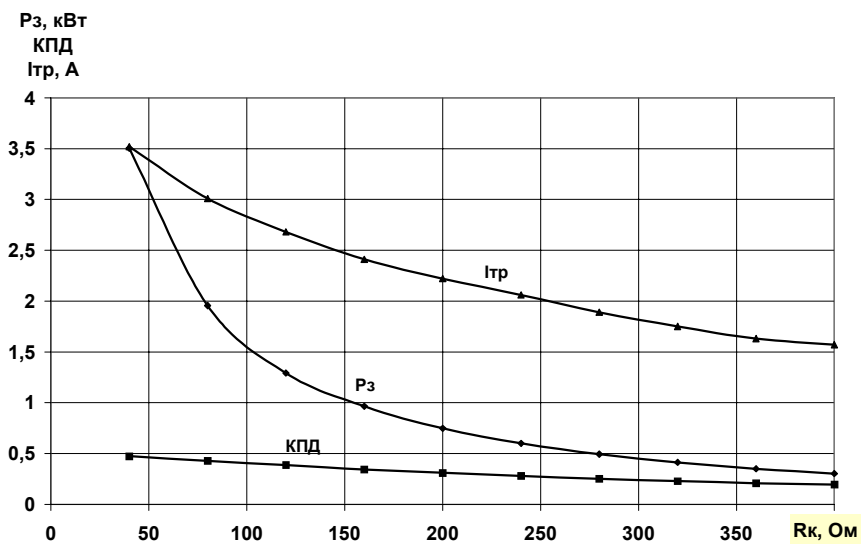
Рассмотрение зарядной схемы с использованием удвоителя напряжения представляет интерес в связи с возможностью снижения габаритов высоковольтного трансформатора за счет уменьшения числа витков его вторичной (высоковольтной) обмотки. Характеристики зарядной цепи представлены на рис. 4.

Как следует из рис. 4, а, выбор емкости схемы удвоения менее 200 пФ (при симметричной схеме удвоения) ведет к существенному уменьшению зарядной мощности. В то же время, введя в схему дополнительную емкость фильтра ~ 2 мкФ (рис. 4, б), уже при емкости схемы удвоения 120 пФ можно достичь зарядной мощности 1 кВт при активном сопротивлении жил кабеля 200 Ом. КПД зарядной цепи при этом ~ 40 %.

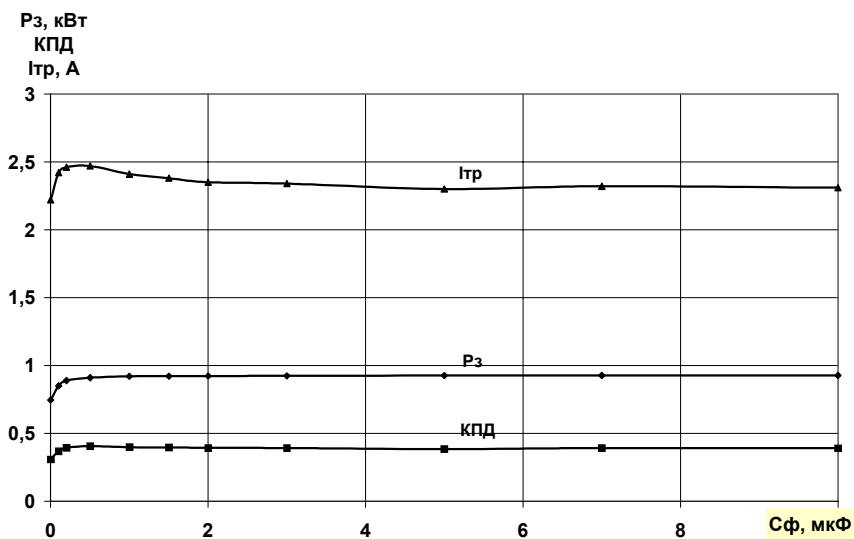
Третьей рассматриваемой схемой стала схема зарядной цепи с использованием в качестве высоковольтного выпрямителя диодного моста, при этом токоограничение в цепи осуществляется лишь сопротивлением соединительного кабеля. Характеристики цепи приведены на рис. 5.

Как следует из рис. 5, а, $P_3 = 1$ кВт в схеме с высоковольтным выпрямителем на диодном мосте можно получить при сопротивлении жил кабеля ~ 180 Ом. КПД зарядной цепи в этом случае 0,33. Использование дополнительной емкости фильтра (рис. 5, б) позволяет достичь требуемой мощности при $R_k = 200$ Ом и увеличить КПД до 0,4.

Сравнивая рассмотренные схемы зарядки, следует отметить практически идентичность их энергетических характеристик. Поэтому практический выбор зарядной схемы, используемой в погружных скважинных устройствах, следует производить на основе оценки положительных и отрицательных свойств схем (см. таблицу).



а)



б)

Рисунок 3 – Характеристики зарядной цепи погружного устройства с использованием ИЕП

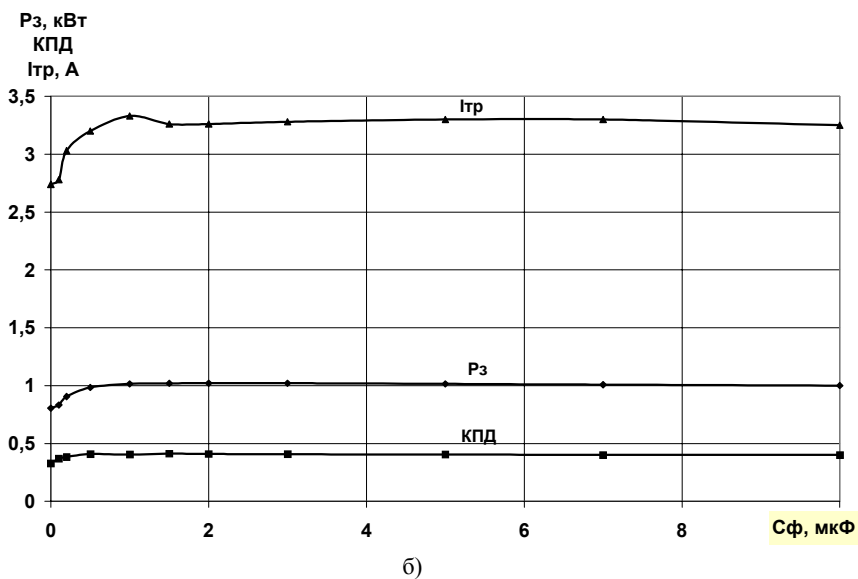
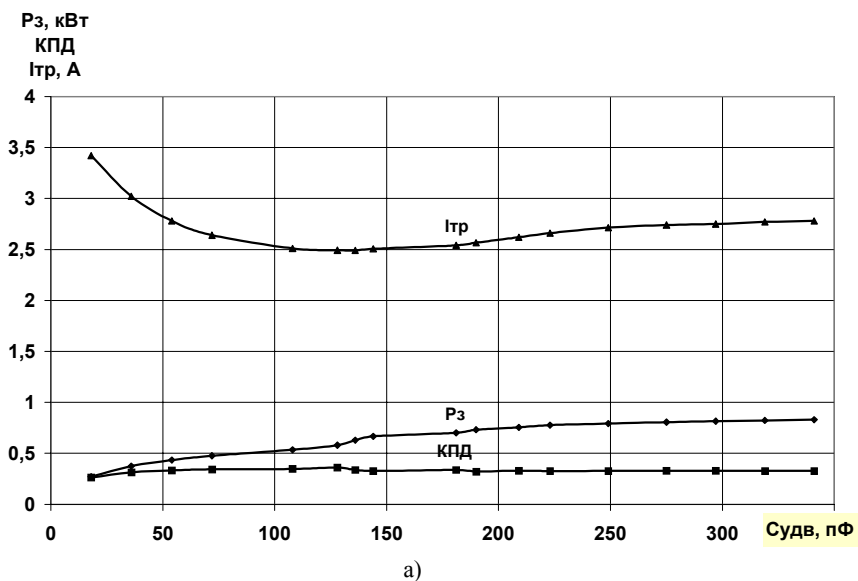
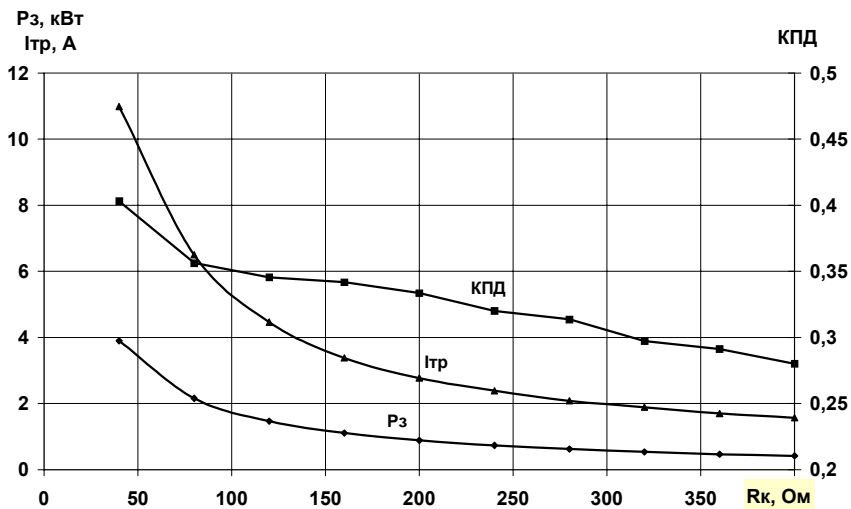
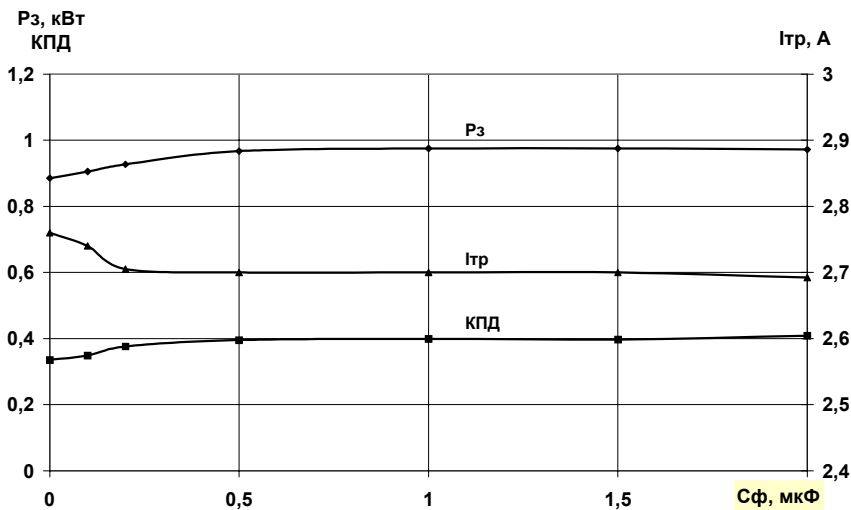


Рисунок 4 – Характеристики зарядной цепи погружного устройства при использовании схемы выпрямления с удвоителем напряжения



а)



б)

Рисунок 5 – Характеристики зарядной цепи погружного устройства при использовании схемы выпрямления с диодным мостом

Схема	Положительные свойства	Отрицательные свойства
ИЕП + высоковольтный выпрямитель на диодном мосте	Малая амплитуда высших гармонических составляющих в спектре тока и напряжения высоковольтного трансформатора, малые габариты и перегрев трансформатора, благоприятный режим работы транзисторов и диодов (нет бросков тока в начале зарядного процесса)	Введение дополнительных элементов (дресселя и емкости ИЕП) в схему, увеличение габаритных размеров погружной части устройства, перегрев дресселя ИЕП, желательность подстройки режима работы ИЕП на сопротивление кабеля
Высоковольтный выпрямитель по схеме удвоения напряжения	Простота схемы, малые габаритные размеры погружной части зарядного контура, уменьшенное число витков высоковольтной обмотки трансформатора и технологичность его изготовления	Тепловой режим работы погружной части устройства определяется допустимой температурой работы керамических конденсаторов схемы удвоения (не более 125 °С), броски тока в начале зарядного процесса (в 3-3,5 раза превышают среднее значение) и ухудшение режима работы транзисторов и высоковольтных диодов
Высоковольтный выпрямитель на диодном мосте	Простота схемы, малые габаритные размеры погружной части зарядного контура	Броски тока в начале зарядного процесса (в 3,5-4 раза превышают среднее значение) и ухудшение режима работы транзисторов и высоковольтных диодов

Проанализировав свойства рассмотренных схем зарядки накопителя погружных скважинных устройств, можно сделать следующие **выводы**:

- использовать схему с ИЕП нецелесообразно в связи с увеличенными габаритными размерами погружной части и значительным влиянием потерь в дресселе на тепловой режим работы устройства;
- схемы с использованием высоковольтного выпрямителя, выполненного по схеме удвоения или на диодном мосте, мало отличаются по габаритным размерам, энергетическим характеристикам. Современное состояние элементной базы позволяет рекомендовать использование схемы с выпрямителем по схеме удвоения напряжения при температурах среды, окружающей погружную часть устройства, до 100 °С, и использование схемы с выпрямителем на диодном мосте при необходимости работы в условиях более высоких температур.

Список литературы: 1. *О.В.Хвоцан, Ю.И.Курашко, В.В.Литвинов.* Повышение эффективности зарядных процессов электроразрядных погружных комплексов увеличенной мощности // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – № 37. – С. 86-92. 2. *О.В.Хвоцан, Ю.И.Курашко, В.В.Литвинов, Ю.И.Мельхер.* Оптимизация габаритных размеров высоковольтного трансформатора погружных электроразрядных устройств повышенной мощности // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2007. – № 34. – С.112-118. 3. Геофизические методы исследования скважин. Справочник / Под ред. *В.М.Запорожца.* – М.: Недра, 1983. – 591 с.

Поступила в редколлегию 28.05.2008

УДК 621.315

С.Ю.ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук; **В.В.ВОЛОХІН**; НТУ «ХПІ»

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДЕРЖАВНИХ МЕТЕОСТАНЦІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ СТАНУ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

В роботі розглянуто основні недоліки використання даних державної мережі метеостанцій для потреб електроенергетичного господарства. Зроблено короткий огляд найнебезпечніших кліматичних факторів, котрі діють на споруди електричних мереж. Також запропоновано варіант рішення метеозадачі для електроенергетичної галузі, у вигляді створення спеціалізованої служби метеомоніторингу, з деякими напрямками її реалізації.

The article deals with main disadvantages of using of data of the state weather stations for electric-power industry. The characteristics of the most unsafe climatic conditions which influence on power engineering objects are presented. The ways of solving weather problem for electric industry are suggested.

Зміни клімату України, пов'язані з глобальним потеплінням, викликають необхідність досліджень впливу кліматичних факторів на енергетичні об'єкти, такі як повітряні лінії (ПЛ) та обладнання підстанцій.

Кліматичні фактори в їхніх екстремальних проявах породжують механічні навантаження, котрі в основному визначають надійність та стійкість конструкцій ПЛ та ПС, вирогідність їхнього безаварійного стану на етапі проектування. Саме тому вся нормативно-технічна документація, котра діє в Україні в області визначення механічних навантажень на проводи, опори та портали, базується на результатах статистичної обробки кліматичних даних за другу половину ХХ століття, отриманих на основі інструментальних вимірів в системі держгідрометеорологічної служби. Відповідно, існуючі об'єкти магістральних електричних мереж НЕК «Укренерго» та розподільчі мережі

розраховані на механічні навантаження, величина яких виходить зі стану клімату України у вказаний період минулого століття.

Фізико-географічне положення України, природні процеси та явища, котрі виникають в атмосфері під дією різноманітних природних факторів або їхнього поєднання, зумовлюють високу частоту виникнення несприятливих для об'єктів електричних мереж умов експлуатації [1].

Основними небезпечними кліматичними факторами, котрі діють на споруди електричних мереж, є тиск вітру та ожеледно-паморозеві утворення (ОПУ), окремо та в їхньому поєднанні.

На сьогодні прийнята наступна класифікація ОПУ на проводах ПЛ:

- 1 Ожеледь – осад прозорого, напівпрозорого або матового непрозорого льоду з густиною від 600 до 900 кг/м³. Зазвичай утворюється при температурі повітря від 0° до -5°С, під час дощу, туману. Кристалики льоду утворюються на великих висотах, тануть, падаючи через теплий шар, та замерзають в холодному приземному шарі з температурою нижче точки замерзання води. Ожеледь стійко тримається на проводах і може бути зруйнована тільки шляхом плавки електричним струмом.
- 2 Суміш ожеледі та паморозі утворюється при періодичних змінах метеоумов у діапазоні температур від 0° до 20°С і має об'ємну масу від 150 до 600 кг/м³.
- 3 Мокрий сніг утворюється при температурі близько 0°С, має гарну липучість і вкриває весь провід. При зниженні температури нижче 0°С мокрий сніг замерзає і обледенілий шар міцно примерзає до проводів. Об'ємна маса цього шару близько 200 кг/м³.
- 4 Зерниста або щільна паморозь – сніговий осад білого кольору, котрий утворюється при вітряній погоді під час туману та при температурі повітря від мінус 3 до мінус 10° С. Густина біля 100 кг/м³. Вона міцно тримається на проводах ПЛ і найбільш ефективно видаляється за допомогою плавки електричним струмом.
- 5 Кристалічна паморозь – наліт кристалів білого льоду з об'ємною масою 200 – 800 кг/м³. Паморозь тримається на проводах погано і ніякої небезпеки для ПЛ не несе.

Із розглянутих ОПУ найбільш аварійну ситуацію для електропостачання спричиняють утворення на проводах ПЛ у вигляді:

- льоду з густиною 600 – 900 кг/м³, котрий утворюється під час дощу при температурах навколишнього середовища від 0°С до -5 ... 10°С;
- мокрого снігу з густиною 200 – 900 кг/м³ при зниженні температури та примерзанні до проводу шаруватої суміші лід – сніг, а також суміші льоду та паморозі з густиною до 600 кг/м³, сформованих під час періодичних змін температури.

Основними вихідними даними для розрахунку вітрових та ожеледних

навантажень на лінію електропередач є інструментальні спостереження за швидкістю вітру та ОПУ на метеорологічних станціях України за багатолітній період спостереження.

На території України існує більш ніж 200 метеорологічних станцій, які розташовані досить рівномірно. Існуюча державна мережа метеостанцій і метеопостів призначена для гідрометеорологічного забезпечення галузей народного господарства. Але ця мережа не може в повній мірі задовольнити потреби окремих користувачів, а саме електроенергетичної галузі. Основні недоліки у використанні даних метеостанцій приведені нижче.

Виходячи із власних можливостей, гідрометслужба встановлює види гідрометеорологічного забезпечення, здійснює збір даних метеоспостережень, оброблює їх та заносить до метеорологічних каталогів. Ці види інформації не враховують специфічні потреби електроенергетичного господарства. Наприклад, для розрахунку вітрового навантаження з ожеледдю необхідна інформація про максимальну швидкість вітру за період дії ожеледі. Ці дані до 1969 року розміщувалися в метеорологічних довідниках. З 1969 року швидкість вітру за період дії ожеледі не вимірюється [1, 2].

Засоби спостереження та вимірювання на метеостанціях нерідко є застарілими і не відповідають сучасному рівню розвитку техніки. Так, метеостанції обладнані ожеледними станками зразка 1945 року, на яких спостерігач замірює лінійні параметри ОПУ, знімає вимірювальний провід, вкритий ОПУ, та по об'єму талої рідини визначає густину ожеледі. На початку багатолітнього періоду спостережень на метеостанціях швидкість вітру вимірювалась за допомогою флюгера з легкою дошкою. Потім, на початку 50-х років були установлені флюгери з важкою дошкою, а в середині 70-х років метеостанції були обладнані механічними анеморумбометрами. Раніше швидкість вітру усереднювалась за двоххвилинний період самим спостерігачем, зараз усереднення виконує сам прилад за десятихвилинний період. Подібні відмінності у характері багатолітніх рядів спостережень за вітром викликають необхідність приводити їх до однорідного виду за допомогою різних коефіцієнтів, котрі занижують достовірність вихідних даних.

В дійсності більшість метеостанцій розташовані в межах міст, селищ, котрі, як правило, знаходяться на низьких позначках (долини гір, річок). Такі метеостанції не можуть в повній мірі охарактеризувати метеообстановку на трасах ПЛ. Крім того, метеомайданчики можуть бути закриті різними об'єктами (деревами, будівлями і т.п.) і не можуть описати вітровий режим відкритої території проходження траси ПЛ. Прилади, які вимірюють характеристики вітру, встановлюються на висоті 10 м і вище, що допустимо для ПЛ. Але ожеледна установка розміщується на висоті лише 2 м над поверхнею землі, а закритість метеомайданчика значно занижує розміри утворень на ньому. Для приведення «закритої» метеостанції до умов «відкритої» вво-

диться коректуючий коефіцієнт закритості, котрий визначається для кожного випадку утворення ожеледі окремо.

Закритість ожеледної установки на метеостанціях змінюється з плином часу із-за появи нових екрануючих об'єктів, збільшення висоти дерев, спилювання дерев, переносу метеомайданчика на нове місце. Відстань від екрануючого об'єкта до границі метеомайданчика та висота екрануючого об'єкта вказані в Кліматологічному довіднику, вип. 10, вид. 1968р. та в Технічних справах метеостанцій. Ця інформація є застарілою, крім того, в існуючих описах допущено ряд неточностей. В зв'язку з цим, в розрахунки коефіцієнтів закритості вноситься багато суб'єктивізму.

Флюгери установлювалися на висоті 14 м, стандартна висота установки анеморумбометра – 9 м, ожеледного станка – 2 м. Це не відповідає висотам конструкцій ПЛ та ПС [2, 3].

Із-за вищевказаних чинників існуюча мережа стандартних метеостанцій не дає можливості надійно охарактеризувати вітрові та ожеледні навантаження на повітряні лінії електропередач.

Для визначення досить надійних розрахункових значень швидкості вітру та товщини стінки ожеледі тривалість рядів спостережень, що використовуються, повинна бути не менше 30 років [4]. На території України неперервний ряд спостережень складає більше 40 років, починаючи з повоєнного часу. Але в зв'язку зі зміною клімату в останні десятиріччя та очікуваними подальшими змінами, такий тривалий період спостережень глибиною більше 20 – 25 років виявиться не характерним для оцінки сучасної кліматичної ситуації та її прогнозу на перспективу.

Основні недоліки у використанні даних державної мережі метеостанцій для потреб електроенергетичного господарства приведені в таблиці.

Висновки:

- 1 На сьогоднішній день немає ніяких підстав вважати, що державна метеорологічна служба буде коли-небудь істотно приближена до рішення задач енергетичної галузі.
- 2 В цих умовах, раціональним та ефективним рішенням для галузі може стати утворення спеціалізованої служби метеоінформації, призначеної для здійснення метеомоніторингу в границях територіального обслуговування електричних мереж НЕК «Укренерго».
- 3 Спеціалізований моніторинг повинен здійснюватися системно як просторово (в зоні всіх мереж НЕК «Укренерго»), так і приладовимірювально (на основі однакових спеціалізованих метеодатчиків та методик обробки інформації).
- 4 Враховуючи розгалужений характер електричних мереж НЕК «Укренерго», охоплюючих всю територію України, спеціалізований метеомоніторинг повинен базуватися на такій же розгалуженій

мережі метеопостів, обладнаних автоматичними приладами спостереження.

Вимоги щодо метеоінформації зі сторони електричних мереж	Забезпечення вимог метеостанціями
Урахування просторового та територіального положення об'єкта (ПЛ, ПС).	Не забезпечується. Територіальна та просторова тотожність метеостанції та об'єкта відсутня.
Урахування конструктивної специфіки, а саме діаметри проводів до 30 мм, висота підвісу проводів більше 10 м, довжина прогонів 300-450 м.	Забезпечується частково (шляхом перерахунку параметрів за допомогою приближених формул).
Вимірювання парусної сили, котра діє на голі проводи та проводи, вкриті ожеледдю.	Не забезпечується. Оцінюється посереднім розрахунковим шляхом по даним про швидкість вітру та по теоретичним формулам.
Безперервність вимірювання метеоданих (потреба в поточній інформації).	Не забезпечується. Заміри знімаються з частотою 8 разів на добу.
Поєднання кліматичних факторів в єдиний момент часу (максимальний вітер під час ожеледі, максимальна ожеледь з вітром).	Не забезпечується. Методика спостереження відсутня.
Оперативність отримання метеоінформації безпосередньо з місця події та з урахуванням інтенсивності метеопроцесу.	Не забезпечується. Заплановано відсилається штормове попередження (по запиту), а також усереднені та опрацьовані дані події.
Точність інформації щодо об'єкта.	Не забезпечується за більшістю параметрів, так як відсутні прямі вимірювання на об'єкті.

Список літератури: 1. *Мартазінова В.Ф.* Довгостроковий прогноз вітроенергетичних зон на території України. – Київ, Видання МНТЦ вітроенергетики НАН України, жовтень- грудень 2001 р. 2. *Аэродинамика электросетевых конструкций / Е.В. Горохов, М.И. Казакевич, С.Н. Шаповалов, Я.В. Назим;* под ред. *Е.В. Горохова, М.И. Казакевича.* – Донецк. – 2000. – 336 с. 3. *Ramsay A.C. Ryerson C.C.* Ice accretion measurements from automated surface observing system (ASSOS) // *The Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures.* – Reykjavik (Iceland). – 1998. – P. 127-130. 4. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

Надійшла до редакції 18.05.2008

СОДЕРЖАНИЕ

М.И.БАРАНОВ, Г.М.КОЛИУШКО, В.И.КРАВЧЕНКО, О.С.НЕДЗЕЛЬСКИЙ, М.А.НОСЕНКО Высоковольтный силовоточный трехэлектродный каскадный воздушный разрядник генератора тока искусственной молнии	3
В.Е.БОНДАРЕНКО, О.В.ШУТЕНКО, Н.В.АУЛОВА Оценка статистической однородности временных рядов показателей качества трансформаторного масла	12
А.В.БОРЦОВ Учет влияния времени коммутации полупроводниковых приборов на форму импульсов напряжения на нагрузке импульсного трансформаторного источника напряжения	20
В.С.БЫКОВ Исследование возможности усиления связей системообразующей сети Южной ЭЭС Украины при использовании управляемых самокомпенсирующихся линий электропередач	26
О.І.ВОВЧЕНКО, С.С.КОЗИРЄВ Побудова інверсної моделі електровибухового перетворення енергії засобами fuzzy-апроксимації	32
Ю.Н.ГИРКА Метрологическая аттестация межэлектродного расстояния в полосковых линиях эталона РЭМП	40
В.С.ГЛАДКОВ, А.А.ГУЧЕНКО, В.Я.ХАЙЛО Компактный источник питания ускорителей ионов гелия и водорода энергией 50 кэВ	43
В.С.ГЛАДКОВ, О.А.ГУЧЕНКО, В.Я.ХАЙЛО, О.В.ШЕСТЕРИКОВ Залежність руйнування бетонів при електричному пробі від амплітудно-часових параметрів імпульсів напруги	49
В.М.ЗОЛОТАРЕВ, В.П.КАРПУШЕНКО, А.Ф.КРИВЕНКО, В.В.ЗОЛОТАРЕВ, А.А.НАУМЕНКО Энергосберегающие схемы испытаний кабелей с полиэтиленовой изоляцией	55
С.В.КИПРИЧ, А.А.ПЕТКОВ, Д.Г.КОЛИУШКО, В.М.КУПРИЕНКО Методика анализа молниезащищенности объектов при сложном рельефе поверхности зоны защиты	66
В.В.КНЯЗЕВ, В.И.КРАВЧЕНКО, И.П.ЛЕСНОЙ, П.Н.МЕЛЬНИКОВ, С.В.ПЕСТРЕЦОВ, А.Ю.ЧЕРНУХИН Результаты исследования параметров активных молниеприемников и рассеивателей	78
В.В.КНЯЗЕВ, Ю.С.НЕМЧЕНКО, И.П.ЛЕСНОЙ, С.Б.СОМХИЕВ, Т.Н.ОСТРОВЕРХ Генератор для проведения испытаний бортового	

авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («контактный ввод»)	88
Д.Г.КОЛИУШКО Особенности расчета заземляющих устройств электроэнергообъектов	98
В.И.КРАВЧЕНКО, Ю.С.НЕМЧЕНКО, Ю.Н.ГИРКА Процедура и результаты международных сличений эталона РЭМП и государственного эталона РФ	104
Ю.В.КРАВЧЕНКО Ресурс пропитанной бумажно-полипропиленовой изоляции в импульсном режиме	107
В.В.КРИВУЩЕНКО, А.А.ПЕТКОВ Расчеты высоковольтного испытательного устройства для имитации токов, заданных интегралом действия	116
О.Н.СИЗОНЕНКО, Э.И.ТАФТАЙ, Р.И.МАЛАЯ, Р.П.КОЛМОГорова, Е.В.ЛИПЯН, А.С.ТОРПАКОВ Влияние высоковольтных импульсных разрядов в растворах поверхностно-активных веществ на их основные свойства	124
О.В.ХВОЩАН, Ю.И.КУРАШКО, В.В.ЛИТВИНОВ Анализ схем зарядной цепи малогабаритных погружных скважинных устройств повышенной мощности	134
С.Ю.ШЕВЧЕНКО, В.В.ВОЛОХІН Оцінка можливості використання даних державних метеостанцій для контролю стану об'єктів електричних мереж	143

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Тематичний випуск
«Техніка і електрофізика високих напруг»

Випуск № 21'2008

Науковий редактор д-р техн.наук,проф. В.І.Кравченко

Технічний редактор Л.В.Ваврів

Відповідальний за випуск В.М.Луцьова

Обл.вид. № 105-08

Підп. до друку 27.06.2008 р. Формат 60x84 1/16. Надруковано на цифровому видавничому комплексі Rank Xerox DocuTech 135. Умов.друк.арк. 7,4. Облік. вид. арк. 8,0. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. № 347. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня ТОВ «Сучасний друк», Харків, вул. Лермонтовська, 27а
