



**ВЕСТНИК**

**НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
«ХПИ»**

**34'2007**

**Харьков**

**ВЕСТНИК**  
**НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО**  
**УНИВЕРСИТЕТА «ХПИ»**

---

**Сборник научных трудов**  
**Тематический выпуск**

**34'2007**

**«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.;

М.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 2007**

**Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».** Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. № 34 – 162 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 № 12 від 7 грудня 2007 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»

## **МОЩНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ МАЛОГАБАРИТНЫЙ ДВУХЭЛЕКТРОДНЫЙ ВОЗДУШНЫЙ РАЗРЯДНИК ГЕНЕРАТОРА ТОКА МОЛНИИ**

Описано конструкцію і технічні характеристики створеного потужного високовольтного малогабаритного двоелектродного повітряного розрядника атмосферного тиску, використовуваного в генераторах проміжної і тривалої складових повного струму блискавки.

The design of performance data of created high-power high-voltage small-sized two-electrode air dischargers of atmospheric pressure which is used in generators of intermediate and long-term components of full current of lightning are described.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время актуальной научно-технической задачей в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) является та, которая связана с разработкой, созданием и практическим применением в электроэнергетике, авиационной и ракетно-космической технике мощных генераторов тока искусственной молнии. Данные генераторы используются для проведения натурных испытаний объектов указанной техники на электромагнитную совместимость и стойкость к воздействию имитируемых ими грозовых разрядов. Как известно, имитируемый полный ток молнии во временной развертке должен содержать следующие основные компоненты [1-4]: импульсную, промежуточную, длительную и повторную импульсную составляющие. Каждая из этих компонент характеризуется своими нормированными амплитудно-временными параметрами (АВП). Так, если импульсная составляющая тока молнии (компонента – *A*) имеет нормированную амплитуду 200 кА (при длительности в 500 мкс и интеграле тока  $2 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c}$ ), его промежуточная составляющая (компонента – *B*) характеризуется средним током в 2 кА (при длительности в 5 мс и переносимом заряде до 10 Кл), то длительная составляющая тока молнии (компонента – *C*) обладает амплитудой до 800 А (при длительности до 1000 мс и переносимом заряде до 200 Кл), а повторная импульсная составляющая (компонента – *D*) характеризуется амплитудой в 100 кА (при длительности в 500 мкс и интеграле тока  $0,25 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c}$ ) [1-3]. Из приведенных выше АВП основных компонент полного тока молнии видно, что моделирующее их высоковольтное электрофизическое оборудование в своем составе должно иметь ряд мощных емкостных (индуктивных) накопителей электрической (магнитной) энергии с различными электрическими парамет-

рами, способных в требуемой последовательности разряжаться на испытываемый технический объект и формировать на нем указанные составляющие тока молнии с заданными АВП. Эти мощные накопители энергии (МНЭ) и определяют в области ВИТ стоимость генераторов соответствующих составляющих полного тока молнии. В 2007 году в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» был разработан и создан «в металле» на экспериментальной базе института на основе МНЭ конденсаторного типа высоковольтный испытательный комплекс из пяти мощных генераторов тока, способных на общей активно-индуктивной нагрузке (с активным сопротивлением до 0,05 Ом и индуктивностью до 1 мкГн) одновременно и синхронно генерировать согласно требованиям [1-4] 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 до 50 мс) полного тока молнии.

Целью данной статьи является краткое описание конструкции и технических характеристик мощного малогабаритного воздушного двухэлектродного разрядника атмосферного давления на 5 кВ типа ММВР-5, используемого в сооруженных нами генераторах промежуточной (компонента –  $B$ ) и длительных (компоненты –  $C$  и  $C^*$ ) составляющих полного тока молнии.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ МОЩНОГО РАЗРЯДНИКА ТИПА ММВР-5 В ГЕНЕРАТОРЕ ТОКА МОЛНИИ

На рис. 1 приведена электрическая схема включения мощного малогабаритного воздушного разрядника на 5 кВ типа ММВР-5 в разрядной цепи генератора с МНЭ конденсаторного типа, предназначенного для формирования на  $RL$ -нагрузке (например, в испытываемом плоском образце металлической обшивки летательного аппарата) компоненты –  $C$  тока молнии.

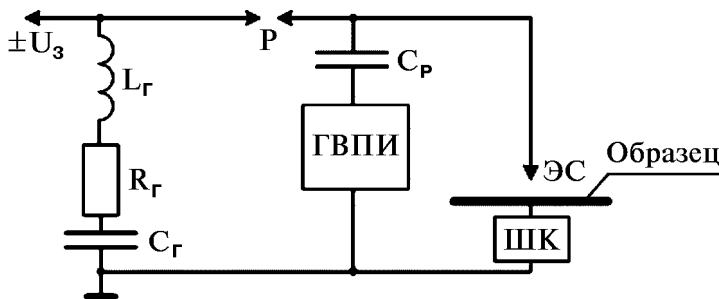


Рисунок 1 – Электрическая схема включения в разрядной цепи генератора длительной составляющей (компоненты –  $C$ ) полного тока молнии мощного малогабаритного воздушного двухэлектродного разрядника  $P$  типа ММВР-5

Согласно рис. 1 МНЭ конденсаторного типа генератора длительной составляющей тока молнии (емкостью  $C_g = 45,36$  мФ, активным сопротивлени-

ем  $R_L = 4,74$  Ом и индуктивностью  $L_L = 11,43$  мГн) после своего заряда до высокого напряжения  $U_3$  положительной (отрицательной) полярности, дальнейшего срабатывания двухэлектродного разрядника  $P$  (типа ММВР-5) в цепи генератора и электрического пробоя в воздушной электродной системе (ЭС) разряжается на испытываемый плоский образец металлической обшивки технического объекта (летательного аппарата) и формирует на нем соответствующую токовую  $C$  – компоненту грозового разряда. Срабатывание разрядника типа ММВР-5 и электрический пробой в воздушном промежутке ЭС при этом обеспечиваются одновременной подачей на них (разрядник и ЭС) от генератора поджигающих импульсов типа ГВПИ-100 [5] микросекундного импульса напряжения амплитудой до 100 кВ. Для развязки генератора ГВПИ-100 со схемой МНЭ в его электрической цепи использован разделительный конденсатор  $C_P = 180$  пФ на 120 кВ, собранный из 12 последовательно соединенных дисковых керамических емкостей типа КВИ-3-2200пФ на 10 кВ [6].

Отметим, что мощный генератор длительной составляющей тока молнии, включенный в схему на рис. 1, содержит 324 параллельно соединенных при помощи плоской медной ошиновки высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ2-5-140 на номинальное напряжение  $\pm 5$  кВ с суммарной номинальной запасаемой энергией в 567 кДж. Для аварийной защиты такого большого количества конденсаторов типа ИМ2-5-140, в случае электрического пробоя одного из них в режимах их заряда или разряда, на их высоковольтных выводах были установлены омические сопротивления, набранные из высоковольтных графито-керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60-100 Ом (по одному резистору на каждый вывод конденсатора).

### **3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОЩНОГО РАЗРЯДНИКА ТИПА ММВР-5**

На рис. 2 представлен общий вид мощного двухэлектродного воздушного разрядника типа ММВР-5 на номинальное напряжение  $\pm 5$  кВ. Данный разрядник содержит два графитовых электрода прямоугольной конфигурации с размерами поперечного сечения  $25 \times 32$  мм<sup>2</sup> и длиной 63 мм. Эти электроды на своих краях имеют по две гибких параллельно соединенных медных шины  $\varnothing 4$  мм, подключаемых с одной стороны к цепи МНЭ конденсаторного типа, а с другой стороны – к генератору ГВПИ-100 и ЭС с испытываемым металлическим образцом обшивки технического объекта. При выполнении указанных электродов разрядника типа ММВР-5 нами были использованы элементы токосъемных щеток от мощной электрической машины. Графитовые электроды при помощи латунных хомутов крепятся к плоским алюминиевым щекам толщиной 3 мм с болтовыми соединениями М10, служащими для подключения разрядника типа ММВР-5 в разрядную цепь генератора длительной (промежуточной) составляющей полного тока мол-

нии. Алюминиевые щеки разрядника покоятся на литых фигурных изоляторах высотой 76 мм и наибольшим диаметром 50 мм, закрепленных на гетинаксовом плоском основании разрядника толщиной 10 мм. Габаритные размеры разрядника типа ММВР-5 составляют: высота – 125 мм; ширина – 160 мм; длина–250мм. Воздушный зазор между плоскими торцами графитовых электродов может легко регулироваться в зависимости от уровня постоянного зарядного напряжения  $U_3$  конденсаторов типа ИМ2-5-140, длины воздушного промежутка в ЭС и выходного поджигающего импульсного напряжения от генератора ГВПИ-100 в пределах от долей до нескольких миллиметров (рабочие значения этого зазора при экспериментальной проверке работы разрядника типа ММВР-5 и выполнении с его помощью исследований по оценке молниестойкости плоских образцов металлической обшивки летательного аппарата составляли от 2 до 4 мм). Для внешнего контроля состояния рабочих поверхностей графитовых электродов внизу под ними на плоском гетинаксовом основании разрядника закреплена фторопластовая пластина толщиной 6 мм. Разрядник типа ММВР-5 закреплен на плоском массивном основании из СТЭФ-20 рабочего стола генератора полного тока молнии. Вес разрядника типа ММВР-5 не превышает 3 кг.



Рисунок 2 – Общий вид мощного высоковольтного малогабаритного воздушного двухэлектродного разрядника типа ММВР-5 на 5 кВ, обеспечивающего коммутацию разрядных цепей генераторов длительной и промежуточной составляющих полного тока молнии с переносимым ими суммарным электрическим зарядом не менее 210 Кл

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ РАБОТЫ МОЩНОГО РАЗРЯДНИКА ТИПА ММВР-5

На рис. 3 приведена осциллограмма длительной составляющей тока молнии (компоненты – С), получаемой в разрядной цепи МНЭ конденсаторного типа согласно рис. 1, коммутируемой разрядником типа ММВР-5. АВП данной токовой компоненты отрицательной полярности были зарегистрированы с помощью встроенного в непотенциальную («земляную») электрическую цепь генератора компоненты – С полного тока молнии и прошедшего государственную метрологическую аттестацию измерительного коаксиального малоиндуктивного шунта типа ШК-300, имеющего после своего входа активное сопротивление 0,185 мОм и два выхода с коэффициентами преобразования соответственно 5642 А/В (выход № 1) и 11261 А/В (выход № 2) [7], и цифрового осциллографа типа *Tektronix* TDS 1012. В соответствии с данными рис. 3 получаем, что амплитуда  $I_{mc}$  имитируемой компоненты – С созданным генератором тока молнии, в состав которого входит рассматриваемый разрядник типа ММВР-5, при  $U_3 = -4$  кВ составляет:  $I_{mc} = 136 \cdot 10^{-3} \times 5642 = 768$  А. Видно, что длительность сформированной аperiodической компоненты – С примерно равна 0,9 с, а ее максимум соответствует времени  $t_m$ , равном около 8,8 мс (это значение  $t_m$  было определено при временной развертке в 5 мс).

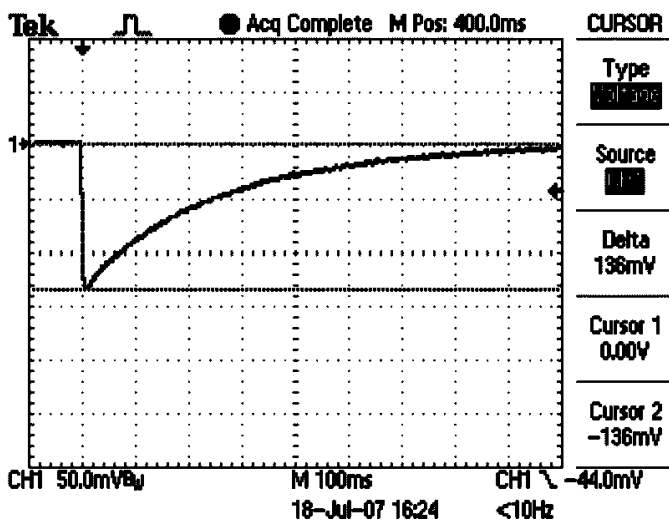


Рисунок 3 – Осциллограмма коммутируемого разрядником типа ММВР-5 мощного импульса длительной компоненты тока молнии временной формы 8,8мс/900мс отрицательной полярности с амплитудой 0,768 кА и переносимым электрическим зарядом в 196 Кл



Расчетная оценка по осциллограмме на рис. 3 электрического заряда  $q_c$ , переносимого при этом длительной составляющей полного тока молнии, показала, что его численное значение оказывается приблизительно равным  $q_c = 196$  Кл. Это количество электричества в генерируемой с использованием разрядника типа ММВР-5 компоненте – С полного тока молнии полностью соответствует действующим международным требованиям [1-4], касающимся моделирования грозового разряда и применяемым при натурных испытаниях различных технических объектов на молниестойкость. Отметим, что рассматриваемый разрядник типа ММВР-5 в описанной выше электрической схеме генератора длительной составляющей тока молнии выдержал без повреждений не менее 150 срабатываний МНЭ конденсаторного типа с единичной и каждый раз запасаемой в нем электрической энергией, равной около 363 кДж.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан, создан и апробирован в реальной работе в составе генераторов длительной и промежуточной составляющих имитированного полного тока молнии мощный малогабаритный двухэлектродный воздушный разрядник атмосферного давления на 5 кВ типа ММВР-5. Апробация разрядника типа ММВР-5 на опытных образцах металлической (композиционной) обшивки летательного аппарата подтвердила его работоспособность при синхронной коммутации им токовых  $B$  и  $C$  компонент молнии с переносимым ими суммарным электрическим зарядом не менее 210 Кл.

**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. *SAE APP 5416/ED-84*. Нормативный документ «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов». США, 1997. – 145 с. 3. *КТР-ВВФ/ДО-160Д/ЕД-14Д*. Квалификационные требования «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний». Раздел 23.0. «Прямое воздействие молнии». Россия, 2004. – С. 258-273. 4. *ГОСТ 30585-98*. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний / Руководитель разработки – В.И. Кравченко. – Киев: Госстандарт Украины, 1998. – 27 с. 5. *Бочаров В.А., Печкарь И.Р.* Генератор высоковольтных пусковых импульсов // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск: Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 1981. – Вып. 9. – С. 39-41. 6. *Баранов М.И.* Сравнительный анализ работы двух схем построения генераторов высоковольтных поджигающих импульсов напряжения мощных электрофизических установок // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПБ». – 2006. – № 37. – С. 100-106. 7. *Дныщенко В.Н., Еремеев В.О., Недзельский О.С., Понуждаева Е.Г.* 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 «ХПБ». – 2007. – № 20. – С.75-79.

*Поступила в редколлегию 15.11.2007*

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

## **УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ЗАТУХАЮЩИХ ПОМЕХ С ЧАСТОТОЙ 100 КГЦ**

Описано конструкцію та результати атестації установки, призначеної для випробувань технічних засобів на несприйнятливість до впливу повторюваних коливальних загасаючих завод з частотою 100 кГц відповідно до вимог міжнародних стандартів. Установка генерує випробувальну напругу чотирьох випробувальних рівнів: 0,25, 0,5, 1 та 2 кВ.

Design and results of certification of the plant intended for testing of hardware for immunity to influence of repetitive oscillating damped interferences with frequency 100 kHz according to requirements of International standards have been described. The plant generates test voltage of four test levels: 0.25, 0.5, 1.0 and 2.0 kV.

**Введение.** В соответствии с требованиями Технического Регламента [1] все технические средства (ТС), имеющие в своем составе электротехнические, электронные и радиоэлектронные компоненты и эксплуатируемые в жилых, коммерческих и промышленных зонах, особенно, на электрических станциях и подстанциях, обязательно проходят испытания в лабораторных условиях по МЭК 61000-4-12-95 [2].

Производство установок, необходимых для проведения таких испытаний не носит массового характера, напротив, изготовление ведется ограниченным числом специализированных предприятий, с учетом индивидуальных требований конкретной испытательной лаборатории. В Украине изготовление испытательных генераторов организовано в сотрудничестве Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» НТУ «ХПИ» и ООО «Терра-АВТ». В данной статье дано описание конструкции установки.

**Анализ и решение проблемы.** Данная статья продолжает цикл публикаций об испытательном оборудовании [3 - 8], полностью удовлетворяющих требованиям современных международных стандартов в области электромагнитной совместимости (ЭМС).

Разработанная и изготовленная установка У-ЗППП-100 предназначена для лабораторных испытаний ТС на стойкость к воздействию повторяющихся колебательных затухающих помех (КЗП) с частотой 100 кГц по МЭК 61000-4-12-95. Повторяющиеся КЗП возникают в силовых линиях и линиях управления и сигнализации на электрических подстанциях высокого и сред-

него напряжения.

Выходные параметры испытательной установки У-ЗПНП-100 полностью соответствуют требованиям к ней нормативной документации и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Единица измерения	Значение
1	2	3
1. Форма импульса напряжения (синусоидальная затухающая волна)		
2. Выходное напряжение в режиме холостого хода, для испытательных уровней: 1 – $U_m^1$ 2 – $U_m^2$ 3 – $U_m^3$ 4 – $U_m^4$	кВ кВ кВ кВ	$0,25 \pm 0,025$ $0,5 \pm 0,05$ $1,0 \pm 0,1$ $2,0 \pm 0,2$
3. Время нарастания импульса напряжения, $T_n$	нс	$75 \pm 15$
4. Частота колебаний, $f_{0,1}$	МГц	$0,1 \pm 0,01$
5. Степень затухания, $\partial$	%	$50 \pm 10$
6. Полярность	-	положительная / отрицательная

Установка У-ЗПНП-100 позволяет испытывать ТС в следующих режимах работы:

- испытания ТС с однофазной трехпроводной системой питания («провод-земля») с пластиной заземления при воздействии на порт электропитания переменного/постоянного тока;
- испытания ТС с трехфазной пятипроводной схемой питания по схеме «провод-земля» с пластиной заземления при воздействии на порт

- электропитания переменного тока;
- испытания ТС с однофазной трехпроводной системой питания («провод-провод») с пластиной заземления при воздействии на порт электропитания переменного/постоянного тока;
- испытания ТС с трехфазной пятипроводной схемой питания по схеме «провод-провод» с пластиной заземления при воздействии на порт электропитания переменного тока.

Общий вид установки У-ЗПНП-100 приведен на рис. 1, а ее структурная схема – на рис. 2.

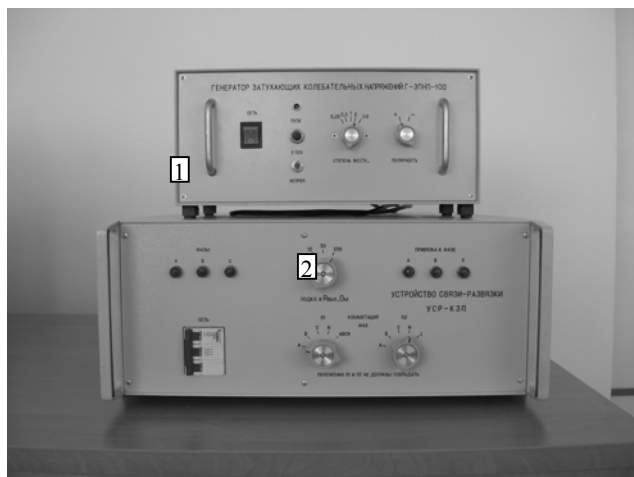


Рисунок 1 – Общий вид установки У-ЗПНП-100  
 1 – генератор затухающих колебательных напряжений Г-ЗПНП-100;  
 2 – устройство связи/развязки.

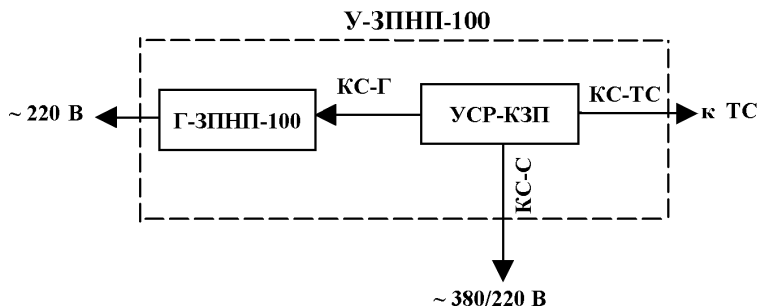


Рисунок 2 – Структурная схема У-ЗПНП-100  
 У-ЗПНП-100 – установка У-ЗПНП-100; Г-ЗПНП-100 – генератор Г-ЗПНП-100;  
 УСР-КЗП – устройство связи/развязки; ТС – испытуемое техническое средство;  
 КС-Г, КС-С, КС-ТС – кабели соединительные

Установка У-ЗПНП-100 конструктивно состоит из генератора затухающих колебательных напряжений (Г-ЗПНП-100), устройства связи/развязки (УСР-КЗП) и комплекта кабелей соединительных (КС). Дополнительным оборудованием, используемым при первичной аттестации данной установки, является система измерений, в которую входят щуп высоковольтный P6015A 1000X фирмы Tektronix и цифровой двухканальный запоминающий осциллограф Tektronix TDS 1012 (ЭО).

Генератор Г-ЗПНП-100 предназначен для создания заданных импульсов напряжения большой энергии, для последующей передачи их через УСР-КЗП в порты питания испытываемого ТС.

Генератор Г-ЗПНП-100 собран в металлическом корпусе с габаритами 360x200x180 мм и включает в себя повысительно-выпрямительное устройство (ПВУ), блок формирующего устройства (БФУ) и управляемый блок поджига (УБП). На рис. 3 показан генератор Г-ЗПНП-100 со снятой верхней крышкой, а на рис. 4 – передняя панель генератора Г-ЗПНП-100.

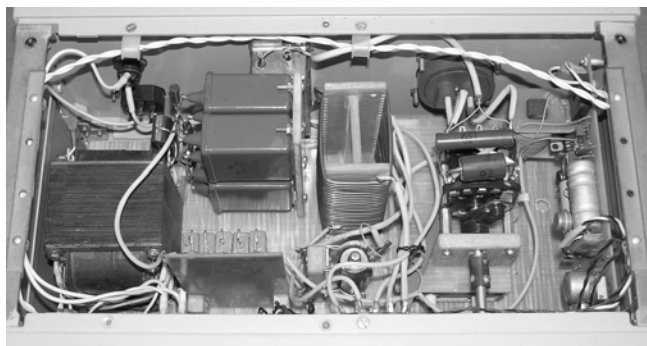


Рисунок 3 – Г-ЗПНП-100 со снятой верхней крышкой



Рисунок 4 – Передняя панель Г-ЗПНП-100

На передней панели генератора Г-ЗПНП-100 расположены следующие органы управления и контроля установки:

- клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор Г-ЗПНП-100 и для его отключения после окончания работы;
- тумблер НЕПРЕРЫВ – 2 СЕК служит для переключения продолжительности работы генератора Г-ЗПНП;
- кнопка ПУСК служит для запуска генератора Г-ЗПНП;
- индикаторная лампочка (светодиод) загорается во время работы генератора;
- переключатель ПОЛЯРНОСТЬ служит для установления полярности выходного напряжения генератора Г-ЗПНП-100: «+» или «-» ;
- переключатель СТЕПЕНЬ ЖЕСТК., кВ служит для установления испытательных уровней выходного напряжения генератора Г-ЗПНП-100 и имеет пять положений: «0,25», «0,5», «1», «2» и «>2»;

На задней панели генератора Г-ЗПНП-100 расположены сетевой разъем СЕТЬ, два предохранителя по 3 А, клемма заземления корпуса «⊥», разъем ВЫХОД для подключения при помощи кабеля соединительного (КС-Г) выхода генератора Г-ЗПНП-100 с устройством связи/развязки УСР-КЗП и разъем ИЗМЕРЕНИЕ U для подключения щупа высоковольтного Р6015А и осциллографа ЭО.

ПВУ предназначено для выработки высокого постоянного напряжения, необходимого для заряда конденсаторов блока формирующего устройства.

БФУ предназначен для формирования на выходе импульсов напряжения заданных амплитудно-временных параметров.

УБП предназначен для формирования импульсов поджига коммутатора Р-37, следующих с частотой 40 Гц.

УСР-КЗП предназначено для ввода колебательных затухающих помех от испытательного генератора в порты питания испытываемого ТС и собрано в металлическом корпусе с размерами 570x480x210 мм. Конструктивно УСР-КЗП состоит из устройства связи (УС) и устройства развязки (УР).

На рис. 5 и 6 показаны передняя и задняя панели УСР-КЗП.

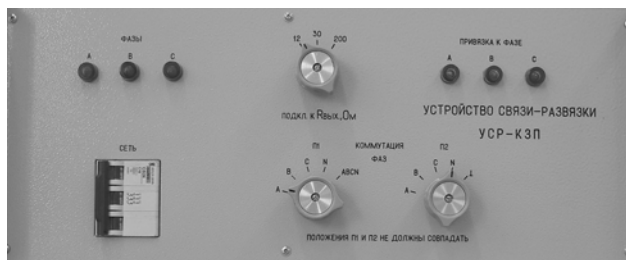


Рисунок 5 – Передняя панель УСР-КЗП

На передней панели УСР-КЗП расположены органы управления и кон-

троля, а на задней – разъемы для подключения к сети питания, к генератору, к фазам испытываемого ТС и к заземлению.

На рис. 7 приведена схема метрологической аттестации генератора Г-ЗПНП-100 из Программы и методики первичной аттестации, утвержденной ГП «Харьковстандартметрология».

На рисунках 8-10 приведены осциллограммы импульсов напряжения амплитудой 2 кВ положительной и отрицательной полярности, частотой 100 кГц и временем нарастания 67 нс, полученные на ЭО с выхода генератора Г-ЗПНП-100 при первичной аттестации установки У-ЗПНП-100.



Рисунок 6 – Задняя панель УСП-КЗП

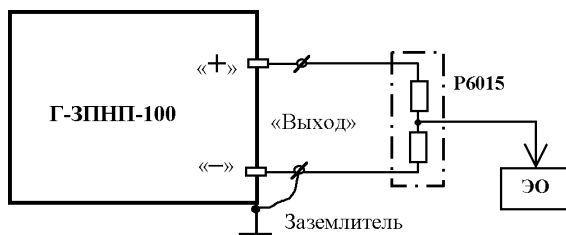
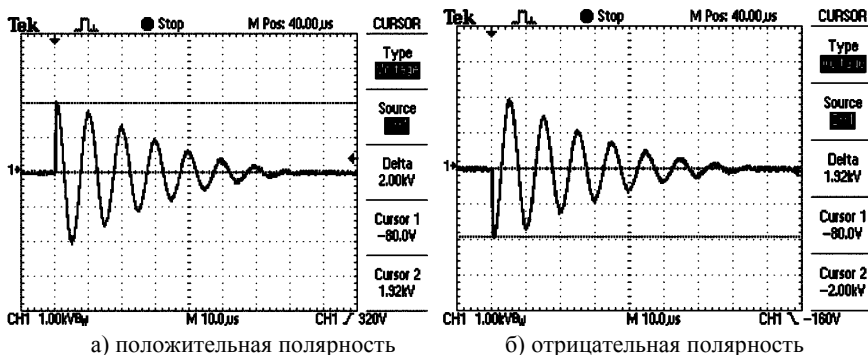


Рисунок 7



а) положительная полярность

б) отрицательная полярность

Рисунок 8

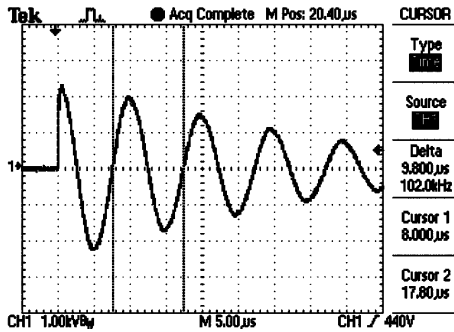


Рисунок 9

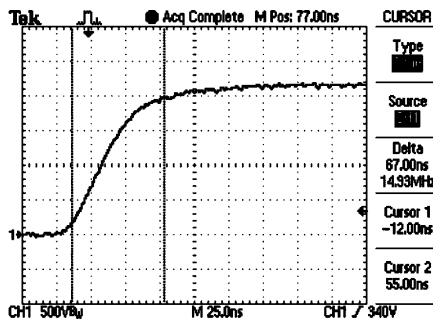


Рисунок 10

**Выводы:** Установка У-ЗПНП-100 прошла государственную аттестацию и успешно применяется в Центре сертификационных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» для проведения испытаний технических средств на электромагнитную совместимость.

**Список литературы:** 1. Технічний Регламент України з підтвердження відповідності електромагнітної сумісності. 2. МЭК 61000-4-12:1995 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 12: Oscillatory waves immunity test. 3. Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П., Немченко Ю.С., Сомхив С.Б. Комплекс для испытаний бортового оборудования самолетов и вертолетов на электромагнитную совместимость. КИ-БОЛА-ЭМС-В. Испытания внешними помехами // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Вип. 2(51). – Харків, 2006. – С.43-46. 4. Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П., Немченко Ю.С., Сомхив С.Б. Установка для испытаний бортового оборудования самолетов и вертолетов на молниестойкость типа УИМ // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Вип. 3(9). – Харків, 2006. – С.43-45. 5. Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П., Немченко Ю.С., Сомхив С.Б. Комплекс для испытаний бортового оборудования самолетов и вертолетов на электромагнитную совместимость. КИ-БОЛА-ЭМС-Э. Измерение эмиссии радиопомех // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Вип. 3(9). – Харків, 2006. – С.40-42. 6. Князев В.В., Немченко Ю.С., Лесной И.П., Сомхив С.Б. Установка для испытаний технических средств на устойчивость к токам кратковре-



менных синусоидальных помех частотой 50 Гц в цепях защитного и сигнального заземления // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Вып. № 17, 2006. – С.18-23. 7. Князев В.В., Немченко Ю.С., Лесной И.П., Лантушко Б.Н., Дорошенко А.В. Установка для испытаний технических средств на молниестойкость // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Вып. № 17, 2006. – С.3-9. 8. Князев В.В., Немченко Ю.С., Лесной И.П., Сомхив С.Б., Островерх Т.Н. Установка для испытаний технических средств на стойкость к затухающему переменному магнитному полю с частотой 100 кГц // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Вып. № 20, 2006. – С.95-100.

*Поступила в редколлегию 08.11.2007*

УДК 621.7.044.7

**А.Ю.БОНДАРЕНКО**, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

### **ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИТЯЖЕНИЯ ПЛОСКОЙ ЗАГОТОВКИ К ИНДУКТОРУ НА ВЕЛИЧИНУ ТРЕБУЕМЫХ УСИЛИЙ**

Для визначення електродинамічних сил взаємодії між ділянкою плоского металевго аркуша із вм'ятиною та індуктора з прямим пропусканням струму при магнітно-імпульсній обробці металів обрана розрахункова модель. Отримано аналітичні вирази для визначення величини необхідних зусиль для вирівнювання вм'ятини й відношення амплітуд динамічних і статичних сил.

The calculated model for determination of electromagnetic forces of interaction between a section of flat metal sheet with a dent and inductor with direct current transmission at magnetic-pulse treatment of metals has been chosen. Analytical expressions for determination of value of force necessary for flattening of a dent and the ratio of amplitudes of dynamic and static forces have been received.

В основе принципа действия индукторов прямого пропускания тока (электродинамических индукторных систем) лежит явление притяжения параллельных проводников с токами, текущими в одном направлении [1,2]. Данное взаимодействие описывается законом Ампера, который в классическом виде был сформулирован для постоянных токов [3].

Если же взаимодействие носит динамический характер, то временные параметры токов должны вносить поправки в амплитуды сил, необходимых для притяжения металлической заготовки или ее какой-то части.

Целью работы является вычисление сил взаимодействия между плоскими параллельными проводниками с токами, изменяющимися во времени по закону затухающей синусоиды, и определение соотношения между амплитудами динамических и статических сил, необходимых для выполнения опера-

ции рихтовки плоской заготовки.

Схема решения поставленной задачи основана на равенстве работ (то есть затрат энергии), которые необходимо выполнить динамической и статической силам для осуществления одной и той же операции. Следовательно, зная величину пути, который должна пройти часть заготовки при ее выравнивании, можно определить соотношение между амплитудами динамической и статической сил, совершающими одну и ту же работу. Полученные результаты позволят скорректировать расчеты параметров электродинамических индукторных систем по известным из эксперимента значениям усилий, необходимых для вытягивания вмятин в металлических листах.

В работе [2] получено выражение для определения силы взаимодействия между плоскими параллельными проводниками заданной ширины при протекании разрядных токов магнитно-импульсной установки:

$$F(t) = F_m \cdot e^{-2\alpha t} \sin^2(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где  $F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{1m} \cdot I_{2m} \cdot \frac{\ell}{h} \cdot G(a, b);$

$$G(a, b) = \left( \frac{h}{4a \cdot b} \right) \cdot \int_{-a}^a \ln \left[ \frac{\sqrt{(b-x)^2 + h^2} + (b-x)}{\sqrt{(b+x)^2 + h^2} - (b+x)} \right] \cdot dx;$$

$2a, 2b, \ell, h$  – ширины проводников, их длина и расстояние между ними,  $I_{1m}, I_{2m}$  – амплитуды протекающих токов в индукторе и заготовке.

Временная зависимость токов одинакова и описывается выражением [1]:

$$I(t) = I_m \cdot e^{-\alpha t} \sin(\omega \cdot t), \quad (2)$$

где  $\alpha, \omega$  – декремент затухания и циклическая частота разрядного тока магнитно-импульсной установки,  $t$  – время.

На практике, при рихтовке плоских деталей, обычно имеет место устранение круглой вмятины. Для простоты будем считать, что вмятина имеет сферическую форму (см. рис. 1, а).

В качестве модели операции рихтовки в плоском листе вмятины сферической формы с помощью индуктора прямого пропускания тока выберем систему параллельных проводников [2], с протекающими в них токами (рис. 1, б). Будем считать, что расстояние между этими проводниками равно глубине вмятины  $H = h$ .

Проводники взаимодействуют на длине  $\ell = 2c$ . Ширина проводника соответствующего вмятине равна ее диаметру  $b = 2c$ . Ширина основного токапровода индуктора равна  $-2a$ .

Уравнение движения какого-то выделенного участка металла заготовки (примем, что это единица площади) с учетом вида возмущающей силы (1) в простейшем варианте [3,4], имеет вид

$$\frac{dv(t)}{dt} \approx \frac{1}{(\rho \cdot d)} \cdot (P_m e^{-2\alpha t} \sin^2(\omega \cdot t) - P_r), \quad (3)$$

где  $P_m$  – давление со стороны возмущающей силы,  $P_m = F_m/S$ ,  $S$  – реальная площадь притягиваемого участка,  $\rho$ ,  $d$  – плотность металла и его толщина,  $P_r$  – предельное давление на металл, при превышении которого в нем происходят необратимые пластические деформации.

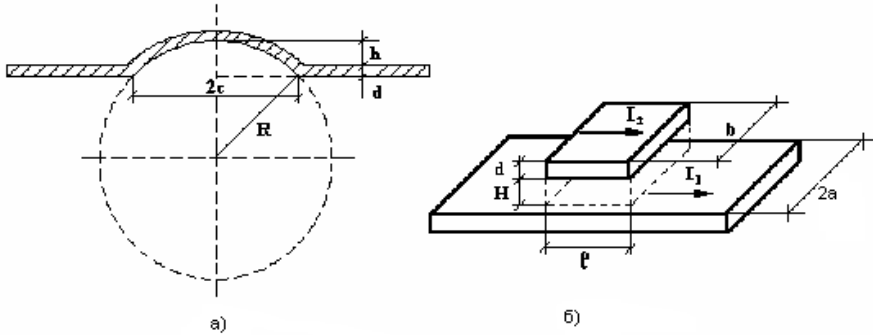


Рисунок 1 – Расчетные модели.

Предельное давление на металл, как характеристику процесса, можно вычислить известными методами сопротивления материалов для принятой формы устраняемой вмятины – сферический сегмент (рис. 1, а), находящейся в поле сил внешнего давления, равномерно распределенных по его поверхности.

Максимальные напряжения при значении коэффициента Пуассона  $\nu = 0,3$  достигают величины  $\sigma_{\max} = (6,34...2,27) \cdot \frac{P_r \cdot R}{2 \cdot d}$  [5] в зависимости от

вида граничных условий на краю вмятины. Поэтому следует ожидать разброс в значениях предельного давления при деформировании вмятины в указанных пределах. При проведении оценок можно принять наиболее близкие к реальности следующие условия – свободный опор краев вмятины, что соответствует наибольшему значению максимального напряжения в вышеприведенной зависимости.

Предельное состояние возникает при достижении величины напряжений в металле, равной его пределу текучести, для стали  $\sigma_T = 240$  МПа [1].

Тогда предельное давление, после достижения которого начинается процесс выравнивания вмятины, будет равно:

$$P_r \approx \sigma_T \cdot \frac{d}{(3,17...1,135) \cdot R}, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус сферы (рис 1, а).

Из геометрических соображений (рис. 1, а):

$$R = \frac{c^2 + h^2}{2 \cdot h} . \quad (5)$$

Тогда из соотношений (4) и (5) можно получить приближенную формулу для предельного давления:

$$P_r \approx k \cdot \sigma_r \cdot \left( \frac{h \cdot d}{c^2 + h^2} \right), \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий разброс максимальных напряжений в металле,  $k \in [0,631, 1,762]$

При интегрировании уравнения (3) удобно ввести следующие величины:

$$P_{1m} = \frac{P_m}{(\rho \cdot d \cdot \omega)}, \quad P_{1r} = \frac{P_r}{(\rho \cdot d \cdot \omega)}, \quad \varphi = \omega \cdot t, \quad \delta = \frac{\alpha}{\omega} - \text{относительный декремент}$$

затухания.

С учетом введенных величин выражение (3) преобразуется к виду:

$$\frac{dv(\varphi)}{d\varphi} \approx P_{1m} \cdot e^{-2\delta \cdot \varphi} \sin^2(\varphi) - P_{1r} . \quad (7)$$

Процесс движения начинается при значении переменной –  $\varphi_0$ , являющейся корнем трансцендентного уравнения:

$$e^{-2\delta \cdot \varphi_0} \sin^2(\varphi_0) \approx \frac{P_{1r}}{P_{1m}} . \quad (8)$$

Интегрируя уравнение (7) по  $\varphi \in [\varphi_0, \varphi]$  и пренебрегая достаточно малыми слагаемыми порядка  $\sim \delta^2$ , находим скорость выделенного элемента заготовки:

$$v(\varphi) \approx P_{1m} \cdot \left( \frac{e^{-2\delta\varphi}}{4\delta} \left[ e^{-2\delta(\varphi_0-\varphi)} (1 + \delta \sin(2\varphi_0)) - (1 + \delta \sin(2\varphi)) \right] - e^{-2\delta \cdot \varphi_0} \sin^2(\varphi_0) \cdot (\varphi - \varphi_0) \right) . \quad (9)$$

На рис. 2, в качестве визуальной иллюстрации динамики процесса, показаны зависимости относительной скорости  $V_0 = \frac{v(\varphi)}{P_{1m}}$  движения участка заготовки в зависимости от фазы действующей силы.

Путь, проходимый объектом под действием динамической силы, находится интегрированием формулы (9). Полученное соотношение может служить уравнением для определения фазы –  $\varphi_e$ , которая будет соответствовать пути –  $H$ .

$$H = H(\varphi_e) = \frac{1}{\omega} \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_e} v(\varphi) \cdot d\varphi . \quad (10)$$

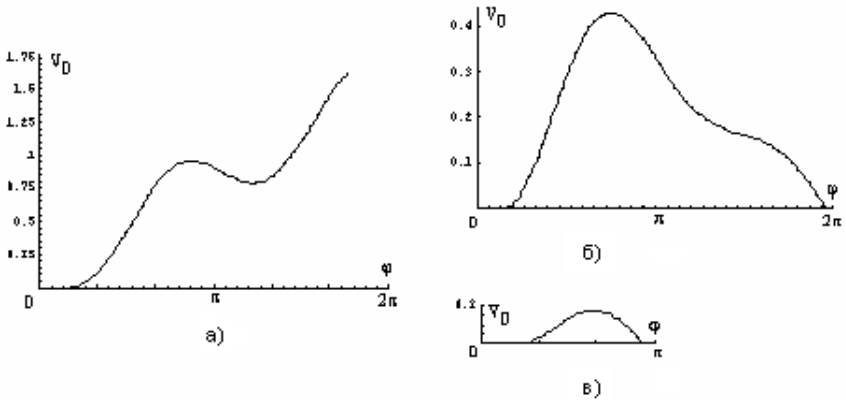


Рисунок 2 – Зависимость относительной скорости деформирования металла заготовки при различных режимах работы электродинамической индукторной системы

$$a) \delta = 0, \varphi_0 = \frac{\pi}{6}; \quad b) \delta = 0,2, \varphi_0 = \frac{\pi}{6}; \quad c) \delta = 0,2, \varphi_0 = \frac{\pi}{4}.$$

С другой стороны, из выражения (6), получим соотношение для  $h = H$ :

$$H(\varphi_e) = \frac{P_r(c^2 + h^2)}{k\sigma_T d}. \quad (11)$$

Подставив в (11) значение  $P_r$  из выражения (8) и учитывая введенные относительные единицы, приравняем (10) и (11). В результате получаем уравнение (12), которое позволяет находить значение фазы действующей силы в конечной точке движения участка заготовки.

$$\frac{\omega^2 \cdot (c^2 + h^2) \cdot \rho \cdot e^{-2\delta \cdot \varphi_0} \cdot \sin^2(\varphi_0)}{k \cdot \sigma_T} = \int_{\varphi_0}^{\varphi_e} \left( \frac{e^{-2\delta\varphi}}{4\delta} \left[ e^{-2\delta(\varphi_0 - \varphi)} (1 + \delta \sin(2\varphi_0)) - (1 + \delta \sin(2\varphi)) \right] - e^{-2\delta \cdot \varphi_0} \sin^2(\varphi_0) \cdot (\varphi - \varphi_0) \right) d\varphi. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что глубина вмятины не оказывает существенно влияния на результаты расчетов, так как в выражении (12) эта величина, как слагаемое суммируется с внешним ее диаметром, причем, первая и вторая величины возводятся в квадрат. Для принятой в расчетах геометрии квадрат внешнего диаметра существенно больше квадрата глубины вмятины. Поэтому за расчетную глубину вмятины принято ее реальное значение  $h$ , а не усредненная величина.

Работа силы над объектом есть характеристика аддитивная [3]. Ее величина для динамического процесса может быть найдена интегрированием

произведения действующей силы на скорость движения объекта в заданном временном интервале.

В терминах решаемой задачи это означает, что

$$A_d = \frac{1}{\omega} \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_s} F(\varphi) \cdot v(\varphi) d\varphi. \quad (13)$$

Выражение (13) преобразуем к виду удобному в практических вычислениях.

Действующая сила описывается зависимостью (1), скорость движения металла заготовки – (9). Подставим их в выражение (13).

После преобразований получим, что

$$A_d = \frac{P_r^2 \cdot S \cdot W}{\rho \cdot d \cdot (\omega \cdot e^{-2\delta \cdot \varphi_0} \cdot \sin^2(\varphi_0))^2}, \quad (14)$$

где

$$W = \int_{\varphi_0}^{\varphi_s} (e^{-2\delta \cdot \varphi} \cdot \sin^2(\varphi)) \cdot \left( \frac{e^{-2\delta \varphi}}{4\delta} \left[ e^{-2\delta(\varphi_0 - \varphi)} (1 + \delta \sin(2\varphi_0)) - (1 + \delta \sin(2\varphi)) \right] - e^{-2\delta \cdot \varphi_0} \cdot \sin^2(\varphi_0) \cdot (\varphi - \varphi_0) \right) \cdot d\varphi.$$

Работа статической силы, совершаемая над объектом при его перемещении по заданному пути, равна произведению этой силы на соответствующее расстояние, то есть  $A_s = F_s \cdot h$ . Работа динамической силы определяется выражением (14).

Из условия равенства работ, что означает равенство затраченной энергии на выполнение одной и той же операции  $A_d = A_s$ , с учетом формул (6), (8), (12) и (14) найдем отношение амплитуд статической и динамической сил, под действием которых происходит выравнивание вмятины заданной геометрии в металлическом листе.

$$\frac{P_r \cdot F_m \cdot W}{\rho \cdot d \cdot \omega^2 \cdot e^{-2\delta \cdot \varphi_0} \cdot \sin^2(\varphi_0)} = F_s \cdot h. \quad (15)$$

Окончательно выражение для определения отношения амплитуд статической и динамической сил имеет вид:

$$\frac{F_m}{F_s} = \frac{\omega^2 \cdot \rho \cdot d \cdot h \cdot e^{-2\delta \cdot \varphi_0} \cdot \sin^2(\varphi_0)}{W \cdot P_r} = \frac{H(\varphi_e)}{W}, \quad (16)$$

где  $H(\varphi_e)$  – правая часть выражения (12).

Рассмотрим пример расчета выравнивания вмятины в стальном листе толщиной  $d = 0,001$  м с помощью индуктора прямого пропускания тока на магнитно-импульсной установке с рабочей частотой разрядного тока  $f_p = 5$  кГц и относительным декрементом затухания –  $\delta = 0,2$ .

Примем, что глубина для всех вмятин одинакова  $H = h = 0,001$  м, а поперечные размеры следующие:  $\ell = b = 2c = 0,03$  м;  $\ell = b = 2c = 0,04$  м;

$\ell = b = 2c = 0,06$  м. Плотность вещества стали  $\rho = 7500$  кг/м<sup>3</sup>, предел текучести –  $\sigma_T = 24 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup> [1].

Вычисления проведем для двух значений коэффициента –  $k$ , определяющего разброс значений максимальных напряжений,  $k = 0,631; 1,762$ .

По формулам (9), (12) и (14) вычислим, в относительных единицах следующие величины  $V_0, H(\varphi_e), W$ . Результаты вычислений представлены в виде графических зависимостей на рис. 3.

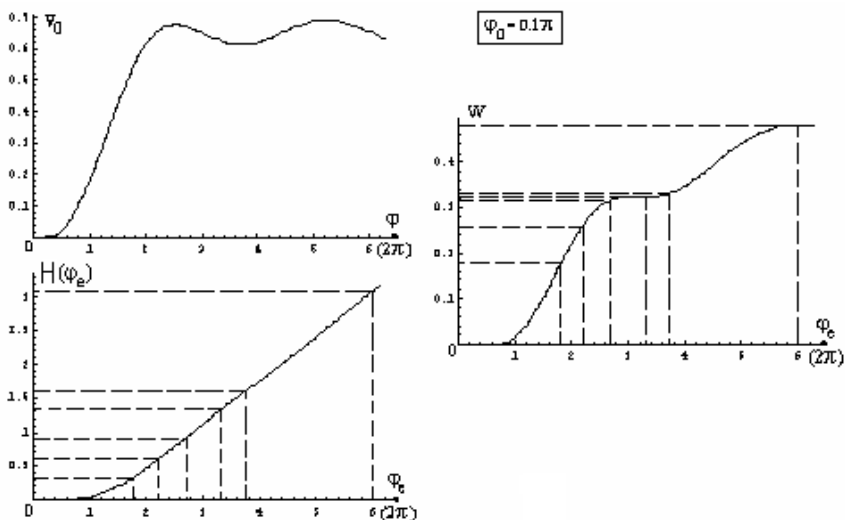


Рисунок 3 – Результаты расчетов

Следует отметить, что при проведении расчетов в качестве начальной фазы действующего поля сил была взята  $\varphi_0 = 0,1 \cdot \pi$ . Как показывают вычисления, при больших ее значениях в металле заготовки появляются механические импульсы, но их величин явно недостаточно для того, что бы объект пришел в движение. Это означает, что уравнение (9) не имеет решений.

Результаты вычислений  $H(\varphi_e)$  для вмятин разной геометрии приведены ниже.

$$k = 0,631: H(\varphi_e)_{2c=0,03} \approx 0,93; \quad H(\varphi_e)_{2c=0,04} \approx 1,65; \quad H(\varphi_e)_{2c=0,06} \approx 3,07.$$

$$k = 1,762: H(\varphi_e)_{2c=0,03} \approx 0,33; \quad H(\varphi_e)_{2c=0,04} \approx 0,59; \quad H(\varphi_e)_{2c=0,06} \approx 1,328.$$

По графику  $H(\varphi_e)$  на рис. 3 находим значения конечных фаз поля действующих сил, соответствующих моментам выпрямления вмятин заданной глубины.

$$k = 0,631, \quad \varphi_{e(2c=0,03)} \approx 2,67; \quad \varphi_{e(2c=0,04)} \approx 3,7; \quad \varphi_{e(2c=0,06)} \approx 6.$$

$$k = 1,762, \quad \varphi_{e(2c=0,03)} \approx 1,8; \quad \varphi_{e(2c=0,04)} \approx 2,2; \quad \varphi_{e(2c=0,06)} \approx 3,3.$$

По найденным значениям конечных фаз на графике для  $W$  (рис. 3) определяем:

$$k = 0,631, \quad W_{(2c=0,03)} \approx 0,326; \quad W_{(2c=0,04)} \approx 0,34; \quad W_{(2c=0,06)} \approx 0,48.$$

$$k = 1,762, \quad W_{(2c=0,03)} \approx 0,18; \quad W_{(2c=0,04)} \approx 0,23; \quad W_{(2c=0,06)} \approx 0,32.$$

По формуле (16) находим отношение амплитуд динамических и статических сил, выполняющих одну и ту же работу по перемещению объекта (выравнивание вмятины глубиной 1 мм):

$$k = 0,631; \quad \left. \frac{F_m}{F_s} \right|_{(2c=0,03)} \approx 2,9; \quad \left. \frac{F_m}{F_s} \right|_{(2c=0,04)} \approx 4,84; \quad \left. \frac{F_m}{F_s} \right|_{(2c=0,06)} \approx 6,4.$$

$$k = 1,762, \quad \left. \frac{F_m}{F_s} \right|_{(2c=0,03)} \approx 1,83; \quad \left. \frac{F_m}{F_s} \right|_{(2c=0,04)} \approx 2,57; \quad \left. \frac{F_m}{F_s} \right|_{(2c=0,06)} \approx 4,15.$$

Величина динамических сил, которые необходимы для выполнения заданной технологической операции, существенно превышает соответствующие статические, а именно:

$$F_m \approx (1,83...6,4) \cdot F_s$$

Приведем абсолютные значения амплитуд скоростей движения объектов, например, для  $k = 0,631$ :

$$V_m \left|_{(2c=0,03)} \approx 33,77 \frac{M}{c}; \quad V_m \left|_{(2c=0,04)} \approx 19,03 \frac{M}{c}; \quad V_m \left|_{(2c=0,06)} \approx 8,47 \frac{M}{c}.$$

Проведенные экспериментальные исследования на магнитно-импульсной установке МИУ-20, показали, что если величина электродинамических сил недостаточна для полного выравнивания вмятины, то после протекания первого импульса тока в индукторе, края вмятины, расположенные наиболее близко к основному токопроводу индуктора, выравнивались наиболее интенсивно. Результатом данного воздействия являлось уменьшение ее поперечного размера. Следующее воздействие импульса той же амплитуды и той же частоты было менее эффективно. При достижении вмятиной какого-то минимального размера дальнейшее воздействие в том же амплитудно-частотном режиме не давало никаких результатов. Следовательно, при многократном электродинамическом воздействии необходимо изменение амплитудно-частотных характеристик следующих друг за другом токовых импульсов. Это положение требует дополнительных исследований.

**Список литературы:** 1. *Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с. 2. *Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю.* Анализ электродинамических усилий в системе плоский индуктор прямого пропускания тока – обрабатываемая заготовка // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 37. – С. 55-62. 3. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. – 4-е изд., перераб. – М.: Наука, 1968. – 940 с. 4. *Михайлов*



УДК 621.373

**А.В.БОРЦОВ**; НТУ «ХПИ»

## **ВЛИЯНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ НА СОГЛАСОВАННЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ**

Розглянутий вплив опору, що погоджує низьковольтне плече дільника з вимірювальним кабелем, на перехідну характеристику дільника.

Influence of resistance, matching the low - voltage arm of divider with a measuring cable, on transient response of divider is considered.

**Постановка задачі.** В процесі розробки, виготовлення і настройки високовольтних імпульсних джерел для електрофізических технологічних установок перед розробниками завжди остро стоїть проблема вимірювання високих напруг. Для вимірювання високих імпульсних напруг широко застосовуються делителі напруги – резистивні, ємнісні та змішані. Вимірювання на високій напрузі ускладнюються тим фактом, що вимірювальні засоби повинні мати відповідну електричну міцність. Отже, при вимірюванні високих імпульсних напруг необхідно враховувати як «паразитні» параметри делителя напруги, так і параметри вимірювального контуру. Вплив «паразитних» параметрів делителя напруги компенсують включенням подовжніх ємностей, а вимірювальний кабель узгоджується з низьковольтним плечем делителя з допомогою активного опору, включеного послідовно з кабелем. В статті розглядається вплив узгоджуючого опору на амплітудно-часові характеристики вимірюваного імпульсу напруги.

Схема заміщення делителя напруги, з використанням зосереджених параметрів, включає в себе (рис. 1):

- $L_n$  – індуктивність підсоединительних проводів;
- $L_1, L_2$  – паразитні індуктивності високовольтного і низьковольтного плечей делителя;
- $C_1, C_2$  – подовжні ємності високовольтного і низьковольтного плечей делителя.

- чей делителя;
- $C_3$  – эквивалентная емкость делителя на землю;
  - $R_1, R_2$  – сопротивления высоковольтного и низковольтного плечей делителя;
  - $R_c$  – согласующее сопротивление;
  - $R_H$  – сопротивление нагрузки;
  - $Z_B$  – волновое сопротивление измерительного кабеля.

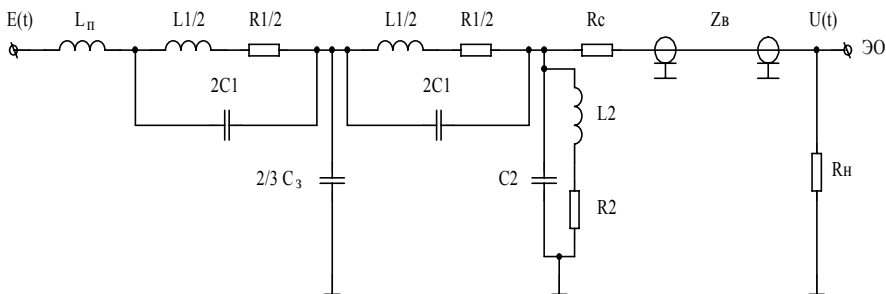


Рисунок 1 – Схема замещения делителя напряжения

Эта схема с учетом различной роли ее элементов справедлива для резистивного, емкостного и смешанного делителей [1, 2, 3]. Для того, чтобы в измерительном кабеле не было отражений, сопротивление  $R_c$ , согласующее кабель с низковольтным плечом делителя  $R_2$  и сопротивление нагрузки  $R_H$  выбираются из условий

$$\begin{cases} R_2 + R_c = Z_B; \\ R_H = Z_B. \end{cases} \quad (1)$$

Переходной процесс в схеме (рис. 1) описывается дифференциальным уравнением 10 порядка, что сильно усложняет анализ схемы.

Для случая, когда  $L_\pi \ll L_1, L_2$  и  $C_3 \ll C_1, C_2$ , что достаточно просто осуществить на практике, схема замещения упрощается (рис. 2).

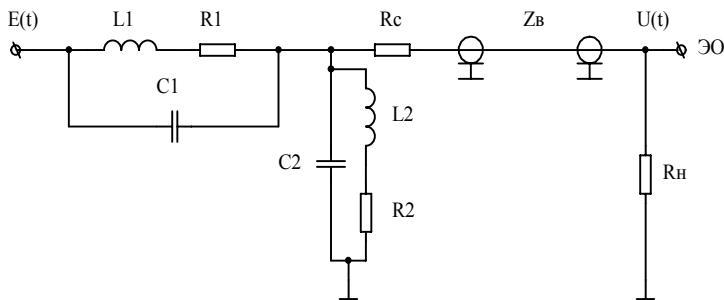


Рисунок 2 – Упрощенная схема замещения делителя

Используя метод межузловых потенциалов [4, 5], и дифференциальный оператор  $\frac{d}{dt}$ , для напряжения на нагрузке  $U(t)$  получим уравнение 3 – его порядка

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[ \frac{\theta_1^2 \tau_{L2}}{k_d} + \frac{(k_d - 1) \theta_2^2 \tau_{L1}}{k_d} \right] \frac{d^3}{dt^3} + \left[ \frac{(\theta_1^2 + \tau_{L2} \tau_{C1})}{k_d} + \frac{(k_d - 1) (\theta_2^2 + \tau_{L1} \tau_{C2})}{k_d} \right] \right. \\ & + \left. \frac{(k_d - 1) \tau_{L1} \tau_{L2}}{k_d (1 + 2 \frac{R_c}{R_2})} \right] \frac{d^2}{dt^2} + \left[ \frac{(\tau_{L2} + \tau_{C1})}{k_d} + \frac{(k_d - 1) (\tau_{L1} + \tau_{C2})}{k_d} + \frac{(k_d - 1) (\tau_{L1} + \tau_{L2})}{k_d (1 + 2 \frac{R_c}{R_2})} \right] \frac{d}{dt} + \\ & + \frac{(k_d - 1)}{k_d (1 + 2 \frac{R_c}{R_2})} + 1 \} U(t) = \frac{R_H}{k_d (R_c + R_H)} \left[ \theta_1^2 \tau_{L2} \frac{d^3}{dt^3} + (\theta_1^2 + \tau_{L2} \tau_{C1}) \frac{d^2}{dt^2} + \right. \\ & \left. + (\tau_{L2} + \tau_{C1}) \frac{d}{dt} + 1 \right] E(t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } k_d = \frac{R_1 + R_2}{R_2}; \theta_1^2 = L_1 C_1; \theta_2^2 = L_2 C_2; \quad \tau_{L1} = \frac{L_1}{R_1}; \tau_{L2} = \frac{L_2}{R_2};$$

$$\tau_{C1} = R_1 C_1;$$

$$\tau_{C2} = R_2 C_2,$$

с начальными условиями

$$U(0) = 0; \frac{dU(0)}{dt} = 0; \frac{d^2U(0)}{dt^2} = 0. \quad (3)$$

Для неискаженной передачи формы измеряемого сигнала потребуем выполнение условий (согласование по постоянным времени в схеме замещения делителя)

$$\theta_1 = \theta_2 = \tau_{L1} = \tau_{L2} = \tau_{C1} = \tau_{C2} = \theta. \quad (4)$$

При этом уравнение (2) запишется в виде

$$\begin{aligned} & \left\{ \theta^3 \frac{d^3}{dt^3} + 2\theta^2 \left[ 1 + \frac{1}{2(1 + 2 \frac{R_c}{R_2})} \right] \frac{d^2}{dt^2} + 2\theta \left[ 1 + \frac{1}{(1 + 2 \frac{R_c}{R_2})} \right] \frac{d}{dt} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{(1 + 2 \frac{R_c}{R_2})} + 1 \right\} U(t) = \frac{R_H}{k_d (R_c + R_H)} \left( \theta^3 \frac{d^3}{dt^3} + 2\theta^2 \frac{d^2}{dt^2} + \right. \\ & \left. + 2\theta \frac{d}{dt} + 1 \right) E(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что для неискаженной передачи согласованным делителем формы измеряемого сигнала, кроме (4), необходимо еще выполнить условия:

$$\begin{cases} 1 + \frac{1}{2(1 + 2\frac{R_c}{R_2})} = 1; \\ 1 + \frac{1}{(1 + 2\frac{R_c}{R_2})} = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Условия (6) можно выполнить только приближенно, обеспечив

$$\frac{R_c}{R_2} \gg 1. \quad (7)$$

Тогда форма выходного сигнала делителя исказится в допустимых пределах, а амплитуда будет меньше амплитуды измеряемого сигнала в  $\frac{k_d(R_c + R_H)}{R_H}$  раз.

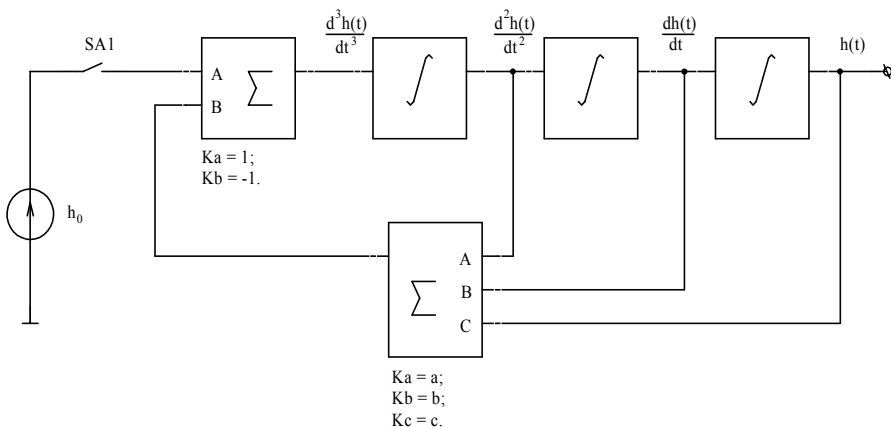


Рисунок 3 – Расчетная модель переходной характеристики согласованного делителя:

$$a = 2\left[1 + \frac{1}{2(1 + 2\frac{R_c}{R_2})}\right]; b = 2\left[1 + \frac{1}{(1 + 2\frac{R_c}{R_2})}\right]; c = \left[1 + \frac{1}{2(1 + 2\frac{R_c}{R_2})}\right]$$

– масштабирующие множители;  $\Sigma$  – суммирующий блок;  $\int$  – интегрирующий блок.

Переходную характеристику делителя напряжения  $h(t)$  рассчитаем по уравнению (5), взяв в качестве входного сигнала  $E(t)$  единичный скачок напряжения

$$E(t) = 1(t) = \begin{cases} 1, & t > 0; \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (8)$$

В результате получим дифференциальное уравнение для переходной характеристики  $h(t)$  согласованного делителя напряжения

$$\frac{d^3 h}{d\tau^3} + 2\left[1 + \frac{1}{2(1 + 2\frac{R_c}{R_2})}\right] \frac{d^2 h}{d\tau^2} + 2\left[1 + \frac{1}{(1 + 2\frac{R_c}{R_2})}\right] \frac{dh}{d\tau} + \left[1 + \frac{1}{(1 + 2\frac{R_c}{R_2})}\right] h = h_0. \quad (9)$$

где  $h_0 = \frac{R_H \cdot 1(\tau)}{k_d(R_c + R_H)}$ ;  $\tau = \frac{t}{\theta}$  – относительное время.

Уравнение (9) в диапазоне  $R_c/R_2 = 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0; 50,0; 100,0$  решено с помощью пакета прикладных программ для персонального компьютера *Electronics Work Bench Pro* [6]. Расчетная модель уравнения (9) показана на рис. 3.

Результаты моделирования уравнения (9) представлены на рис. 4 и 5.

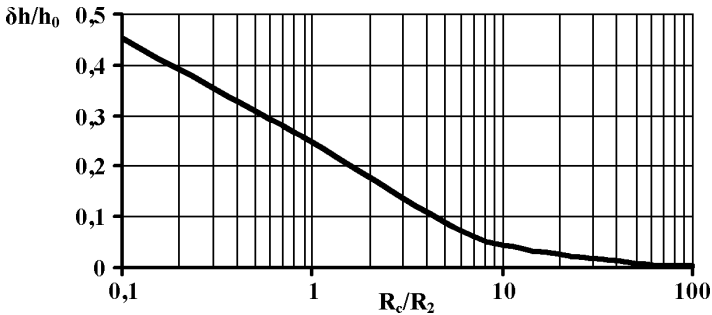


Рисунок 4 – Зависимость относительного уменьшения амплитуды переходной характеристики делителя  $\delta h/h_0$  от соотношения  $R_c/R_2$

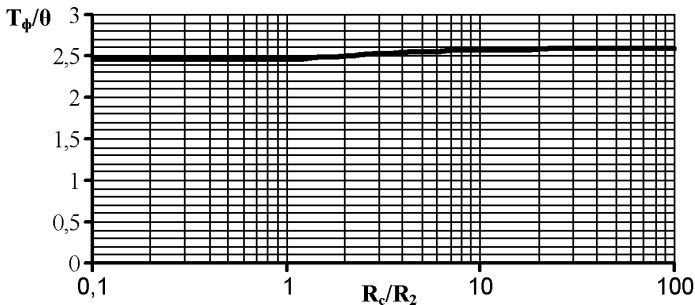


Рис. 5. Зависимость относительной длительности фронта переходной характеристики делителя  $T_\phi/\theta$  от соотношения  $R_c/R_2$

## Выводы

1. для неискаженной передачи формы измеряемого импульса напряжения необходимо выполнение условий:

– равенство всех постоянных времени в схеме замещения делителя

$$\sqrt{(L_1 C_1)} = \sqrt{(L_2 C_2)} = \frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2} = R_1 C_1 = R_2 C_2 = \theta;$$

– согласующее сопротивление  $R_C$  должно быть значительно больше сопротивления низковольтного плеча  $R_2$

$$R_C \gg R_2;$$

2. время установления переходной характеристики  $\tau_p$  слабо зависит от

соотношения  $\frac{R_C}{R_2}$  и лежит в диапазоне  $2,4\theta \leq \tau_p \leq 2,6\theta$ ;

3. уменьшение амплитуды переходной характеристики может достигать

величины  $\frac{\delta h}{h_0} \approx 0,45$  при малых значениях  $\frac{R_C}{R_2}$  ( $\frac{R_C}{R_2} \leq 0,1$ ).

**Список литературы:** 1. *А.М.Ашнер* Получение и измерение импульсных высоких напряжений. – М.: Энергия, 1979. – 120 с. 2. *А.Шваб* Измерения на высоком напряжении (Измерительная техника и способы измерения). – М., «Энергия», 1973. – 232 с. 3. *В.А.Авруцкий, И.П.Кужекин, Е.Н.Чернов* Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента: Учебное пособие. Под ред. И.П. Кужекина. – М.: МЭИ, 1983. – 264 с. 4. *Л.Р.Нейман, К.С.Демирчян* Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 2. – 3-е изд., перераб. доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 416 с. 5. *Л.А.Бессонов* Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. – М., «Высшая школа», 1973. – 752 с. 6. *В.И.Карлацук* Электронная лаборатория на ИВМ РС. Издание 2-е, дополненное и переработанное. – М., «Солон – Р», 2001. – 726 с.

*Поступила в редколлегию 22.10.2007*

УДК 621.317.3

**Ю.Н.ГИРКА; Ю.С.НЕМЧЕНКО;** НТУ «ХПИ»

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОВЕДЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЭТАЛОНЕ РЭМП

Описана методика визначення рівня напруженості електромагнітного поля за настройками високовольтного обладнання.

The procedure of determination of electromagnetic field intensity level by settings of high-voltage equipment is described.

**Постановка задачи.** В 2007 году ГП «Харьковстандартметрология» утверждены программы и методики государственной метрологической аттестации и методики поверки средств измерения импульсных электрических и магнитных полей. Методика, изложенная в этих документах, предполагает установку и поддержание на постоянном уровне напряженности электрического или магнитного поля (в зависимости от объекта аттестации) в рабочем объеме полосковой линии Эталона РЭМП, конструктивные особенности которого описаны в [1]. Определение и контроль уровня напряженности поля осуществляется с помощью образцового измерительного комплекса, постоянное присутствие которого искажает равномерность поля. Поэтому при проведении экспериментов с аттестуемым средством измерительной техники (СИТ), присутствие в рабочем объеме другого СИТ исключено, а контроль уровня напряженности поля приходится осуществлять другими методами.

**Решение задачи.** Эталон РЭМП в упрощенном виде (рис. 1) – это два высоковольтных импульсных источника питания (ИИП) различной конструкции, которые при достижении на них необходимого зарядного напряжения разряжаются при помощи коммутаторов (К) на две полеобразующие системы (ПЛ-24 и ПЛ-48) в виде замкнутых симметричных полосковых линий, согласованных на конце активными нагрузками, равными волновому сопротивлению.

При этом выходными параметрами Эталона РЭМП являются импульсы электрического и магнитного полей с амплитудно-временными характеристиками, которые определяются штатным образцовым измерительным комплексом, состоящим из трех СИТ:

- измеритель магнитной составляющей поля с оптической линией передачи информации – СПЕФВ-НО;
- измеритель электрической составляющей поля с оптической линией передачи информации – СПЕФВ-ЕО;
- измеритель электрической составляющей поля с кабельной линией передачи информации – СПЕФВ-ЕК.

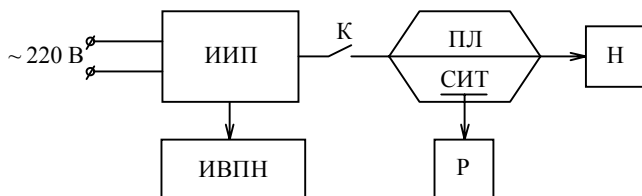
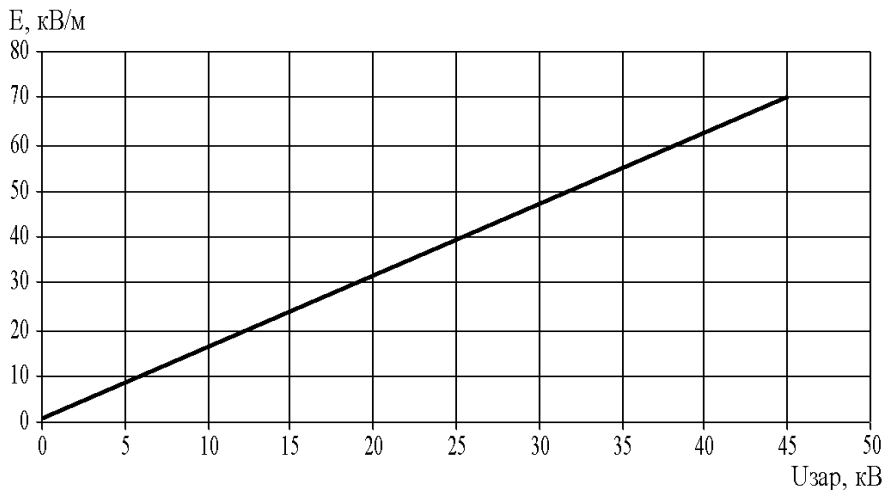


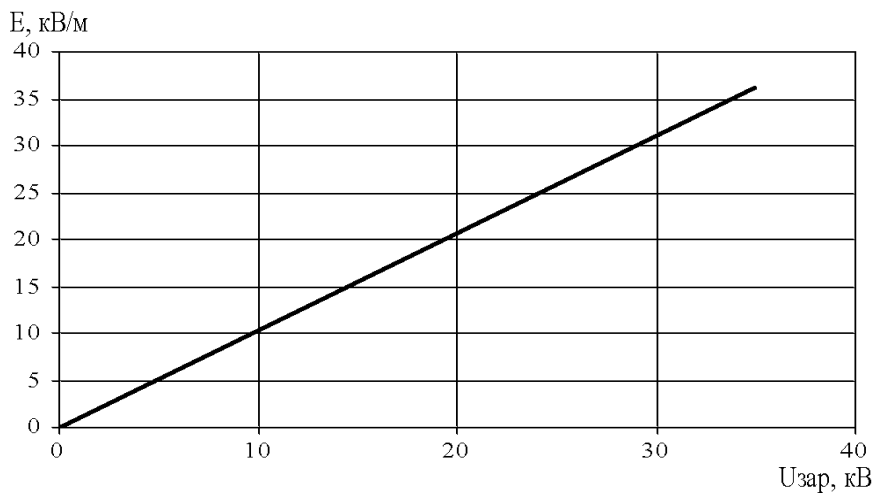
Рисунок 1 – Упрощенная схема Эталона РЭМП:

ИИП – импульсный источник питания; ИВПН – измеритель высокого постоянного напряжения; К – коммутатор; ПЛ – полосковая линия; СИТ – средство измерительной техники; Р – регистратор; Н – нагрузка

Практика экспериментальной работы на Эталоне РЭМП показала, что существует однозначная зависимость между амплитудами электромагнитного поля и зарядного напряжения ИИП, которое измеряется штатным измерителем высокого постоянного напряжения (ИВПН). ИВПН представляет собой омический делитель напряжения, низковольтное плечо которого нагружено на высокоточный цифровой вольтметр типа В2-22



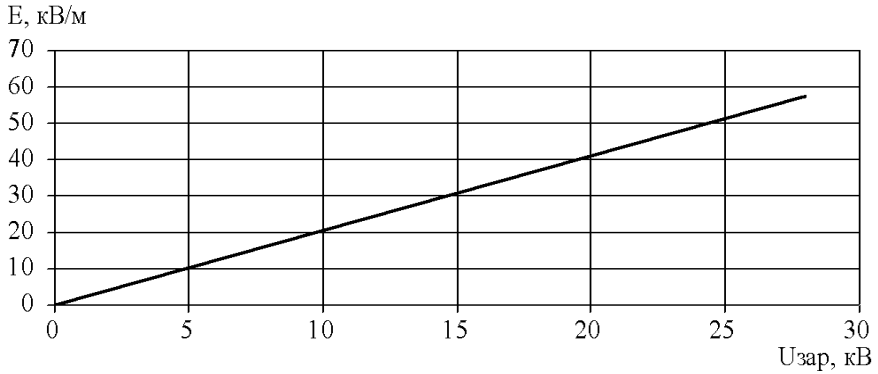
а



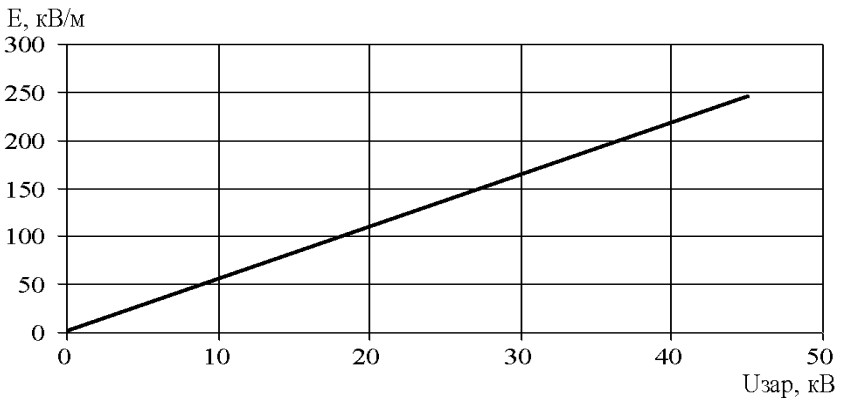
б

Рисунок 2 – График зависимости напряженности электрического поля в ПЛ-48 от зарядного напряжения ИИП экспоненциальных (а) и ступенчатых (б) импульсов





а



б

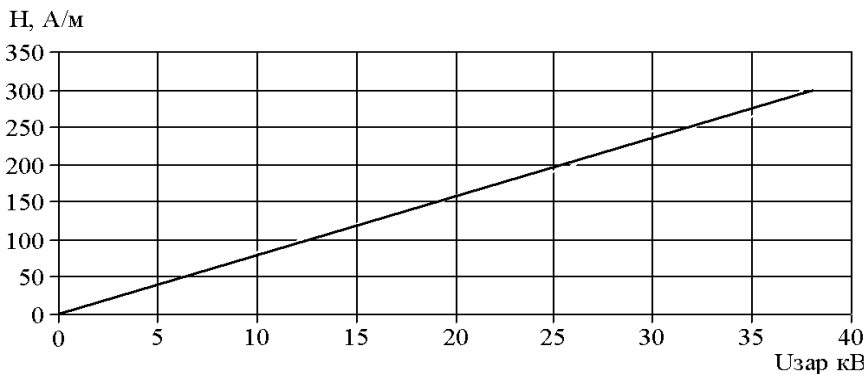
Рисунок 3 – График зависимости напряженности электрического поля в ПЛ-24 от зарядного напряжения ИИП ступенчатых (а) и экспоненциальных (б) импульсов

Из теоретических основ электротехники [2] известно, что зависимость между постоянным зарядным напряжением  $RC$  цепочки и выходным напряжением переходного процесса при коммутации линейна, а напряженность электрического поля в рабочем объеме Эталона РЭМП определяется как отношение напряжения между электродами полосковой линии к расстоянию между ними. Поэтому наиболее простым способом контроля напряженности поля во время проведения испытаний СИТ с неизвестными или не подтвержденными метрологическими характеристиками является контроль зарядного напряжения на пульте контроля и управления Эталона РЭМП.

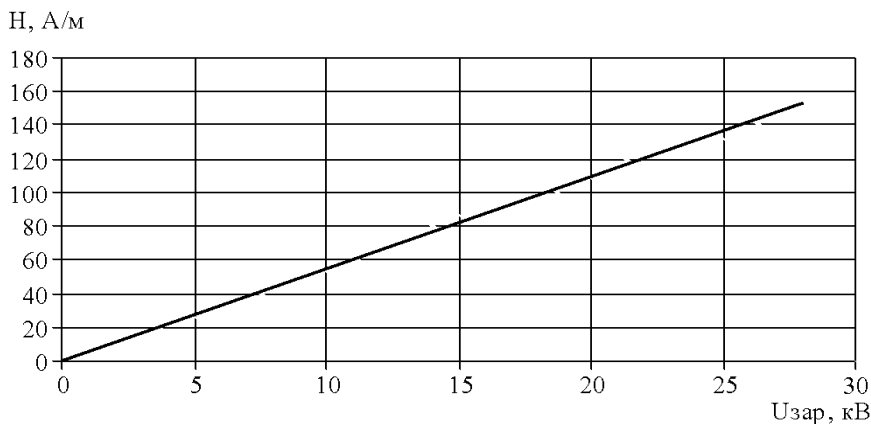
Для определения зависимости зарядного напряжения ИИП и напряженности поля в ПЛ мы провели подробные экспериментальные исследования, в ходе которых были получены не менее 30 точек в каждом режиме работы

Эталона РЭМП с четкой фиксацией зарядного напряжения и напряженности электрического поля с помощью ИВПН и образцового измерителя напряженности электрического поля СПЕФВ-ЕК. Измеритель напряженности электрического поля был выбран с кабельной линией передачи информации, т.к. его показания имеют гораздо более линейный характер, чем аналогичный измеритель с оптической системой.

По полученным данным были составлены графики зависимости напряженности электрического поля от зарядного напряжения генераторов экспоненциальных и прямоугольных импульсов. После этого была проведена аппроксимация полученных точек на прямую. Разброс данных составил не более 5 %. Графики приведены на рис. 2 и 3.



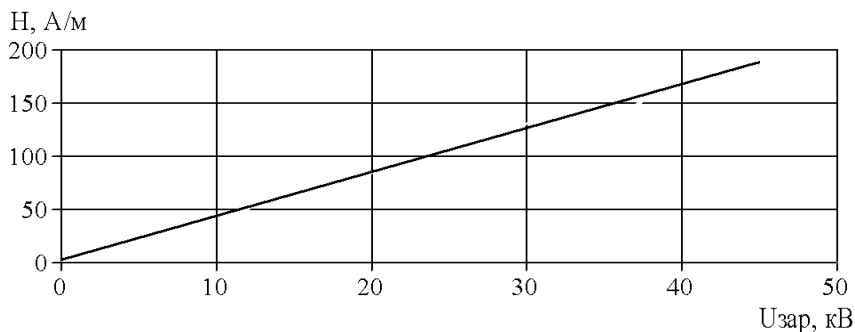
а



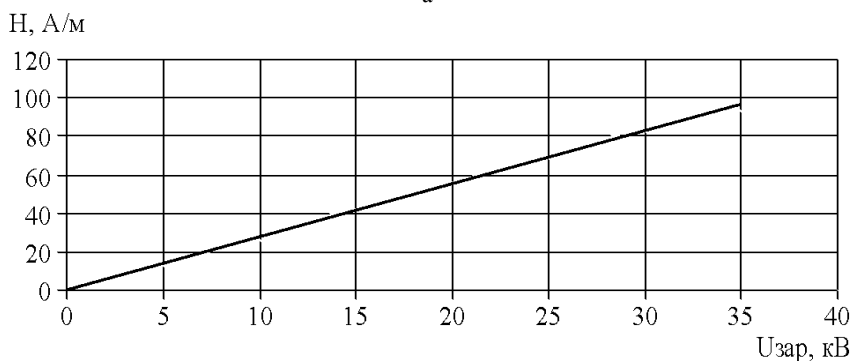
б

Рисунок 4 – Графики зависимости напряженности магнитного поля ПЛ-24 от величины зарядного напряжения ИИП экспоненциальных (а) и ступенчатых (б) импульсов

Образцовый измеритель магнитного поля имеет только оптическую линию передачи информации и два поддиапазона измерений, поэтому наиболее простой и надежный способ определения напряженности магнитного поля, на наш взгляд – это использовать факт ТЕМ-волны, распространяющейся в симметричной полосковой линии, в которой, как известно, отношение напряженностей электрического и магнитного полей составляет  $120\pi$  [3]. Тогда, для получения зависимости напряженности магнитного поля от величины зарядного напряжения, достаточно разделить напряженность электрического поля на 377. Таким образом, были получены графики на рис. 4 и 5.



а



б

Рисунок 5 – Графики зависимости напряженности магнитного поля ПЛ-48 от величины зарядного напряжения ИИП экспоненциальных (а) и прямоугольных (б) импульсов

Основное значение этих графиков заключается в том, что они являются единственным надежным способом определения амплитуды напряженности электромагнитного поля в ходе проведения метрологической аттестации СИТ, методика которой состоит в следующем:

- 1) Аттестуемое СИТ устанавливается в рабочей зоне ПЛ.
- 2) Устанавливается заданный уровень напряженности поля Эталона РЭМП по графикам на рис. 2-5.
- 3) Подавая импульсы напряжения на ПЛ, набираем статистику показаний аттестуемого СИТ.

### **Выводы.**

Таким образом, графики на рис. 2 – 5 являются необходимым инструментом для проведения метрологической аттестации СИТ сериями идентичных по амплитуде импульсов электромагнитного поля.

В заключении можно отметить, что приведенные графики зависимости напряженности электрического или магнитного поля в рабочей зоне Эталона РЭМП от зарядного напряжения ИИП с успехом применялась в процессе практического опробования программ и методик государственной метрологической аттестации и методик поверки средств измерения импульсных электрических и магнитных полей, где зарекомендовали себя с лучшей стороны.

**Список литературы:** 1. *Кравченко В.И., Немченко Ю.С.* Исходный эталон Украины импульсных электрических и магнитных полей – цель создания эталона, требования к нему и его конструктивное исполнение // *Электротехника і електромеханіка.* – 2006. – №2. – С. 76-79. 2. *Нейман Л.Р., Демерчан К.С.* Теоретические основы электротехники. Т.1. – М., 1985. – 238 с. 3. *Ковалев И.С.* Конструирование и расчет полосковых устройств. – М., 1974. – 296 с.

*Поступила в редколлегию 22.10.2007*

УДК 621.317.3

**В.С.ГЛАДКОВ**, канд.техн.наук; **Л.В.ВАВРИВ**, канд.физ.-мат.наук;  
**А.А.ГУЧЕНКО**; **А.В.ШЕСТЕРИКОВ**; НТУ «ХПИ»

### **К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА**

У статті проаналізоване використання різних систем електродів, які створюють електростатичні поля для обробки трансформаторної олії. Запропоновано систему електродів для створення об'ємнопросторового високоградієнтного електричного поля.

The use of different electrode systems creating electrostatic fields for treatment of transformer oil has been analyzed in the paper. The electrode system for creation of three-dimensional high-gradient electric field was proposed.

**Введение.** С точки зрения физической химии трансформаторное масло (ТМ), применяемое для заполнения силового электрооборудования, является полидисперсной микрогенной системой. То есть в дисперсной среде (особенно ТМ, как смеси сложных и простых углеводородных и неуглеводородных компонентов) всегда присутствуют несколько дисперсных фаз различного характера и разной степени дисперсности [1,2]. Проще говоря, в масле присутствуют микроскопические примеси твердых, жидких и газообразных веществ. Эти примеси создают неоднородности, влияющие на протекание физических процессов в ТМ. На этом и основывается ряд методов, позволяющих зафиксировать наличие указанных примесей и оценить их количественные и качественные характеристики. Общий подход к применению некоторых из этих методов рассматривается в [3].

При приложении внешнего электрического поля в ТМ, как в любой полидисперсной микрогенной системе, наблюдаются электрокинетические явления. Частицы дисперсных фаз (твердые, жидкие и газообразные) становятся электроразряженными микрообъектами. Электрический заряд частиц согласно правилу Кена будет различным: частицы с диэлектрической проницаемостью большей (вода), чем у окружающей среды (ТМ), заряжаются положительно, а с меньшей (газ) – отрицательно [4].

На движении частиц в электрическом поле в сторону того из электродов, заряд которого противоположен по знаку их собственному, основан процесс электрофореза. В результате электрофореза в ТМ происходит сортировка и повышение концентрации определенного вида частиц вблизи электродов. Задача состоит в оптимальном выборе системы и конфигурации электродов.

**Решение проблемы.** Для упорядочения движения частиц применяются системы электродов различных типов, обеспечивающие определенную конфигурацию и напряженность электрического поля.

Простейшим вариантом является плоская система электродов, то есть по сути, плоский конденсатор, между обкладками которого в однородном электрическом поле находится ТМ (дисперсионная среда) с примесями (дисперсная фаза).

Однако, при экспериментах с ТМ, содержащим примеси в растворенном или мелкодисперсном состоянии, четкого разделения последних вблизи электродов не наблюдается вследствие влияния контактной перезарядки частиц примесей: заряженная частица, касаясь противоположно заряженного электрода, меняет свой заряд и движется к другому электроду. Этот процесс повторяется многократно и затрудняет процесс регистрации примесей.

Следовательно, использование систем электродов, создающих однородное электрическое поле нецелесообразно.

В неоднородных электрических полях наблюдается движение частиц

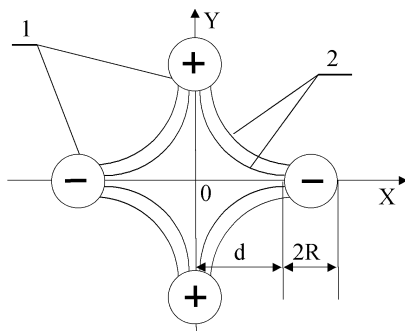
дисперсной фазы по силовым линиям в направлении увеличения напряженности поля, где их концентрация увеличивается.

Типичным примером системы электродов, создающих такое поле, является коаксиальная система. Силы, действующие как на диэлектрические, так и на проводящие частицы различных размеров, а также характер движения этих частиц в электрическом поле коаксиальной системы электродов достаточно подробно проанализированы в [5,6]. Убедительно показано, что диэлектрические частицы с диэлектрической проницаемостью  $\xi$  большей, чем диэлектрическая проницаемость среды  $\xi_{cp}$ , будут оседать на внутреннем электроде, частицы с  $\xi < \xi_{cp}$  будут оседать на внешнем электроде [5]. Что касается проводящих частиц, то они при любых размерах и любых действительных значениях  $\xi$  втягиваются в область максимального значения поля [6].

В свою очередь, увеличение концентрации частиц вблизи электродов ведет к увеличению скорости коагуляции, быстрому расслоению фаз системы. Однако, для того чтобы градиентная сила существенно влияла на процесс коагуляции, необходимо, чтобы градиент поля имел большую величину во всем объеме. А для системы коаксиальных электродов наибольший градиент поля расположен только лишь вблизи внутреннего электрода. Отсюда следует, что система коаксиальных цилиндров малоэффективна [7].

Конструкция электродов должна представлять собой объемно-пространственную систему, чтобы образовывать по всему обрабатываемому объему высокоградиентное электрическое поле.

С этой точки зрения интерес представляет система электродов, известная в электронной оптике как четырехполюсная, или квадрупольная, электростатическая линза [8] (см. рисунок).



Поперечное сечение четырехполюсной электростатической линзы:  
1 – цилиндрические электроды; 2 – силовые линии электрического поля.

Напряженность электрического поля в такой системе электродов в декартовой системе координат с центром на оси симметрии определяется вы-

ражением:

$$E(X, Y) = \frac{2U}{d} \sqrt{X^2 + Y^2},$$

где  $d$  – расстояние от центра электродной системы (точка  $O$ ) до электрода;  $X$  и  $Y$  – координаты.

Очевидно, что в центре системы напряженность поля равна нулю и при вертикальной ориентации электродов частица примеси, находящаяся там движется только под действием силы тяжести. Это положение крайне неустойчиво, при малейшем отклонении от нулевой точки частица начинает двигаться под действием пондеромоторной силы со стороны поля.

С точки зрения получения максимального градиента электрического поля геометрия электродной системы должна соответствовать соотношению  $R = 1,10 \div 1,15 d$  [8].

В общем случае система электродов может быть не только четырехполюсной, а и любой кратной четырем.

**Выводы.** Таким образом, для электрических устройств обработки ТМ наиболее целесообразно использовать системы электродов типа четырех полюсной электростатической линзы, потому что такие системы позволяют получить объемно-пространственное электрическое поле с максимальным градиентами.

Если считать систему из четырех электродов элементарной ячейкой, то из таких ячеек несложно создать пространственную систему сколь угодно большого поперечного сечения. Такая система позволяет при относительно невысоких потенциалах электродов элементарных ячеек получить в большом объеме обрабатываемого ТМ пространственное распределение высокоградиентного электрического поля, что значительно увеличивает эффективность обработки ТМ.

**Список литературы:** 1. *Р.А.Лунштейн, М.И. Шахнович* Трансформаторное масло. – М: Энергоатомиздат, 1964. – 296 с. 2. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов. – М.: Энергия, 1980. – 240 с. 3. *В.С. Гладков, А.А. Гученко, А.В. Шестериков* К определению малых количеств газов и влаги в трансформаторном масле // Вестник НТУ «ХПИ», Харьков. – 2005. – № 49. – С. 160-163. 4. *М.Г. Грановский, И.С. Лавров, О.В. Смирнов* Электрообработка жидкостей. – Л.: Химия, 1976. – 216 с. 5. *А.И. Коробко, З.И. Коробко* Математическая модель поведения диэлектрической частицы в коаксиальном электрофильтре // Труды 11-й Международной научно-технической конференции «Физическое и компьютерные технологии». – Харьков: Изд-во «ФЭД». – 2005. – 386 с. 6. *А.И. Коробко, З.И. Коробко* Математическая модель поведения проводящей частицы в коаксиальном электрофильтре // Труды 11-й Международной научно-технической конференции «Физическое и компьютерные технологии». – Харьков: Изд-во «ФЭД». – 2005. – 386 с. 7. *Г.М. Панченков, Л.К. Цобек* Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле. – М.: Химия, 1969. – 122 с. 8. *В.М. Кельман, С.Я. Явор* Электронная оптика. – Л.: Наука, 1968. – 488 с. 9. *И.А.Шукейло* Сильнофокусирующая линза с цилиндрическими полюсами // Журнал технической физики. – 1959. – Том XXIX, в. 10. – С. 1225-1227.

*Поступила в редколлегию 29.10.2007*

**В.С.ГЛАДКОВ**, канд.техн.наук; **П.Н.МЕЛЬНИКОВ**;  
**В.В.РУДАКОВ**, докт.техн.наук; НТУ «ХПИ»;  
**И.И.МАГДА**, докт.физ.-мат.наук, ННЦ «ХФТИ»

## **ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНОГО ЗАРЯДА МАЛОЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1,0 МВ**

Наведено опис створеного джерела заряджання малоємнісної навантаги напругою до 1,0 МВ, яке складається з маслонаповненого генератора імпульсних напруг амплітудою до 1,0 МВ, системи керування, генератора підпалювальних імпульсів та підвищувально-випрямного пристрою. Генератор імпульсів має номінальну напругу амплітудою 1,0 МВ, ємність у розряді 500 пФ енергія, що запасається, 250 Дж, власну індуктивність <0,7 мкГн, гарантований ресурс  $10^5$  циклів «заряд-розряд», тривалість фронту першої напівхвилі напруги 15 нс на навантазі 200 пФ та частоті слідування імпульсів, що генеруються, 1 Гц.

The description of created source of pulsed charging of low-capacitance load with voltage up to 1.0 MV is presented. The source consists of oil-filled generator of pulsed voltages with amplitudes up to 1.0 MV, control system, ignition pulse generator, and stepping-up and rectifying device. The pulse generator has nominal voltage 1.0 MV, discharging capacitance 500 pF, stored energy 250 J, self-inductance <0.7  $\mu$ kH, guaranteed resource  $10^5$  cycles of «charge-discharge», duration of front of first half-wave of voltage 15 ns on the load with capacitance 200 pF, and repetition frequency of generated pulses 1 Hz.

В научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте (НИПКИ) «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ») разработан и создан источник импульсного заряда малоёмкостной нагрузки напряжением до 1,0 МВ (ИИЗ-1,0), состоящий из маслонаполненного генератора импульсных напряжений амплитудой до 1,0 МВ (ГИН-1,0М), повысительно-выпрямительного устройства с выходным напряжением  $\pm 50$  кВ (ПВУ-50), системы управления работой ИИЗ-1,0 (СУ) и генератора поджигающих импульсов (ГПИ). ИИЗ-1,0 производит «быстрый заряд» нагрузочной ёмкости величиной 200 пФ, при этом время заряда (первой полуволны импульса напряжения) не превышает 15 нс. Кроме этого, ИИЗ-1,0 содержит в своем составе:

- короткозамыкатель (КЗ);
- систему измерений (СИ);
- эквивалент нагрузки (ЭН) в металлическом корпусе для испытаний ГИН-1,0М.

Принципиальная электрическая схема ИИЗ-1,0 приведена на рис. 1. После включения сетевого напряжения последнее повышается, выпрямляется ПВУ и соответственно заряжает конденсаторы С собственно ГИН-1,0М. При подаче от ГПИ на F1 поджигающего импульса происходит разряд ГИН-1,0М на нагрузку Zн. Регулировка величины зарядного напряжения ГИН-1,0М



производится с ПУ автотрансформатором АТ, включенным в первичную обмотку ВТ, и выпрямляется высоковольтными вентилями. Конструктивно ИИЗ-1,0 представляет собой устройство, состоящее из пульта управления (ПУ) с СУ и ГПИ, ПВУ (с КЗ и СИ) и ГИН-1,0М в металлическом корпусе, залитом трансформаторным маслом. С одной стороны ГИН-1,0М подключен к ПВУ, а с другой – к ЭН. Компоновка элементов ИИЗ-1,0 приведена на рис.2., а общий вид – на рис. 3.

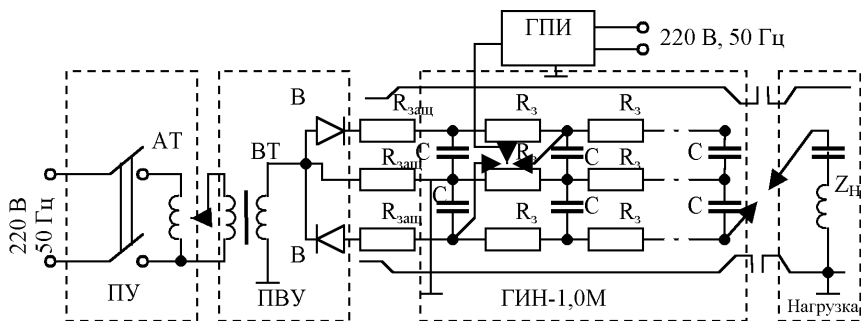


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема ИИЗ-1,0

ПУ – пульт управления, ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство, ГИН-1,0М – генератор импульсов напряжения,  $Z_n$  – нагрузка Заказчика, ГПИ – генератор поджигающих импульсов,  $R_{защ}$  – резистор защитный, В – вентиль,  $R_3$  – резистор зарядный, С – конденсатор, F1 – коммутатор, АТ – автотрансформатор, ВТ – высоковольтный трансформатор

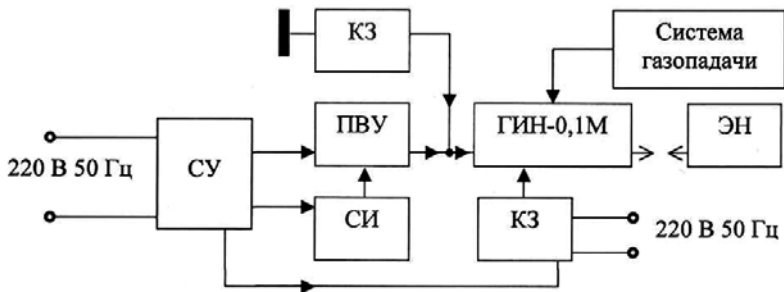


Рисунок 2 – Блок схема ИИЗ-1,0

Основным элементом ИИЗ-1,0 является маслонаполненный генератор импульсов напряжения ГИН-1,0М, работающий по схеме Аркадьева-Маркса. Нужно отметить, что в настоящее время резко возросла необходимость использования мегавольтных генераторов импульсов напряжения с наносекундными длительностями фронта для получения мощных электронных пучков и импульсов жесткого рентгеновского излучения, а также питания ин-

дукционных ускорителей, мощных радиоизлучающих устройств и др. При этом возросли требования к стабильности параметров генерируемых импульсов напряжения, особенно к длительности наносекундного фронта импульса. Для создания мегавольтных импульсов с наносекундными длительностями фронтов генераторы должны иметь очень низкую индуктивность, что можно достичь применением низкоиндуктивных высоковольтных конденсаторов и коммутаторов, а также соответствующей компоновкой изоляционной несущей конструкции (ИНК) с целью уменьшения геометрической длины пути разряда. Габариты генераторов, особенно ИНК, определяются в основном габаритами используемых конденсаторов и средой, в которой работает генератор (газ под давлением, трансформаторное масло, воздух и т.п.).

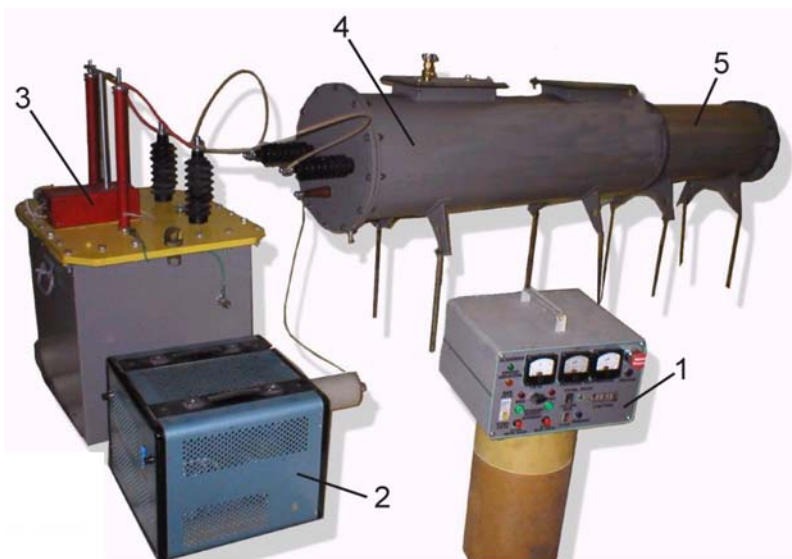


Рисунок 3 – Общий вид ИИЗ-1,0

При создании ГИН-1,0М (с учетом жестких требований по длительности фронта генерируемого импульса напряжения) с целью уменьшения геометрического пути разряда была применена этажерочная ИНК, в качестве несущих элементов которой впервые были использованы изоляционные корпуса специально созданных для данного генератора конденсаторов и коммутаторов, что является отличительной особенностью описываемого генератора. Это позволило уменьшить длину до суммы геометрических размеров конденсаторов и коммутаторов, т.е. свести индуктивность генератора до суммы собственных индуктивностей конденсаторов и коммутаторов. Принципиальная электрическая схема ГИН-1,0М приведена на рис. 4.

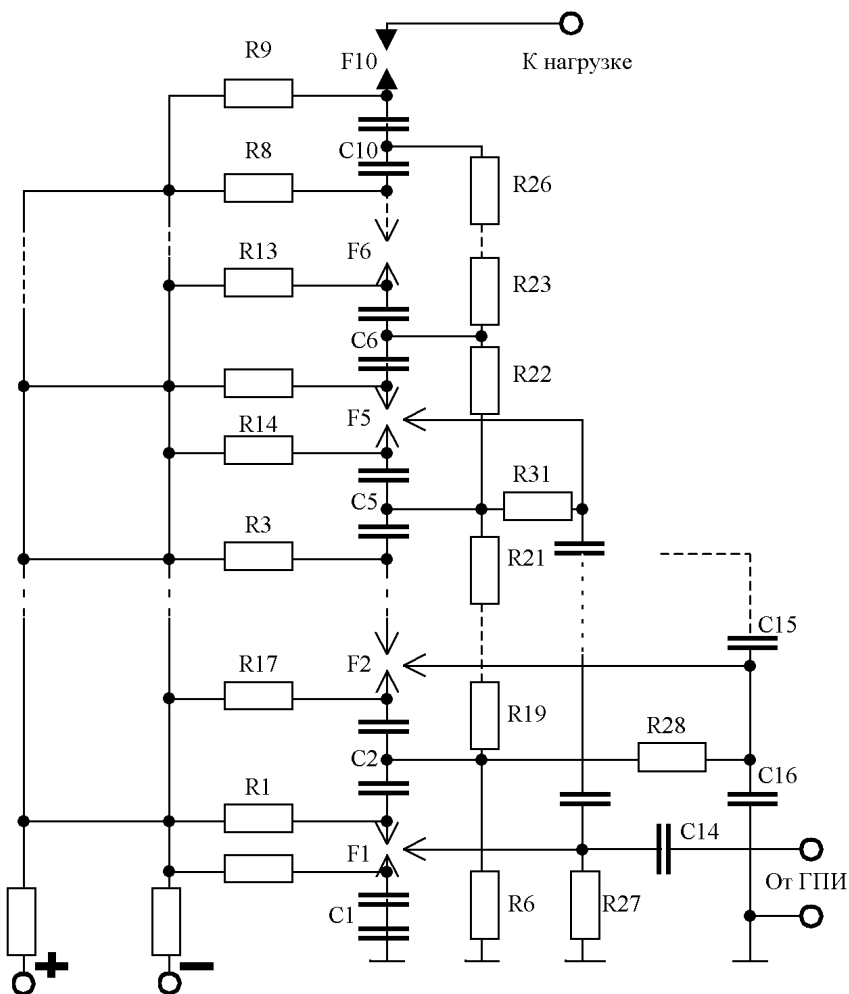


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема ГИН-1,0М:

C1...C10 – конденсаторы типа КИМ-131, R1...R26 – резисторы зарядно-разрядные, F1...F5 – коммутатор трехэлектродный КИТ-100, F6...F10 – коммутатор двухэлектродный типа КИД-100, C12...C16 – конденсаторы пусковые, R27...R31 – резисторы пусковые

Расчеты параметров электрической схемы производились с учетом паразитных параметров на Electronics Workbench. Зарядно-разрядный контур ГИН-1,0М состоит из 10 каскадов (C1...C10) номинальным напряжением 100 кВ. Каждый каскад состоит из специально разработанного конденсатора КИМ-131 и работающих в азоте под давлением коммутаторов трехэлектрод-

ных типа КИТ-100 (F1...F5) и двухэлектродных типа КИД-100 (F6...F10) напряжением 100 кВ каждый. Для обеспечения заряда конденсаторов применены 3 ветви зарядно-разрядных резисторов. Ветви R1...R8 и R9...R17, через которые подается зарядное напряжение от ПВУ, подключены к потенциальным выводам конденсаторов КИМ-131, а заземленная ветвь R16...R26 подключена к средним выводам конденсатора. Для стабильного срабатывания ГИН-1,0М в заданном диапазоне рабочих напряжений на первых 5-ти каскадах применены трехэлектродные управляемые коммутаторы типа КИТ-100. Управляемый запуск генератора осуществляется подачей импульса поджига от ГПИ на средние электроды коммутаторов F1...F5 через 2 ветви конденсаторов C12...C14 и C15...C16. Средние электроды коммутаторов F1...F5 подключены к средним точкам конденсаторов через R27...R31. Конструктивно ГИН-1,0М состоит из заполненного трансформаторным маслом цилиндрического металлического корпуса со смотровыми окнами и расположенного внутри него зарядно-разрядного контура. Общий вид ГИН-1,0М представлен на рис. 5.

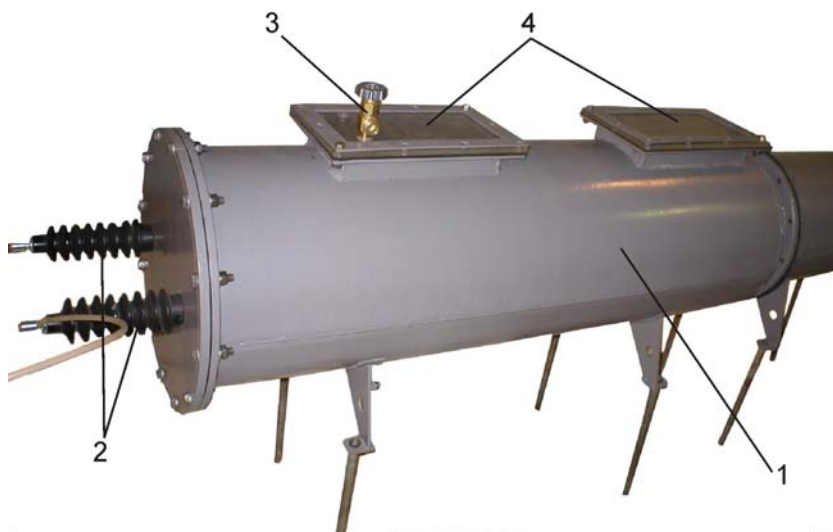


Рисунок 5 – Общий вид ГИН-1,0М (заполненный трансформаторным маслом):  
 1 – металлический корпус, 2 – проходные изоляторы для подачи напряжения от ПВУ,  
 3 – кран для подачи азота в систему газоподдачи, 4 – смотровые окна

Зарядно-разрядный контур ГИН-1,0М выполнен в виде отдельной конструкции, состоящей из 10 каскадов «конденсатор-коммутатор», жестко стянутых специальными изоляционными стержнями (см. рис. 6), что позволяет резко сократить время сборки (разборки) всей конструкции. Зарядно-

разрядный контур крепится к изоляционной плате (основанию), являющейся одновременно крышкой металлического корпуса ГИН-1,0М.

Будучи монолитным блоком, зарядно-разрядный контур легко устанавливается в корпусе ГИН-1,0М. Нужно отметить, что разработанная конструкция ГИН-1,0М позволила получить на емкостной нагрузке требуемые амплитудно-временные параметры генерируемого импульса, уменьшив при этом в 1,3 раза заданную минимальную величину длительности фронта импульса.

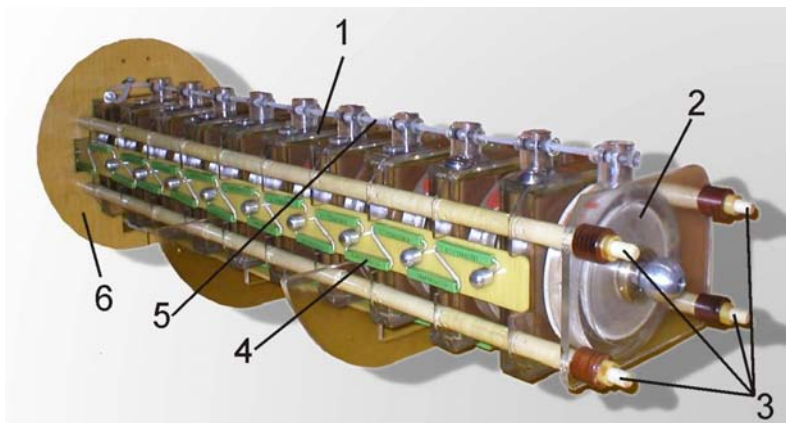


Рисунок 6 – Общий вид зарядно-разрядного контура ГИН-1,0М  
1 – конденсатор КИМ-131, 2 – коммутаторы КИТ-100 и КИД-100, 3 – изоляционные стягивающие стержни, 4 – зарядно-разрядные резисторы, 5 – система газоподдачи, 6 – плата-основание

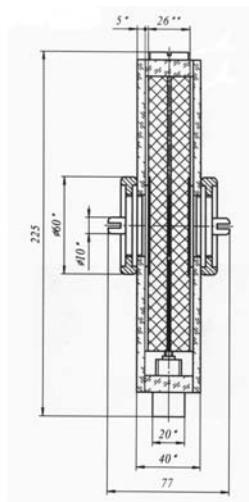
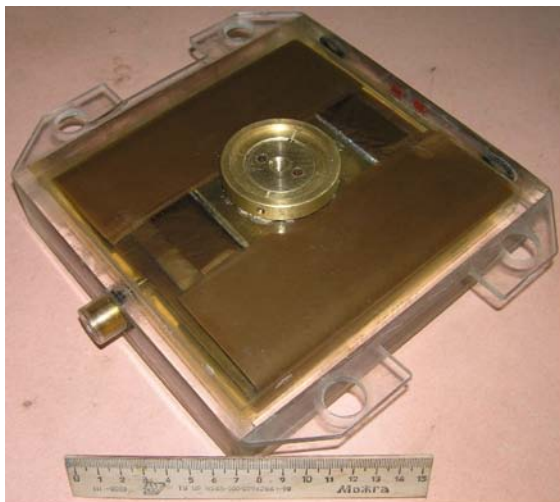
Одним из основных элементов ГИН-1,0М является специально разработанный для него высоковольтный малоиндуктивный конденсатор типа КИМ-131. Конденсатор КИМ-131 (рис. 7) предназначен для работы в составе ГИН в масляной среде. Номинальное напряжение конденсатора составляет 100 кВ, емкость между основными выводами – 5 нФ, собственная индуктивность – менее 10 нГн, ресурс конденсатора при надежности 0,9 составляет  $5 \cdot 10^4$  циклов «заряд-разряд» в режиме слабозатухающего колебательного разряда с декрементом колебаний более 2. Конденсатор состоит из пакета секций, изоляционного корпуса с четырьмя проушинами для крепления, двух основных латунных выводов, расположенных на противоположных сторонах конденсатора, вспомогательного вывода, расположенного на боковой грани конденсатора.

Пакет конденсатора состоит из двух полупакетов, включенных последовательно. Емкость каждого полупакета составляет 10 нФ, напряжение 50 кВ. Место соединения полупакетов подключено к вспомогательному выводу.

Каждый полупакет состоит из пяти последовательно включенных групп секций, прижимной контактной пластины, припаянной к основному выводу, главной изоляции, обеспечивающей необходимую электрическую прочность по поверхности изоляции внутри пакета. Оценка ресурса при надежности  $P$  производилась в предположении логнормального распределения отказов конденсаторной изоляции [1]

$$\lg M_p = \lg M_{cp} - z_p \sigma, \quad (1)$$

где  $M_{cp}$  – средний ресурс секции,  $z_p$  – квантиль соответствующей заданной надежности  $P$ ,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение, зависящее от толщины диэлектрика [1]. Используя выражение (1) выбрано число последовательно соединенных секций, толщина диэлектрика между обкладками, обеспечивающие максимальный ресурс, и рассчитана надежность работы конденсатора при ресурсе  $5 \cdot 10^4$ . Изоляционный корпус из оргстекла обеспечивает необходимую электрическую прочность по поверхности, а также удерживает пакет секций в сжатом состоянии и значительно упрощает механическую сборку (разборку) ГИН-1,0М с помощью проушин. Основные выводы из конденсатора в виде массивных латунных дисков обеспечивают возможность контактного соединения как с последовательно включенными разрядниками, так и с зарядными элементами (при заряде напряжение на выводах составляет  $\pm 50$  кВ, на вспомогательном электроде 0). Для обеспечения надежного контакта в выводе имеется центральное резьбовое отверстие М10.



1  
Рисунок 7 – Общий вид конденсатора КИМ-131  
1 – внешний вид, 2 – геометрические размеры

2

Другими ответственными элементами являются двухэлектродные и трехэлектродные коммутаторы соответственно типа КИД-100 и КИТ-100 напряжением 100 кВ (см. рис. 8), подобные по конструкции описанным в [2]. Основной отличительной особенностью коммутаторов является конструкция их выводов, которые позволяют производить непосредственную стыковку с выводами конденсатора КИМ-131. Это дало полностью исключить из контура разряда ГИН-1,0М соединительную ошиновку, то есть минимизировать собственную индуктивность генератора. Кроме этого, оптимизирована как в механическом, так и в электрическом отношении конструкция системы газоподачи, которая целиком выполнена из высокопрочных изоляционных материалов (см. п. 3 рис. 5 и п. 5 рис. 6).



Рисунок 8 – Общий вид коммутатора

При создании повысительно-выпрямительного устройства напряжением  $\pm 50$  кВ в его состав (кроме специально разработанного повышающего трансформатора 220/40000 В и высоковольтных вентилях) включены короткозамыкатель и делители выпрямленного напряжения. Конструктивно ПВУ выполнен в виде заполненного трансформаторным мас-

лом металлического бака, внутри которого расположены повышающий трансформатор и вентили с токоограничивающими резисторами, а на изоляционной крышке – проходные изоляторы для подачи выпрямленного напряжения в ГИН-1,0М, высоковольтные делители и короткозамыкатель (см. п. 3 рис. 3). Конструктивно делители напряжения расположены в изоляционных трубах, а выводы от их низковольтных плеч соединены с микроамперметрами ПУ. Короткозамыкатель выполнен в виде подвижных контактов, автоматически замыкающих высоковольтные выводы ПВУ и ГИН-1,0М при отключении напряжения с ИИЗ-1,0. Движение контактов осуществляется тяговым электромагнитом.

Пульт управления СУ, заполненный коммутационной аппаратурой, выполнен в виде отдельного блока (см. п. 1 рис. 3). После подачи напряжения, о чем свидетельствует сигнализация, пульт управляет работой КЗ, включением, регулированием и измерением выпрямленного напряжения микроамперметрами (подключенными к делителям напряжения ПВУ), подает импульс поджига на коммутаторы ГИН-1,0М, как в ручном, так и в автоматическом режимах, с одновременной регистрацией количества разрядов. На передней панели ПУ расположены вольтметр (регистрирует напряжение в первичной обмотке повышающего трансформатора), микроамперметры (регистрируют напряжение заряда ГИН-1,0М в кВ), рукоятка регулирования напряжения заряда, сигнализация и клавиши включения/выключения ГПИ, а также индикатор счетчика импульсов и кнопка «Аварийное отключение». На заднюю панель ПУ выведены разъемы для подключения ПВУ, ГПИ, КЗ и СИ.

Генератор поджигающих импульсов изготовлен в виде двух блоков – блока управления и высоковольтного генератора поджигающих импульсов. Блок управления конструктивно расположен в ПУ (с переключателем «Ручной пуск – Автоматический пуск», индикатором счетчика импульсов и кнопкой «Ручной пуск»). Высоковольтный генератор поджигающих импульсов (вместе с высоковольтным импульсным трансформатором напряжением 80 кВ) выполнен в виде отдельного элемента (см. п. 2 рис. 3).

Для исследования и испытания ИИЗ-1,0 изготовлен эквивалент нагрузки, который пристыковывается к ГИН-1,0М при испытаниях и состоит из последовательно соединенных конденсаторов К15-10, размещенных в залитом трансформаторным маслом металлическом корпусе (см. п. 5 рис. 3).

Созданный источник импульсного заряда ИИЗ-1,0 (см. рис. 3) генерирует на нагрузке емкостью 200 пФ и индуктивностью 100 нГ колебательный затухающий импульс напряжения со следующими параметрами:

- длительность фронта, определяемая на уровне 0,1...0,9 амплитудного значения первой полуволны напряжения (см. рис. 9), нс..... 15, 0



- максимальное значение амплитуды первой полуволны напряжения, МВ .....1,0
- гарантированный режим работы, циклы «заряд-разряд» .....  $10^5$
- коэффициент управляемости .....1,9
- режимы работы .....  
ручной и автоматический с частотой следования импульсов 1 Гц

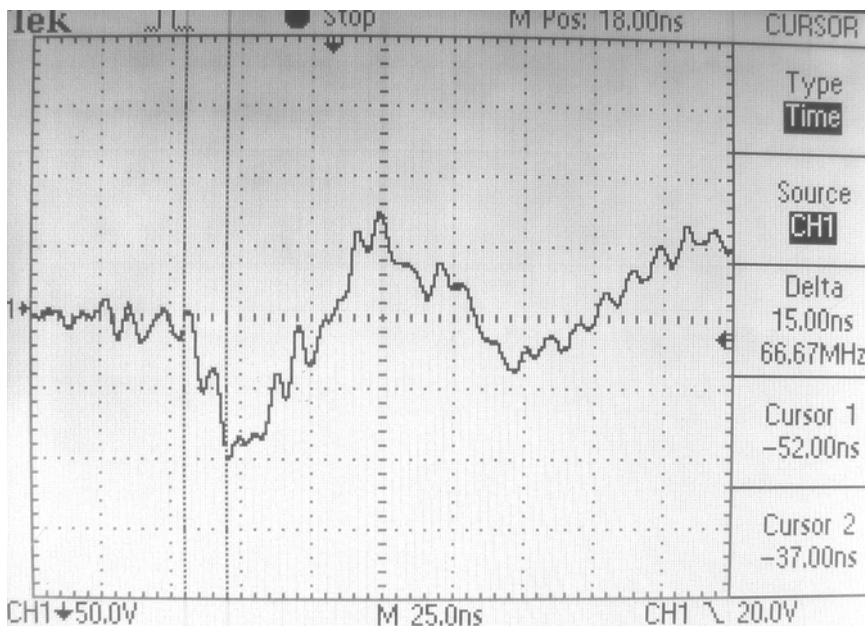


Рисунок 9 – Осциллограмма первой полуволны импульса тока на эквиваленте нагрузки

Нужно отметить, что созданный источник импульсного заряда типа ИИЗ-1,0 может быть использован для создания мегавольтных импульсов напряжения с длительностями фронтов порядка 1 нс (и меньше) при соответствующей его доработке обостряющими устройствами.

**Список литературы:** 1. Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В. Электротехника и электромеханика. – Харьков. – 2006. – № 1. – С. 71-75. 2. Бочаров В.А., Пекарь И.Р., Мельников П.Н. Приборы и техника эксперимента. – Москва, 1986. – № 5. – С. 104-106.

Поступила в редколлегию 20.11.2007

*Е.А.ГОРЮШКІН*, канд.техн.наук; *А.Е.ГОРЮШКІН*; НТУ «ХП»

## СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРІВ ПАРАМЕ- ТРІВ ІМПУЛЬСІВ МАЛОЇ ТРИВАЛОСТІ

У статті проведений аналіз можливості використання засобів математичної статистики для рішення завдання визначення параметрів імпульсів, що вимірюються, по результатам досліджень за допомогою методу зважених найменших квадратів.

The analysis of possibility for use of mathematical statistic methods for decision of task of determination of parameters of pulses with use of method of weighted minimal squares is discussed.

**Вступ.** Наявність у результатах вимірів параметрів імпульсів малої тривалості (ІМТ) випадкових помилок призводить до необхідності використання засобів математичної статистики для рішення завдання визначення параметрів, що вимірюються, по результатам досліджень.

Метод зважених найменших квадратів (МЗНК) [1] дозволяє достатньо просто виробляти попередню статистичну обробку вимірів, що переслідує дві основні цілі:

- 1) підвищення точності за рахунок зменшення впливу випадкових помилок, припущених у кожному окремому вимірі;
- 2) апроксимація великої кількості експериментальних наданих згладжуваним поліномом невисокої міри.

Досягнуте скорочення обсягу даних призводить до зниження вимог по пропускний здатності каналів зв'язку та обчислювальним ресурсам автоматизованої системи управління та обробки. Крім того, застосування поліномів, які апроксимують дискретні значення від різноманітних вимірювальних засобів, дозволяє призводити виміри до співпадаючих моментів часу. Врешті, при попередній статистичній обробці можуть бути частково виявлені та виключені аномальні результати вимірів.

**Метою роботи** є аналіз можливості використання засобів математичної статистики для рішення завдання визначення параметрів імпульсів, зокрема методу зважених найменших квадратів.

Якщо процес, що досліджується є монотонною функцією часу, то для його апроксимації доцільно обрати алгебраїчний поліном чи лінійну комбінацію ортогональних поліномів, що також становлять монотонні функції. Якщо процес має коливальний характер, то можна використати тригонометричні поліноми (наприклад, поліноми Бернштейна). Врешті, якщо процес має коливальну та монотонну складові одночасно, то для апроксимації дискретних вимірів цього процесу можна використовувати ортогональні полі-

номи, що поєднують й ті й другі властивості. Використання ортогональних поліномів для згладжування дискретних вимірів надто зручно: коефіцієнти апроксимуючого поліноmu виражаються безпосередньо через результати вимірів та ортогональні з вагою поліноми. Крім того, якщо при обраному значенні ступеня полінома опинилося, що точність наближення функції одержаним поліномом незадовільна, то збільшивши ступінь полінома, необхідно лише розрахувати по рекурентним формулам значення відомої функції часу та додаткового коефіцієнту полінома. Корисно визначити ту обставину, що обчислення ортогональних поліномів з наступним обертанням діагональної матриці призводить до менших помилок, ніж при використанні алгебраїчних поліномів, хоч обидві процедури алгебраїчно еквівалентні.

Точність результатів згладжування також зменшується, коли не звертається увага на маючу місце корельованість помилок вимірів. Треба враховувати корельованість цих помилок, щоб одержувати задовільні результати найбільш простим способом. Доказано, що з збільшенням кількості використаних вимірів ( $N \rightarrow \infty$ ) дисперсії оцінок коефіцієнтів апроксимуючого полінома як оптимальних, так і неоптимальних прагнуть до однієї межі. Збільшення похибок апроксимованих значень вимірів за рахунок неоптимальності процедури згладжування несуттєве та практично-го значення не має.

При оцінці точності згладжених значень процесу, що досліджується в нашому випадку корельованість помилок вимірів обов'язково повинна враховуватися, бо в іншому випадку дисперсії отриманих результатів опиняться дуже заниженими.

Визначення порядку полінома та інтервалу досліджень для апроксимації дискретних вимірів процесу, що досліджується, є основним принциповим моментом методики згладжування вимірів. При фіксованому порядку полінома чим більше інтервал згладжування  $T_0$  (та кількість вимірів  $M$ ), тим у більшій мірі можна зменшити вплив випадкових помилок вимірів, але при цьому збільшується методична помилка вимірів (яка дорівнює сумі відкинутих членів ряду). Якщо ж збільшувати порядок апроксимуючого полінома, то методична помилка внаслідок згладжування зменшиться, а випадкова помилка зросте.

**Критерії вибору ступеня згладжуючого полінома при невідомій дисперсії помилок вимірів.** Нехай є результати вимірів  $h(t_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ , деякого процесу  $z(t)$ . Припустимо, що результати вимірів становлять суму

$$h(t_i) = z(t_i) + \delta h(t_i), \quad (1)$$

значень не випадкового процесу  $z(t_i)$  та випадкової помилки вимірів  $\delta h(t_i)$ , що характеризується нульовим математичним очікуванням та дисперсією

$$\sigma_i^2 = \sigma_0^2 / w_i,$$

де  $w_i$  – відомі постійні позитивні ваги вимірів;  $\sigma_0^2$  може бути й невідоме.

Необхідно одержати математичний вираз згладжуючої кривої  $\hat{z}(t)$ . Раніше показано, що рішення завдання згладжування вимірів істотно спрощується, якщо для апроксимації вимірів значень  $h(t_i)$  використовувати лінійну комбінацію ортогональних поліномів, наприклад Чебишева:

$$\hat{z}(t) = \sum_{r=0}^k \hat{C}_r \cdot \varphi_r(t), \quad (2)$$

де  $\varphi_r(t)$  – відомі функції часу, наприклад поліноми Чебишева;

$\hat{C}_r$  – оцінки коефіцієнтів полінома (2);

$r$  – порядок ортонормованого полінома;

$k$  – ступінь апроксимуючого багаточлена.

Вибір ступеня згладжуючого полінома при невідомій дисперсії помилок вимірів засновується на використанні статистики  $R_n$

$$R_n = \frac{K_n}{W_n^2} = \frac{\sum_{i=0}^{N-2} [h(t_i) - \hat{z}_n(t_i)] \cdot [h(t_{i+1}) - \hat{z}_n(t_{i+1})]}{\sum_{i=0}^{N-1} [h(t_i) - \hat{z}_n(t_i)]^2}, \quad (3)$$

Величина  $R_n$  визначає взаємну корельованість відхилень, узятих на одній сукупності, а саме корельованість всіх пар сусідніх значень  $[h(t_i) - \hat{z}_n(t_i)]$ .

Сумарна випадкова величина  $W_n^2$

$$W_n^2 = \sum_{i=0}^{N-1} a^2(t) = V_n^2 + A_n^2; \quad (4)$$

$$V_n^2 = \sum_{i=0}^{N-1} [\delta h(t_i)]^2 - \sum_{r=0}^n P_r^2 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \varphi_r^2(t_i); \quad (5)$$

$$A_n^2 = 2 \cdot \sum_{r=n+1}^k C_r \cdot P_r \sum_{i=0}^{N-1} \varphi_r^2(t_i) + \sum_{r=n+1}^k C_r^2 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \varphi_r^2(t_i). \quad (6)$$

Величина  $V_n^2$  – це сума квадратів відхилень вимірів від їх згладжених значень для випадку, коли  $A_n^2 = 0$ , тобто ступінь апроксимуючого полінома не менш дійсного ступеня функції, що вимірюється ( $n \geq k$ ). Вона має розподіл  $\sigma^2 \kappa^2$  із  $N-n-1$  ступенями свободи та характеризується математичним очікуванням

$$M[V_n^2] = (N - n - 1) \cdot \sigma^2 \quad (7)$$

та дисперсією

$$D[V_n^2] = 2(N - n - 1) \cdot \sigma^4. \quad (8)$$

При переході до частотного аналізу сукупний енергетичний спектр  $s_n^2$ , що характеризує якість згладжування, є випадковою величиною, оскільки становить суму випадкової та не випадкової величин:

$$s_n^2 = \sum_{r=0}^n P_r^2 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \varphi_r^2(t_i) + a_n^2. \quad (9)$$

При збільшенні ступеня апроксимуючого полінома перша складова зростає, друга – ні. Ця друга складова визначає ту частину спектру, яка випадає на ступені, котрі перевищують ступінь апроксимуючого поліному.

Таким чином, для кожного конкретного випадку, коли визначений спектр процесу, що досліджується  $z(t)$  та спектр потужності помилки (сукупність значень  $P_r$ ), знайдеться принаймні одне значення  $n_{\text{опт}}$ , при якому величина  $s^2$  мінімальна.

Це значення  $n_{\text{опт}}$  і визначить шукану ступінь апроксимуючого полінома.

**Попередня статистична обробка результатів вимірів.** Аномальні результати вимірів, що порушують статистичний характер інформації про процес, що досліджується, можуть істотно викривляти результати статистичної обробки вимірів та повинні виключатися з наступної обробки [2].

Аномальні виміри можуть бути викликані збоями апаратури (машинні збої, збої каналів передачі даних, збої самого вимірювального засобу), але головним чином зумовлені хибним усуненням неоднозначностей функції, що вимірюється.

Засоби відбраковки вимірів базуються на апіорних даних про характер зміни функцій, що вимірюються в часу. Перевірку результатів вимірів на аномальність у процесі їх одержання (у реальному масштабі часу) проводять за умовою знаходження виміру в припустимих межах (наприклад, у межах строга по параметру, що вимірюється), при цьому додатково може здійснюватися перевірка модуля різниці сусідніх вимірів. При багатоканальних вимірах надто ефективною є міжканальна обробка вимірів.

З урахуванням приведених думок попередню обробку вимірів пропонується проводити в наступній послідовності.

1. Складають вибірку з перших отриманих  $n$  вимірів
2. Обчислюють згладжені значення вимірів (2);
3. Розраховують оцінку середньоквадратичного відхилення помилок вимірів.

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^v (h_k - \hat{z}_k)^2}{v - n - 1}}. \quad (10)$$

4. Враховуючи, що випадкова величина

$$\frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^v (h_k - \hat{z}_k)^2 \quad (11)$$

розподілена як  $\chi^2_{v-n-1}$ , складають довірчий інтервал

$$J = [\gamma_1 \cdot \hat{\sigma}; \gamma_2 \cdot \hat{\sigma}] \quad (12)$$

де величини  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  визначають як табличні по заданому рівню ймовірності  $p$  і числу ступенів свободи  $\nu - n - 1$ .

5. Перевіряється виконання нерівності

$$\gamma_1 \cdot \hat{\sigma} \leq \sigma \leq \gamma_2 \cdot \hat{\sigma}. \quad (13)$$

Виконання умови (13) свідчить про правильність визначення оцінки середнього квадратичного відхилення, що можливо для випадку, коли в вибірці відсутні аномальні виміри. В такому випадку вимір вважається достовірним та може бути використаний у подальшій обробці. У вигляді опорної вибірки використовується  $\nu$  останніх вимірів.

В разі, коли кількість аномальних вимірів, що повторюються один за одним, перевершить наперед задане число, то переходять до пошуку нової опорної вибірки.

Для підтвердження викладених вище положень було проведено експериментальне дослідження можливостей зменшення похибок шляхом статистичної обробки вибірок. При цьому особливий інтерес має питання зменшення дисперсії шумів дискретизації [3]. У вигляді вихідної моделі для формування масиву вибірок був обраний близький до прямокутного імпульс із кінцевими  $\tau_f$  і  $\tau_c$ , що формувався методом кусочно-лінійної апроксимації. В процесі формування була передбачена також можливість моделювання аналого-цифрового перетворення з різноманітною розрядністю. В якості вихідних параметрів були обрані:

- тривалість імпульсу  $t_i$  10 мкс;
- кількість відліків 256;
- динамічний діапазон 10 Дб.

Початкові дані зображені на рисунках: на рис. 1 зображений ідеальний імпульс, на рис 2, 3 – імпульси після аналого-цифрового перетворення шляхом чотирьох- та восьмирозрядного аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Видно, що при збільшенні розрядності АЦП похибки дискретизації суттєво зменшуються (розмах помилки складає  $\approx 100$ мв,  $\approx 25$ мв і  $\approx 12$ мв відповідно), тому в цілях наочності подальші дослідження проводилися з моделями чотирьох - та шестирозрядних АЦП, як найбільш швидкодіючих при сучасній елементній базі. Такі імпульси оброблялися шляхом згладжування їх поліномами за викладеною вище методикою. Результат обробки для чотирьохрозрядного АЦП наведено на рис. 4.

Основні числові параметри помилок аналого-цифрового перетворення шести- та восьмирозрядним АЦП з застосуванням поліноміального згладжування та без нього приведені в табл. 1.

З таблиці видно, що дисперсія помилок виміру після поліноміального згладжування по меншій мірі у 1,5 рази менша, ніж дисперсія незгладжених помилок, та лише незначно перевищує дисперсію незгладжених помилок перетворення АЦП із більшою розрядністю. Цей важливий висновок при конс-

труюванні вимірювачів параметрів простих сигналів дозволяє застосовувати АЦП із меншою розрядністю. Оскільки вони є найбільш швидкодіючими, то знижуються вимоги до швидкодії апаратної частини вимірювача. Відзначимо, що при вимірі параметрів сигналу період оновлення інформації може бути достатньо великим (до хвилин), тому деяке збільшення часу математичної обробки не страшні.

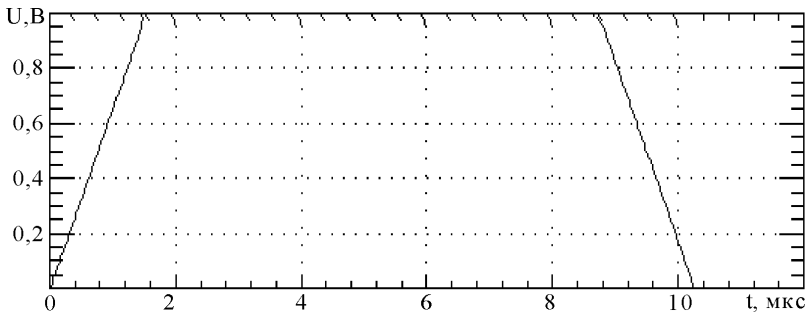


Рисунок 1 – Вихідний імпульс

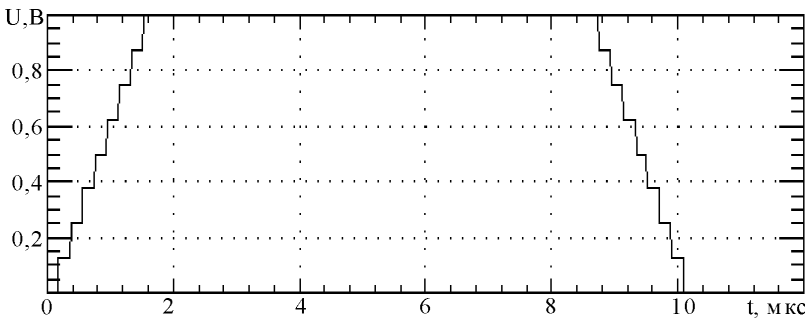


Рисунок 2 – Імпульс, перетворений чотирирозрядним АЦП

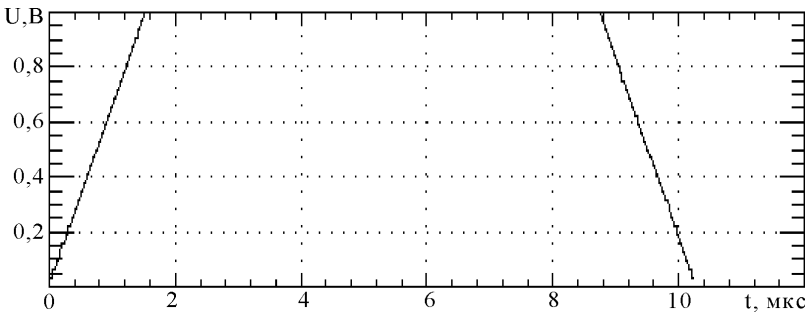


Рисунок 3 – Імпульс, перетворений восьмирозрядним АЦП

Таблиця 1

Параметри	Шестирозрядний АЦП		Восьмирозрядний АЦП
	без обробки	з обробкою	
Розмір вибірки	256	256	256
Математичне очікування	-3,14444E-3	-3,14271E-3	-3,14837E-3
Дисперсія	<b>4,75989E-5</b>	<b>2,97947E-5</b>	<b>2,45077E-5</b>
СКВ	6,8992E-3	5,45845E-3	4,95052E-3
Стандартна помилка	3,04607E-4	2,40996E-4	2,18571E-4

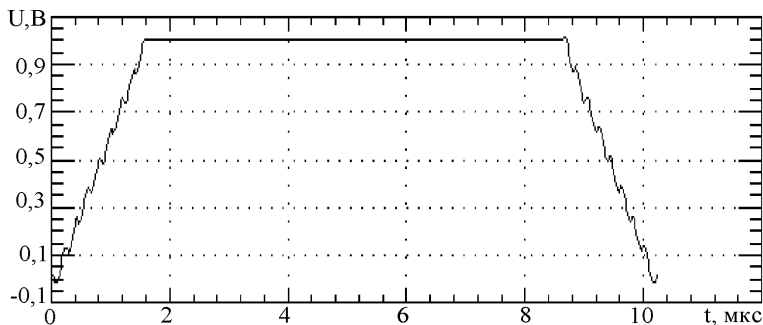


Рисунок 4 – Оброблений імпульс після чотири розрядного АЦП

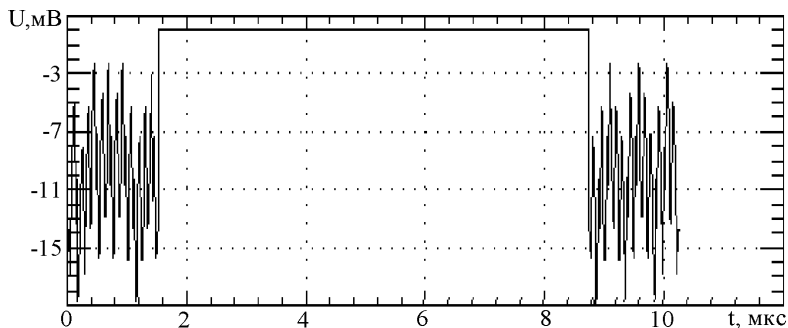


Рисунок 5 – Похибки згладження на інтервалі в 5 відліків

Особливу важливість для поліноміального згладжування набуває правильний вибір інтервалу, на якому здійснюється згладжування. В загальному випадку величина цього інтервалу залежить від тактової частоти АЦП, його розрядності, динамічного діапазону та в принципі може бути розрахована для кожної конкретної вибірки. На рисунках 5 та 6 представлені різниці між ідеальним та оцифрованим імпульсом, який



згладили поліномом при інтервалах в 5 та 12 відліків відповідно, причому останній інтервал забезпечує мінімальне значення помилки та, отже, є у цьому понятті оптимальним.

Чисельні значення статистичних характеристик цих помилок представлені у таблиці 2. З неї видно, що оптимізація інтервалу згладжування дає вираш, який виражається у зменшенні дисперсії помилок згладжувань у 1,2...1,3 рази.

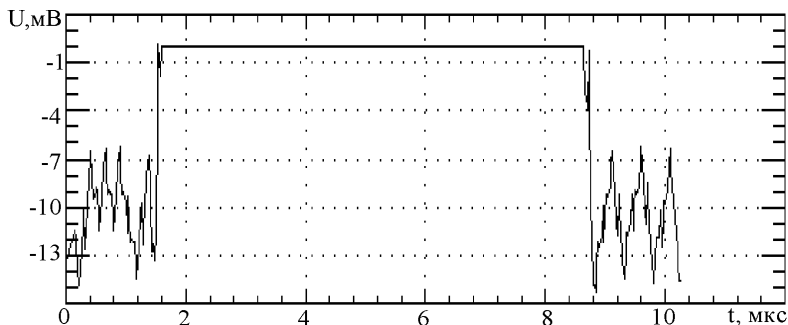


Рисунок 6 – Похибки згладження на інтервалі в 12 відліків

Таблиця 2

Параметри	Згладжування		Без обробки
	оптимальне	неоптимальне	
Розмір вибірки	256	256	256
Математичне очікування	0,0148509	0,0147721	0,0147721
Дисперсія	<b>5,08906E-4</b>	<b>6,11088E-4</b>	<b>9,00776E-4</b>
СКВ	0,0225589	0,0247202	0,0300129
Стандартна помилка	<b>9,96002E-4</b>	<b>1,09142E-3</b>	<b>1,3251E-3</b>

Альтернативою обчисленню може бути експериментальне визначення інтервалу згладжування на сімействі згладжених вибірок за будь-якими критеріями. Зокрема, на рис. 7 зображена поверхня помилок поліноміального згладжування поліномом 2 ступеня вибірки розміром у 256 відліків. Осі «X» відповідає номер відліку (у діапазоні 0...255), осі «Y» умовний інтервал згладжування (початковий інтервал складає 5 точок, кінцевий – 37); ось «Z» відбиває модуль розмаху різниці між ідеальним і оцифрованим за допомогою шестирозрядного АЦП імпульсами. З рисунку видно, що існує мінімум модуля помилки, що можна визначити та використати при подальшому аналізі.

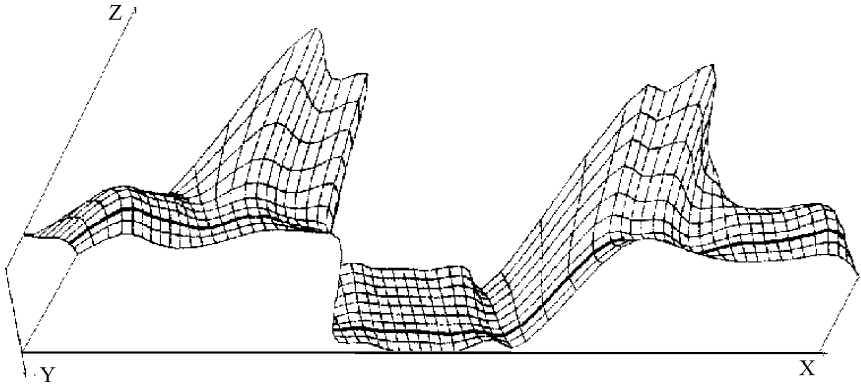


Рисунок 7 – Поверхня помилок поліноміального згладжування

**Висновки.** На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що побудова аналого-цифрового вимірювача параметрів імпульсів як єдиного апаратно - програмного комплексу дозволяє одержати повну статистичну оцінку точностних параметрів імпульсів малої тривалості, що вимірюються.

**Список літератури:** 1. *Т.Андерсон* Статистический анализ временных рядов. Пер.с англ. – М.: Мир, 1976. 2. *Блейхут Р.* Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. Пер. с англ. – М., Мир, 1989. 3. *Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н.* Цифровая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1990.

*Надійшла до редколегії 29.10.2007*

УДК 621.373:664

*Л.С.ЕВДОШЕНКО*, НТУ «ХПИ»

## **СТАРТОВАЯ СТУПЕНЬ ГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Для генератора мегавольтных импульсов створено малогабаритный (470×226×226 мм) стартовый ступень на напрягу 10 кВ з енергією, що запасється, 1,25 кДж. При розряді ступеню на нелінійне навантаження (імпульсний трансформатор с феромагнітним осердя та незарядженою ємністю у вторинній обмотці) за допомогою одного керованого розрядника зі скривленням поля фронт імпульсу напруги на навантаженні не перевищував 80 нс.

Small-sized (470×226×226 mm) starting stage on voltage 10 kV with stored energy 1.25 kJ for generator of megavolt pulses has been created. Voltage pulse front on the load during discharge of the stage into nonlinear load (pulsed transformer with ferromagnetic core and non-charged capacitance in secondary winding) with help of one controlled discharger with field distortion was less 80 ns.

**Введение.** Спектр применения импульсных электротехнологий весьма широк: обработка пищевых продуктов, водоподготовка, дробление бетона, озонирование, очистка сточных вод и отходящих газов и т.п. Ускоренное развитие импульсных электротехнологий в настоящее время требует создания генераторов высоковольтных импульсов с амплитудой в сотни киловольт и длительностью фронта в доли – единицы наносекунд. Причем, важное значение для технологических электроустановок (а, следовательно, генераторов импульсов) приобретают такие параметры как высокий ресурс и компактность.

**Анализ источников.** Недостатком схемы умножения напряжения по принципу генератора Маркса является наличие большого количества искровых разрядников, а также значительные габариты емкостных накопителей ступеней. Трансформаторные схемы умножения напряжения по сравнению с генераторами Маркса более компактны и надежны и могут работать в импульсно – периодическом режиме [1]. Поэтому при разработке данного генератора импульсов напряжения с амплитудой около 1 МВ и фронтом в доли – единицы наносекунд была выбрана схема двухступенчатого повышения напряжения с использованием в каждой ступени трансформатора Тесла (см. рис. 1). Такая схема позволяет обойтись небольшим количеством искровых разрядников, а также позволяет уменьшить габариты элементов генератора.

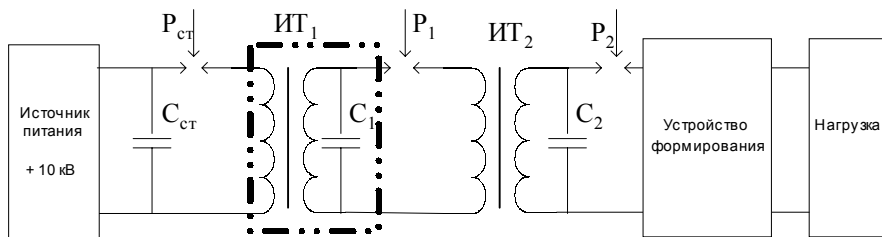


Рисунок 1 – Упрощенная схема генератора мегавольтных импульсов:

$C_{ст}, C_1, C_2$  – емкости стартовой, первой и второй ступеней генератора соответственно;  $P_{ст}, P_1, P_2$  – управляемые искровые коммутаторы стартовой, первой и второй ступеней генератора соответственно; ИТ<sub>1</sub>, ИТ<sub>2</sub> – импульсные повышающие трансформаторы (и.т.) первой и второй ступеней генератора

**Определение направления исследований.** Для эффективного повышения напряжения в каждой ступени генератора управляемые разрядники должны срабатывать в моменты, когда напряжение на емкостях ступеней близко к максимально возможному, т.е. на фронтовой части импульсов. Воздействие только фронтовой части импульсов напряжения (особенно, если длительность фронта составляет доли – единицы микросекунд [2]) на изоляцию, позволяет увеличить значение допустимой рабочей напряженности

электрического поля в элементах ступеней генератора. Это, в свою очередь, дает возможность уменьшить изоляционные расстояния в них, и тем самым снизить массо-габаритные показатели элементов и индуктивность разрядных контуров ступеней. Из тех же соображений следует стремиться к минимизации фронтов импульсов в каждой ступени повышения напряжения. Этого можно достичь при малых временах коммутации разрядников и низкой индуктивности разрядных контуров.

Таким образом, к работе искровых разрядников в составе данного генератора предъявляются следующие требования:

- стабильный разброс времени запаздывания пробоя;
- минимальное время коммутации;
- стабильность временных интервалов между управляющими импульсами разрядников ступеней.

**Целью исследований** при создании стартовой ступени генератора мегавольтных импульсов с фронтом в доли – единицы наносекунд являются:

- обеспечение минимального стабильного разброса времени запаздывания пробоя и минимального времени коммутации стартового разрядника;
- создание разрядного контура с низкой индуктивностью.

**Конструкция ступени.** В состав стартовой ступени входят емкостный накопитель  $C_{ст}$  и управляемый разрядник  $P_{ст}$ . Стартовый накопитель  $C_{ст}$  состоит из четырех последовательно соединенных пакетов, извлеченных из выпускаемых промышленностью конденсаторов К 75-40а. Каждый пакет имеет емкость 100 мкФ и рассчитан на напряжение 3 кВ. Таким образом,  $C_{ст}$  имеет емкость 25 мкФ, и допустимое напряжение для него составляет 12 кВ. При зарядном напряжении 10 кВ вследствие недозаряда ресурс  $C_{ст}$  больше, чем у конденсаторов К 75-40а. Пакеты  $C_{ст}$  размещены в стальном корпусе (см. рис. 2). Корпусная изоляция для  $C_{ст}$  по сравнению с К 75-40а усилена пятью слоями полиэтиленовой пленки толщиной 100 мкм. Удельная плотность энергии в  $C_{ст}$  составляет  $\sim 140$  Дж/дм<sup>3</sup>. Непосредственно к фланцу корпуса  $C_{ст}$  с помощью шпилек М8 крепится корпус стартового разрядника  $P_{ст}$ . Последний представляет собой воздушный разрядник с резким искажением поля. Основные электроды  $P_{ст}$  в виде стальных колец с наружным диаметром 100 мм и внутренним – 80 мм со скругленными торцами в рабочей зоне. Управляющий электрод (у.э.) выполнен в виде плоского кольца с внутренним диаметром 90 мм, наружным – 130 мм и толщиной 0,3 мм из нержавеющей стали. На внутренней кромке у.э. в восьми местах, равноотстоящих друг от друга по окружности кромки, выполнены треугольные зубцы высотой  $\sim 2$  мм для фиксации точек иницирования пробоя. У.э. размещен точно в середине рабочего промежутка длиной 5 мм. Корпус  $P_{ст}$  изготовлен из оргстекла и со-

стоит из двух одинаковых половин. Для повышения ресурса разрядника внутренняя поверхность корпуса развита за счет цилиндрического паза таким образом (см. рис. 2), что продукты эрозии электродов попадают только на небольшую часть внутренней изоляционной поверхности и не могут попасть внутрь этого паза. Длина  $P_{ст}$  в направлении протекания тока составляет 55 мм, а его размеры в плане – 226×226 мм.

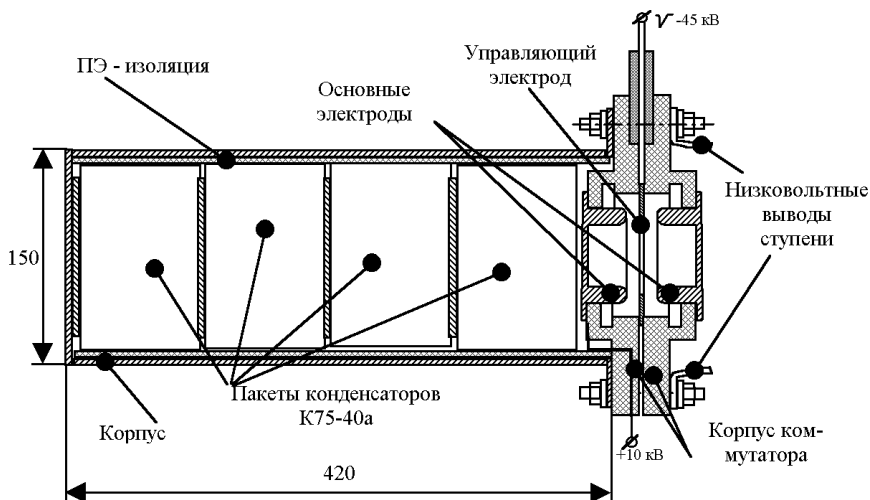


Рисунок 2 – Конструкция стартовой ступени генератора

Прямым токопроводом стартовой ступени генератора являются конденсаторные пакеты  $C_{ст}$  и подключенный к последнему из них разрядник  $P_{ст}$ , а обратным токопроводом – охватывающий пакеты  $C_{ст}$  стальной корпус и стальные шпильки, осуществляющие токоподвод к нагрузке стартовой ступени и одновременно прижимающие по периметру корпус  $P_{ст}$  к фланцу корпуса  $C_{ст}$ . Таким образом, разрядный контур стартовой ступени представляет собой замкнутый на одном конце отрезок «коаксиальной» линии квадратного сечения, что позволяет получить небольшую по величине индуктивность контура. Габариты ступени составляют 470×226×226 мм.

**Работа ступени.** При работе генератора высоковольтных импульсов накопитель  $C_{ст}$  заряжается от источника питания +10 кВ. Запасаемая энергия стартовой ступени составляет 1,25 кДж. После заряда  $C_{ст}$  отрицательный импульс напряжения амплитудой около 45 кВ поступает из блока импульсов управления на у.э.  $P_{ст}$ . После его срабатывания  $C_{ст}$  разряжается на первичную обмотку и.т. ИТ<sub>1</sub> первой ступени повышения напряжения генератора. В результате энергия стартовой ступени начинает распространяться по тракту ге-

нератора, формируя в конечном итоге выходные мегавольтные импульсы с коротким фронтом.

Для обеспечения минимального разброса времени пробоя и получения минимального времени коммутации  $P_{ст}$  следует минимизировать длительность фронта импульса управления и увеличивать его амплитуду. Для формирования импульса, удовлетворяющего этим требованиям, служит блок импульсов управления (см. рис. 3), работающий следующим образом.

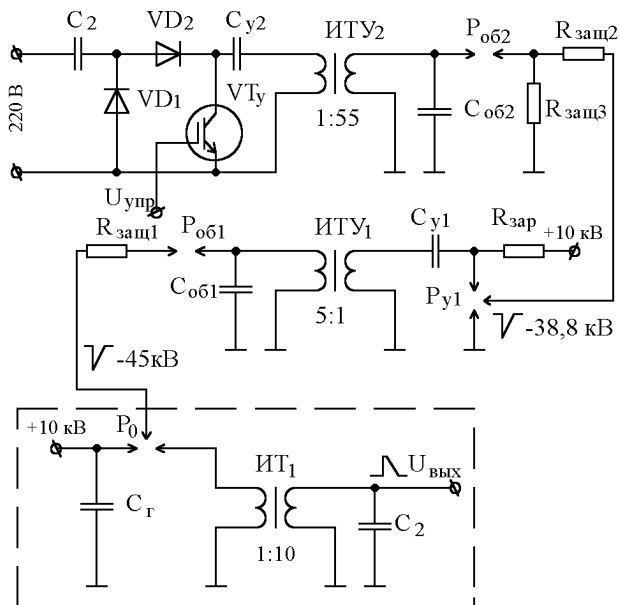


Рисунок 3 – Схема блока импульсов управления  $P_{ст}$

Конденсатор  $C_{y1}$  заряжается от источника  $+10 \text{ кВ}$  как и стартовый накопитель  $C_{ст}$ . Одновременно происходит заряд конденсатора  $C_{y2}$  от сети  $220 \text{ В } 50 \text{ Гц}$  до  $660 \text{ В}$ . После окончания заряда всех трех указанных емкостей от блока синхронизации (на рис. 3 не приведен) поступает импульс управления на затвор IGBT – транзистора  $VT_y$  (IRGPH50UD). После включения последнего  $C_{y2}$  разряжается на первичную обмотку многовиткового (в первичной обмотке содержится 26 витков, во вторичной – 1450 витков) и.т.  $ИТ_{y2}$ . Импульс напряжения амплитудой  $\sim 35 \text{ кВ}$  со вторичной обмотки  $ИТ_{y2}$ , пройдя через цепочку обострения  $C_{о62}-P_{о62}$ , поступает на у.э. тригatrona  $P_{y1}$ . После его срабатывания  $C_{y1}$  разряжается на первичную обмотку маловиткового (в первичной обмотке – 3 витка, во вторичной – 15) трансформатора  $ИТ_{y1}$  с низкой индуктивностью рассеяния. Индуцированный импульс амплитудой

~45 кВ со вторичной обмотки ИТ<sub>у1</sub> поступает на цепочку обострения С<sub>об1</sub>-Р<sub>об1</sub>, где происходит укорочение фронта  $t_{ф.у.}$  импульса управления до (10÷12) нс. Далее этот импульс через резистор R<sub>защ1</sub> приходит на у.э. Р<sub>ст</sub>.

### Оценка времени запаздывания пробоя стартового разрядника.

Управляющий электрод размещен точно в середине рабочего зазора Р<sub>ст</sub>, т.е. он находится на эквипотенциали, соответствующей половине зарядного напряжения С<sub>ст</sub>. Обозначим зазор между основным положительным высоковольтным электродом и у.э. через *a*, а зазор между у.э. и вторым основным (имеющим потенциал земли через первичную обмотку ИТ<sub>1</sub>) электродом – через *b*. До прихода управляющего импульса электрическое поле в рабочем зазоре Р<sub>ст</sub> (т.е. в зазорах *a* и *b*) близко к однородному, его напряженность составляет 10 кВ/0,5 см=20 кВ/см.

Предположим, что потенциал у.э. изменяется мгновенно при подаче на него импульса управления. С приходом отрицательного управляющего импульса амплитудой 45 кВ к зазору *a* приложится напряжение (5+45) кВ, напряженность поля в зазоре составит 50 кВ/0,25 см = 200 кВ/см, то есть напряженность поля возрастет в 10 раз по сравнению с первоначальной. В зазоре *b* напряженность составит (+5-45) кВ/0,25 см = 160 кВ/см.

Напряженность поля E<sub>у</sub> на кромке у.э. можно оценить по формуле [3]:  $E_y \approx Ua^{-1}[(0,3a/r)+0,65]$ , где *r* – радиус скругления кромки у.э. Для нашего случая *r* = 0,15 мм при U = 10 кВ получаем E<sub>у</sub> ≈ 226 кВ/см. Из-за наличия микроострий реально напряженность будет больше, как минимум, в 10 раз и существенно превысит 10<sup>6</sup> В/см [4]. В таких условиях с острых кромок у.э. одновременно в зазорах *a* и *b* начнется формирование лавин и стримеров и сформируются разрядные каналы, замыкающие в конечном итоге основные электроды Р<sub>ст</sub>.

Оценим время запаздывания пробоя Р<sub>ст</sub>. Коэффициент перенапряжения П<sub>а</sub> промежутка *a*:  $P_a = U_a/U_{0a}$ , где U<sub>a</sub> – амплитуда импульса, U<sub>0a</sub> – постоянное напряжение неуправляемого пробоя зазора. Подставив численные значения, получим для промежутка *a* П<sub>а</sub> = 6,66, а для промежутка *b* П<sub>б</sub> = 5,3. Время запаздывания пробоя зазора *a* составит [5]  $t_{па,нс} \approx 1,4/(P_a-1)^2 = 0,043$  нс, соответственно зазора *b* –  $t_{пб} \approx 0,076$  нс. Таким образом, суммарное расчетное время  $t_{пр}$  запаздывания пробоя Р<sub>ст</sub> составит  $t_{пр} = t_{па} + t_{пб} = 0,119$  нс.

Реальное время  $t_n$  запаздывания пробоя Р<sub>ст</sub> будет больше расчетного на длительность фронта  $t_{ф.у.}$  импульса управления и время перезарядки межэлектродной емкости С<sub>6</sub> у.э. на заземленный основной электрод.

Приближенная оценка показывает, что С<sub>6</sub> ≈ 5 пФ. Оценим время перезарядки. Анализ параметров контура перезарядки С<sub>6</sub> показывает, что в нем имеет место апериодический процесс, то есть время перезарядки С<sub>6</sub> максимально составит  $t_{с6} = 3 R_{защ1} C_6 = 3 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-12} = 15 \cdot 10^{-9}$  (с) = 15 нс. В итоге  $t_n = t_{пр} + t_{ф.у.} + t_{с6} \approx 27$  нс.

**Экспериментальные результаты.** Проведенные эксперименты в процессе отладки генератора мегавольтных импульсов показали, что:

- экспериментально определенное время  $t_{\text{п}}$  запаздывания пробоя  $P_{\text{ст}}$  не превышало 40 нс;
- разброс  $t_{\text{п}}$  находился в пределах от 0 до 8 нс;
- разброс времени прохождения сигнала по тракту блока импульсов управления  $P_{\text{ст}}$  от момента подачи импульса управления на транзистор  $VT_y$  до момента прихода управляющего импульса на у.э.  $P_{\text{ст}}$  составляет от 20 до 80 нс.

Полученные упомянутые временные интервалы и их разброс приемлемы для обеспечения работоспособности генератора.

На рис. 4 приведена осциллограмма импульса выходного напряжения стартовой ступени генератора. Стартовая ступень подключена к нелинейной нагрузке (на рис. 1 выделена штрих – пунктирной линией) – и.т. ИТ<sub>1</sub> с ферромагнитным сердечником из электротехнической стали 3422, причем к вторичной обмотке и.т. присоединена незаряженная емкость 0,15 мкФ. Как видно из осциллограммы, амплитуда импульса составила 8,8 кВ по сравнению с зарядным напряжением 9,6 кВ, то есть потери по амплитуде напряжения составила 8,3 %. Высокочастотные осцилляции на спаде импульса можно объяснить следующим образом. Примерно в течение 3,2 мкс после момента коммутации  $P_{\text{ст}}$  происходит заряд емкости  $C_1$  от вторичной обмотки ИТ<sub>1</sub>, после чего на у.э. разрядника  $P_1$  первой ступени повышения напряжения приходит управляющий импульс. Приход этого импульса и последующий пробой  $P_1$  создают высокочастотные колебания в измерительном тракте, что и наблюдается на осциллограмме рис. 4.

Расшифровка осциллограммы выходного импульса дает следующие значения для разрядного контура стартовой ступени. Индуктивность  $L_{\text{к}} = 190$  нГн, характеристическое сопротивление  $z = 0,142$  Ом.

Исходя из этих значений, был проведен оценочный расчет времени  $\tau_{\text{к}}$  коммутации  $P_{\text{ст}}$ . Расчет по формуле Дж.Ч.Мартина [4] показал, что индуктивная составляющая  $\tau_{\text{L}}$  времени коммутации для обоих зазоров  $a$  и  $b$  равна  $\sim 19,5$  нс, а резистивные составляющие  $\tau_{\text{R}}$  соответственно для зазоров  $a$  и  $b$  равны 1,95 нс и 2,25 нс. Таким образом, время коммутации  $P_{\text{ст}}$  составляет 43 нс.

Согласно осциллограмме (рис. 4) длительность фронта  $t_{\text{ф}}$  выходного импульса напряжения стартовой ступени генератора по уровню 0,2 – 0,9 равна  $\sim 80$  нс. Такое большое расхождение расчетного времени коммутации  $P_{\text{ст}}$  и экспериментального значения  $t_{\text{ф}}$ , зарегистрированного осциллографом серии TDS 7000 с полосой пропускания 7 ГГц, можно объяснить следующим образом. На развертке осциллографа с ценой деления 1 мкс/клетка стробоскопический режим работы осуществляется с периодом 20 нс. Таким образом, при расчетном времени коммутации 43 нс число выборок сигнала составит мак-



симум 3, а минимум – 2, что недостаточно для отражения реального фронта импульса.

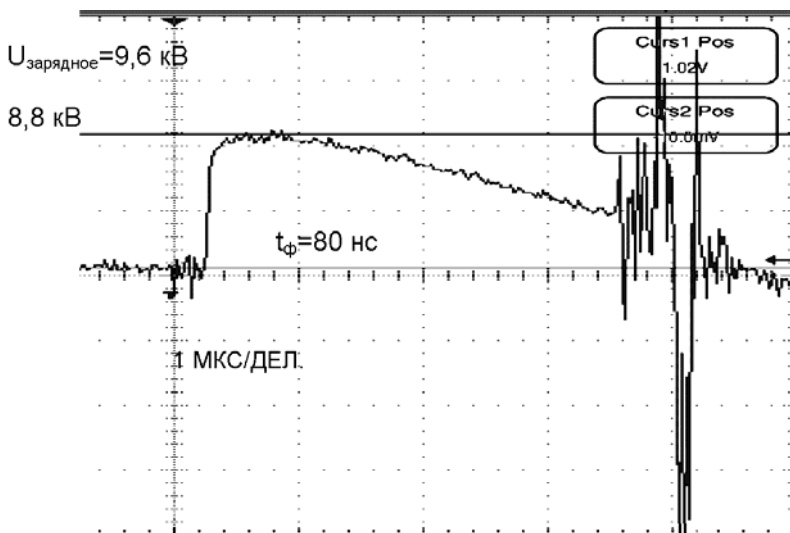


Рисунок 4 – Осциллограмма выходного импульса напряжения стартовой ступени генератора

Максимальная расчетная амплитуда разрядного тока через  $P_{\text{ст}}$  в экспериментах составила:  $I_{\text{max}} = U_{\text{зар}}/z = 67,6 \text{ кА}$  при максимальной скорости нарастания  $5 \cdot 10^5 \text{ А/с}$ .

После  $\sim 800$  срабатываний была произведена разборка  $P_{\text{ст}}$ . Его визуальный осмотр показал следующее. На рабочих поверхностях основных электродов видны незначительные следы эрозии в местах, противостоящих треугольным зубцам на внутренней кромке у.э. Три упомянутые зубца из восьми на у.э. были на одну треть высоты оплавлены. Часть изоляционной поверхности корпуса  $P_{\text{ст}}$ , которая расположена напротив рабочего зазора, была загрязнена продуктами эрозии электродов, хотя это и не сказывалось на работоспособности разрядника. Протирка ветошью, смоченной в ацетоне, позволила восстановить исходное состояние этой диэлектрической поверхности. Есть основание предположить, что  $P_{\text{ст}}$  без нарушения работоспособности позволит произвести  $10^4$  срабатываний без замены электродов, но с протиркой внутренней изоляционной поверхности корпуса с периодичностью  $\sim 10^3$  срабатываний.

Отличительными особенностями данной стартовой ступени генератора высоковольтных импульсов являются:

- коммутация запасенной энергии ступени в  $1,25 \text{ кДж}$  осуществляется

одним разрядником, что упрощает конструкцию, поскольку в случае использования нескольких параллельных разрядников возникает задача их синхронного включения;

- фронт импульса при коммутации накопителя  $C_{ст}$  емкостью 25 мкФ (при этом эквивалентная емкость разрядной цепи составляет ~10 мкФ) на нелинейную нагрузку – импульсный трансформатор с ферромагнитным сердечником и с незаряженной емкостью во вторичной обмотке – не превышает 80 нс. Это позволило достичь амплитуды напряжения на первичной обмотке трансформатора  $\sim 0,92 U_{зар}$ .

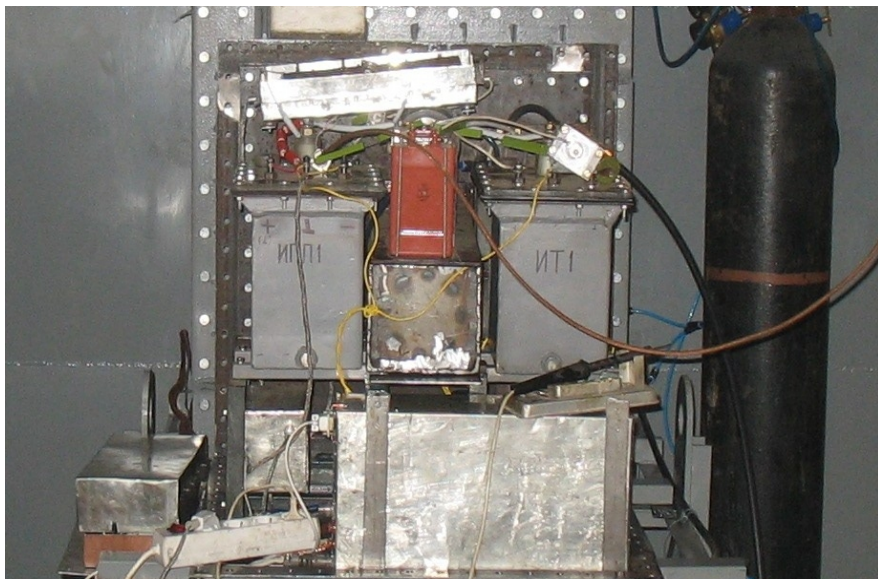


Рисунок 5 – Фотография стартовой ступени в составе генератора

**Выводы.** Впервые в схеме с трансформатором Тесла в цепи 3 – х витковой первичной обмотки этого трансформатора использован узел «емкостный накопитель – управляемый разрядник» с емкостью накопителя 25 мкФ и общей индуктивностью менее 20 нГн. Это позволило получить амплитуду тока в первичной обмотке трансформатора Тесла 67,6 кА с максимальной скоростью нарастания тока  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  А/с при зарядном напряжении 9,6 кВ и минимальных габаритах узла.

Автор выражает благодарность доктору технических наук Бойко Н.И. за советы и критику в процессе создания стартовой ступени генератора и подготовки рукописи.

**Список литературы:** 1. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. –

49 с. 2. *Кремнев В.В., Месяц Г.А.* Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 137 с. 3. *Резвых К.А.* Расчет электростатических полей. – М.: Энергия, 1967. – 111 с. 4. *Герасимов А.И.* Многоканальные разрядники с ламельными управляющими электродами, их развитие и применение. – ПТЭ. – 2004. – № 1. – С. 7-8. 5. *Дайон М.И., Долгошеин Б.А., Ефременко В.И. и др.* Искровые камеры. – М.: Атомиздат, 1967. – 30 с.

*Поступила в редколлегию 20.11.2007*

УДК 621.373

***А.И.ИВАНЬКИНА***; НТУ «ХПИ»

## **ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Метою даної роботи є розробка генератора з використанням високовольтного трансформатора, що дозволяє отримувати високовольтні імпульси до 20кВ з тривалістю 10мкс і частотою проходження імпульсів от 800 Гц до 1,5 кГц.

The purpose of this work is development of generator with the use of high-voltage transformer, that allows to get high-voltage pulses to 20 kV with duration of 10  $\mu$ s and pulse repetition frequency from 800 Hz to 1.5 kHz.

Высокие технологии, использующие электрохимические и электродинамические процессы в газах, реализуются при помощи высоковольтных импульсных установок.

По сравнению с 80-90 гг. прошлого столетия тенденция на улучшение эффективности работы установок связана с повышением быстродействия коммутирующих элементов и увеличением частотного диапазона. Важным требованием улучшения энергетических показателей электрофизических процессов является необходимость повышения крутизны фронта импульсов, так как это требование приводит к повышению напряженности электрического поля в разрядном промежутке и созданию благоприятных условий для зажигания разряда и ионизационных процессов. Также на энергетические показатели электрофизических процессов значительно влияет длительность импульса напряжения, воздействующего на разряд, т.к. кинетические процессы в газах при воздействии импульса происходят за время до единиц микросекунд, и при воздействии импульса, длительность которого превышает это время, в разрядном промежутке происходит нежелательный разогрев газа и электродной системы.

В связи с вышесказанным перед разработчиками высоковольтных им-

пульсных установок стоит задача формирования импульсов малой длительности с крутым фронтом нарастания напряжения. В литературе [1,2] известно применение субмикросекундных генераторов, принцип действия которых заключается в том, что, сжатие энергии происходит в звеньях магнитной компрессии, а также применение генераторов с использованием высоковольтных импульсных трансформаторов [3]. Однако, данные генераторы нельзя использовать на частотах свыше 1 кГц, так как магнитные элементы, в первом случае, работают в режиме насыщения, что приводит к резкому возрастанию тока и выделению тепла в них, во втором случае высоковольтный импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации 50 и более имеет значительные паразитные параметры: индуктивность рассеивания и собственную емкость, из-за большого количества витков вторичной обмотки и значительной доли высоковольтной изоляции в объеме трансформатора. Это приводит к значительному увеличению габаритов и стоимости трансформатора.

Экспериментальный трансформатор на 100 кВ, мощностью до 2кВт был изготовлен в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», на магнитопроводе из электротехнической стали толщиной 80 мкм, коэффициент трансформации 250, при этом он имел индуктивность рассеивания 350 мГн, а расчетная собственная емкость трансформатора составила 28 мкФ. Такие параметры трансформатора привели к тому, что длительность импульса за счет завала фронта и спада импульса напряжения составила 200 мкс, что не позволило использовать данный трансформатор для частот свыше 1200 Гц, при этом его габариты составили 600×600×400 мм. Уменьшение же числа витков первичной обмотки приводит к снижению индуктивности рассеивания, но при этом значительно возрастает потери в магнитопроводе, так как он вынужден работать в области более глубокого насыщения.

Целью данной работы явилась необходимость разработки генератора с использованием высоковольтного трансформатора, позволяющего получать высоковольтные импульсы с длительностью до 10 мкс и частотой следования до 1,5 кГц. Данный генератор разрабатывался для получения озона.

## **ОПИСАНИЕ ГЕНЕРАТОРА**

Схема генератора представлена на рис. 1. Состоит из выпрямителя сетевого напряжения, т.е. диодного моста  $VD1$ , пульсации выпрямленного напряжения сглаживаются конденсатором  $C1$ , ток зарядки конденсатора ограничивается резистором  $R1$ , который через 0,5 секунды закорачивается при помощи реле, управляемого таймером. Через дроссель  $L$  и диод  $VD2$  заряжается конденсатор  $C2$  после того как напряжение на конденсаторе достигнет максимума, а ток будет равен нулю, срабатывает транзистор  $YT1$  и конденсатор  $C2$  разряжается на первичную обмотку трансформатора  $T1$ .

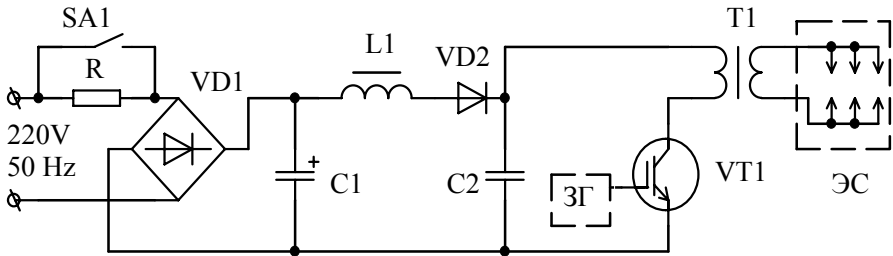


Рисунок 1 – Схема генератора озона

Напряжение через вторичную обмотку трансформатора передается на систему электродов (ЭС), в которой происходит высоковольтный разряд и генерируется озон.

Трансформатор изготовлен на феррите марки 3000НМ, количество витков первичной обмотки 70, вторичной – 900, следовательно, коэффициент трансформации 13. Габариты трансформатора, состоящего из магнитопровода и обмоток –  $120 \times 100 \times 73$  мм.

Традиционно в высоковольтных трансформаторах предельно уменьшают индуктивность рассеивания, то есть обмотки размещают на одном керне, это приводит к резкому ухудшению условий охлаждения первичной обмотки и увеличению эффекта близости по сравнению с расположением первичной и вторичной обмоток на разных кернах сердечника. В данном случае обмотки разнесены, что является естественным ограничением входной мощности. Поэтому для компенсации ограничения мощности используется дроссель  $L$  [4], который создает совместно с  $C1$  и  $C2$  колебательный контур. Регулировка индуктивности дросселя (в данном генераторе дроссель намотан на магнитопроводе из материала 50НП с зазором, регулировка зазора позволяет изменять индуктивность), приводит к изменению собственной частоты контура и приближает ее к частоте коммутации транзистора  $VT1$ . Коммутация  $VT1$  осуществляется задающим генератором  $3Г$ . Приближение собственной частоты контуров к частоте коммутации приводит к увеличению напряжения на первичной и вторичной обмотке трансформатора. Непременным условием увеличения напряжения является превышение накопительной емкости над емкостью, образованной собственной емкостью трансформатора и емкостью нагрузки  $C'_0$  [3]. На рис. 2 изображена схема замещения генератора озона.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 показан внешний вид описываемого генератора, выходная мощность данного генератора составляет 300 Вт, частота коммутации изменяется в пределах от 800 Гц до 1500 Гц, выходное напряжение – от 4,5 кВ до 20 кВ.

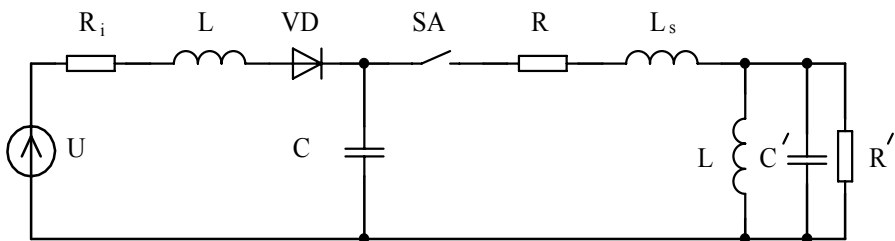


Рисунок 2 – Схема замещения:  $U$  – источник постоянного напряжения;  $R_i$  – внутреннее сопротивление источника;  $L$  – индуктивность дросселя;  $VD$  – диод;  $C_1$  – накопительная емкость;  $L_S$  – индуктивность рассеивания трансформатора,  $L_S = L_{S1} + L_{S2}$  ( $L_S$  равна сумме индуктивностей рассеивания первичной и вторичной обмотки);  $R$  – сопротивление обмоток;  $C'_0$  – собственная емкость трансформатора и нагрузки;  $L_\mu$  – индуктивность намагничивания;  $R'_H$  – сопротивление нагрузки

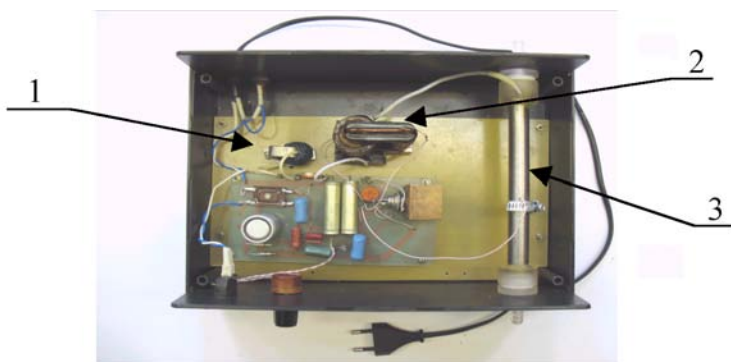


Рисунок 3 – Внешний вид генератора: 1 – источник питания; 2 – высоковольтный трансформатор, намотанный на феррите 3000НМ типа ПК30×16; 3 – разрядная трубка, где происходит генерация озона

Разрядная трубка представляет собой два коаксиальных металлических электрода, между которыми располагается стеклянный барьер, разрядный промежуток – 0,8 мм.

Форма импульса напряжения, измеренного на первичной стороне трансформатора, показана на осциллограмме рис. 4. Цена деления – 0,05В/дел. по оси ординат, 20 мкс/дел. по оси абсцисс.

Форма импульса напряжения, измеренного на высоковольтной обмотке изображена на рис. 5. Цена деления – 0,5В/дел по оси ординат, 20мкс/дел. по оси абсцисс

Измерения проводились при помощи осциллографа С8-13 и резистивного делителя напряжения, изготовленного из резисторов типа ТВО, практически безындукционных, коэффициент деления – 16000. Измерения фиксировались при частоте следования пачек импульсов -1000Гц, при этом, мак-

симальное амплитудное значение напряжения на первичной обмотке -800 В, на вторичной обмотке – 18 кВ.

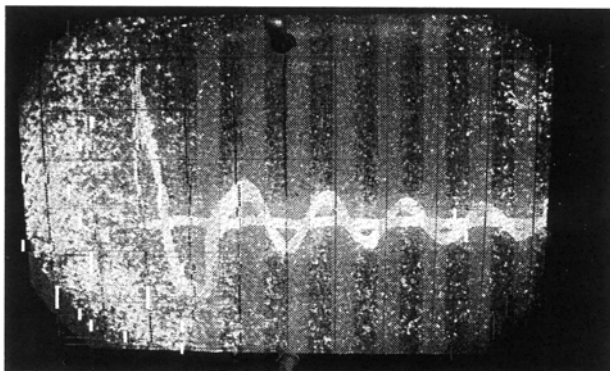


Рисунок 4 – Форма напряжения на первичной обмотке трансформатора

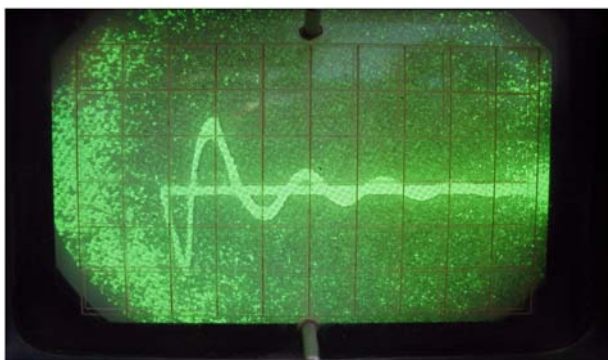


Рисунок 5 – Форма импульсов напряжения высоковольтной обмотки

При изменении частоты коммутации от 800 Гц до 1,5 кГц наблюдается пропорциональная зависимость амплитуды выходных импульсов от частоты коммутации. Амплитуда выходных импульсов изменяется от 4,5 кВ до 20 кВ. Данная закономерность значительно упрощает схемное решение источника питания генератора: не требуется дополнительных узлов для регулировки напряжения.

Концентрация озона измерялась оптическим газоанализатором «Циклон-5.11» (Россия, Фирма «Оптэк»). Минимальная концентрация составила 0,8г/м<sup>3</sup> при частоте 800 Гц, увеличивалась до 7,5 г/м<sup>3</sup> пропорционально частоте коммутации. Разряд осуществлялся в атмосферном воздухе без предварительной подготовки, расход воздуха через разрядный промежуток – 0,06 м<sup>3</sup>/час.

## **ВЫВОДЫ:**

1. Для получения высоковольтных импульсов значительной амплитуды и необходимой длительности целесообразно подбирать параметры колебательных контуров, образованных источником питания, высоковольтным трансформатором и нагрузкой таким образом, чтобы приближать их собственные частоты к частоте коммутации.
2. Существует интервал линейной зависимости изменения амплитуды высоковольтных импульсов от частоты коммутации.
3. Реализация п.1, п.2 приводит к упрощению изготовления высоковольтного трансформатора и в целом, генератора озона, что приводит к значительному снижению стоимости изготовления последнего.

**Список литературы:** 1. *Г.А.Месяц*. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с. 2. *Н.П. Поляков*. Наносекундные озонаторы // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 5. – С. 126-129. 3. *К.А.Желтов* Пикосекундные сильноточные электронные ускорители // М., Энергоатомиздат, 1991. – С. 62-85. 4. *Ю.А.Быстров, И.Г.Мироненко* Электронные цепи и устройства // Высшая школа, 1989. – С.49-55.

*Поступила в редколлегию 08.11.2007*

УДК 621.316.9

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

## **ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГООБЪЕКТОВ**

У статті представлено опис графічного інтерфейсу, який входить до складу програмного комплексу для проведення розрахунків заземлювальних пристроїв вільної конфігурації.

In article the description of the graphic interface, which is a part of a program complex for calculation of grounding systems of free configuration is presented.

Заземляющее устройство (ЗУ) является обязательным элементом каждого электроэнергообъекта, обеспечивающее, главным образом, нормальное функционирование оборудования и безопасность обслуживающего персонала, а также другие функции, которые подробно освещены в [1]. Начиная с 2003 г. проводится электромагнитная диагностика ЗУ различных объектов электроэнергетики по методике описанной в [2]. Указанная методика состоит из трех основных этапов: экспериментального; расчетного и этапа выдачи рекомендаций [3].

Для выполнения второго этапа электромагнитной диагностики было не-



обходимо разработать программный комплекс для расчета сложных ЗУ произвольной конфигурации различных объектов. При его разработке были учтены следующие особенности:

- ЗУ является трехмерным сложным объектом заранее неизвестной конфигурации, так как программа должна рассчитывать ЗУ находящиеся в эксплуатации по несколько десятков лет, а, следовательно, существенно отличающегося от проекта;
- возможность вводить ЗУ электроэнергетических объектов любых размеров без ограничения числа узлов и соединений;
- из-за сложности геометрической конфигурации необходимо предусмотреть процедуры проверки ошибок исходных данных для обеспечения правильной работы расчетного модуля;
- необходимо иметь возможность рассчитать напряжение прикосновения на всех единицах оборудования при любом аварийном режиме;
- так как количество режимов достаточно велико (например, на подстанциях 220 кВ и выше, а также на узловых подстанциях 110 кВ их количество более 200), требуется обеспечить автоматический расчет всех аварийных режимов, а также выполнить их автоматический анализ;
- при наличии двух и более глухозаземленных нейтралей возможность вводить аварийный ток в несколько узлов одновременно.

Разработанный программный комплекс для расчета ЗУ произвольной конфигурации Grounding 1.0 состоит из трех частей:

- входного интерфейса, который в графической или табличной форме дает возможность ввести исходные данные, например, геометрическую конфигурацию ЗУ;
- расчетной части, в которой производится расчет по введенным исходным данным;
- модуль анализа, в котором производится обработка полученных результатов.

Схема взаимодействия модулей программы в комплексе приведена на рис. 1.

В настоящей работе подробно рассматривается интерфейс программного комплекса. Требование расчета ЗУ произвольной конфигурации определило задание его при помощи способа индивидуального кодирования проводников. В этом случае расчетная схема ЗУ составляется из узлов и связей между ними. Различаются три вида узлов и связей:

- 1) подземный узел (связь) – узел (связь), расположенный под землей на различной глубине. Координата  $Z$  у данного вида узлов (связей) больше 0;
- 2) наземный узел (связь) – узел (связь), расположенный на поверхности земли. Координата  $Z$  у данного вида узлов (связей) равна 0;

- 3) надземный узел (связь) – узел (связь), расположенный над землей на различной высоте. Координата  $Z$  у данного вида узлов (связей) меньше 0.

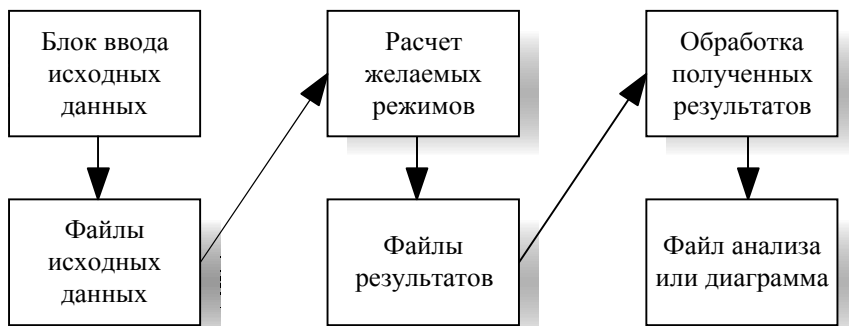


Рисунок 1 – Схема взаимодействия модулей программного комплекса

Каждый узел имеет свой уникальный набор координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Узлов, с одинаковыми координатами  $X$  и  $Y$  может быть три (при координате  $Z > 0$ ,  $Z < 0$ ,  $Z = 0$ ).

На первом этапе необходимо произвести ввод исходных данных. Для реализации ввода разработан графический интерфейс, с целью сокращения возможного количества ошибок при задании геометрической модели заземляющей сетки произвольной конфигурации, по сравнению, например, с табличным интерфейсом. Вначале загружается «подложка», то есть план подстанции с нанесенным на него ЗУ. В качестве «подложки» может быть использован уже нарисованный файл в формате «.bmp». Затем оператор обрисовывает ЗУ по загруженной «подложке». Пересчет из координат экрана в реальные координаты производится автоматически. Данные узлов, которые получаются в результате обрисовки, заносятся в таблицу следующего формата:

где: «№ узла» – это порядковый номер узла, он является уникальным, то есть в одной и той же расчетной схеме нет двух узлов с одинаковым номером;

«Коорд.  $X$ », «Коорд.  $Y$ » – координаты узла по осям  $X$  и  $Y$  соответственно;

«Коорд.  $Z$ » – глубина залегания узла (положительные значения соответствуют подземным узлам, а отрицательные – надземным);

«Количество связей» – число связей с другими узлами сетки;

«Ширина проводника» – кодированные характерные размеры проводников, отходящих от заданного узла;

«Форма проводника» – форма сечения проводников, отходящих от за-

данного узла;

«Связи» – перечисление номеров узлов, с которыми связан данный узел;

«Оборудование» – в этой колонке располагается название оборудования, если узел расположен на нем. Значение «=» означает, что в данном узле оборудование отсутствует.

Таблица 1

№ узла	Коорд. X	Коорд. Y	Коорд. Z	Количество связей	Ширина проводника	Форма проводника	Связи	Оборудование
1	10,2	5,4	0,5	2	0,016	Пруток	2;3	=
2	20	5,4	0,5	2	0,016	Пруток	1;3;4	=
3	20	18	0,5	2	0,016	Пруток	1;2	=
4	20	5,4	0	1	0,016	Пруток	2	КС-110 ф. «С»

В примере, приведенном выше, задан прямоугольный треугольник с вершинами в точках 1, 2 и 3, расположенный под землей на глубине 0,5 м, выполненный из проводника круглого сечения диаметром 16 мм. Узел 4 расположен на поверхности земли, что соответствует местонахождению оборудования КС-110 ф. «С». Описанный пример приведен на рис. 2.

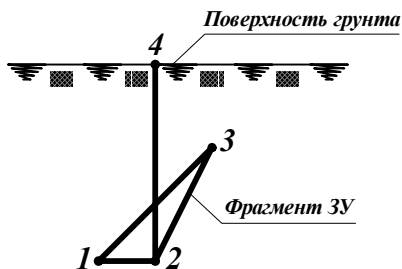


Рисунок 2

Таким образом, табл. 1 заполняется узлами, которые будут составлять расчетную схему ЗУ. Для проведения расчета также необходимы и данные о связях между узлами. Они содержатся в другой таблице, которая создается автоматически из табл. 1 узлов. Она выглядит следующим образом:

где: «№ связи» – уникальный номер связи;

«Индекс связи» – признак, указывающий наземная связь или подземная (если он равен 1 – то подземная, если нулю – наземная или надземная). Это необходимо для расчетной части программы, чтобы не учитывать наземные связи при расчете поля создаваемого заземлителями;

- «Начальный узел» – принимаемый узел начала связи;
- «Конечный узел» – принимаемый узел конца связи;
- «Ширина связи» – размер связи по ширине, второй размер для прямоугольной связи вычисляется как десятая часть размера по ширине, что обусловлено стандартным рядом прямоугольных заземляющих проводников, то есть  $40 \times 4 \text{ мм}^2$ ,  $50 \times 5 \text{ мм}^2$  и т. д.;
- «Форма связи» – форма сечения связи;
- «Глубина связи» – глубина расположения связи относительно поверхности земли;
- «Индуктивность связи» – погонное индуктивное сопротивление связи, мкГн/м;
- «Сопротивление связи» – погонное активное сопротивление связи Ом/м.

Таблица 2

№ связи	Индекс связи	Начальный узел	Конечный узел	Ширина связи	Форма связи	Глубина связи	Индуктивность связи	Сопротивление связи
1	1	1	2	0,016	Пруток	0,5	0	0
2	1	1	3	0,016	Пруток	0,5	0	0
3	1	2	3	0,016	Пруток	0,5	0	0
4	1	2	4	0,016	Пруток	0,5	0	0

Величины погонных сопротивлений по умолчанию задаются равными нулю и в этом случае они вычисляются в расчетной части программы автоматически. Если эти значения задать в табл. 2, то программа не будет рассчитывать их, а будет использовать введенные.

Применение Borland Database Engine (BDE) позволило решить проблему ввода произвольного числа точек. Кроме того, после полной отрисовки схемы при помощи графического интерфейса есть возможность подкорректировать введенную конфигурацию с помощью таблиц BDE. Разработанный интерфейс также позволяет ввести в произвольное количество точек аварийный ток различной амплитуды.

Пример расчетной схемы подстанции, введенной с помощью разработанного графического интерфейса, приведен на рис. 3.

После того, как введены исходные данные, они сортируются по глубине связей (сначала подземные, у которых  $Z > 0$ , затем наземные –  $Z = 0$ , а затем надземные –  $Z < 0$ ). Необходимость сортировки вызвана тем, что при расчете полевой задачи надземные и наземные связи не участвуют, а, следовательно, не учитываются расчетной частью программы. После сортировки введенные данные подвергаются проверке на наличие ошибок. Проверяется наличие не

связанных с общей схемой точек, отсутствие связей больше максимальной (обычно принимается 20 м) или минимальной длины (обычно принимается 0,2 м), а также наложения связей друг на друга.

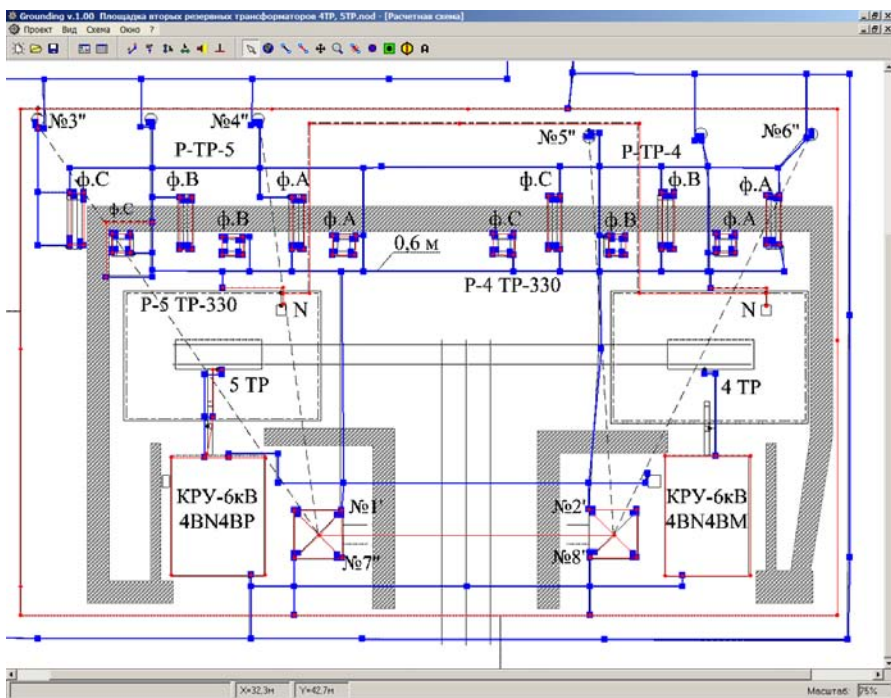


Рисунок 3 – Расчетная схема ЗУ электроэнергообъекта

Исходные данные, введенные с помощью графического интерфейса, сохраняются в семи файлах. Первый из них – файл узлов, содержащий в себе данные табл. 1, за исключением колонки названия оборудования; второй – файл соединений, содержащий в себе данные табл. 2; третий – файл общих параметров, содержащий габаритные размеры подстанции, удельное сопротивление грунта, ток однофазного короткого замыкания; четвертый файл – файл оборудования, который содержит номера точек, расположенных на оборудовании, на котором необходимо производить расчет величины напряжения прикосновения; пятый – файл режимов, в котором указаны номера точек, в которых будет имитироваться режим однофазного короткого замыкания; шестой и седьмой файлы – содержат графический чертеж подземных и надземных соединений соответственно и вместе они составляют геометрию введенного ЗУ.

После окончания ввода исходных данных управление передается рас-

четной части программы, в которой производится расчет ЗУ произвольной конфигурации в двух различных режимах: однофазное короткое замыкание (КЗ) на территории подстанции (рис. 4, а) и однофазное КЗ за пределами подстанции (рис. 4, б). В первом случае ток «втекает» в месте повреждения и «вытекает» через нейтраль трансформатора, а во втором случае ток «втекает» в нейтраль трансформатора, а «вытекает» в зоне нулевого потенциала.

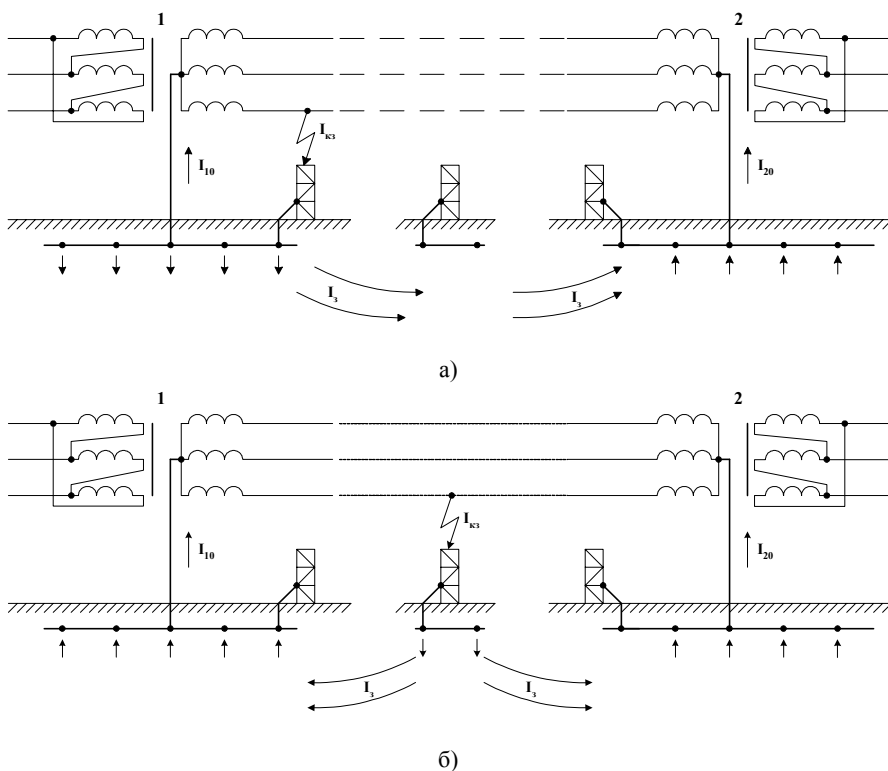


Рисунок 4 – Схема расчетных режимов однофазного КЗ:  
а) КЗ на территории подстанции 1; б) КЗ за территорией подстанции 1.

Подробное описание математической модели приведено в [4]. Количество режимов определяется количеством оборудования на объекте, на котором может произойти КЗ. Результатом расчета каждого режима является файл, в который записываются значения потенциалов и напряжений прикосновения на оборудовании. Имеется возможность создания файла для построения эквипотенциальных поверхностей на всей территории объекта при заданном режиме. Картину распределения линий равного потенциала по

данному файлу можно построить, используя программный пакет Windows Surfer.

После проведения расчетов необходимо проанализировать полученные результаты. Для этого в программном комплексе предусмотрен модуль анализа, который служит для того, чтобы обработать файлы, содержащие значения напряжений прикосновения. В качестве исходных данных для анализа в программе задаются допустимые величины напряжения прикосновения, определяемые по [5], в зависимости от времени срабатывания защиты. В модуле анализа учитывается категория оборудования – является ли оно рабочим местом или нет. Для рабочего места принимается величина напряжения прикосновения, определяемая быстродействием резервной защиты. Для всего остального оборудования объекта допустимая величина напряжения прикосновения принимается с учетом времени срабатывания основной защиты. Время срабатывания защиты принимается с учетом времени срабатывания отключающего устройства.

При обработке результатов расчета можно анализировать как все узлы при всех режимах, так и напряжение прикосновения отдельного узла во всех режимах. В первом случае результатом работы программы будет создание таблицы узлов, в которых напряжение прикосновения превышает допустимый уровень. Эта таблица может быть сохранена в текстовом файле, и использоваться при оформлении протокола испытаний объекта. Во втором случае может быть построена гистограмма, пример которой приведен на рис. 4.

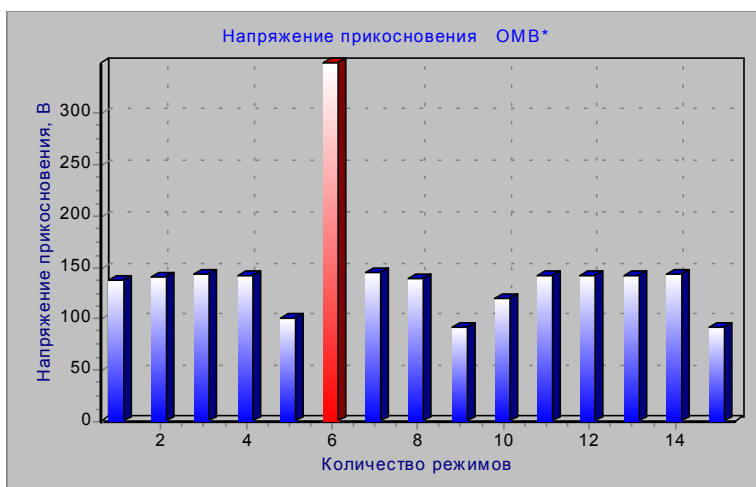


Рисунок 4 – Гистограмма напряжений прикосновений оборудования ОМВ

Приведенная гистограмма может быть скопирована в буфер обмена Windows или сохранена в рисунке формата bmp.

## **Выводы**

1. Приведены требования к созданию программного комплекса для расчета сложных ЗУ произвольной конфигурации объектов электроэнергетики.
2. Описаны принцип построения и основные возможности созданного графического интерфейса программного комплекса, а также программы анализа полученных результатов.

Разработанный программный комплекс успешно применяется в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» для расчета ЗУ произвольной конфигурации различных электроэнергообъектов.

**Список литературы:** 1. *Кац Е.Л., Меньшов Б.Г., Целебровский Ю.В.* Заземляющие установки высокого и низкого напряжения // Итоги науки и техники. Сер. Электрические станции и сети. – 1989. – № 5. – 158 с. 2. *Шкуринский Г.М., Заболотникова Л.П., Колиушко Г.М. и др.* Випробування та контроль стану заземлювальних пристроїв електроустановок. Галузевий нормативний документ ГНД 34.20.303-2003. – Київ: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». – 2004. – 52 с. 3. *Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И., Васьяковский А.П., Чевычелов В.А., Колиушко Д.Г.* Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 4. – С. 29-32. 4. *Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М.* Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – 2003. – Т. 25, № 2. – С. 99-111. 5. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений и токов. – Введ. 01.07.83. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 6 с.

*Поступила в редколлегию 14.11.2007*

УДК 621.313

**А.А.ПЕТКОВ**, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ»

## **РАЗРЯД ДВУХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА ОБЩЮЮ НАГРУЗКУ**

У роботі досліджена зміна форми імпульсу струму в навантаженні при різних співвідношеннях параметрів схеми. Визначено область співвідношення параметрів, у якій у навантаженні формується уніполярний імпульс струму з монотонним наростанням і спадом.

Change of form of current pulse in the load under different ratios of circuit parameters has been studied in the work. The domain of parameters ratio, in which unipolar current pulse with monotonous rise and drop was formed in the load, was determined.

**Постановка проблемы.** В практике испытаний технических средств на



устойчивость к воздействию электромагнитных факторов возникает необходимость формирования импульсов тока большой амплитуды (сотни кА) и длительности (тысячи мкс). Для создания таких импульсов используется ряд нескольких емкостных накопителей (ЕНЭ) с различным уровнем зарядного напряжения на общую нагрузку. Данные устройства обеспечивают формирование импульсов тока различной формы и для обеспечения процесса их проектирования необходимо иметь информацию об областях изменения параметров цепей ЕНЭ, при которых в нагрузке могут быть сформированы импульсы тока той или иной формы.

**Анализ публикаций.** Параллельной работе нескольких ЕНЭ на одну нагрузку посвящен ряд публикаций [1-4]. В [1] приведены результаты численного и экспериментального исследования переходного процесса при параллельной работе двух генераторов импульсов напряжения на активно-индуктивную нагрузку. Для формирования тока молнии (длительность фронта 2 мкс, длительность импульса 50 мкс) в работе было исследовано замыкание нагрузки. В [2] представлено аналитическое решение системы операторных уравнений, описывающих переходный процесс при работе генераторов больших импульсных токов с корректирующей цепью на RL-нагрузку. В расчетной схеме генератор и параллельно включенная корректирующая цепь представлены RLC-звеньями, что также соответствует эквивалентной схеме совместной работы ЕНЭ на общую нагрузку. Аналитическое выражение для тока в нагрузке получено при условии, что активное сопротивление нагрузки много больше активных сопротивлений генератора и корректирующей цепи. В [3, 4] рассмотрено решение задачи выбора параметров элементов импульсных источников питания, работающих на общую нагрузку, как задачи оптимизации по различным критериям. В [4] также проанализировано уменьшение суммарной энергоемкости устройств, формирующих импульсы тока с коротким фронтом и длинным спадом значений, при использовании нескольких импульсных источников питания. Показано, что уменьшение энергоемкости особенно эффективно в случае, когда длительность спада превышает в сто и более раз длительность фронта.

В рассмотренных публикациях решаются специфические задачи, что не позволяет провести обобщение их результатов для целей анализа формы генерируемого импульса тока. Необходимость такого анализа вызвана тем, что испытательные импульсы тока должны иметь строго регламентированную форму, задаваемую нормативными документами, например [5-7]. Одной из наиболее широко используемой формы импульса тока является апериодическая форма с монотонным нарастанием и спадом значений. Такие импульсы, в частности, используются при испытаниях на стойкость к разрядам молнии [8].

**Целью** настоящей работы является определение области соотношения параметров ЕНЭ, обеспечивающих формирование аperiodического импульса тока с монотонным нарастанием и спадом его значений.

**Материалы и результаты исследований.** Рассмотрим схему разряда двух ЕНЭ на RL-нагрузку, приведенную на рис. 1.

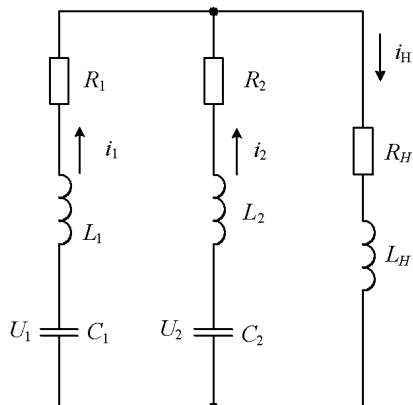


Рисунок 1 – Схема разряда двух ЕНЭ на общую нагрузку:

$U_1, C_1, R_1, L_1$  – зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность ЕНЭ1;  $U_2, C_2, R_2, L_2$  – зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность ЕНЭ2;  $R_H, L_H$  – активное сопротивление и индуктивность нагрузки;  $i_1, i_2, i_H$  – соответственно ток в ветвях ЕНЭ1, ЕНЭ2 и нагрузке

Можно показать, что переходный процесс в этой схеме описывается следующей системой интегро-дифференциальных уравнений с безразмерными переменными.

$$\begin{cases} r_1 I_1 + \frac{dI_1}{d\tau} + \int I_1 d\tau - r_2 I_2 - L_{21} \frac{dI_2}{d\tau} - \frac{1}{C_{21}} \int I_2 d\tau = 1 - U_{21}; \\ r_2 I_2 + L_{21} \frac{dI_2}{d\tau} + \frac{1}{C_{21}} \int I_2 d\tau + r_H I_H + L_{H1} \frac{dI_H}{d\tau} = U_{21}; \\ I_H = I_1 + I_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $r_1 = \frac{R_1}{\sqrt{L_1/C_1}}$ ,  $r_2 = \frac{R_2}{\sqrt{L_1/C_1}}$ ,  $r_H = \frac{R_H}{\sqrt{L_1/C_1}}$  – безразмерные аналоги активных сопротивлений;

$\tau = t/\sqrt{L_1 C_1}$  – безразмерный аналог времени;

$$I_1 = \frac{i_1}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad I_2 = \frac{i_2}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad I_H = \frac{i_H}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \text{ – безразмерные аналоги токов;}$$

$$L_{21} = \frac{L_2}{L_1}, \quad L_{H1} = \frac{L_H}{L_1}, \quad C_{21} = \frac{C_2}{C_1}, \quad U_{21} = \frac{U_2}{U_1} \text{ – безразмерные аналоги индуктивностей, емкости и зарядного напряжения.}$$

дуктивностей, емкости и зарядного напряжения.

Как видно из (1), переходный процесс в схеме определяется семью безразмерными величинами:  $r_1, r_2, r_H, L_{21}, L_{H1}, C_{21}, U_{21}$ . В зависимости от соотношения между ними импульс тока в нагрузке может иметь различный вид. Стилизованные формы импульса тока, генерируемые в нагрузке, приведены на рис. 2.

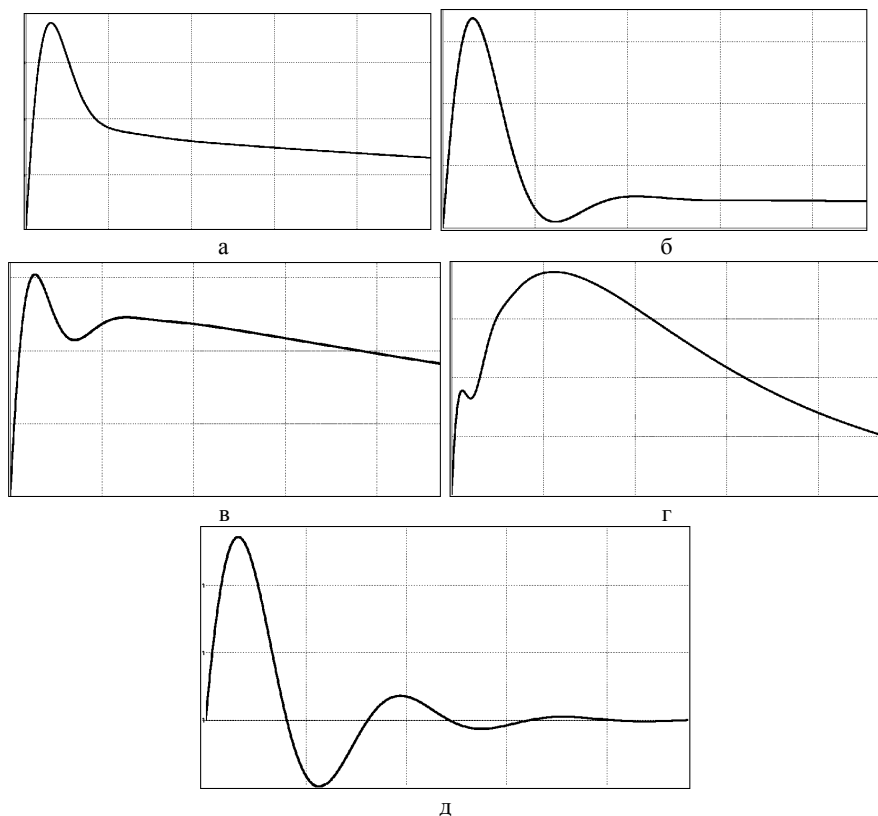


Рисунок 2 – Формы импульсов тока

Поставим задачу определения соотношения безразмерных параметров, при которых импульс тока имеет аperiодическую форму с монотонным на-

растанием и спадом значений (см. рис. 2,а):  $dI_H/d\tau > 0$  при  $\tau \in (0, \tau_{\max})$ ,  $dI_H/d\tau \leq 0$  при  $\tau > \tau_{\max}$ , где  $\tau_{\max}$  – время достижения максимального значения тока в нагрузке. Решить поставленную задачу в аналитическом виде не представляется возможным. Алгоритм численного решения может быть описан следующим образом.

1. Задаемся набором безразмерных параметров и вычисляем множество значений тока нагрузки  $I_H = f(\tau)$ .

2. На множестве рассчитанных значений определяем время достижения максимального значения тока –  $\tau_{\max}$  и его величину –  $I_{\max}$ .

3. Фиксируем наличие экстремумов в интервалах  $(0, \tau_{\max})$  и  $(\tau_{\max}, \infty)$ .

Результаты численного анализа (проведенного при  $r_1 = 1$ ;  $r_H = 0,5$ ;  $L_{H1} = 5$ ;  $C_{21} = 100$ ;  $U_{21} = 0,1$ ), представлены на рис. 3. При изменении  $L_{21}$  в интервале  $[0,4; 1,2]$  в зависимости от величины  $r_2$  имеют место следующие области с характерной формой импульса тока. При изменении  $r_2$  в интервале  $[0; r_{2,1})$  в нагрузке формируется униполярный импульса тока с колебаниями на фронте (область 1). Переход величины  $r_2$  в интервал  $(r_{2,1}; r_{2,2})$  характеризуется перемещением колебательности на спад импульса, которое происходит за счет уменьшения величины максимума тока (область 2). При дальнейшем увеличении  $r_2$  в интервал  $(r_{2,2}; r_{2,3})$  в нагрузке формируется апероидический униполярный импульс с монотонным нарастанием и спадом (область 3).

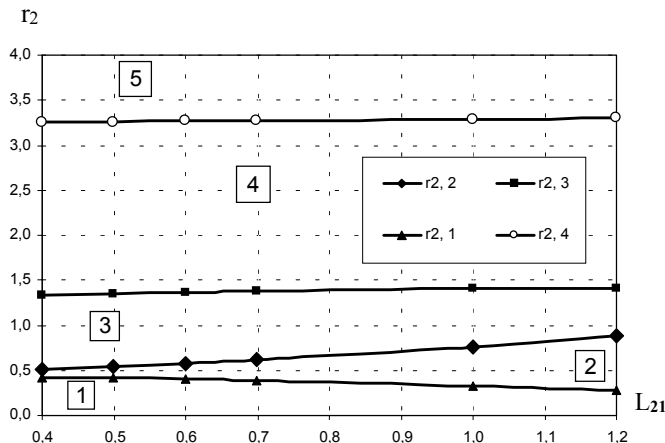


Рисунок 3 – Области изменения формы импульса тока в нагрузке:

- 1 – область униполярного импульса тока с колебаниями на фронте (рис. 2, г);
- 2 – область униполярного импульса тока с колебаниями на спаде (рис. 2, в);
- 3 – область униполярного апероидического импульса тока с монотонным нарастанием и спадом (рис. 2, а);
- 4 – область униполярного импульса тока с колебаниями на спаде (рис. 2, б);
- 5 – область периодического затухающего импульса тока (рис. 2, д)

Связь  $r_2$  и  $L_{21}$  для границ этой области имеет вид:

– для нижней границы

$$r_{2,2} = 0,2028 L_{21}^2 + 0,1345 L_{21} + 0,4266, \quad (2)$$

– для верхней границы

$$r_{2,3} = -0,1285 L_{21}^2 + 0,3105 L_{21} + 1,2287. \quad (3)$$

Дальнейшее увеличение сопротивления  $r_2$  в интервал  $(r_{2,3}; r_{2,4})$  приводит вновь к появлению колебательности на спаде импульса тока в нагрузке (область 4), которая, при дальнейшем увеличении  $r_2 > r_{2,4}$  (область 5), вызывает появление отрицательных значений импульса тока и, при  $r_2 \rightarrow \infty$ , имеет место затухающий колебательный импульс тока, показанный на рис 2д.

Таким образом, в исследованном диапазоне изменения соотношения параметров схемы, аperiodический импульс имеет место только в области, ограниченной значениями, определяемыми по соотношениям (2) и (3).

### Выводы.

1. В работе приведена система безразмерных уравнений, описывающих переходный процесс при разряде двух ЕНЭ на общую нагрузку.
2. Показано, что в зависимости от соотношения параметров схемы возможно формирование пяти характерных видов импульса тока в нагрузке.
3. Получены аналитические выражения для определения границ области соотношения параметров схемы, в которой в нагрузке формируется униполярный импульс тока с монотонным нарастанием и спадом его значений.

Результаты данной работы могут являться базой для дальнейших исследований формирования импульса тока в нагрузке, при одновременном разряде на нее двух и более емкостных накопителей энергии.

**Список литературы:** 1. Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Применение мощных генераторов импульсных напряжений в схеме с замыкателем нагрузки для получения больших импульсных токов молнии // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 4. – 2004. – С. 37-45. 2. Баранов М.И., Игнатенко Н.Н. Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков: НТУ «ХПИ». – №49. – 2005. – С. 3-14. 3. Губарев Г.Г., Северин В.П. Оптимизация параметров импульсных источников питания // Электричество. – 1983. – № 1. – С. 64-65. 4. Губарев Г.Г., Кононов В.В. Трехкритериальная оптимизация импульсных источников питания // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. – № 6. – С. 66-73. 5. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической изоляции. Межгосударственный стандарт. – Минск: Издательство стандартов, 1998. – 31 с. 6. ГОСТ Р 50649-94 Устойчивость к им-

пульсному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 20 с. 7. ГОСТ Р 51317.412-99 Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 28 с. 8. *Кравченко В.И.* Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.

*Поступила в редколлегию 10.10.2007.*

УДК 621.319.4

***В.В.ПУДАКОВ***, докт. техн. наук;

***Ю.В.КРАВЧЕНКО; В.О.ЛЫСЕНКО***; НТУ «ХПИ»

### **«КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ» У СКОШЕННОГО КРАЯ ОБКЛАДКИ КОНДЕНСАТОРА**

Проведено розрахунок напруженості електричного поля на поверхні скошеного краю обкладки конденсатора з урахуванням діелектричного прошарку, що прилягає до краю обкладки в залежності від співвідношення геометричних розмірів і діелектричних проникностей елементів конструкції.

Calculation of electric field intensity on a surface of the capacitor facing oblique edge in view of the dielectric layer adjoining to a facing edge depending on a parity of the geometrical sizes and capacitivities of design elements is made.

**Актуальность.** Одним из методов повышения удельных характеристик импульсных высоковольтных конденсаторов является применение комбинированной изоляции [1,2]. В последнее время получены положительные результаты и при применении чисто пленочной изоляции, пропитанной изоляционным маслом [3]. Результаты по определению мест пробоя в том и другом случае показывают, что отказы происходят преимущественно на краях обкладок. Основной причиной отказов является резко выраженный «краевой эффект» [4]. Исследованию электрических полей на краях обкладок посвящено много работ [5-9], преимущественно для однородного диэлектрика. Известны работы [8, 9] по определению коэффициента усиления электрического поля у края обкладки с прямоугольной формой торца для комбинированной изоляции в присутствии масляной прослойки, примыкающей к торцу. В работе [10] показано существенное влияние геометрии расположения слоистой изоляции у края закругленного электрода на величину напряженности электрического поля и проведен выбор оптимальной конструкции. В то же время форма торца края обкладки как показали экспериментальные исследования [11]

имеет скошенную форму с углом скоса, изменяющимся вдоль периметра обкладки в диапазоне от  $30^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ . В работе [11] приведены результаты распределения поля у скошенного торца в зависимости от угла скоса в однородном диэлектрике. Показано, что наилучшие удельные характеристики при угле скоса обкладки  $30-40^{\circ}$  достигается при отношении толщины фольги к толщине диэлектрика  $0,12-0,16$ . В то же время результаты по определению электрического поля у края скошенного электрода в присутствии комбинированного диэлектрика отсутствуют.

Поэтому, определение характера электрического поля у края скошенного электрода с учетом диэлектрических проницаемостей применяемых диэлектриков является актуальной задачей.

**Цель работы.** Определение характера распределения электрического поля у края скошенного торца обкладки конденсатора и разработка рекомендаций по выбору диэлектрических проницаемостей масляной прослойки, прилегающей к торцу обкладки, и твердого диэлектрика, толщин обкладки и изоляции, обеспечивающих лучшее распределение электрического поля.

**Постановка задачи.** Упрощенная модель края обкладки представлена на рис. 1, где электрод со скошенным торцом и толщиной  $h$ , находящийся под потенциалом  $U_0$  расположен между двумя бесконечными электродами с нулевым потенциалом. К торцу обкладки примыкает прослойка диэлектрика толщиной  $h$  с  $\varepsilon_1$ , а между обкладками, расстояние между которыми  $d$  (в данной задаче принималось, что  $d = 100$  мкм), расположена изоляция с  $\varepsilon_2$ . Характерный диапазон изменения геометрических размеров составил:  $h/d = 0,05 \div 0,5$ ;  $\alpha = 15 \div 90^{\circ}$ ;  $b_2 = b_3 = 3d$ ;  $b_1 = b_4 = 3d + h/\operatorname{tg} \alpha$ . Диапазон изменения относительных диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,1 \div 10$ .

Требуется определить напряженность электрического поля на сходящихся под углом  $\alpha$  торцевых поверхностях края обкладки на расстоянии  $r \leq 0,1 d$  от вершины угла скоса.

**Методика решения.** Для определения напряженности электрического поля в электростатическом приближении использованы следующие граничные условия:  $U = U_0$  – потенциал обкладки со скошенным торцом,  $U = 0$  – потенциал двух бесконечных электродов, между которыми находится обкладка; условие равенства нормальных составляющих вектора электростатической индукции на границе раздела  $i$ -го и  $k$ -го диэлектриков:

$$\varepsilon_i E_{iN} = \varepsilon_k E_{kN}, \quad (1)$$

где  $E_{iN}$  и  $E_{kN}$  соответственно нормальные составляющие вектора напряженности электрического поля, действующие соответственно в  $i$ -й и  $k$ -й диэлектрических средах.

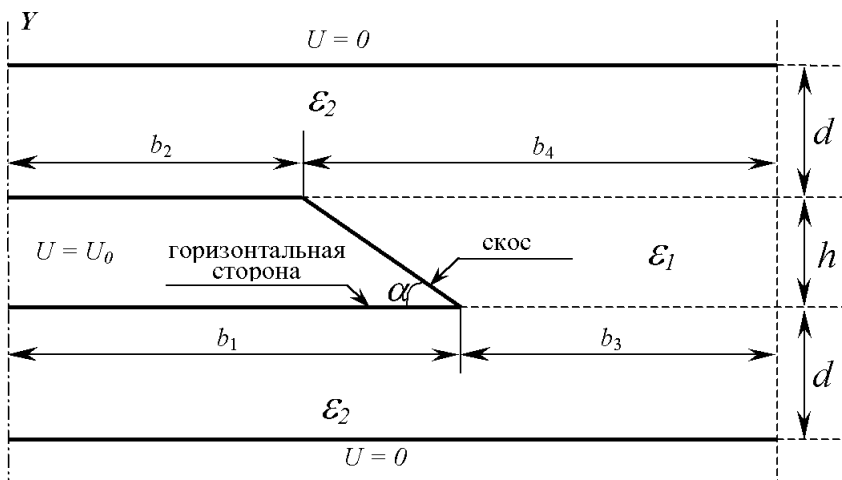


Рисунок 1 – Упрощенная модель края обкладки

Задача решена методом интегральных уравнений [8] с использованием уравнений Фредгольма первого рода (для потенциалов) и второго рода (для условия равенства нормальных составляющих вектора электростатической индукции на поверхностях раздела сред):

$$\sum_{i=1}^m \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \int_{S_{Qi}} \sigma \cdot \ln \frac{1}{r_{QM}} dS = U_0(M), \quad (2)$$

$$\frac{\sigma(M)}{2\epsilon_0} + \lambda \cdot \sum_{i=1}^m \int_{S_{Qi}} \sigma \cdot \frac{\cos(\vec{r}_{QM}, \vec{n})}{r} dS = 0, \quad (3)$$

где  $\lambda = \frac{\epsilon_k - \epsilon_i}{\epsilon_k + \epsilon_i}$ ,

$\sigma$  – поверхностная плотность электрических зарядов на  $i$ -х поверхностях электродов и границ раздела диэлектрических сред (всего характерных границ –  $m$ );

$r_{QM}$  – расстояние от точки  $Q$  расположения поверхностного заряда  $\sigma$  до точки наблюдения  $M$ ;

$\vec{n}$  – вектор нормали к поверхности раздела сред, направленный из  $i$ -той среды в  $k$ -тую;

$S_{Qi}$  – поверхность  $i$ -той границы.

Система интегральных уравнений (2) и (3) была сведена к системе линейных интегральных уравнений в предположении, что каждая из характерных границ имеет бесконечную длину в направлении, перпендикулярном



плоскости рис. 1 рассматриваемой задачи, а в направлении, совпадающим с плоскостью рисунка, разбита на отрезки равной длины, причем на каждом из отрезков плотность заряда предполагалась постоянной. При этом коэффициенты матрицы системы линейных алгебраических уравнений в интегральной форме от ядер Фредгольма 1 и 2-го родов при неизвестных плотностях зарядов определялись численным интегрированием методом прямоугольников с заданной точностью.

Для реализации компьютерной программы использованы подпрограммы, приведенные в пособии [8]. Результаты расчета приведены в виде значений напряженности электрического поля на поверхности электродов и нормальной составляющей напряженности электрического поля на поверхности границ раздела диэлектрических сред.

Учет симметрии относительно вертикальной плоскости  $Y$  позволил сократить число неизвестных в 2 раза.

**Результаты расчетов.** Общее число узлов разбиения границ расчетной области составляло от 200 до 1200. Достаточная для расчетов точность вычислений (менее 5%) достигается уже при числе разбиения границ области не менее 400. Следует заметить, что на первых 2-3 отрезках области разбиения от вершин углов в ряде случаев наблюдается более высокое значение погрешности, которое обусловлено выбором кусочно-постоянной плотности зарядов в области резконеоднородного поля. Поэтому производилась коррекция плотности зарядов в этой области с помощью степенных функций и с учетом полученных результатов в дальнейшей области.

На рис. 2,3 выборочно представлены зависимости  $E^* = E_r/E_0$  (где  $E_0 = U/d$ ) от расстояния  $r$  до вершины острого угла и от вершины смежного тупого угла при различных  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  для  $h/d = 0,2$  и остром угле скоса  $\alpha = 30^\circ$  (рис. 2 – на скосе (первое и третье значение напряженности  $E^*$  при  $r \leq 0,65$  на графиках не представлены), рис. 3 – на горизонтальной части).

Анализ этих зависимостей, а также всех результатов расчета позволяет сделать ряд выводов.

Напряженность электрического поля у острого угла скоса в большинстве случаев превышает напряженность электрического поля у тупого угла скоса (рис. 2). Однако, при  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 \leq 0,4$  (реально это соответствует появлению газовой прослойки у края обкладки) напряженность электрического поля у вершины тупого угла на расстоянии  $r \geq (1-2)$  мкм может превышать напряженность электрического поля у острого края обкладки. Учитывая, что характерный размер образующихся газовых пузырьков в результате действия критических частичных разрядов составляет единицы микрон, то возможны более интенсивные процессы разрушения именно у вершины тупого угла для конденсаторов с высокой удельной энергией. Это возможно и по той причине, что с увеличением размеров пузырьков газа их электрическая прочность

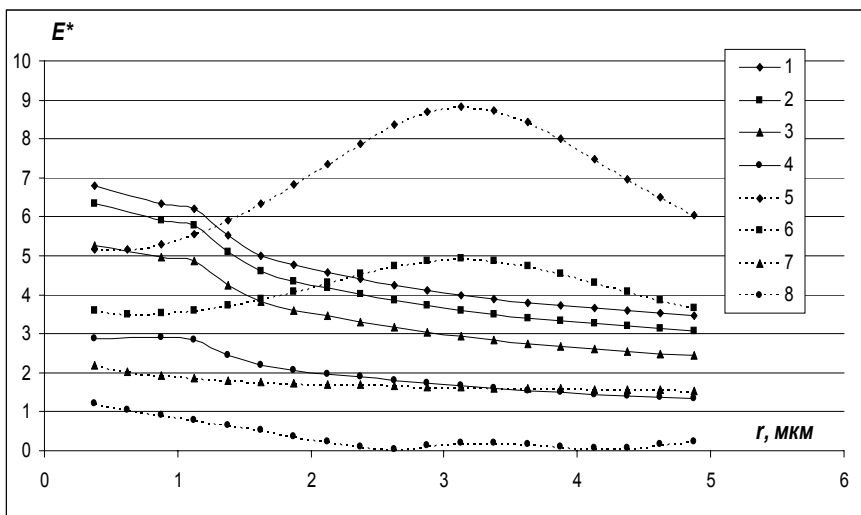


Рисунок 2 – Зависимости  $E^* = f(r)$  на скосе обкладки для различных соотношений  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  для острого,  $\alpha = 30^\circ$ , (кривые 1-4) и смежного с ним тупого угла (кривые 5-8): кривые 1,5 –  $E^* = f(r)$  для  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,2$ ; кривые 2,6 –  $E^* = f(r)$  для  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,4$ ; кривые 3,7 –  $E^* = f(r)$  для  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1$ ; кривые 4,8 –  $E^* = f(r)$  для  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 5$ .

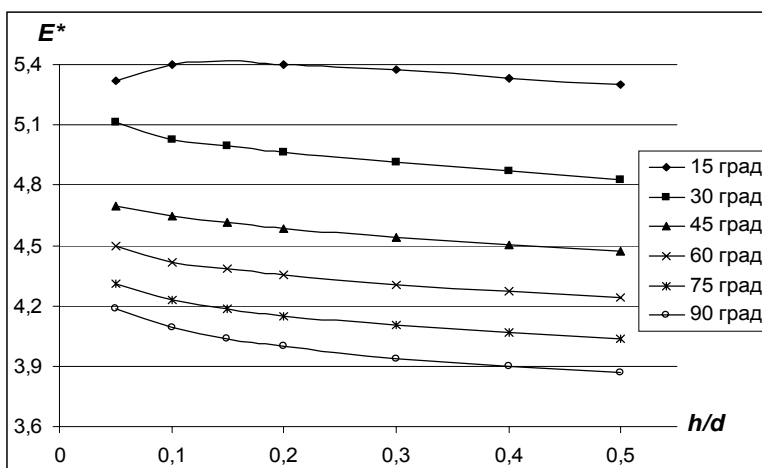
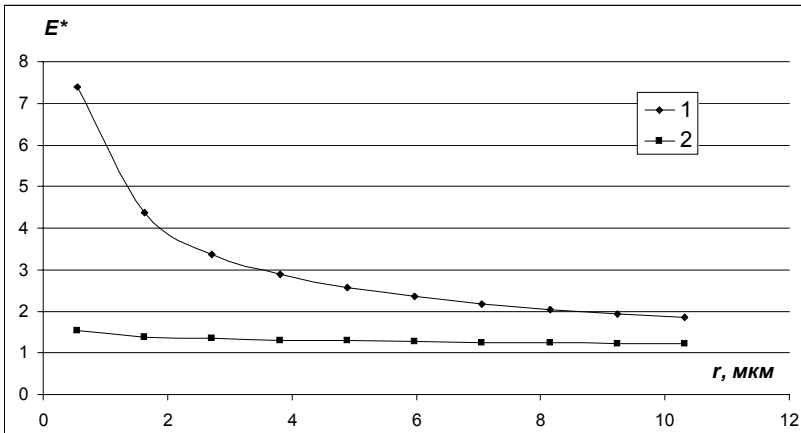


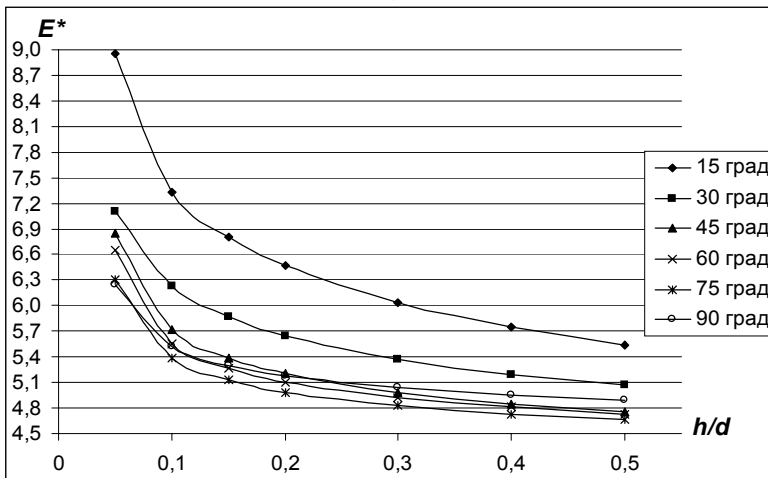
Рисунок 3 – Зависимости  $E^* = f(r)$  на горизонтальной стороне обкладки при  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,2$  для острого,  $\alpha = 30^\circ$ , (крив. 1) и смежного с ним тупого угла (крив. 2)

уменьшается. Согласно теории «напряженного объема» [12] при разрушении изоляции вблизи поверхности электродов с кромками, образующих тупые углы, показатель степени в формуле «жизни» (зависимости ресурса от на-

пряженности электрического поля) принимает большие значения (10-16), что соответствует экспериментальным данным разрушения конденсаторной изоляции при напряженностях электрического поля, значительно превышающих рабочие. В отличие от скошенной грани напряженность поля на горизонтальной части обкладки вблизи острого угла всегда больше напряженности электрического поля на горизонтальной части у тупого угла (рис. 3). С увеличением отношения  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  напряженность электрического поля в равноудаленных от вершин углов точках монотонно уменьшается.



а)



б)

Рисунок 4 – Зависимость  $E^* = f(h/d)$  для различных углов скоса:  
а) на горизонтальной стороне обкладки; б) на скосе обкладки

Увеличение толщины обкладки (рис. 4) приводит к ослаблению электрического поля на горизонтальной части и на скосе обкладки у вершин углов края обкладки. При этом, чем больше угол скоса, тем меньше напряженность электрического поля, за исключением случая, когда  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,2$  (рис. 4, б). В этом случае напряженность электрического поля на скосе при угле  $90^\circ$  может превышать напряженность электрического поля при угле  $45^\circ$ .

Полученные результаты при соответствующей доработке могут быть использованы для расчета оптимального отношения толщины обкладки к толщине диэлектрика при различных соотношениях диэлектрических проницаемостей для достижения максимальной удельной энергии с учетом объема, занимаемого обкладками. Представляет интерес и расчет электрического поля в подобной конструкции с различными диэлектрическими слоями между обкладками.

### **Выводы.**

1. Численным методом вторичных источников определена напряженность электрического поля на поверхности скошенного края обкладки конденсатора с учетом диэлектрической прослойки, прилегающей к краю обкладки в зависимости от соотношения геометрических размеров (толщины обкладки и толщины диэлектрика, угла скоса) и диэлектрических проницаемостей.

2. Увеличение толщины обкладки, угла скоса и диэлектрической проницаемости масляной прослойки в большинстве случаев приводят к улучшению распределения электрического поля у края обкладки.

3. Показано, что при наличии газовых включений, когда  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 \leq 0,2$ , возможно развитие более интенсивных ионизационных процессов у кромок обкладки с тупыми углами, где напряженность электрического поля больше.

4. При больших толщинах обкладки и  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 \leq 0,2$  напряженность электрического поля на скосе при угле  $90^\circ$  может превышать напряженность электрического поля при угле  $45^\circ$ .

5. Полученные результаты могут быть использованы при выборе структуры конденсаторного диэлектрика и оптимизации конструкции конденсатора.

**Список литературы:** 1. Богатенков И.М., Бочаров Ю.Н., Гумерова Н.И., Иманов Г.М. и др. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / Под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2003. – 608 с. 2. Рудаков В.В. Выбор рабочей напряженности электрического поля масляных бумажно-полипропиленовых конденсаторов // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 37. – С. 76-80. 3. 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. 4. Рудаков В.В. Распределение электрического поля у края обкладки с комбинированным диэлектриком // Вестник ХГПУ. – 1998. –

Вып. 25. – С. 12-16. **5. Кирьяков А.М., Попова В.А., Шнейерсон Г.А.** Расчет напряженности поля вблизи кромки электрода в неоднородной среде // Изв. АН СССР Сер. Энергетика и транспорт. – 1978. – № 5. – С. 108-114. **6. Титов М.Н.** Исследование методом конформных отображений электрического поля конденсатора с неоднородным диэлектриком // Электричество. – 1982. – № 9. – С. 57-59. **7. Колечицкий Е.С., Плис А.И., Шульгин В.К.** Регулирование электрических полей в бумажно-масляной изоляции с конденсаторными обкладками. Ч. 2 // Электричество. – 1996. – № 3. – С. 23-28. **8. Набока Б.Г.** Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике. – К.: ИСИО, 1995. – 120 с. **9. Рудаков В.В., Конотоп В.В., Пенцов В.М.** Краевой эффект в конструкции конденсаторного типа с неоднородным диэлектриком // Электропромышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1978. – Вып. 6. – С. 11-12. **10. Рудаков В.В., Покладов О.В., Кравченко Ю.В.** Расчет электрического поля системы плоских электродов с твердым диэлектриком // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – № 4. – С. 72-75. **11. Рудаков В.В.** Оптимизация конструкции конденсатора // Техническая электродинамика. – 1996. – № 5. – С. 6-9. **12. Бржезицкий В.О., Сакова А.В., Рудаков В.В. та ін.** Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О.Бржезицького та В.М.Михайлова. – Харків: НТУ «ХП» – Торнадо, 2005. – 930 с.  
*Поступила в редакцію 27.11.2007*

УДК 622.24.537.528

**О.Н.СИЗОНЕНКО**, докт.техн.наук; **Э.И.ТАФТАЙ**;  
**Р.И.МАЛАЯ**; **Р.П.КОЛМОГорова**;

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СПОСОБОВ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АГРЕГАТИВНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКОУСТОЙЧИВЫХ ЭМУЛЬСИЙ**

Наведено результати експериментальних досліджень впливу способів електророзрядної дії на агрегативну стійкість високостійких водонафтових емульсій. Встановлено закономірності зв'язку параметрів дії зі зміною агрегативної стійкості емульсій.

The results of experimental researches of influence of electric discharge methods on the demulsification of gravitational stability of highly stable water-oil emulsion are given. Conformities to the law of influence parameter association with the change of gravitational stability demulsification of emulsions are found.

**Постановка задачи.** Возрастающие требования к качеству материалов и значительные трудности промышленной реализации воздействия на высокоустойчивые эмульсии (сложность аппаратурного оформления, недолговечность отдельных узлов и пр.) наряду с расширением областей применения таких сред, требуют поиска новых научных решений в разработке методов управления их физико-химическими свойствами.

Особую актуальность представляют проблемы, связанные с утилизацией нефтесодержащих отходов. Эти проблемы вызваны широким применением высокоэффективных химических и физико-химических технологий увеличения нефтеотдачи пластов. Такие технологии основываются на использовании поверхностно-активных веществ, которые способствуют формированию мелкодисперсных высокоустойчивых эмульсий, осложняющих процессы подготовки нефти. Высокоустойчивые нефтяные эмульсии, загрязненные механическими примесями, при отделении воды от нефти на установках подготовки нефти концентрируются в промежуточных слоях и выводятся в специальные амбары-накопители. Такие мелкодисперсные высокоустойчивые эмульсии «ловущечные нефти» не поддаются расслоению даже в современных электродегидраторах.

Проведенный мониторинг разработок ведущих фирм США, Англии, Японии, России и др. показал, что в настоящее время наиболее широко используются такие способы воздействия на высокоустойчивые эмульсии как седиментационный, химический, центрифугирование и электрические. Однако все они обладают рядом недостатков, которые в конечном итоге не позволяют деземальгировать высокоустойчивые эмульсии с высокой соленостью дисперсной фазы. Поэтому можно констатировать, что нет достаточно эффективных методов воздействия на высокоустойчивые эмульсии, позволяющих без изменения исходного химического состава среды снижать вязкость и ослаблять взаимодействие между структурообразующими компонентами, увеличивать степень дисперсности твердых включений, ослаблять коллоидную систему и, в конечном итоге, регулировать их свойства.

Работы [1-4] показали принципиальную возможность изменения физико-химических свойств различных дисперсных систем при электроразрядном воздействии. Эти работы указывают на перспективность использования импульсного электроразрядного воздействия как для разрушения бронирующих оболочек глобул воды и ускорения процессов коагуляции водной фазы и ослабления коллоидной системы высокоустойчивых эмульсий, так и для ускорения процессов гомогенизации эмульсий и создания высокоустойчивых систем.

**Цель настоящей работы** – исследовать влияние способов электроразрядного воздействия на агрегативную устойчивость высокоустойчивых эмульсий.

**Методика эксперимента.** Исследования влияния способов электроразрядного воздействия на агрегативную устойчивость высокоустойчивых эмульсий проводились на экспериментальном стенде, представленном на рис. 1.

Для исследований были использованы способы электроразрядного воздействия, которые позволяют формировать между электродами и приклады-

вать к эмульсии импульсы напряжения - униполярные, знакопеременные, регулируемые по длительности и скорости ввода энергии, с разными амплитудными значениями напряженности поля и частотой следования импульсов, с одновременным наложением постоянных и импульсных полей. Перечисленные способы электроразрядного воздействия с соответствующими вариациями характеристик полей были реализованы с помощью различных схем.

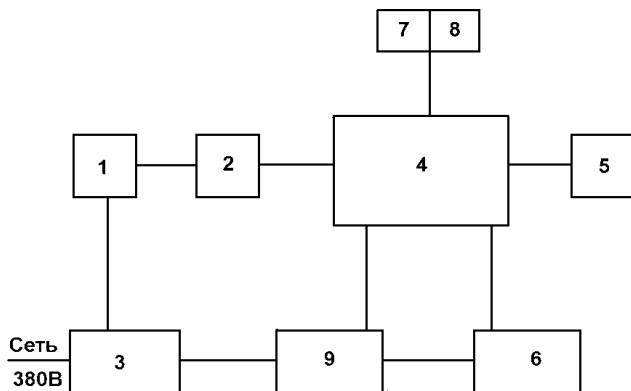


Рисунок 1 – Блок-схема экспериментального стенда:

1 – автотрансформатор РТТ-25/0,5; 2 – высоковольтный трансформатор-выпрямитель ВТМ-20/50-72; 3 – щит управления; 4 – электроразрядная схема; 5 – рабочая камера; 6 – измерительный комплекс; 7, 8 – электроблокировки; 9 – пульт управления

Способ электроразрядного воздействия с высокой скоростью ввода энергии и длительностью фронта импульса воздействия примерно  $1 \cdot 10^{-6}$  с, реализовывался электрической схемой, приведенной на рис. 2. Этой схемой, имеющей небольшую индуктивность в разрядной цепи (примерно 6 мкГн), обеспечивались амплитудные значения напряженности поля от  $0,3 \cdot 10^6$  до  $1,2 \cdot 10^6$  В/м и токи через эмульсию от единиц до сотен ампер.

Способ электроразрядного воздействия на эмульсии чередующимися импульсами реализован с помощью электрической схемы (№ 2), приведенной на рис. 3. В этом способе в начале импульсы формировались в течение времени заряда накопительной емкости, их длительность изменялась от долей до единиц секунды при значениях тока менее одного ампера, а напряженности электрического поля были менее предельных ( $E_{пр}$ ). А после того, как накопительная емкость заряжалась, происходил процесс ее разряда и на эмульсию воздействовали импульсы противоположной полярности с высокой скоростью ввода энергии. Предельное значение напряженности электрического поля ( $E_{пр}$ ) для каждой эмульсии различно и соответствует напряженности электрического поля, при котором дальнейшее плавное повышение

напряжения на электродах практически не приводит к повышению напряженности поля в эмульсии из-за значительного снижения ее активного сопротивления. Схема (№ 2), приведенная на рис. 3 отличается от схемы (№ 1), приведенной на рис. 2 взаимной сменой расположения воздушного разрядника и накопительной емкости.

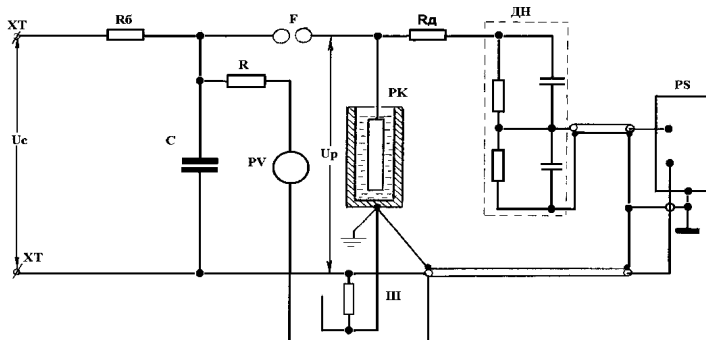


Рисунок 2 – Электрическая схема № 1:

$U_c$  – напряжение источника питания;  $R_6$  – балластный резистор (от 0,109 до 200 МОм);  $F$  – разрядник;  $C$  – рабочая емкость (0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4 ; 0,8 мкФ);  $U_p$  – рабочее напряжение(30,5; 22,5; 15; 12; 10; 7,5 кВ );  $R$  – токоограничивающий резистор;  $PV$  – киловольтметр;  $Ш$  – коаксиальный шунт;  $ДН$  – делитель напряжения;  $PK$  – рабочая камера (технологический узел);  $PS$  – осциллограф;  $R_d$  – демпфирующий резистор

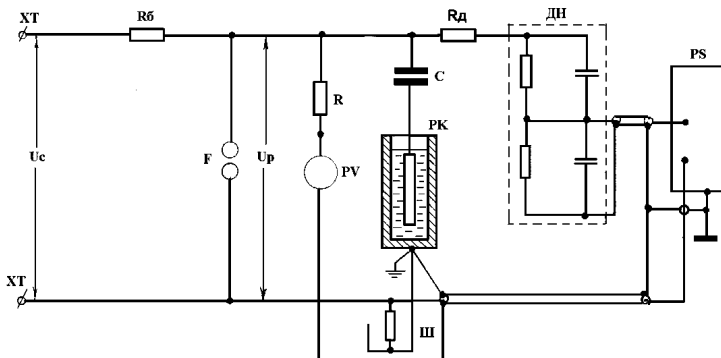


Рисунок 3 – Электрическая схема № 2:

$U_c$  – напряжение источника питания;  $R_6$  – балластный резистор;  $C$  – рабочая емкость (0,05; 0,6 мкФ);  $U_p$  – рабочее напряжение(30,5; 22,5 кВ);  $R$  – токоограничивающий резистор;  $PV$  – киловольтметр;  $Ш$  – коаксиальный шунт;  $ДН$  – делитель напряжения;  $PK$  – рабочая камера (технологический узел);  $PS$  – осциллограф;  $F$  – разрядник;  $R_d$  – демпфирующий резистор



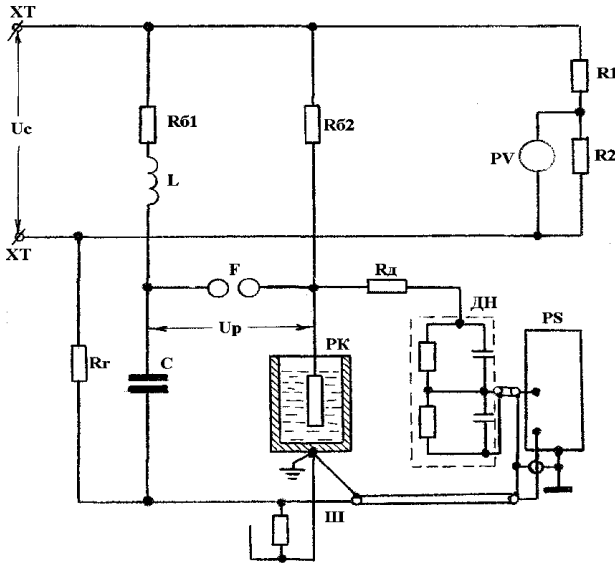


Рисунок 4 – Электрическая схема № 3:

$U_c$  – напряжение источника питания;  $U_p$  – рабочее напряжение (30,5; 22,5 кВ);  $R_{61}$  – набор балластных резисторов;  $R_{62}$  – набор балластных резисторов в цепи подпитки;  $R_1, R_2$  – резисторы делителя напряжения;  $R_d$  – демпфирующий резистор;  $R_r$  – развязывающий резистор;  $PV$  – киловольтметр;  $C$  – рабочая емкость (0,05; 0,6 мкФ);  $R$  – токоограничивающий резистор;  $\Pi$  – коаксиальный шунт;  $ДН$  – делитель напряжения;  $PK$  – рабочая камера (технологический узел);  $PS$  – осциллограф;  $L$  – индуктивность 680 мкГн;  $F$  – разрядник

Способ электроразрядного воздействия при непрерывном воздействии на эмульсию постоянным электрическим полем (менее  $E_{пр}$ ), при токах через нее со значениями от десятков до сотен миллиампер с наложением импульсного воздействия с высокой скоростью ввода энергии был реализован электрической схемой № 3, приведенной на рис. 4. Отличие схемы № 3 (см. рис. 4) от схемы № 1 (см. рис. 2) в том, что в схему введен балластный резистор, через который осуществляется подача постоянного напряжения от высоковольтного источника на разрядную камеру.

Способ электроразрядного воздействия на эмульсию импульсами, для которых скорость нарастания фронта импульса изменялось от единиц до десятков микросекунд, длительность импульса составляла десятки и сотни микросекунд, амплитудные значения напряженности поля задавались от  $1,2 \cdot 10^6$  до  $0,3 \cdot 10^6$  В/м, амплитудные значения тока составляли доли килоампера, а форма импульса изменялась от аperiodической (униполярной) до колебательной, осуществлялся с помощью индуктивного токоограничения

(электрическая схема № 4, приведенная на рис. 5). Отличием данной электрической схемы от схемы № 1, приведенной на рис. 2 является введение в разрядную цепь сменной индуктивности.

Для исследований были выбраны три вида нефтей (табл. 1), которые, согласно [5] классифицируются как нефти:

- со средней плотностью ( $840 \text{ кг/м}^3 < \rho \leq 880 \text{ кг/м}^3$ );
- тяжелые с высокой плотностью ( $880 \text{ кг/м}^3 < \rho \leq 920 \text{ кг/м}^3$ );
- очень тяжелые, с весьма высокой плотностью ( $\rho > 920 \text{ кг/м}^3$ ).

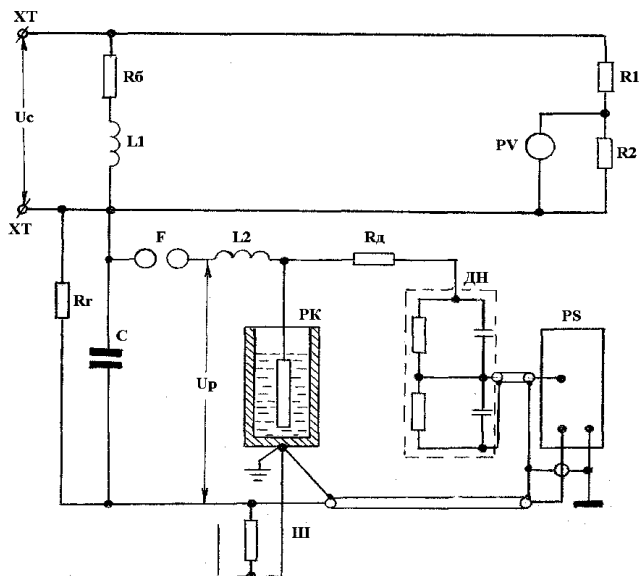


Рис. 5 - Электрическая схема № 4:

$U_c$  – напряжение источника питания;  $U_p$  – рабочее напряжение (30,5; 22,5 кВ);  $R_6$  – набор балластных резисторов;  $R_1, R_2$  – резисторы делителя напряжения;  $R_d$  – демпфирующий резистор;  $R_r$  – развязывающий резистор;  $PV$  – киловольтметр;  $C$  – рабочая емкость (0,05; 0,6 мкФ);  $R$  – токоограничивающий резистор;  $\text{Ш}$  – коаксиальный шунт;  $\text{ДН}$  – делитель напряжения;  $\text{ПК}$  – рабочая камера (технологический узел);  $\text{PS}$  – осциллограф;  $L_1$  – индуктивность в цепи заряда рабочей емкости;  $L_2$  – индуктивность в цепи разряда рабочей емкости ( $L_2' = 0,63 \text{ мГн}$ ,  $L_2'' = 10 \text{ мГн}$ ,  $L_2''' = 94 \text{ мГн}$ );  $F$  – разрядник

На основе нефтей, представленных в таблице 1, готовились высокоустойчивые эмульсии, характеристики которых приведены в таблице 2. Эти эмульсии являются эмульсиями обратного типа, величина глобул полярной жидкости (воды в нефти) близка к размеру коллоидных частиц и составляет около 10 мкм.

Таблица 1 – Физико-химические характеристики нефтей

№ нефти	ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕФТИ			
	Обводненность, $O$ , %	Плотность при $50^{\circ}\text{C}$ , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	Кинематическая вязкость при $60^{\circ}\text{C}$ , $10^{-6}$ , $\text{м}^2/\text{с}$	Соле-содержание, %
1 – нефть Павловского месторождения, Россия, Пермская обл.	безводная	957	38,80	–
2 – нефть Малодевицкого месторождения, Украина, Черниговская обл.	24	876	7,18	35
3 – нефть Каражанбасского месторождения, Казахстан	безводная	925	22,50	–

Таблица 2 – Физико-химические характеристики эмульсий

Характеристики	Эмульсии		
	№ 1	№ 2	№ 3
Солесодержание, %	15	30	15
Обводненность, %	25	25,6	25
Кинематическая вязкость при температуре $60^{\circ}\text{C}$ , $\text{мм}^2/\text{с}$	40,49	7,18	26,07
Удельная проводимость дисперсной фазы, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$	3,21	5,208	3,21
Плотность эмульсии при температуре $50^{\circ}\text{C}$ , $\text{г}/\text{см}^3$	0,995	0,934	0,971

**Основная часть.** Первый способ электроразрядного воздействия, обеспечивает высокую скорость ввода энергии и реализуется при подаче высокого напряжения на зажимы ХТ (см. рис. 2) через балластный резистор. При этом происходит накопление заряда в рабочей емкости и рост напряжения на его обкладках. Воздушный искровой разрядник настроен на рабочее напряжение и при достижении этого напряжения на емкости происходит пробой разрядника и это напряжение прикладывается к электродам рабочей камеры. Данный способ воздействия на агрегативную устойчивость нефтяных эмульсий был исследован на эмульсиях № 1 и № 3 (см. табл. 2). Суммарное количество энергии приложенной к эмульсиям варьировалось от 2,5 до 90 кДж, при частоте следования импульсов воздействия от 1 до 3 импульсов в секунду, рабочее напряжение составляло 30,5 кВ, а емкость  $C = 0,05$  мкФ. Посте-

пенно наращивая количество импульсов, воздействующих на эмульсию, от нескольких сотен до нескольких тысяч контролировалась ее остаточная обводненность методом Дина и Старка [6, 7]. Так при числе импульсов  $n = 4500$  и суммарной энергии  $90$  кДж – остаточная обводненность эмульсии №1 составила  $O_1 = 6,5$  %.

А при тех же параметрах импульсного воздействия на эмульсию № 3, частичное обезвоживание произошло уже при  $220$  импульсах и суммарной энергии  $4,95$  кДж, остаточная обводненность при этом составила  $O_1 = 12,2$  %. Это можно объяснить различиями физико-химических свойств эмульсий № 1 и № 3, что приводит к значительным отличиям в вольтамперных зависимостях данных эмульсий, представленных на рисунке 6. Напряжение, при котором в эмульсии № 3 образуются цепочки из дисперсной фазы, обуславливающие возрастание тока через эмульсию, значительно ниже, чем для эмульсии № 1, поэтому разложение эмульсии № 3 происходит при меньших затратах энергии.

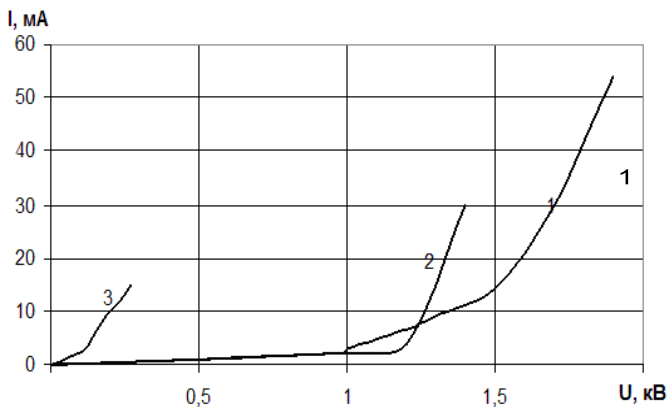


Рис. 6 – Зависимость тока через эмульсию от напряжения на межэлектродном промежутке: 1 – эмульсия № 1; 2 – эмульсия № 2; 3 – эмульсия № 3

Как показали результаты экспериментов, электрические поля с напряженностью, превышающей  $E_{пр}$  в импульсном режиме, вызывают резкое увеличение коагуляции и приводят к изменению формы разрядного напряжения. Это хорошо наблюдается при осциллографировании формы кривой разряда накопительной емкости на эмульсию (см. рис. 7). Буквально начиная с первых импульсов воздействия видно уменьшение постоянной времени разряда накопительной емкости на все исследуемые типы эмульсий. Это указывает на снижение электрического сопротивления эмульсии под воздействием импульсов высокого напряжения.

При этом ток через эмульсию увеличивается, что связано с возрастани-

ем количества и длины цепочек из глобул высокопроводящей дисперсной фазы и уменьшением сопротивления. Такое снижение сопротивления характерно для исследуемых эмульсий до тех пор, пока количество и длина цепочек из дисперсной фазы не замкнут межэлектродный промежуток в эмульсии. Возникновение проводящих мостиков при обработке эмульсии соответствует времени, когда кривая разряда емкости на эмульсию при осциллографировании начинает переходить в область отрицательных значений напряжений. С этого момента при дальнейшей обработке начинает проявляться колебательный характер разряда. Как отмечалось выше, это приводит к непроизводительной потере энергии накопителя и одновременно с коалесценцией глобул воды может происходить и их разрушение (диспергирование). Следовательно, с этого момента необходимо снижать напряженность электрического поля до такого уровня, при котором бы на осциллограммах регистрировались аperiodические (униполярные) формы кривой разряда накопителя.

Параметры и режимы способа электроразрядного воздействия на эмульсии чередующимися импульсами, реализуемого при помощи электрической схемы №2 (рис. 3), представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Параметры воздействия и режимы обработки эмульсии № 1 при использовании способа по электрической схеме № 2

№ опыта	C, мкФ	U <sub>p</sub> , кВ	n, разрядов	O <sub>1</sub> , %	f, Гц	W <sub>Σ</sub> , кДж
1	0,05	30,0	100	25	2	2,25
2	0,05	30,0	1000	25	2	22,5
3	0,05	30,0	2000	25	2	45
4	0,05	30,0	4000	9	2	90
5	0,4	15,0	1000	6,2	20	45
6	0,4	15,0	2000	5,0	20	90
7	0,4	15,0	2900	3,0	20	130,5

Из табл. 3 видно, что электроразрядное воздействие на эмульсию № 1 чередующимися импульсами, формируемыми в течение времени заряда накопительной емкости при среднедействующем значении напряженности электрического поля  $0,8 \cdot 10^5$  В/м и разрядными импульсами с временем ввода энергии порядка  $10^{-6}$  с противоположной полярности при высоких амплитудных значениях напряженностей поля ( $\sim 1,2 \cdot 10^6$  В/м), как и в предыдущем способе и при той же суммарной энергии 90 кДж, не оказало влияния на агрегативную устойчивость эмульсии. При снижении в 2 раза амплитудных значений напряженностей электрического поля и увеличении более чем в 2 раза длительности импульса при значительно меньшем количестве разрядов,

но том же значении суммарной энергии 90 кДж произошло усиление процессов коагуляции водной фазы и как следствие, снижение остаточной обводненности до 5 %.

Сравнивая результаты двух электроразрядных способов воздействия на эмульсии (электрические схемы № 1 и № 2) видно, что при 4000 разрядов существенных различий в деэмульгировании высокоустойчивых эмульсий нет.

Результаты исследования способа электроразрядного воздействия, путем приложения к эмульсии постоянного электрического поля при токах через эмульсию от десятков до сотен миллиампер с наложением на него импульсного воздействия с высокой скоростью ввода энергии приведены для эмульсии из нефти № 1 в табл. 4. В отличие от предыдущего способа, реализованного электрической схемой № 2 (см. рис. 3), в этом способе к межэлектродному промежутку постоянно прикладывалось постоянное напряжение 1,8 кВ от того же источника питания через токоограничивающий резистор (см. рис. 4).

Таблица 4 – Параметры электроразрядного способа воздействия и режимы обработки эмульсий № 1 при использовании электрической схемы №3

№ опыта	C, мкФ	U <sub>p</sub> , кВ	n, разрядов	O <sub>1</sub> , %	f, Гц	W <sub>Σ</sub> , кДж
1	0,05	30	1516	8,5	3	34,11
2	0,05	30	2000	6,6	8,5	45

Одновременно на этот же промежуток подавались импульсы напряжения при разряде емкости, которая заряжалась от ВТМ 20-50. При этом ток и напряжение от источника постоянного напряжения и от разряда емкости складывались, так как были одной полярности. Индуктивность разрядной цепи при разрядах составляла примерно 6 мкГн.

Эти эксперименты показали, что одновременное приложение к высокоустойчивой эмульсии в процессе обработки постоянного напряжения не высокой напряженности ( $E = 0,7 \cdot 10^5$  В/м) и импульсного напряжения высокой напряженности ( $E = 1,2 \cdot 10^6$  В/м) привело к положительному результату и по сравнению с предыдущим способом (см. табл. 3), при одних и тех же параметрах разрядной цепи (C, U<sub>p</sub>, n) обеспечило большую эффективность, учитывая значительное снижение затраченной электрической энергии.

Исследования способа электроразрядного воздействия на эмульсию импульсами (см. рис. 4), для которых скорость нарастания фронта импульса изменялось от единиц до десятков микросекунд, длительность импульса составляла десятки и сотни микросекунд, амплитудные значения напряженности поля задавались от  $1,2 \cdot 10^6$  до  $0,3 \cdot 10^6$  В/м, амплитудные значения тока составляли доли килоампера, а форма импульса изменялась от аperiodиче-

ской (униполярной) до колебательной выполнялись при различных индуктивностях.

Индуктивность  $L_2$  изготавливалась 3-х номиналов –  $L_2' = 0,63$  мГн,  $L_2'' = 10$  мГн,  $L_2''' = 94$  мГн. Результаты обработки эмульсии из нефти № 2 по этому способу, реализуемому схемой № 4 приведены в табл. 5.

Из таблицы видно, что с увеличением индуктивности в разрядной цепи и ростом количества вложенной в межэлектродный промежуток энергии остаточная обводненность снижается. Зависимость остаточной обводненности от количества вложенной энергии представлены на рис. 8 (опыты 4, 5, 6 из таблицы 5). Как видно из графика существует прямая зависимость остаточной обводненности от количества вложенной в эмульсию энергии.

Таблица 5 – Параметры электрической схемы № 4 и режимы обработки эмульсии № 2

№ опыта	C, мкФ	U <sub>p</sub> , кВ	n, разрядов	L, мГн	f, Гц	O <sub>1</sub> , %	W <sub>Σ</sub> , кДж
1	0,2	15	4000	0,63	0,5	10,5	90
2	0,2	15	4000	94	0,5	9,5	90
3	0,2	15	6000	10	4	4,5	135
4	0,8	7,5	4350	10	4	8,5	97,8
5	0,8	7,5	6000	10	4	4,0	135
6	0,8	7,5	8000	10	4	3,5	180

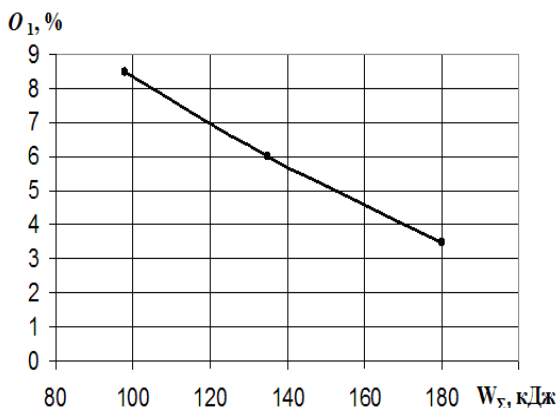


Рисунок 8 – Зависимость остаточной обводненности эмульсии № 2 от количества электрической энергии вложенной в эмульсию

При использовании дополнительной индуктивности осуществлялась попытка с одной стороны резко ограничить ток при пробое межэлектродного промежутка в рабочей камере, а с другой стороны изменить (уменьшить) ам-

плитудное значение напряженности электрического поля в эмульсии относительно напряжения на разряднике и увеличить время приложения к эмульсии разрядного тока и напряжения. Такой способ воздействия на высокоустойчивую эмульсию оказался наиболее эффективным. Установлено, что наиболее глубокое нарушение агрегативной устойчивости наблюдается при создании униполярного импульса с временем нарастания фронта от 20 до 30 мкс и длительностью импульса от 600 до 700 мкс. При дальнейшем увеличении длительности импульса наблюдаются частичные пробои эмульсии, переход кривой через нулевую линию, искажение формы импульса и снижение амплитуды.

**Выводы.** Из исследуемых электроразрядных способов воздействия на высокоустойчивые эмульсии наиболее глубокие нарушения агрегативной устойчивости получены при воздействии на эмульсию униполярными импульсами со скоростью нарастания фронта импульса от единиц до десятков микросекунд и длительностью импульса от десятков до сотен микросекунд. При этом достаточно эффективными оказались амплитудные значения напряженности поля от  $0,3 \cdot 10^6$  до  $1,2 \cdot 10^6$  В/м, а амплитудные значения тока составляли доли килоампера.

Такие условия наиболее эффективного воздействия на процессы коагуляции высокопроводимой дисперсной фазы высокоустойчивой эмульсии реализуются электроразрядным способом с индуктивным токоограничением.

**Список литературы:** 1. *Круглицкий Н.Н., Горovenko Г.Г., Малошевский П.П.* Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях. – Киев: Наукова думка, 1983. – 154 с. 2. Пат. 67828 Украина, С 10 L 1/32. Способ обработки высоковязкого топлива / *О.Н.Сизоненко, И.С.Швец, Л.С.Дыхта, А.Ф.Головащенко* (Украина). – №2001096173; Заявлено 15.03.2004; Опубликовано 15.07.2004. – Бюл. № 7. – 2 с. 3. *Сизоненко О.Н., Тафтай Э.И., Ткаченко А.К., Швец И.С.* Особенности электроразрядного воздействия на высоковязкие среды // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 6. – С. 37-43. 4. *Сизоненко О.Н., Тафтай Э.И., Ткаченко А.К., Швец И.С.* Влияние электроразрядного воздействия на физико-химические свойства высоковязких сред // Национальный университет кораблестроения: Збірник наукових праць. – Миколаїв, 2004. – № 1. – С. 154-162. 5. *Конторович А.Э, Нестеров И.И., Салманов Ф.К.* и др. Геология нефти и газа Западной Сибири. – М.: Недра, 1975. – 515 с. 6. *Боровая М.С.* Лаборант нефтяной и газовой лаборатории. – М.: Недра, 1968. – 308 с. 7. ГОСТ 2477-65. Нефтепродукты. Метод определения содержания воды. – Переизд. Апр. 1982 с изм.1. – Взамен ГОСТ 1044-41 и ГОСТ 2477-44; Введ. 01.01.66 до 01.01.90; Снято ограничение срока действия // ГОСТ 14921-78 и др. Нефтепродукты. Методы испытаний. – М., 1987. – С.217-223.

*Поступила в редколлегию 21.11.2007*



**А.И.СКИБЕНКО**, канд. физ.-мат. наук; **Ю.В.ЛАРИН**;  
**А.В.ПРОКОПЕНКО**; **Ю.Н.НЕЗОВИБАТЬКО**; **Ю.В.КОВТУН**;  
**Е.И.СКИБЕНКО**, канд. физ.-мат. наук;  
**В.Б.ЮФЕРОВ**, докт.техн.наукж ННЦ ХФТИ НАНУ

## **СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ НА ТЯЖЕЛЫХ ГАЗАХ И ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В ИМПУЛЬСНОМ ОТРАЖАТЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ ДЛЯ СЕПАРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Почато дослідження процесу й особливостей утворення імітаційної плазми на важких газах і парах металів для сепараційних технологій на основі імпульсного відбивного розряду. Проведено експерименти по вивченню умов подачі поділованої речовини в область розряду за допомогою механізму розпилення осадженого раніше матеріалу під дією часток і потоків плазми, генеруємих в імпульсному відбивному розряді.

Researches of process and features of production of imitating plasma on heavy gases and metal vapors for separating technologies are started, on the basis of the pulse reflective discharge. On studying conditions of supply of divided substance experiments are lead to area of the discharge by means of the mechanism of dispersion besieged a material before under action of particles and the streams of plasma generated in pulse reflective discharge.

Сепарационные технологии, производящие разделение элементов после их ионизации в силовых скрещенных электрических и магнитных полях, предполагается в первую очередь использовать для переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО). В [1-6] описываются различные варианты реализации устройств для разделения веществ на элементы магнито-плазменными методами, в том числе вариант отражательного разряда Пеннинга. В тоже время на этапе разработки, опробования и осуществления отдельных технологических решений и технологий в целом, исследования физических процессов и технологических решений предполагается проводить на имитационных веществах, в частности на смеси тяжелых благородных газов, таких как Ar, Kr, Xe, в различном процентном их содержании и возможно в сочетании с парами металлов. Поэтому представляет интерес исследование процесса ионизации и образования плазмы на имитационных веществах (смесьях) с учетом эффективности ионизации в различных ионизационных состояниях в зависимости от энерговклада в разряд и других его параметров, что необходимо для оптимизации параметров плазмообразующей системы (или систем), определения ее эффективности и проведения сравнительного анализа подобных систем различного типа. С учетом вышесказанного в первую очередь представляет интерес исследование динамики роста плотности плазмы  $n_p = f(t)$ , пространственного распре-

деления плотности плазмы, определения скорости ионизации  $s = f(Q)$  и параметрических характеристик разряда, то есть  $n_p, v_{ep}, \omega_{ep} = f(H, p, c)$ . Таким образом, конечной целью запланированных и проводимых экспериментов являются исследования возможности получения сепараторной плазмы требуемых параметров [7] и изучения ее свойств в отражательном разряде в среде тяжелых газов. На данном этапе ограничимся рассмотрением предварительных результатов этих экспериментов с водородной и аргоновой плазмой при использовании в качестве катодов монометалла и композитного материала.

Эксперименты проводились на установке (рис. 1), состоящей из разрядной камеры 1, магнитных катушек 2, вакуумных откачных постов 3, системы напуска рабочего газа 4. В торцах разрядной камеры 1 размещались катоды 5, анодом служили дополнительные цилиндрические электроды 6 и обечайка разрядной камеры 1.

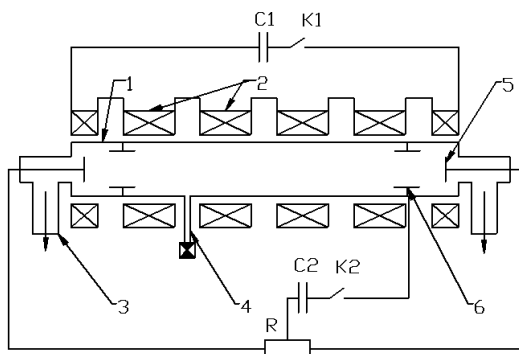


Рисунок 1 – Схематическое изображение экспериментальной установки:  
 1 – разрядная камера; 2 – магнитные катушки; 3 – вакуумные откачные посты;  
 4 – система напуска рабочего газа; 5 – катоды; 6 – дополнительные электроды,  
 C1, C2 – емкостные накопители, K1, K2 – коммутаторы тока,  
 R – балластное сопротивление

Разрядная камера имела следующие размеры: внутренний диаметр 200 мм, длина 1500 мм. Магнитное поле создавалось соленоидом, состоящим из шести катушек, две из них, торцевые, создают магнитные пробки с пробочным отношением 1,25, четыре средние – равномерное по оси магнитное поле с напряженностью до 4,7 кЭ в импульсе. Длительность импульса магнитного поля составляет 18 мс. Начальное давление в камере составляло  $10^{-6}$  тор, затем напускался рабочий газ до давления  $1-8 \cdot 10^{-3}$  тор. Плазма образовывалась в результате разряда конденсаторной батареи C2 емкостью 200 мкФ, напряжением до 4 кВ и длительностью 3,5 мс между холодными катодами 5 диаметром 100 мм и кольцевыми анодами 6 диаметром 160 мм, соединенными с камерой и отстоящими от катодов на расстоянии 100 мм. При этом

реализовывались скрещенные E и H поля (продольное H, поперечное E). На рис. 2 приведены осциллограммы магнитного поля и разрядного тока. Использовались катоды двух типов: выполненные из монометалла – алюминий и медь; композитного материала – медь с напыленным методом КИБ титаном.

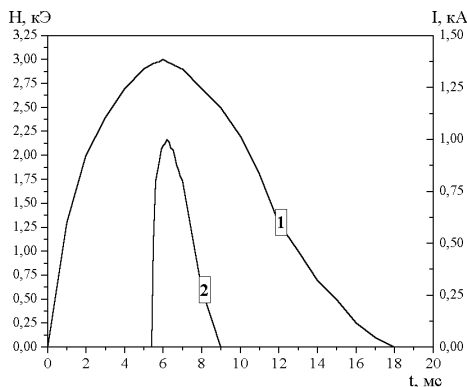


Рисунок 2 – Осциллограммы магнитного поля и разрядного тока:  
1 – магнитное поле; 2 – разрядный ток.

Расположение средств диагностики приведено на рис. 3. К ним следует отнести СВЧ-интерферометр с рабочей длиной волны  $\lambda = 8$  мм, а также рефлектометр–коррелятор с длиной волны  $\lambda = 10,7$  мм. Рупорные антенны 3,4 предназначены для СВЧ интерферометрии плазмы, антенны 5,6 служат для проведения СВЧ рефлектометрических измерений для определения профиля плотности и скорости вращения плазмы посредством определения сдвига взаимнокорреляционной функции двух СВЧ сигналов, отраженных от участков слоя плазмы одной плотности и разнесенных по азимуту [8].

В эксперименте было проведено сравнение динамики роста и спада плотности плазмы во времени для двух типов катодов: из монометалла и композитного материала. Оказалось (см. рис. 4), что при реализации разряда в водороде с системой электродов (катодов) с напыленным титаном на поверхности, обращенной к разряду, прослеживается удлинение стадии существования плазмы с плотностью  $9-3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Величина удлинения стадии существования плазмы для катодов с титановым напылением составляет ~6 мс по сравнению с разрядом в водороде при использовании монометаллических электродов без напыления. При этом, существенным может оказаться поступление в разряд значительного количества примесных атомов титана, а также растворенных в нем газов –  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  и С, за счет процессов распыления слоя титана на поверхности катодов частицами и потоками образовавшейся плазмы. В пользу этого говорит

тот факт, что при этом меняется характер и окраска свечения разряда – из фиолетового свечение становится белесым. Этот эффект может оказаться весьма полезным в будущем при создании металлических плазм для сепарационных технологий.

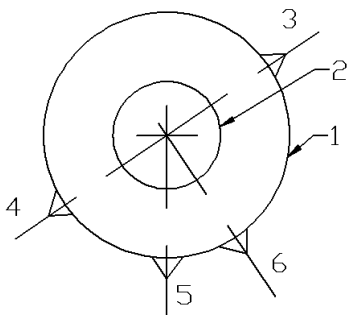


Рисунок 3 – Схема расположения диагностических средств в плоскости поперечного сечения разрядной камеры и плазменного столба:

1 – разрядная камера, 2 – граница плазмы, 3,4 – передающая и приемная антенны СВЧ-интерферометра; 5,6 – антенны СВЧ рефлектометра – коррелятора

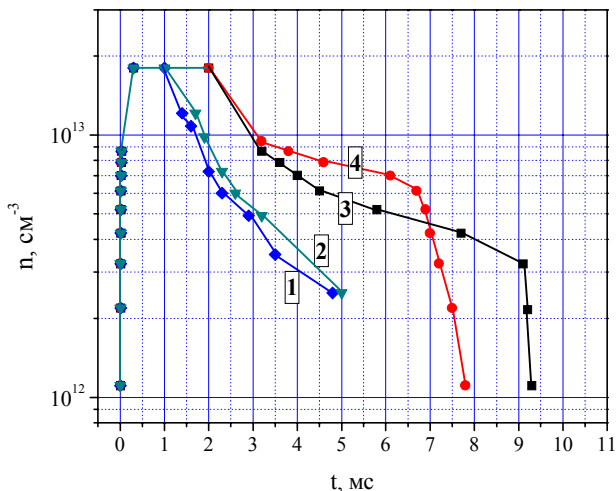


Рисунок 4 – Зависимости плотности плазмы от времени для двух типов катодов:

1,2 – монометалл; 3,4 – монометалл с напыленным слоем Ti.

кривые 2,3 –  $H_{\max} = 4,7$  кЭ; 1,4 –  $H_{\max} = 2,3$  кЭ;  $P = 1,8 \cdot 10^{-3}$  торр

Появления временного удлинения стадии существования плазмы при сравнении динамики распадающейся плазмы для двух типов используемых

катодов может быть объяснено следующим образом. Известно [9], что время удержания  $\tau_{\text{уд}}$  плазмы в магнитной ловушке пробочной конфигурации может быть определено по формуле Будкера:

$$\tau_{\text{уд}} = 1,81 \bar{\tau}_i \lambda(R), \quad (1)$$

где  $\bar{\tau}_i$  – среднее ионное время релаксации, которое равно:

$$\bar{\tau}_i = \frac{3\sqrt{3m_i}}{8\pi n L e^4} \cdot T_i^{3/2}, \quad (2)$$

а функция  $\lambda(R)$  может быть аппроксимирована выражением  $\lambda(R) = \lg R$ , где  $R$  – пробочное отношение. Согласно этого переход от разряда на легких атомах, например, водороде, к разряду на более тяжелых атомах, например, титане, при прочих равных условиях может привести к увеличению времени удержания плазмы, что и наблюдается реально в эксперименте (смотри рис. 4). Действительно, при начальном значении плотности плазмы  $1,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  изменение плотности в  $e$ -раз соответствует моменту времени 1,7 мс после начала разряда в случае использования катодов из монометалла (кривая 2 на рис. 4). В то же время при изменении материала катодов – переход на монометал с напыленным слоем Ti, тот же спад плотности в  $e$ -раз приходится на момент времени 7,3 мс, что говорит об удлинении процесса существования плазмы и изменении динамики распада плазмы заданной плотности, причем временное удлинение процесса увеличивается в 4,3 раза по сравнению с катодом из чистого монометалла без напыления. Если воспользоваться формулой Будкера для оценки времени удержания ионов водорода и ионов титана, то отличие времени удержания этих ионов при прочих равных условиях составят величину равную  $\sqrt{m_{\text{Ti}}^i / m_{\text{H}}^i} \sim 4,7$  раза, что согласуется с результатами эксперимента.

Наблюдаемая картина распада плазмы (рис. 4) также может быть связана с увеличением полного числа частиц плазмы в разряде за счет поступления и ионизации примесных атомов H, O, C.

Кроме того, появлению временное удлинение распадной части зависимости  $n = f(t)$  при использовании медных катодов с напыленным Ti может объясняться диффузионными процессами. Действительно, величина коэффициента диффузии поперек магнитного поля в сильно ионизированном газе определяется как:

$$D_{\perp} = \frac{T_i + zT_e}{m_i v_{in} \left[ 1 + \frac{\omega_e \omega_i}{(v_{en} + v_{in}) v_{in}} \right]}. \quad (3)$$

С ростом массы иона потери плазмы поперек магнитного поля будут уменьшаться, что улучшает условия удержания плазмы и, соответственно, его время.

На рис. 5 представлены зависимости плотности аргоновой плазмы от времени при различных давлениях рабочего газа. На рис. 6 и 7 приведены зависимости времени существования измеренной плотности плазмы в разряде и динамики плотности плазмы от давления нейтрального газа в различные моменты времени развития разряда. Время существования измеренной плотности плазмы изменяется в указанном диапазоне давлений примерно в 1,5 раза.

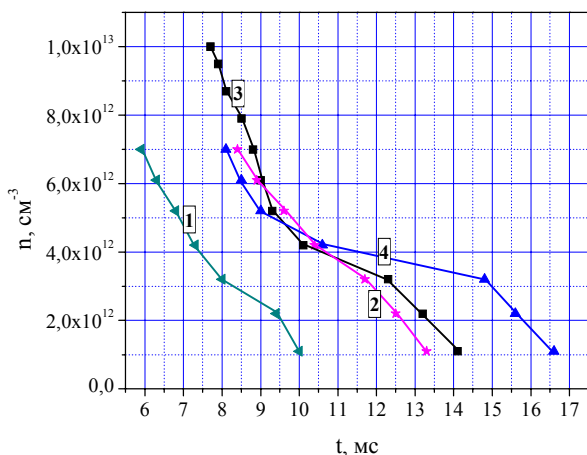


Рисунок 5 – Изменение плотности плазмы во времени для различных значений давления рабочего газа (аргона):  
 1 –  $P = 2,18 \cdot 10^{-3}$  тор; 2 –  $P = 3,9 \cdot 10^{-3}$  тор; 3 –  $P = 4,99 \cdot 10^{-3}$  тор; 4 –  $5,93 \cdot 10^{-3}$  тор

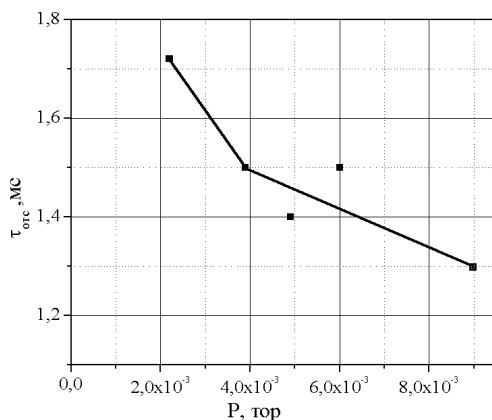


Рисунок 6 – Зависимость времени существования плазмы плотностью  $n \geq 1,8 \cdot 10^{13}$  см⁻³ от давления рабочего газа (аргона)

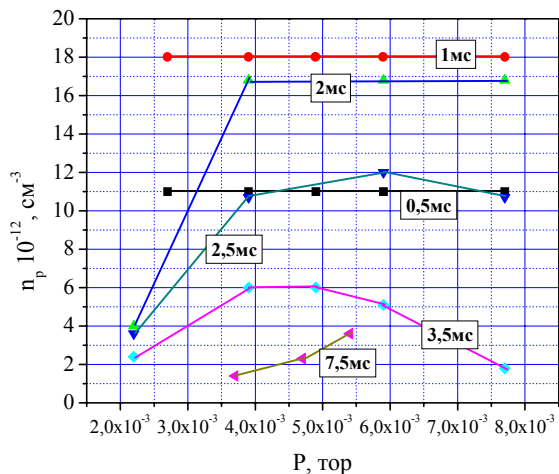


Рисунок 7 – Зависимость плотности плазмы от давления рабочего газа (аргона) для различных моментов разряда

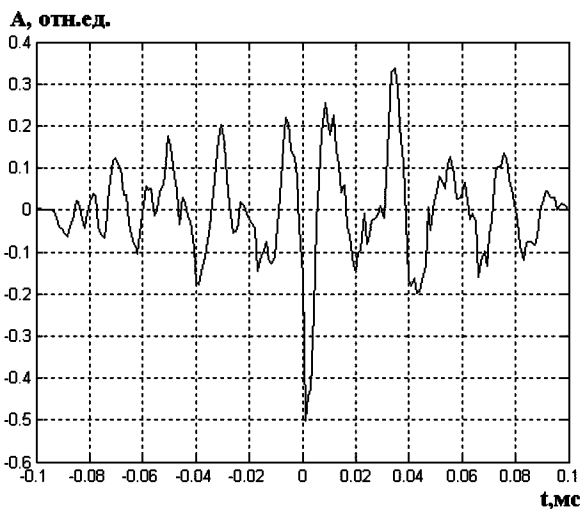


Рисунок 8 – Взаимнокорреляционная функция двух СВЧ сигналов, отраженных от плазменного слоя с  $n = n_{кр}$

Результаты корреляционного анализа отраженных СВЧ сигналов в каналах 5 и 6 (рис. 3) представлены на рис. 8 взаимнокорреляционной функцией (ВКФ) двух СВЧ-сигналов, отраженных от различных участков слоя плазмы одной плотности  $n = n_{кр}$  для зондирующей волны. Максимальная плотность плазмы на этой стадии разряда  $n > n_{кр}$ . С помощью корреляцион-

ных функций согласно [8] может быть определена скорость вращения плазмы. Действительно, сдвиг максимума ВКФ определяется временем прохождения элементов отражающего слоя с плотностью  $n = n_{кр}$  между антеннами 5 и 6 (рис. 3). Используя набор аналогичных ВКФ и значение радиуса отражающего слоя определена скорость вращения плазмы в скрещенных E и H полях ( $v_{вр} \sim 0,97 - 2,1 \cdot 10^6$  см/с) и круговая частота вращения ( $\omega_{вр} \sim 1,94 - 4,2 \cdot 10^5$  Гц).

Таким образом, в результате проведенных экспериментов определены условия создания водородной, аргонной, водородно-металлической и аргонно-металлической плазмы с максимальной плотностью  $1,8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и возможностью регулировки величины плотности в диапазоне  $10^{12} - 10^{13}$  см<sup>-3</sup> за счет изменения давления нейтральной среды. Определены также параметры вращения образованного плазменного образования – скорость и частота вращения. Установлено наличие осевой симметрии плазменного образования в разряде.

**Список литературы:** 1. Изотопы: свойства, получение, применение. Т. 1 / Под ред. В.Ю.Баранова. – Москва: "ФИЗМАТЛИТ", 2005. – 600 с. 2. A.Litvak, S.Agnev, F. Anderegg *et al.* // 30<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA. – Vol. 27A, O-1.6A. 3. А.И.Карчевский, В.С.Лазько, Ю.А.Муромкин и др. // Физика плазмы. – Т.19, в.3. – 1993. – С. 411. 4. А.М.Егоров, В.Б.Юферов, Ю.В.Ковтун и др. Сравнительный анализ проектов плазменных сепараторов изотопов с колебаниями на циклотронных частотах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (3). – № 4. – 2004. – С. 323-325. 5. А.М.Рожков, К.Н.Степанов и др. Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний во вращающейся плазме // Письма в ЖЭТФ. – Т. 10, № 2. – 1969. – С. 71-75. 6. С.И.Скибенко, Ю.В.Ковтун, В.Б.Юферов Патент UA №24729 от 10.07.2007, Бюл. № 10, 2007 г. 7. Ю.В.Ковтун, Е.И.Скибенко, В.Б.Юферов Коаксиальный ускоритель для заполнения магнито-плазменных сепараторов плазмой // Вестник НТУ ХПИ. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2007. – № 20. – С. 107-113. 8. А.И.Скибенко, В.Л.Очеретенко *et al.* // Укр.фіз.ж. – 2001. – Т. 46, № 4. – С. 443-448. 9. Г.И.Будкер. Термоядерные реакции в системе с магнитными пробками. К вопросу о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую. (Физические принципы и предварительные расчеты). В книге Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерных реакций. Т.3. – Изд-во АН СССР, 1958. – 364 с.

Поступила в редколлегию 07.11.2007



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

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ**

На основі аналізу комплексу електромагнітних, теплових, температурних співвідношень визначено оптимальні показники габаритів високовольтного трансформатора занурювальних електродорозрядних пристроїв.

On the basis of analysis of complex of electromagnetic, thermal, temperature correlations the optimum indexes of sizes of high-voltage transformer of submersible electrodischarge devices are determined.

**Введение.** Дальнейшее развитие электродоразрядного метода увеличения притока нефти в скважины, позволяющее расширить спектр его использования при уменьшении времени ремонтных и профилактических работ на скважинах, ставит ряд задач, направленных как на уменьшение габаритных размеров скважинного устройства, так и на возможность увеличения его энергетических показателей при приемлемом температурном режиме работы. Учитывая, строго говоря, противоречие в возможности достижения наилучших показателей по каждому направлению (повышение энергетических показателей при уменьшении габаритов ведет к резкому увеличению удельных потерь и, соответственно, ухудшению теплового режима работы устройства в условиях высокой внешней рабочей температуры), следует определить зависимости, позволяющие оптимизировать решение комплекса задач в целом.

В связи с наибольшей концентрацией электротехнических компонентов одним из наиболее уязвимых элементов при работе погружного скважинного комплекса является зарядный блок, содержащий полупроводниковые элементы инвертора и выпрямителя, систему управления инвертором, высоковольтный трансформатор. Основным тепловыделяющим и массивным элементом зарядного блока является высоковольтный трансформатор, поэтому **целью** настоящей работы стало определение оптимального комплекса массогабаритных, тепловых и температурных показателей работы данного элемента.

**Постановка задачи.** Проведенные ранее работы [1] позволили сделать вывод о возможности создания погружного скважинного устройства с полезной передаваемой в накопительный конденсатор мощностью 1 кВА при про-

текании постоянного тока по кабелю, соединяющему наземную и погружную части. Учитывая работу преобразователя на индуктивно-емкостной преобразователь, возникает необходимость расчета высоковольтного трансформатора на удвоенную габаритную мощность [2], то есть  $P_{заб} = 2$  кВА.

Одной из особенностей погружных скважинных устройств является расположение оборудования в цилиндрическом корпусе крайне ограниченных габаритов (внешний диаметр – 102 мм, внутренний – 88 мм), определяемых допустимым диаметром обсадной трубы скважины и высоким (до 50 МПа) гидростатическим давлением. Наилучшим вариантом по заполнению рабочего пространства корпуса было определено использование стержневого трансформатора с магнитопроводом квадратного сечения стороной 15 мм и шириной окна 20 мм (рис. 1), что позволяет, соблюдая необходимые изоляционные промежутки, приблизить часть поверхности обмотки и магнитопровода к стенке корпуса для улучшения теплоотвода.

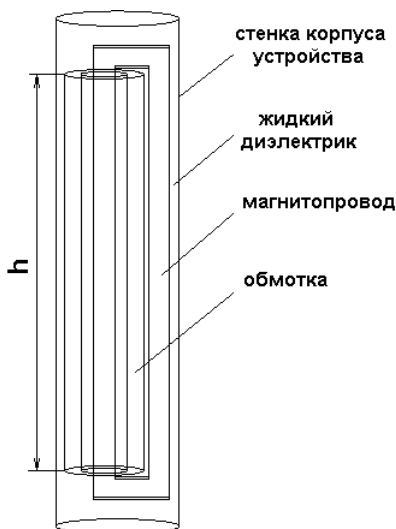


Рисунок 1 – Высоковольтный трансформатор

В качестве материала магнитопровода был выбран сердечник из нанокристаллического железа фирмы МЕЛТА (г. Киев, [3]), имеющий гораздо лучшие показатели, как по величине индукции, так и по удельным потерям в сравнении с широко использующимися в настоящее время ферритовыми сердечниками. Согласно представленной производителем информации была определена зависимость удельных объемных потерь в материале магнитопровода от индукции и частоты:

$$q_{cm} = 0,038 \cdot B^2 \cdot f^{1,65}, \quad (1)$$

где  $q_{cm}$  – удельные объемные потери в стали, Вт/м<sup>3</sup>;  $B$  – индукция, Тл;  $f$  – частота, Гц.

Приняв за  $h$  высоту обмоток трансформатора, учитывая особенности конструктивного исполнения магнитопровода и наличие необходимых зазоров, общие потери в магнитопроводе определяются согласно формуле

$$Q_{cm} = 1,58 \cdot 10^{-4} \cdot (0,132 + 2h) \cdot q_{cm}, \quad (2)$$

где  $Q_{cm}$  – потери в магнитопроводе, Вт;  $h$  – высота обмоток, м.

Используя формулы по электромагнитному расчету трансформатора и потерь в нем [4], достаточно просто определить выражение, связывающее потери в обмотке трансформатора с его габаритной мощностью, частотой протекающего тока и индукцией материала магнитопровода:

$$Q_m = \frac{j \cdot \rho_m \cdot (l_{\delta 1} + l_{\delta 2})}{4,44 \cdot S_{\text{эфф}} \cdot K_c} \cdot \frac{P_{\text{заб}}}{f \cdot B}, \quad (3)$$

где  $Q_m$  – потери в обмотке, Вт;  $j$  – плотность тока в обмотках трансформатора, А/м<sup>2</sup>;  $\rho_m$  – удельное сопротивление материала обмотки (для медного провода  $\rho_m = 1,75 \cdot 10^{-8}$  Ом·м);  $l_{\delta 1}$  – средняя длина витка первичной обмотки, м;  $l_{\delta 2}$  – средняя длина витка вторичной обмотки, м;  $S_{\text{эфф}}$  – эффективное сечение магнитопровода, м<sup>2</sup>;  $K_c$  – коэффициент заполнения магнитопровода сталью;  $P_{\text{заб}}$  – габаритная мощность трансформатора, ВА.

Габаритные размеры вторичной обмотки трансформатора и число ее витков связаны выражением

$$W_2 = \frac{K_m \cdot h \cdot h_m}{d_2^2},$$

где  $W_2$  – число витков вторичной обмотки;  $h_m$  – толщина намотки вторичной обмотки, м;  $d_2$  – диаметр провода вторичной обмотки, м;  $K_m$  – коэффициент заполнения катушки вторичной обмотки медью (с учетом закраин, межслоевой изоляции, изоляции провода, технологических зазоров  $K_m = 0,2$ ). Используя данное выражение, формулу (3) и формулы электромагнитного расчета трансформатора, была получена зависимость, связывающая высоту обмоток с габаритной мощностью, частотой и индукцией:

$$h = \frac{1}{1,11 \cdot \pi \cdot j \cdot K_m \cdot K_c \cdot h_m \cdot S_{\text{эфф}}} \cdot \frac{P_{\text{заб}}}{f \cdot B}. \quad (4)$$

Для упрощения расчета температурного режима работы трансформатора его первичная и вторичная обмотки сведены в один цилиндр (см. рис. 1) с внутренним диаметром, соответствующим расположению первого слоя первичной, и внешним, определяющимся положением последнего слоя вторичной обмотки. Это дало возможность определить удельные объемные потери в обмотках:

$$q_m = \frac{603 \cdot Q_m}{h}, \quad (5)$$

где  $q_m$  – удельные потери в обмотках, Вт/м<sup>3</sup>.

Система уравнений [1]-[5] решалась при помощи программы *Mathcad 2001 Professional*. Учитывая опыт создания высоковольтного погружного оборудования, заранее были определены параметры радиального сечения высоковольтного трансформатора ( $l_{e1} = 0,098$  м;  $l_{e2} = 0,151$  м;  $h_m = 0,007$  м). Согласно технической информации, представленной производителем,  $S_{эфф} \cdot K_c = 1,62 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Плотность тока, протекающего по обмоткам трансформатора при отсутствии принудительного охлаждения, допустимо выбирать  $j = 2,2 \cdot 10^6$  А/мм<sup>2</sup>.

Теоретический анализ тепловых режимов работы зарядного блока проводился с помощью программы для расчета различного рода физических полей *Femlab 3.1*, позволяющей, в частности, моделировать переходные характеристики и стационарную тепловую картину одно-, дву- и трехмерных конфигураций методом конечных элементов с достаточно высокой точностью. Трехмерная модель высоковольтного трансформатора представлена на рис. 1. При составлении модели принимались следующие допущения:

- первичная и вторичная обмотки, каркасы, изоляционные слои были объединены в один цилиндр, теплофизические характеристики которого соответствовали меди; теплофизические характеристики материала, из которого выполнен магнитопровод (сердечник из нанокристаллического железа), соответствовали стали;
- наличие стальной стенки трубы не учитывалось; граничное условие для образующей поверхности цилиндрической области, заключающей модель – условие постоянной температуры, поддерживаемой внешней средой;
- цилиндрическая область заполнена жидким диэлектриком (трансформаторным маслом) и не ограничена в осевой плоскости.

Данные, использованные при составлении модели высоковольтного трансформатора, приведены в таблице.

Элемент	Магнито-провод	Обмотка	Жидкий диэлектрик
Материал	сталь	медь	трансформаторное масло
Удельная мощность $q$ , Вт/м <sup>3</sup>	10820	12200	-
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7870	8700	880,3
Удельная теплоемкость $C_m$ , Дж/(кг·К)	440	385	1666
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	76,2	400	0,11

**Результаты исследований.** Зависимость высоты обмоток (и, соответственно, высоты всего трансформатора) от рабочей индукции материала магнитопровода и частоты напряжения, преобразуемого трансформатором, представлена на рис. 2.

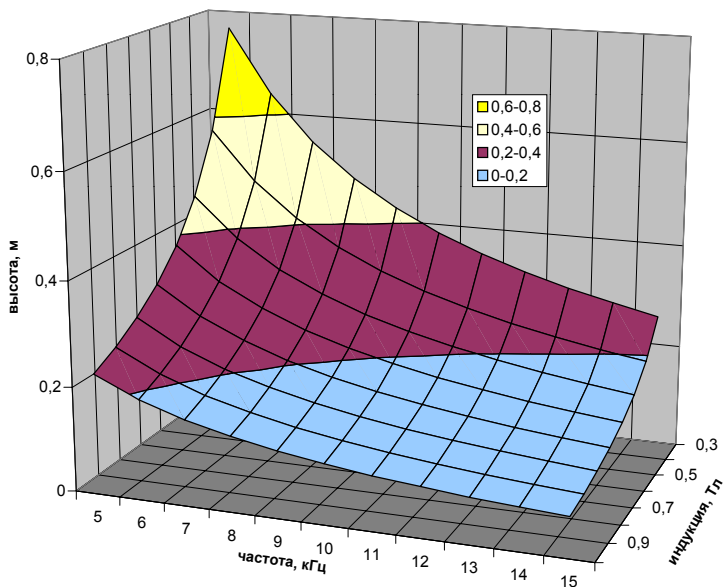


Рисунок 2 – Зависимость высоты обмоток трансформатора от индукции и частоты

С увеличением индукции и частоты, как следует из (4), габариты трансформатора уменьшаются в обратной пропорциональности. Уменьшение габаритов ведет к снижению внешней поверхности и ухудшению условий теплоотвода из внутренних слоев трансформатора. Поэтому интерес представляет также рассмотрение вопроса о потерях при работе трансформатора в диапазоне частот (5...15) кГц и индукций (0,3...1) Тл (рис. 3). Учитывая допущения, приведенные выше и не соответствующие работе трансформатора в натуральных условиях (наличие источников тепла в торцах цилиндрической поверхности), целесообразно представить информацию в относительных единицах (в качестве базовых приняты наименьшие значения величин массивов). Для перехода к абсолютным значениям следует определить реальный температурный режим работы трансформатора в одной из точек массива.

Как видно из рис. 3, в диапазоне рабочих частот и индукций существует область с наименьшими возможными потерями. Расчет показал, что наименьшие потери наблюдаются при равенстве потерь в материале магнито-

провода и обмоток ( $Q_{cm} = Q_m$ ), при этом расчетная высота обмотки практически неизменна и равна 0,021 м. В случае увеличения одной из составляющих общие потери резко возрастают.

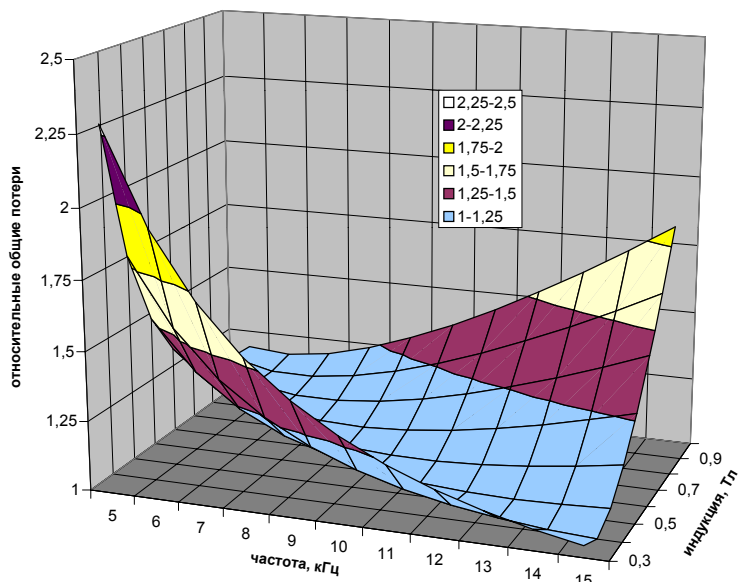


Рисунок 3 – Зависимость общих потерь в трансформаторе от индукции и частоты

Результаты расчета температурного режима работы трансформатора представлены на рис. 4. Представлены данные по относительному перегреву магнитопровода трансформатора, так как именно его материал является на сегодняшний день наиболее подверженным выходу из строя при перегреве (рабочая температура – 120 °С). Выбор расчетной точки трансформатора в сторону значений рабочих частоты и индукции, меньших чем оптимальные, приводит к увеличению габаритов данного элемента при снижении величины удельных потерь и температуры перегрева. В то же время, при выборе больших значений частоты и индукции увеличение общих потерь сопровождается уменьшением габаритных размеров и резкому росту перегрева внутренних областей трансформатора.

Таким образом, при расчете высоковольтного трансформатора для погружных устройств, работающих в экстремальных условиях, рекомендуется придерживаться оптимального соотношения рабочих частот и индукций. Так, оптимальной высотой обмоток трансформатора мощностью 2 кВА, согласно проведенного анализа, является 0,021 м. Расчет трансформатора для устройств, работающих в условиях пониженных рабочих температур окру-

жающей среды, можно производить при некотором увеличении частоты и индукции, что даст возможность уменьшить габариты погружной части устройства при его надежной работе.

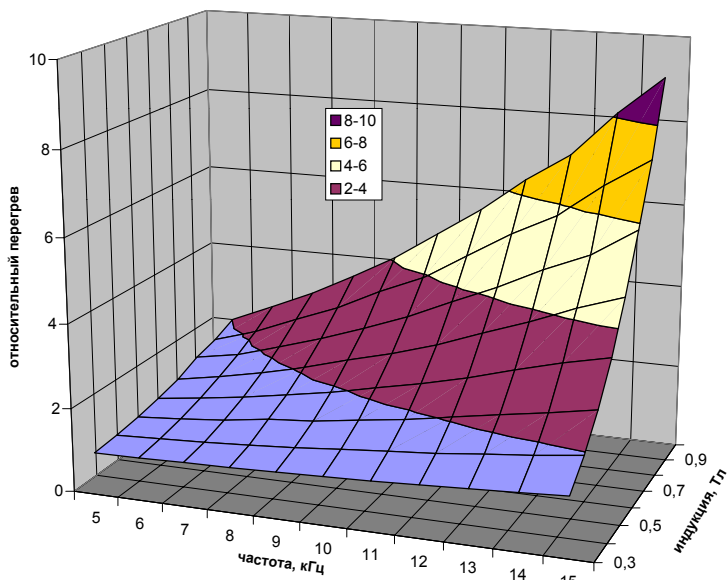


Рисунок 4 – Перегрев магнитопровода трансформатора

**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. *И.В.Пентегов.* Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – Киев: Наук. думка, 1982. – 424 с. 3. Аморфные и нанокристаллические сплавы. Общая информация. Технический бюллетень ТВ-GI. <http://www.novitech.com>. 7с. 4. *П.М.Тихомиров.* Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

*Поступила в редколлегию 07.11.2007*

**В.Г.ЖЕКУЛ**, канд.техн.наук; **И.С.ШВЕЦ**, канд.физ-мат.наук;  
**С.Г.ПОКЛОНОВ**, канд.техн.наук; **Э.И.ТАФТАЙ**;  
**Р.П.КОЛМОГорова**; **А.П.СМИРНОВ**; Институт импульсных  
процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **КОАГУЛЯЦИЯ ВОДНОЙ ФАЗЫ В ВЫСОКОУСТОЙЧИВЫХ НЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

У статті представлено результати експериментальних досліджень впливу різних електричних полів на стійкі емульсії типу «олія-вода» з метою їхнього розшарування. Основна прикладна спрямованість досліджень складається в пошуку підходів до ефективного впливу на такі емульсії, як відходи нафти й нафтопродуктів, з метою їхньої утилізації.

In article are presented results of the experimental studies of the influence by different electric field on stable emulsions of the type "machine oil - water" for the reason their exfoliation. The Main applied directivity of the studies consists in searching for approach to efficient influence on such emulsions as, waste oils and petroleum derivatives, for the reason their utilization.

### **Введение**

Широкое применение высокоэффективных химических и физико-химических технологий увеличения нефтеотдачи пластов [1,2], связанных с использованием поверхностно-активных веществ, приводит к формированию мелкодисперсных высокоустойчивых эмульсий, осложняющих процессы подготовки нефти к переработке. Высокоустойчивые водонефтяные эмульсии (ловушечные нефти), являющиеся вторичным продуктом в установках подготовки нефти, плохо поддаются расслоению современными методами [3].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований воздействия постоянного, переменного (50 Гц) и импульсного электрических полей на агрегативную устойчивость таких эмульсий.

### **Методика проведения экспериментальных исследований**

Экспериментальные исследования проводились в специально изготовленной разрядной камере, обеспечивающей квазиоднородное распределение электрического поля в межэлектродном промежутке (рис. 1). Величина прикладываемого напряжения выбиралась из соображения исключения пробоя промежутка и составляла 1 и 2 кВ. При длине межэлектродного промежутка  $l = 20$  мм напряженность электрического поля составляла 0,5 и 1 кВ/см. Для контроля электрических процессов в эмульсиях проводились измерения тока в промежутке и падения напряжения на нем с помощью омических шунтов и делителей напряжения, подключенных к осциллографу С8-9А. Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Все экспе-



рименты проводились на эмульсиях, приготовленных на основе нефти Усинского месторождения, содержащей значительное количество парафинов, смол, асфальтенов и других тяжелых компонентов и обладающей из-за этого большой вязкостью. Получаемая на основе такой нефти водонефтяная эмульсия, даже при значительных обводненностях (до 25 %) обладала хорошей устойчивостью и не расслаивалась даже при высоких температурах и значительных временах отстоя. По своей стабильности она близка к ловушечным нефтям. Для приготовления эмульсий вода засаливалась растворением поваренной соли. Из литературы [4] известно, что наличие хлоридов в воде придает устойчивость (стабилизирует) эмульсии типа «вода-масло». При приготовлении эмульсии использовалась вода соленостью ( $C_{NaCl}$ ) 10 и 15 %. В процессе воздействия на эмульсию электрическим полем ее температура поддерживалась постоянной в пределах от 55 до 65 °С путем помещения экспериментальной ячейки в сосуд с водой такой же температуры. Сосуд был снабжен электроподогревом. После обработки электрическим полем эмульсия тщательно сливалась в специальную емкость и помещалась в сушильный шкаф, где отстаивалась при температуре 60 °С в течение суток.

После отстоя эмульсия подвергалась реологическим, структурным и другим исследованиям. Такая стандартная технология проведения исследования позволила в дальнейшем проводить корректное сравнение результатов различных экспериментов.

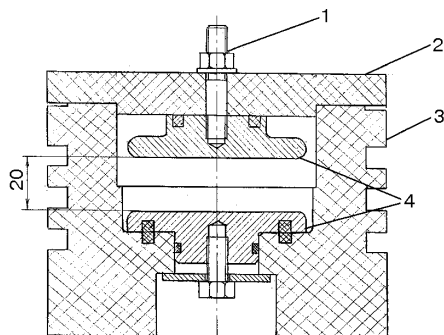


Рисунок 1 – Экспериментальная ячейка:

1 – токовод; 2 – крышка; 3 – корпус; 4 – электроды

### Результаты исследований

На рис. 3 представлены осциллограммы тока через промежуток, заполненный эмульсией, содержащей 15 % воды соленостью 10 % при приложении к электродам переменного (кривые 1-3) и постоянного (кривые 4,5) напряжения величиной 2 кВ. Независимо от характера приложенного к эмульсии поля наблюдается одинаковый качественный характер изменения тока. Во всех случаях в начальный момент воздействия ток практически равен ну-

лю и по истечении некоторого времени (время паузы тока  $t_{пт}$ ) начинает быстро расти до какого-то максимума, после чего начинается его спад. До величины, равной примерно 1/3 от максимального своего значения, ток через эмульсию падает так же быстро, как и нарастал до максимума. В дальнейшем кривая тока выполаживается и медленный спад может продолжаться несколько сотен секунд (осциллограф С8-9А позволяет вести регистрацию на развертке 500 с). Такой характер тока наблюдался во всех многочисленных экспериментах при воздействии на эмульсию однородным постоянным и переменным электрическим полем. Такое поведение тока в эмульсии вполне согласуется с той качественной картиной поведения капелек воды в масле, которую наблюдали авторы в модельном эксперименте, если предположить, что ток имеет конвективный характер, то есть перенос зарядов в эмульсии осуществляется движущимися между электродами капельками воды под воздействием электрического поля. Такое предположение вполне правдоподобно, поскольку объясняет наличие паузы тока в начале воздействия поля из-за отсутствия в течение некоторого времени движения капелек воды в эмульсии, которое наблюдалось в модельном эксперименте.

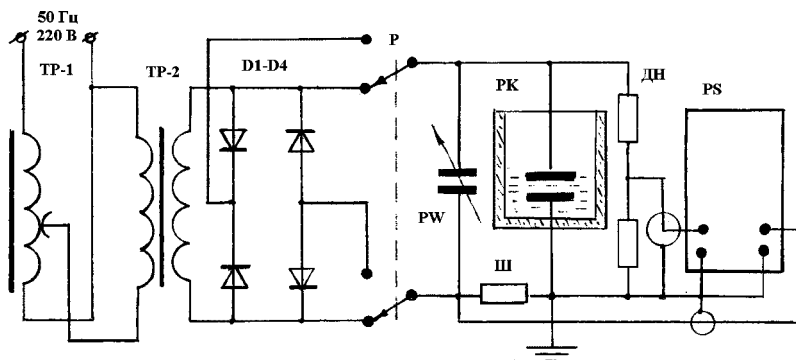


Рисунок 2 – Электрическая схема экспериментальной установки для воздействия на эмульсию постоянным и переменным полем:

TP-1 – регулировочный трансформатор; TP-2 – повышающий трансформатор;  
D1-D4 – диодный выпрямитель; SA – переключатель; C – магазин емкостей;  
PK – разрядная камера; Ш – коаксиальный омический шунт; ДН – делитель напряжения; PS – осциллограф двухлучевой запоминающий

Убыстрение капелек воды в масле и их массовое движение в процессе воздействия поля приводит к росту тока до максимума. По мере слияния капель и их осаждения уменьшается их количество в эмульсии, уменьшается также свободный заряд, который несет каждая капля (ионы растворенной в воде соли) из-за его осаждения на электродах в момент касания, что объясняет дальнейший спад тока после выхода на максимум.

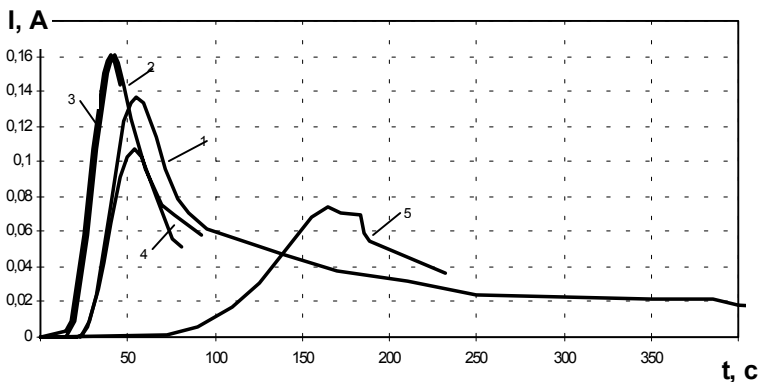


Рисунок 3 – Осциллограммы тока через промежуток, заполненный эмульсией, содержащей 15 % воды соленостью 10 % при приложении к электродам переменного (кривые 1-3) и постоянного (кривые 4,5) напряжения величиной 2 кВ

Небольшие по величине токи, протекающие в эмульсии, также подтверждают версию о конвективной их природе. Наряду с указанными выше особенностями протекания тока в эмульсии при воздействии постоянного или переменного (50 Гц) однородного электрического поля можно отметить следующие основные результаты данного исследования:

- характер протекания тока (наличие начальной паузы тока, участка быстрого его роста до максимума и последующего быстрого его спада до величины, равной примерно 1/3 его максимума, после которого спад тока выполаживается и выходит на какое-то, практически постоянное, значение) при приложении к эмульсии постоянного и переменного поля в качественном плане одинаков;
- процессы коагуляции водной фазы при воздействии переменного поля на эмульсию более эффективны, чем при воздействии постоянного поля, что выражается в существенно меньшей начальной паузе тока (рис. 3) и более низкой остаточной обводненностью эмульсии при одинаковых энергетических затратах (рис. 3, табл. опыты 1-5);
- наиболее оптимальным по энергозатратам и снижению обводненности эмульсии является время обработки, совпадающее с временем снижения тока в эмульсии до величины, равной 1/3 его максимального значения (рис. 3, кривые 1-3).

Последний результат послужил основанием для предпочтения переменного поля постоянному в дальнейших экспериментальных исследованиях. Наличие паузы тока в начале воздействия однородного поля, которое мы связываем с отсутствием избыточных зарядов на капельках воды в эмульсии и малой, из-за этого, начальной их подвижностью в электрическом поле, дали основание для исследования возможности использования воздействия ко-

ротких электрических импульсов высокой напряженности поля с целью предварительной подзарядки капель и их активации перед воздействием переменного поля по изложенной выше методике.

Результаты воздействия электрических полей на высокоустойчивые водонефтяные эмульсии

№ опыта	Параметры эмульсии		Параметры воздействия					Перем. поле	Результаты эксперимента				
			Импульсное поле										
	$O$ , %	$C_{NaCl}$ , %	$U_3$ , кВ	$C$ , пкФ	$W_3$ , Дж	$n$	$U$ , кВ	$I_{max}$ , А	$t_{нт}$ , с	$t_{омк}$ , с	$W_c$ , Дж	$O_1$ , %	
1	15	10	-	-	-	-	2~	0,136	0,2	400	28206	1,5	
2	15	10	-	-	-	-	2~	0,16	12	90	10120	0,75	
3	15	10	-	-	-	-	2~	0,16	20	52	4590	7	
4	15	10	-	-	-	-	2+	0,114	25	81	7580	2,5	
5	15	10	-	-	-	-	2+	0,073	73	235	13971	2,6	
6	25	15	-	-	-	-	2~	0,035	18	370	10544	2	
7	25	15	10	5100	0,255	50	2~	0,05	5	210	10855	1	
8	25	15	-	-	-	-	2~	0,03	60	130	1983	7,25	
9	25	15	10	5100	0,255	50	2~	0,08	5	130	8435	3	
10	25	15	-	-	-	-	2~	0,035	5	90	3180	6,25	
11	25	15	10	5100	0,255	50	2~	0,1	5	90	5386	3,5	
12	15	10	20	1250	0,2	32	2~	0,2	4	58	9870	3	
13	15	10	20	1250	0,2	16	2~	0,135	4	53	8271	4,25	
14	15	10	20	1250	0,2	8	2~	0,19	11	93	13825	2,5	
15	15	10	20	500	0,1	64	2~	0,164	3	77	9987	5	
16	15	10	20	500	0,1	32	2~	0,2	2	61	10802	4	
17	15	10	20	500	0,1	16	2~	0,2	4	61	9943	5,5	
18	15	10	20	500	0,1	8	2~	0,2	7	76	11890	3,5	
19	15	10	20	250	0,052	64	2~	0,154	5	103	15819	3,5	
20	15	10	20	250	0,052	32	2~	0,166	4	80	12513	1,5	
21	15	10	20	250	0,052	16	2~	0,17	4	87	12484	3	
22	15	10	16,3	1500	0,2	32	2~	0,19	3	81	11630	2,5	
23	15	10	11,54	3000	0,2	32	2~	0,25	3	53	11209	2	
24	15	10	8,16	6000	0,2	32	2~	0,19	2	60	10422	2,75	
25	15	10	11,56	3000	0,2	32	1~	0,12	8	207	11567	1	
26	15	10	20	500	0,1	32	1~	0,082	5	225	8891	3	
27	15	10	20	500	0,1	32	-	-	-	-	-	11,25	
28	15	1	20	500	0,1	32	1~	0,06	6	219	7435	11	
29	15	10	20	500	0,1	32	1~	0,094	45	683	27414	1,7	
30	15	10	20	1000	0,2	600	1~	0,16	10	160	8142	5,5	

Экспериментальное исследование комбинированного воздействия импульсного и переменного электрических полей на эмульсию осуществлялось в той же рабочей камере, в которой исследовалось воздействие каждого из полей в отдельности (рис. 1). Экспериментальный стенд включал электрические схемы для воздействия импульсным (рис. 4) и переменным (рис. 2) электрическими полями. В каждом опыте рабочая камера, заполненная исследуемой эмульсией, подключалась попеременно сначала к первой, а затем ко второй схеме. Минимальное время, которое затрачивалось на механическое переключение рабочей камеры из одной схемы в другую, составляло от 1 до 2 минут.

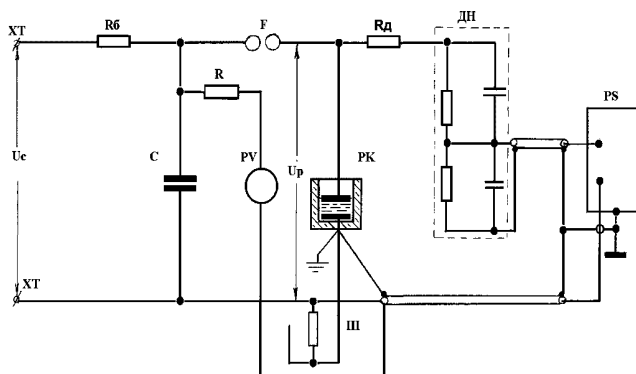


Рисунок 4 – Электрическая схема экспериментальной установки для воздействия на эмульсию импульсным полем:

$U_c$  – напряжение источника питания;  $R_b$  – балластный резистор; F – разрядник;  
 C – рабочая емкость;  $U_p$  – рабочее напряжение; R – токоограничивающий резистор;  
 PV – киловольтметр; Ш – коаксиальный шунт; ДН – делитель напряжения;  
 ПК – рабочая камера; PS – осциллограф;  $R_d$  – демпфирующий резистор

Исходя из основной идеи активирующей роли предварительного воздействия импульсного поля на глобулы воды в эмульсии, при таком комбинированном подходе, энергия в каждом импульсе и количество импульсов были существенно снижены по сравнению со случаем прямого воздействия импульсного поля на процессы коагуляции водной фазы. При этом параметры переменного поля сохранялись прежними.

Первые же опыты (табл., опыты 6-12) показали, что предварительная активация эмульсии импульсным полем существенно сократила длительность начальной паузы тока при последующем воздействии переменного поля с нескольких десятков до нескольких секунд. Для эмульсии обводненностью 25 % и соленостью водной фазы 15 % по результатам этих опытов очевидно влияние предварительной ее активации высоковольтными импульсами на остаточную ее обводненность после обработки. После комбинированного

воздействия остаточная обводненность эмульсии примерно в 2 раза ниже, чем после воздействия только переменного поля.

Экспериментально установлено, что с увеличением времени между воздействием импульсным полем и последующим воздействием переменным полем до двух часов эффект активации эмульсии постепенно исчезает.

После длительной паузы между двумя воздействиями эмульсия ведет себя также, как и при воздействии только переменного поля. В полной мере эффект активации исследуемых эмульсий сохранялся примерно в течение 10 минут. Этот результат, безусловно, имеет практическое значение и должен быть учтен в рекомендациях по использованию комбинированного способа воздействия на процессы коагуляции водной фазы в эмульсиях. Во всех экспериментах, приведенных в таблице, пауза между воздействием двух полей составляла примерно 2 минуты. Проверочный опыт по воздействию только импульсного поля с используемыми здесь параметрами (опыт 27) показал, что это даже при большом количестве импульсов (600) не приводит к существенному снижению остаточной обводненности эмульсии по сравнению с исходной.

В дальнейших исследованиях ставилась задача определить влияние параметров импульсного поля на эффективность активации водных глобул в эмульсии и процессов коагуляции водной фазы. Поскольку первые же опыты оправдали наши ожидания и процессы активации глобул воды в эмульсии достаточно эффективны при очень низкой запасаемой энергии в импульсах, то в дальнейших опытах она варьировалась в небольшом интервале от 0,05 до 0,25 Дж. Также в небольшом интервале варьировалось число импульсов от 6 до 24. Изменение зарядного напряжения от 8 до 20 кВ осуществлялось при постоянной запасенной энергии  $W_z = 0,2$  Дж за счет одновременного изменения емкости накопительного конденсатора. Анализ этих экспериментальных исследований (табл., опыты 13-25) позволяют констатировать, что существует порог по количеству импульсов, который обеспечивает активацию основной массы глобул воды в эмульсии. Для исследуемой эмульсии этот порог лежит в пределах от 10 до 20 импульсов. Уменьшение количества действующих импульсов ниже этого порога снижает эффект активации эмульсии, что видно по возросшему времени начальной паузы тока при последующем воздействии переменного поля. Увеличение числа действующих импульсов выше этого порога увеличения эффекта активации уже не дает. Очевидно, это связано с тем, что процессы активации глобул воды в эмульсии выходят на насыщение и связано это с конечным числом свободных зарядов (ионов) в глобулах воды, которые могут под воздействием импульсного поля перераспределяться между ними. Возможно, для каждой эмульсии существует более точное значение этого порога по числу импульсов, чем указанный выше интервал, однако его уточнение требует уже статистических исследований. Учитывая малое значение энергии, затрачиваемое в каждом импульсе, и незначительное количество импульсов, которое необхо-

димо для активации эмульсии, точное значение этого порога для практических целей не столь важно.

Анализ представленных в таблице экспериментальных результатов (опыты 12-24) показывают, что такие параметры импульса, как запасенная энергия, зарядное напряжение, длительность слабо влияют на процесс активации эмульсии. Ни длительность начальной паузы переменного тока, ни выделившаяся в эмульсии энергия при последующем воздействии переменного поля не проявляют какой-либо зависимости от параметров предварительного воздействия импульсов и изменяются очень слабо. Очень слабо изменяется при этом и остаточная обводненность эмульсии после комбинированной обработки. Если эта слабая зависимость и есть, то для ее выявления также необходимы статистические исследования. Учитывая сложность и трудоемкость экспериментов и анализа их результатов, проведение статистических исследований не представлялось возможным и по высказанным выше соображениям не имело особого смысла.

Снижение приложенного к эмульсии напряжения переменного поля с 2 до 1 кВ (табл., опыты 16 и 26, 23 и 25) и, соответственно, напряженности электрического поля с 1 до 0,5 кВ/см привело к незначительному изменению длительности начальной паузы тока, выделившейся в эмульсии энергии и остаточной ее обводненности. Этот результат имеет положительное значение, поскольку в эмульсиях обводненностью 15 % и более и соленостью водной фазы 10 % и более при напряженностях переменного поля 1 кВ/см в некоторых случаях на осциллограммах тока регистрируются частичные разряды.

Исходя из вышеизложенных механизмов протекания процессов в эмульсии под воздействием импульсного и однородного переменного электрических полей, можно ожидать, что при большей концентрации солей процессы коагуляции водной фазы в эмульсии должны протекать более эффективно. Опыты с эмульсиями одинаковой обводненностью 15 %, но разной соленостью 10 и 1 % (табл., опыты 26,28) подтвердили эти прогнозы. Остаточная обводненность эмульсии исходной соленостью 10 % после обработки составила 3 %, в то время, как остаточная обводненность эмульсии исходной соленостью 1 % после такой же обработки составила 11 %. Этот результат говорит о том, что комбинированным воздействием электрическими полями можно успешно обезвоживать и обессоливать сильно обводненные и сильно засоленные ловушечные нефти.

**Список литературы:** 1. Алмаев Р.Х., Плотников И.Г., Назмиев И.М., Князев В.И. Щелочно-полимерное воздействие на пласт в условиях терригенных коллекторов Башкортостана // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 7. – С. 26-30. 2. Рузин Л.М., Урсегов С.О. Развитие тепловых методов разработки пермо-карбоневой залежи Усинского месторождения // Нефтяное хозяйство. – 2005. – № 2. – С. 82-84. 3. Тарасов М.Ю. Основные технологические решения, используемые при проектировании объектов подготовки нефти на месторождениях Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 7. – С. 26-30. 4. Клейтон В. Эмульсии / Пер. с англ. Н.А. Плетеновой, К.А. Попеловой; Под ред. акад. П.А. Ребиндера. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 680 с.

*Поступила в редколлегию 22.10.2007*

**А.И.КОРОБКО**, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»

## **ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ТИПА «КАЛИБРАТОР» НА КОНИЧЕСКОЙ ЛИНИИ**

В статті наведено опис генератора типу «Калібратор» для створення надпотужних імпульсних електромагнітних випромінювань наносекундного та субнаносекундного діапазонів з використанням у якості системи полеутворювання конічної лінії, узгодженої на кінці.

In the paper the description of the generator such as «Kalybrator» for creation of super-power pulse electromagnetic fields nanosecond and sub nanosecond ranges is resulted. As system which forms a field, the conic line which is coordinated on the end is used.

**Введение.** В настоящее время проблема обеспечения стойкости и защищенности электро- и радиотехнических устройств и систем к поражающему воздействию мощных электромагнитных факторов естественного и искусственного происхождения [1-3] является очень актуальной. В процессе решения данной проблемы используются экспериментальные методы исследования, что порождает необходимость разработки и создания уникальных сверхмощных генераторов для создания импульсных электромагнитных полей наносекундного и субнаносекундного диапазонов. Кроме этого, такие генераторы необходимы для исследования метрологических характеристик импульсных измерительных систем наносекундного и субнаносекундного диапазонов.

**Постановка задачи.** Принципиально генераторы для создания сверхмощного импульсного электромагнитного поля наносекундного и субнаносекундного диапазонов могут быть реализованы в двух видах: генераторы «свободных» электромагнитных волн и генераторы «связанных» электромагнитных волн.

Как следует из названия, генераторы первого типа, генерируют импульсное электромагнитное поле в свободном пространстве и имеют в своем составе импульсный источник питания и систему полеобразования антенного типа, которая преобразует импульсы напряжения и тока в импульсное электромагнитное поле.

Генераторы второго типа генерируют импульсное электромагнитное поле в ограниченном объеме системы полеобразования (как правило, это двух- или более связанные системы в виде конических, цилиндрических линий или их сочетаний). При этом для устранения отражений от конца системы полеобразования, имеющей конечную длину, используется согласующее оконечное устройство.



Генераторы второго типа существенно превосходят по величине максимальной импульсной мощности генерируемого импульсного электромагнитного поля генераторы первого типа, так как в первом случае рабочий объем системы полеобразования находится вне ее электродов (антенны), а во втором случае – между ними.

При этом, естественно, резко разнятся и величины импульсных мощностей электромагнитных полей в рабочих объемах (при одинаковых импульсных источниках питания).

Это различие увеличивается еще более существенно, если принять во внимание тот факт, что рабочий объем генераторов первого типа находится, как правило, в дальней зоне антенной системы (системы полеобразования), что вызвано необходимостью получения в рабочем объеме импульсных электрических и магнитных полей, соответствующих сферической  $T$  – волне.

Кроме этого генераторы первого и второго типов существенно отличаются по виду полевой переходной характеристики системы полеобразования (реакции системы полеобразования в виде электрических и магнитных составляющих импульсных электромагнитных полей на импульсы напряжения и тока в виде единичного перепада, генерируемые импульсным источником питания).

Так полевая переходная характеристика генераторов «свободных» волн существенно отличается по своему виду от функции  $l(t)$ , что затрудняет их использование для метрологических целей и для проведения испытаний [4].

Вид полевой переходной характеристика генераторов «связанных» волн может быть приближен к виду  $l(t)$  в максимальной степени, так как двух- или более связанные системы полеобразования в виде конических, цилиндрических линий или их сочетания потенциально могут обеспечить адекватное преобразование импульсов напряжения и тока, генерируемых импульсным источником питания, в импульсное электромагнитное поле в теоретически бесконечном частотном диапазоне.

В описываемом генераторе «Калибратор» была использована система полеобразования на основе конической линии, так как только она из всего многообразия двух и более связанных систем в полной мере теоретически удовлетворяет всем требованиям [5,6].

Система полеобразования на основе конической линии имеет следующие преимущества по сравнению с другими системами [5]:

- обладает постоянным и чисто активным входным импедансом, равным ее волновому сопротивлению, в бесконечном частотном диапазоне;
- основная мода колебаний – сферическая  $T$  – волна;
- в данной системе отсутствуют распространяющиеся без затухания волны высших типов;
- теоретически полевая переходная характеристика данной системы

представляет собой функцию  $I(t)$ .

По сравнению с другими системами система на основе конической линии обладает рядом недостатков:

- в рабочем объеме системы присутствуют все три составляющие импульсного электромагнитного поля;
- максимальные значения электрических и магнитных составляющих импульсного электромагнитного поля затухают по закону  $1/r$  вдоль продольной оси системы полеобразования.

Однако данные недостатки не являются определяющими, так как их влияние было сведено к допустимому минимуму рациональным выбором конструктивных параметров описываемого генератора.

Общий вид импульсного электромагнитного генератора типа «Калибратор» представлен на рисунке.



Общий вид электромагнитного генератора типа «Калибратор»

Импульсный генератор состоит из следующих основных частей: импульсный источник питания; система полеобразования; оконечное устройство.

В качестве импульсного источника питания был использован волновой генератор импульсов напряжения со следующими основными характеристиками.

1. Максимальное значение импульсов напряжения при работе на активную нагрузку величиной 150 Ом: регулируется от 10 кВ до 110 кВ.
2. Длительность фронта импульса напряжения и тока при работе на активную нагрузку величиной 150 Ом на уровнях 0,1 – 0,9 максимального значения: регулируется от 100 пс до 50 нс.
3. Длительность импульсов напряжения и тока на уровне 0,5 макси-

мального значения: регулируется от 50 нс до 1 мкс.

4. Максимальный уровень наложенных колебаний на столе импульсов напряжения и тока: не более 2 %.
5. Режимы работы: одиночные импульсы (один импульс в секунду) и частотный (50 Гц).
6. Тип коммутаторов: газонаполненные разрядники под давлением.

В качестве системы полеобразования была использована симметричная двухэлектродная коническая линия со следующими основными характеристиками.

1. Время нарастания полевой переходной характеристики по уровням 0,1 - 0,9 максимального значения: не более 65 пс.
2. Волновое сопротивление: 150 Ом + 3 Ом.
3. Размеры конической линии: 3,5 м x 1,2 м x 1,2 м.
4. Максимальная величина паразитных составляющих электромагнитного поля в рабочем объеме: не более 5 %.

Оконечное устройство представляет собой пространственно распределенную резистивную систему со следующими характеристиками.

1. Активная составляющая входного импеданса: 150 Ом + 1 Ом.
2. Модуль коэффициента отражения (для электрической и магнитной составляющих): не более 3 %.

Генератор типа «Калибратор» позволяет осуществлять генерирование импульсных электромагнитного поля в рабочем объеме системы полеобразования со следующими амплитудно-временными характеристиками.

1. Тип генерируемого электромагнитного поля: сферическая Т-волна с радиусом кривизны, численно равным расстояния от точки наблюдения до импульсного источника питания.
2. Рабочий объем: усеченная пирамида с размерами оснований 0,1 м x 0,1 м (узкое сечение), 1 м x 1 м (широкое сечение) и расстоянием между основаниями 3 м.
3. Максимальное значение вертикальной составляющей импульсов электрического поля в узком сечении рабочего объема: 100 кВ/м – 1000 кВ/м.
4. Максимальное значение горизонтальной составляющей импульсов магнитного поля в узком сечении рабочего объема: 266 А/м – 2660 А/м.
5. Максимальное значение вертикальной составляющей импульсов электрического поля в широком сечении рабочего объема: 10 кВ/м – 100 кВ/м.
6. Максимальное значение горизонтальной составляющей импульсов магнитного поля в широком сечении рабочего объема: 26 А/м – 266 А/м.
7. Величина паразитных составляющих электромагнитного поля в лю-

- бой точке рабочего объема: не более 5 % от рабочих составляющих.
8. Величина коэффициента отражения (по электрическому и магнитному полям) в любой точке рабочего объема: не более 3 %.
  9. Длительность фронта импульсов электромагнитного поля на уровнях 0,1 - 0,9 максимального значения в любой точке рабочего объема (для электрической и магнитной составляющих): от 125 пс до 50 нс.
  10. Длительность импульсов электромагнитного поля на уровне 0,5 максимального значения в любой точке рабочего объема (для электрической и магнитной составляющих): от 50 нс до 1 мкс.
  11. Частота следования импульсов: 50 Гц и режим одиночных импульсов (один импульс в секунду).
  12. Максимальный уровень наложенных колебаний на столе импульсов электрического и магнитного поля: не более 2 %.

**Заключение.** Описанный генератор импульсного электромагнитного поля типа «Калибратор» с использованием симметричной конической линии по комплексу своих основных характеристик позволяет:

- проводить определение метрологических характеристик импульсных измерителей электромагнитного поля наносекундного и субнаносекундного диапазонов;
- проводить экспериментальное исследование по определению стойкости к сверхмощным электромагнитным импульсам наносекундного и субнаносекундного диапазонов элементной базы а также электро- и радиотехнических устройств и систем с соответствующими габаритными размерами.

**Список литературы:** 1. *Рикетс Л.У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж.* Электромагнитный импульс и методы защиты. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с. 2. *Мырова Л.О., Чепиженко Л.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с. 3. *Коробко А.И., Коробко З.И.* Реальные уровни стойкости различной радиоэлектронной аппаратуры к воздействию импульсного электромагнитного излучения СВЧ-диапазона // Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», Харьков. – 2005. – Т. 6. – С. 96. 4. *C.E.Baum, J.P.O'Loughlin, I.D.Smith, R.Ates, J.Fockler, D.McLemore, M.D.Abdalla, M.C.Skip.* JOLT: A Highly Directive, Very Intensive, Impulse-Like Radiator // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – Vol. 92, № 7. – July 2004. – PP. 1096-1109. 5. *Коробко А.И., Коробко З.И.* Решение задачи распространения Т-волны в конической линии // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: «Энергетика и преобразовательная техника». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – № 1. – С. 109-111. 6. *Коробко А.И.* Анализ волн высших типов в цилиндрической линии имитаторов электромагнитных импульсов // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: «Энергетика и преобразовательная техника». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – № 1. – С. 116-121.

*Поступила в редколлегию 19.11.2007.*

**А.И.КОРОБКО**, канд.техн. наук, НТУ «ХПИ»

## **ПРИНУДИТЕЛЬНЫЙ ОСТАНОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ АВТОМОБИЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ КОНТАКТНОГО ТИПА**

Розглянуто питання щодо розробки, створення та експериментальних досліджень портативної та стаціонарної систем контактного типу для примусової зупинки двигунів внутрішнього згорання автомобілів на основі наносекундних імпульсних генераторів.

In the paper questions of development, creation and experimental researches of portable and stationary systems of contact type with use nanoseconds pulse generators for compulsory stops of internal combustion engines of cars are considered.

**Введение.** Для правоохранительных органов актуальной является задача принудительного останова движущегося автомобиля без применения огнестрельных средств и других методов летального воздействия. Данная задача решалась в рамках совместного проекта с участием НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» и американской фирмы «Джейкор».

**Постановка задачи.** В процессе выполнения этих работ были использованы основные положения концепции защиты от мощных электромагнитных воздействий радиоэлектронных систем, расположенных на борту летательных аппаратов (самолета), изложенные в [1].

В этом аспекте показателен следующий эксперимент. С помощью стороннего источника по фюзеляжу самолета пропускается импульс тока наносекундного диапазона с максимальной величиной около 10 кА. При этом за счет несовершенства металлического фюзеляжа как электромагнитного экрана по экранирующей оболочке коаксиального кабеля, расположенного внутри фюзеляжа и соединенной с ним, протекает импульсный ток с максимальной величиной порядка 1 кА.

Протекание этого тока за счет несовершенства экранирующей оболочки вызывает протекание тока порядка 1А по сигнальному проводу расположенному внутри экранирующей оболочки. Этот ток вызывает появление помехи на конце кабеля в виде импульсов напряжения с максимальной величиной, численно равной произведению максимальной величины импульса тока на входной импеданс радиотехнического устройства, подсоединенного к концу кабеля. Для типовых значений импеданса в диапазоне (50 – 300) Ом, характерных для коаксиальных кабелей, максимальное значение импульса напряжения помехи составляет величину (50 – 300) В.

Такая величина помехи является опасной для полупроводниковых приборов, входящих в состав радиотехнических систем самолета [2].

Проведенный сравнительный анализ помехозащищенности и стойкости к мощным электромагнитным воздействиям радиотехнических систем самолета и автомобиля показал, что уровень стойкости последних является существенно более низким.

Это позволило предположить, что при протекании импульсного тока наносекундного диапазона с максимальной величиной порядка 10 кА по металлическому корпусу автомобиля можно ожидать необратимый выход из строя основных радиоэлектронных систем автомобиля, которые контролируют работу его двигателя: а именно электронной системы зажигания и бортового компьютера.

На основе результатов вышеприведенного анализа были разработаны, созданы и испытаны два типа высоковольтных наносекундных генератора контактного типа:

- контактная портативная система «Автоарестор – П»;
- контактная стационарная система «Автоарестор – С».

Указанные системы предназначены для принудительного останова двигателей внутреннего сгорания стоящих или движущихся автомобилей путем необратимого выведения из строя электронной системы зажигания и бортового компьютера останавливаемого автомобиля.

Основное отличие между этими системами заключается в месте подключения указанных систем к металлическим деталям останавливаемого автомобиля.

Контактная портативная система «Автоарестор – П» в момент наезда останавливаемого автомобиля подводит импульсы тока к точкам днища автомобиля в передней его части, которых касаются электроды системы (см. рис. 1).

Основные технические характеристики контактной портативной системы «Автоарестор - П».

1. Тип импульсного источника питания – волновой генератор импульсов напряжения, генерирующий одиночные импульсы.
2. Максимальная величина импульсов напряжения – 120 кВ.
3. Тип емкостного накопителя – керамические конденсаторы K15-10.
4. Величина длительности фронта импульса напряжения (при работе на активную нагрузку 10 Ом) – 3,5 нс.
5. Запуск импульсного источника питания – автоматический (при наезде останавливаемого автомобиля на систему).
6. Габаритные размеры (без источника питания и электродной системы) – 500 x 500 x 100 мм.
7. Масса – 32 кг.
8. Максимальная скорость останавливаемого автомобиля – до 250 км/час.



Рисунок 1 – Контактная портативная система «Автоарестор – П»

Контактная стационарная система «Автоарестор – С» в момент наезда останавливаемого автомобиля подводит импульсы напряжения и тока к точке на крыше останавливаемого автомобиля и к плоскому сетчатому электроду, расположенному на поверхности дороги (см. рис. 2).

При этом происходит электрический пробой по поверхности шины останавливаемого автомобиля (которая изготовлена из диэлектрического материала) и путь тока таким образом замыкается.



Рисунок 2 – Контактная стационарная система «Автоарестор – С»

Основные технические характеристики контактной портативной системы «Автоарестор – С».

1. Тип импульсного источника питания – волновой генератор импульсов напряжения, генерирующий одиночные импульсы и серии импульсов.
2. Максимальная величина импульсов напряжения – 640 кВ.
3. Тип емкостного накопителя – керамические конденсаторы K15-10.
4. Величина длительности фронта импульса напряжения (при работе на активную нагрузку 10 Ом) – 4,5 нс.
5. Частота следования импульсов – 8 Гц.
6. Габаритные размеры (без источника питания и электродной системы) – 1200 x 500 x 1600 мм.
7. Масса – 120 кг.
8. Максимальная скорость останавливаемого автомобиля – до 250 км/час.

Системы «Автоарестор – П» и «Автоарестор – С» были экспериментально опробованы и испытаны на легковом автомобиле «Шевролет – Кавалер» 1986 г. выпуска на испытательно-исследовательском полигоне НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». При этом было проведено 6 испытательных заездов для испытаний системы «Автоарестор – П» и 5 испытательных заездов для испытаний системы «Автоарестор – С».

Для обеспечения безопасности дорожного движения максимальная скорость автомобиля была ограничена величиной около 120 км/час. За рулем испытываемого автомобиля в момент электрических воздействий находился водитель-испытатель в летней одежде. Дополнительные средства защиты для предотвращения электрического поражения водителя-испытателя от «шаговой» разности потенциалов не применялись.

В процессе испытаний движущийся автомобиль наезжал на электродные системы, при этом происходил электрический разряд импульсного источника питания на корпус автомобиля, двигатель сразу останавливался (после первого импульса), а автомобиль двигался далее только по инерции. Результаты всех 11-ти испытательных заездов: выход из строя электронной системы зажигания и бортового компьютера автомобиля.

**Заключение.** Данные контактные автомобилеостанавливающие системы можно рекомендовать для оснащения правоохранительных органов.

**Список литературы:** 1. *Рикетс Л.В., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж.* Электромагнитный импульс и методы защиты. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с. 2. *Мырова Л.О., Чепиженко Л.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с. 3. *Korobko A.I.* Final Report under the Agreement between JAYCOR and NIPKI «MOLNIYA» of October 10, 1995 «JAYCOR AUTO ARRESTOR PROGRAM».

*Поступила в редколлегию 19.11.2007.*



**С.Г.ПОКЛОНОВ**, канд.техн.наук; **В.Г.ЖЕКУЛ**, канд.техн.наук;  
**Э.И.ТАФТАЙ**; **И.С.ШВЕЦ**, канд.физ.-мат.наук; Институт импульсных  
процессов и технологий НАНУ, Николаев

## **КАЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ КОЛЛЕКТИВА ГЛОБУЛ ВОДЫ В НЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

У статті наведені результати експериментальних досліджень поведінки колективу водних глобул у нафтових емульсіях при впливі електричних полів, запропонована якісна модель зміни питомої електропровідності емульсії впродовж часу.

In article the results of experimental researches of behaviors of collective water drops in petroleum emulsions at influence an electrical field are given, the qualitative model of change specific conduction of emulsions in time is offered.

**Введение.** Воздействие электрических полей на водомасленные эмульсии (ВМЭ) и водонефтяные эмульсии (ВНЭ) для целей обезвоживания и очистки с содержанием водной и твердой фазы в эмульсиях не более 2 % широко используется в промышленности [1,2,3]. При превышении указанных значений загрязнений технологическое оборудование теряет производительность и возникают аварийные режимы его работы [4,5].

Однако существует широкий класс эмульсий, так называемые «ловящечные нефти», содержащий от 10 до 80 % воды и от 2 до 6 % механических примесей, это высокообводненные, высокоустойчивые и засоленные эмульсии, возникающие в процессе нефтедобычи и подготовки товарной нефти.

Очевидно, что разработка подходов к проблеме воздействия электрических полей на высокообводненные и высокоустойчивые нефтяные эмульсии с целью уменьшения потерь нефти представляет интерес, тем более что количество ВНЭ, попадающих в отходы и загрязняющих окружающую среду, может составлять до 1,6 % от добываемого количества нефти [5].

**Целью работы** явилось более детальное изучение элементарных процессов в межэлектродном промежутке, заполненном водонефтяной эмульсией, поскольку багажа представлений о них, изложенных в литературе, недостаточно для выработки рабочей гипотезы о поведении коллектива глобул (капель) воды в высокообводненных и засоленных ВНЭ при воздействии постоянного, переменного и импульсного полей.

**Методика эксперимента.** Особенность первого этапа исследований состояла в визуальном наблюдении за поведением отдельных глобул воды, а

также коллектива глобул при приложении постоянного, переменного и импульсного полей различного типа и напряженности. Для этого была взята кювета из стекла размерами 70×50×100 мм, в которой вертикально помещались плоские электроды. Электрическая схема позволяла подавать на исследуемый промежуток постоянное, переменное и импульсное напряжение величин от 2 до 4,5 кВ. Реализация импульсного режима производилась посредством механического ключа с регулировкой времени воздействия от 20 мс до десятков секунд. Фоторегистрация процессов производилась с помощью WEB-камеры «Genius».

Учитывая сложности проведения исследований, связанных с непрозрачностью водонефтяных эмульсий, в качестве дисперсной среды использовалось чистое прозрачное трансформаторное масло марки Т – 1500, ГОСТ 982–80 ( $\gamma_m = 0,895 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_m = 10^{11} \text{ Ом м}$ ), а в качестве дисперсной фазы – смесь этилового спирта с дистиллятом. Для лучшей визуализации смесь подкрашивалась чернилами, а плотность смеси подбиралась близкой к плотности трансформаторного масла, чтобы капли «зависали» в масле.

На втором этапе воздействию различных электрических полей подвергались натуральные высокоустойчивые и высокообводненные ВНЭ.

**Основная часть: 1. Постоянное электрическое поле.** В первых наблюдениях исследовано поведение небольшого количества глобул воды в масле. В кювете было реализовано однородное постоянное электрическое поле напряженностью  $E_0 = 8,3 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ . На рис. 1 представлены наиболее информативные кадры из фотосъемки процесса с указанием текущего времени процесса.

Как следует из рис. 1, и в соответствии с литературными данными [6], глобула воды, помещенная в масло под влиянием поверхностного натяжения приобретает почти сферическую форму, при малых размерах достаточно близкую к форме шара. Такая форма обуславливается капиллярным давлением изгиба, возникающим под воздействием сил поверхностного натяжения и направленным от периферийного слоя капельки вовнутрь ее. Это давление определяется формулой [7]:

$$p_\sigma = 2\sigma/a, \quad (1)$$

где  $p_\sigma$  – капиллярное давление изгиба, Па;

$\sigma$  – поверхностное натяжение на границе раздела фаз, Н/м;

$a$  – радиус капельки, м.

После приложения к межэлектродному промежутку постоянного электрического поля сферическая глобула воды поляризуется и вытягивается в эллипсоид вращения [7,8], внутри которого также возникает электрическое поле [9]. Поляризация глобулы имеет следующий механизм. Молекулы воды, представляя собой жесткие диполи со значительно смещенными центрами тяжести положительных и отрицательных зарядов, обладают большой

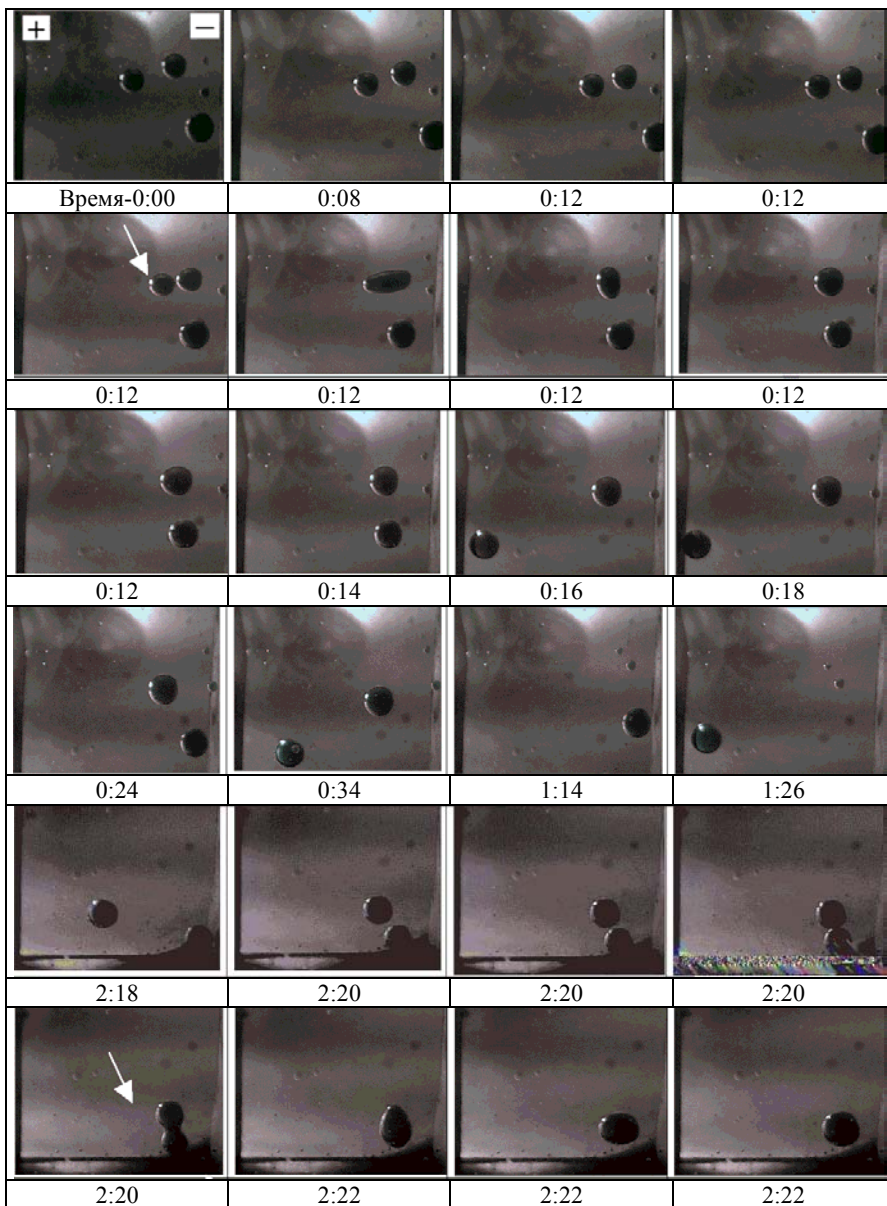


Рисунок 1 – Поведение капель в постоянном однородном электрическом поле  $E_0 = 8,3 \cdot 10^4$  В/м. (Длительность экспозиции кадра  $\sim 0,03$  с, стрелками указаны места слияния капель)

полярностью. Под влиянием внешнего поля молекулы воды стремятся повернуться таким образом, чтобы векторы их дипольных моментов совпали по направлению с силовыми линиями поля.

Эта ориентация тем более полная, чем сильнее электрическое поле, и чем слабее тепловое движение молекул. Внутри объема глобулы вода остается электронейтральной благодаря взаимной компенсации различных по знаку зарядов соседних диполей. Однако, на противоположных участках поверхности глобулы, из-за существенной малости дипольного момента молекул масла по сравнению с дипольным моментом молекул воды, возникает скопление избыточных зарядов – отрицательных на входе силовых линий внешнего поля, положительных – на выходе. Время установления поляризационных эффектов в глобулах воды составляет порядка  $10^{-10}$  с. Таким образом, глобулу воды в целом можно рассматривать как большой упругий диполь, момент которого увеличивается с повышением напряженности электрического поля. При этом силы поля, действующие на противоположные заряды диполя, равны по величине и направлены в противоположные стороны. Они стремятся увеличить расстояние между разноименными поляризационными зарядами, приводя этим самым к вытягиванию глобулы вдоль силовых линий поля. В итоге совместного воздействия сил поверхностного натяжения и сил поля глобула и приобретает форму вытянутого эллипсоида вращения, большая полуось которого расположена вдоль линий поля. Чем выше напряженность электрического поля, тем более вытянутой становится глобула, а при достаточно высокой напряженности поля силы, вытягивающие глобулу, становятся настолько большими, что в состоянии разорвать ее, преодолев силы поверхностного натяжения.

Как следует из рис. 1 напряженность поля в опыте недостаточна для видимого изменения формы глобул, однако поляризация их происходит и это приводит к тому, что глобулы, находящиеся вблизи друг от друга, притягиваются и сливаются.

Сила, с которой взаимодействуют две поляризованные глобулы одинакового размера определяется соотношением [10]

$$F = k \frac{D^6 E_0^2}{l^4}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, В<sup>2</sup>;

$D$  – диаметр капель, м;

$E_0$  – напряженность внешнего электрического поля, В/м;

$l$  – расстояние между центрами капель, м.

Из выражения (2) следует, что при расстоянии между глобулами значительно превышающем их размеры, сила взаимодействия глобул уменьшается до нуля. Однако, если расстояние между каплями гораздо меньше их радиуса, сила притяжения резко возрастает.

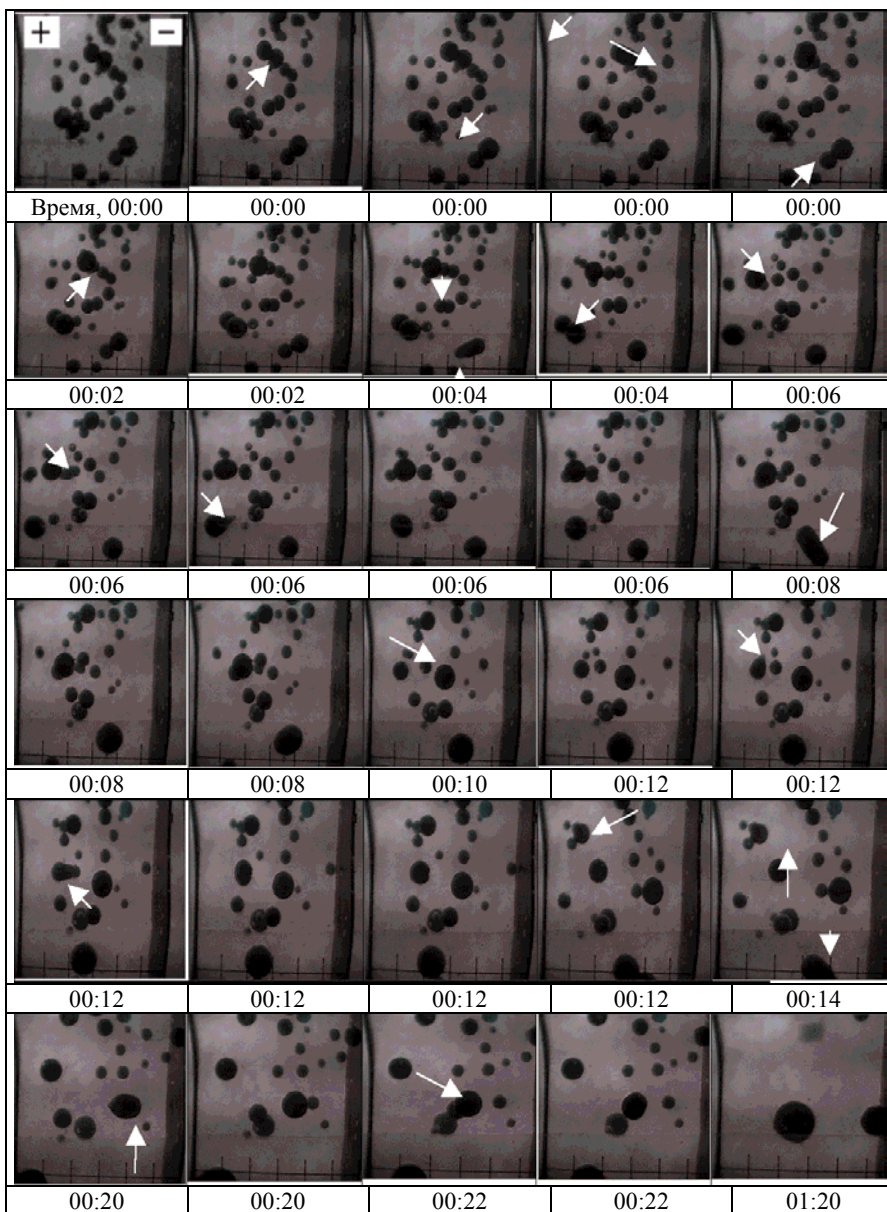


Рисунок 2 – Поведение каплей в постоянном однородном электрическом поле  $E_0=8,3 \cdot 10^4$  В/м. (Длительность экспозиции кадра  $\sim 0,03$  с, стрелками указаны места слияния каплей, цена деления шкалы внизу кадра  $-5$  мм)

Повышение концентрации глобул в единице объема (рис. 2) приводит к естественному их сближению и, в результате, к многочисленным слияниям.

В этом процессе имеет значение увеличение напряженности электрического поля самой глобулы, поскольку при значительном сближении глобул, на величину их поляризации оказывает влияние не только внешнее поле, но и поле смежной глобулы. В результате этого происходит взаимное усиление напряженностей поля на поверхности между ними. При сравнительно большом удалении одной глобулы от другой, когда расстояние между центрами превышает их диаметры в три раза и больше, взаимным дипольным влиянием можно пренебречь. При расстоянии между глобулами, превосходящим диаметр только на 10 %, напряженность поля на смежных частях их поверхностей возрастает почти на порядок, то есть дипольное поле становится гораздо больше внешнего поля. Роль внешнего поля в этом случае состоит в «первичной» поляризации капелек. Еще большее возрастание напряженности поля происходит при дальнейшем уменьшении расстояния между глобулами. Так, при расстоянии между центрами, превышающем их диаметр на 2,5 %, то есть при расстоянии между ближайшими точками поверхностей глобул, равным всего 5 % радиуса, и напряженности внешнего электрического поля от  $2 \cdot 10^5$  до  $3 \cdot 10^5$  В/м, напряженность поля вблизи смежных поверхностей глобул составляет от  $8 \cdot 10^6$  до  $12 \cdot 10^6$  В/м. Под воздействием таких напряженностей поля тонкий слой, разграничивающий две смежные глобулы, разрушается, и они мгновенно сливаются [11]. Характерной особенностью этих опытов является наличие перемещения глобул в однородном поле. Есть все основания утверждать, что первоначально глобулы не несут на себе избыточного заряда, поскольку длительное время от начала приложения поля к межэлектродному промежутку глобулы остаются неподвижными.

Это утверждение основано на том факте, что электрическое поле взаимодействует только с заряженными частицами, вызывая их перемещение вдоль силовых линий. Лишь спустя некоторое время глобулы начинают движение, в нашем случае, преимущественно к положительному (высоковольтному) электроду, причем процесс этот носит все ускоряющийся характер. Этот факт может свидетельствовать только о том, что глобулы постепенно накапливают на себе избыточный заряд. Относительно механизмов появления избыточного заряда на глобулах воды в литературных источниках обсуждается, пожалуй, единственный – оседание ионов, присутствующих в нефтепродуктах. Так, в число неуглеводородных компонентов трансформаторного масла входят асфальто-смолистые органические соединения, нафтеновые кислоты, эфиры, спирты и соединения, содержащие металлы, которые могут быть носителями тока в межэлектродном промежутке [12]. Однако, следует отметить, что слияние двух соседних глобул в первый момент включения поля не приводит к появлению избыточного заряда на вновь образованной глобуле, поскольку она остается неподвижной в приложенном поле.

Очевидно, что избыточный заряд глобулы достигает своего максимального значения в момент контакта глобулы с одним из электродов. Величина приобретаемого ею заряда пропорциональна напряженности электрического поля и квадрату радиуса кривизны контактирующей с электродом поверхности капельки.

Как только глобула воды оторвется от электрода, заряд с нее начинает стекать благодаря проводимости окружающей ее среды. Величина постоянной времени стекания заряда  $\tau$  обратно пропорциональна проводимости среды. Оценки, приведенные в литературе, дают для светлых нефтепродуктов значение  $\tau \approx 2$  с, а для нефти наибольшая величина  $\tau \approx 1,7 \cdot 10^{-2}$  с. Из этой оценки делается вывод о неэффективности дополнительной зарядки глобул воды для обезвоживания нефти.

В результате приобретения дополнительного заряда глобула воды начинает двигаться от электрода в противоположном направлении. Причем скорость этого движения значительно выше скорости до первичного контакта с электродом. Скорость движения такой капельки пропорциональна ее первоначальному радиусу и квадрату напряженности внешнего электрического поля. Параметры движения проводящей частицы с учетом вязкости среды, например, можно оценивать по соотношениям [3].

При движении глобулы сближаются, сталкиваются, в результате чего происходит их слияние в одну или несколько больших, которые осаждаются на дно кюветы.

Повышение напряженности электрического поля до значения  $E_0 = 14 \cdot 10^4$  В/м приводит к повышению интенсивности процессов коагуляции глобул (рис. 3). Так, сразу после включения поля близлежащие глобулы сливаются, а образовавшиеся укрупненные глобулы через некоторое время начинают перемещаться в межэлектродном пространстве и уже к 16 секунде процесс практически закончивается. Однако результирующая глобула не покидает межэлектродное пространство, а вовлекается в многократное движение между электродами. Причем процесс отрыва ее от электрода сопровождается таким вытягиванием, что от нее отрывается частичка, обладающая, по-видимому, почти всем зарядом исходной глобулы, поскольку движется она к противозлектроду с большой скоростью, практически «влипая» в него. Есть случаи, когда деление зарядов происходит таким образом, что исходная глобула приобретает даже отрицательный заряд и начинает возвратное движение к положительному электроду. Большой же частью исходная глобула, продолжая движение к противозлектроду, сталкивается с движущейся навстречу ранее оторвавшейся частичкой и возвращается назад. Очевидно, что подобные явления являются энергетически затратным.

**2. Импульсное электрическое поле.** Дальнейшее повышение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке до значений

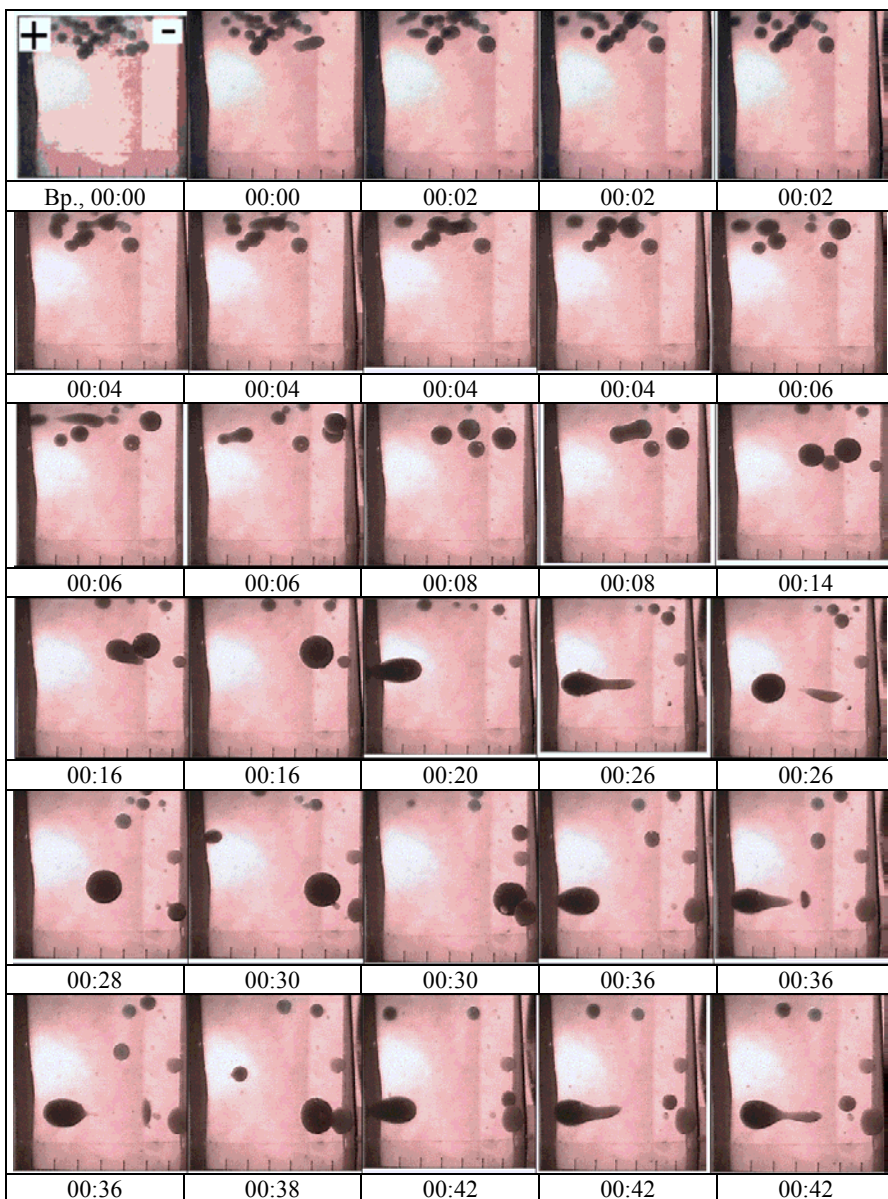


Рисунок 3 – Поведение капле в постоянном однородном электрическом поле  $E_0 = 14 \cdot 10^4$  В/м. (Длительность экспозиции кадра  $\sim 0,03$  с, цена деления шкалы внизу кадра – 5 мм)



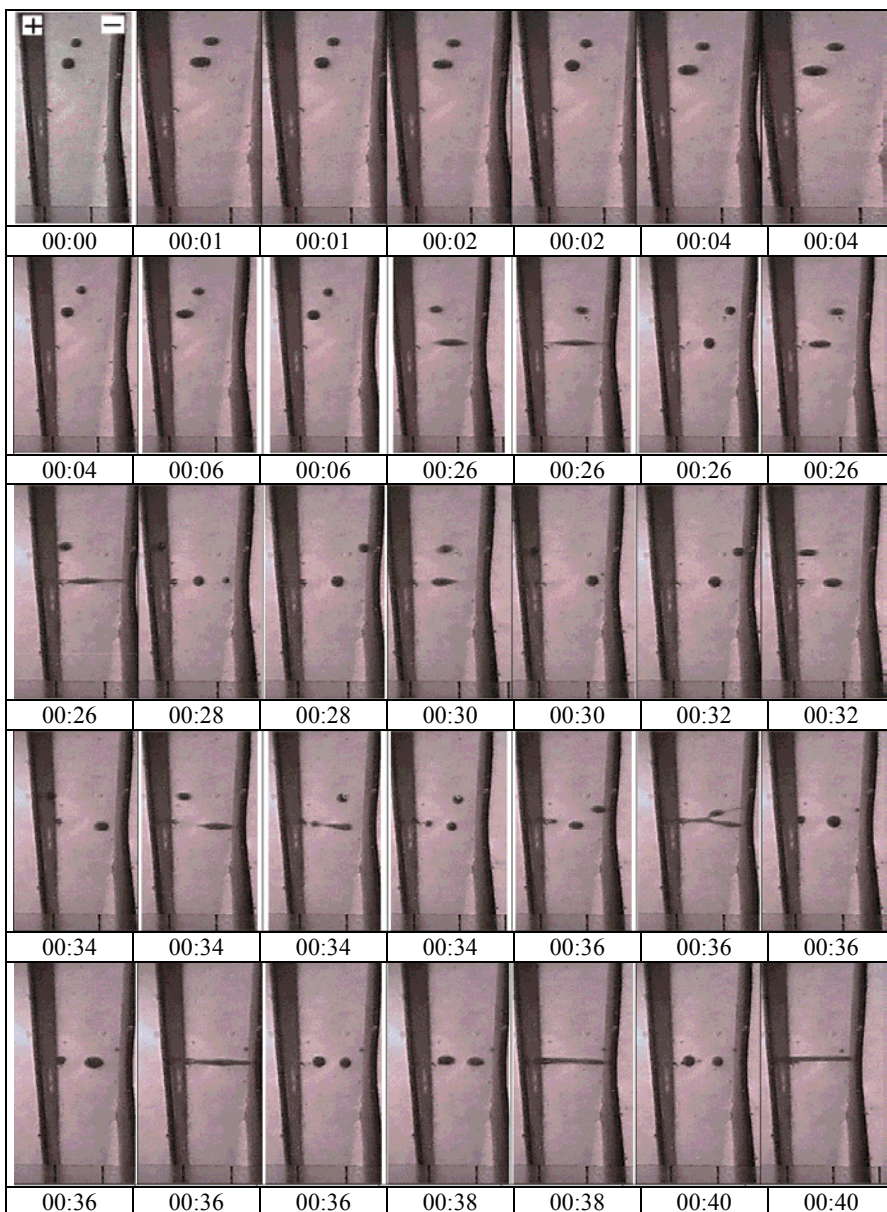


Рисунок 4 – Поведение капле в импульсном однородном электрическом поле  $E_0 = 30 \cdot 10^4$  В/м. (Длительность экспозиции кадра  $\sim 0,03$  с, цена деления шкалы внизу кадра – 5 мм)

$E_0=30 \cdot 10^4$  В/м в следующем опыте совмещено с переходом на импульсный режим включения поля.

Как следует из рис. 4, воздействие электрического поля указанной напряженности приводит к видимому вытягиванию глобул, еще не имеющих избыточного заряда. При этом, начиная с подачи второго импульса, глобулы начинают также импульсно смещаться к положительному, имеющему высокий потенциал, электроду, что свидетельствует о появлении на них малого избыточного заряда. По мере увеличения числа импульсов деформация глобул увеличивается так же, как и увеличивается смещение в сторону электрода.

Согласно расчетам [7], критическая напряженность внешнего электрического поля, при которой капелька разрывается, равно

$$E_{кр} = A_1 \sqrt{\frac{\sigma}{\epsilon a}}, \quad (3)$$

где  $A_1$  – постоянная, равная для одиночной капельки 0,38, а для эмульсии обводненностью 20 % она равна 0,4;

$\epsilon$  – усредненная диэлектрическая проницаемость, Ф/м.

Из формулы (3) следует, что критическая напряженность поля повышается с увеличением межфазного поверхностного натяжения и уменьшением радиуса капельки. Это понятно, чем больше силы поверхностного натяжения и чем меньше размер капельки, тем она устойчивее и тем большая требуется напряженность поля для ее разрушения.

Очевидно, что формула (3) не учитывают влияние избыточного заряда на процесс разрушения глобулы, поскольку, в соответствии с рис. 4, при той же самой напряженности поля глобула, получившая избыточный заряд при контакте с электродом, существенно увеличила деформацию с последующим распадом на несколько глобул меньших размеров (на 28 секунде). Дальнейшее импульсное включение поля приводит к слиянию всех глобул и перемыканию межэлектродного промежутка проводящим водным мостиком. Импульсный режим позволяет в этом случае избежать перегрузки источника питания.

**3. Переменное электрическое поле.** Как следует из литературных источников, в переменном электрическом поле промышленной частоты поведение капельки пресной воды примерно такое же, как и в постоянном. Капелька также поляризуется, вытягиваясь вдоль силовых линий поля, и тоже диспергируется на более мелкие при напряженности поля, выше критической. Различие состоит только в том, что при постоянном поле капелька приобретает фиксированную форму эллипсоида вращения определенного эксцентриситета, при переменном поле этот эксцентриситет, а также направление поляризации капельки, периодически изменяются в соответствии с изменениями напряженности поля. Таким образом, капелька, находясь в переменном электрическом поле промышленной частоты, все время «дрожит»: попеременно, то вытягиваясь в эллипсоид вращения, то приобретая почти

шарообразную форму [5]. Все сказанное выше о поведении капельки пресной воды во внешнем электрическом поле справедливо также и для проводящей капельки соленой воды. Разница состоит лишь в том, что из-за наличия дополнительных свободных зарядов в соленой воде проводящая капелька сильнее вытягивается и диспергируется при меньших критических напряженностях поля, чем капелька пресной воды. По этой же причине в переменном электрическом поле капелька соленой воды «дрожит» интенсивнее, чем такая же по размерам капелька пресной воды [13].

Приложение к межэлектродному промежутку переменного электрического поля промышленной частоты напряженностью  $E_0=10^5$  В/м в нашем опыте существенно увеличивает скорость коагуляции глобул (рис. 5) по сравнению с постоянным полем. По-видимому, «дрожание» глобул способствует сближению кончиков близлежащих глобул, что неизбежно ведет к повышению вероятности их слияния по ранее описанному механизму. Из рисунка видны слияния трех и четырех глобул одновременно.

В отличие от литературных данных, наблюдается слабое направленное движение глобул к электроду с высоким потенциалом (противоположный заземлен). При касании электрода глобула не покидает его, а совершает мелкие скачкообразные перемещения. При этом с кончика ее, обращенного к противоположному электроду, вырываются «факелы», которые достают до близлежащих глобул, приводя к коагуляции последних. Так, уже на 8 секунде процесса подобным механизмом инициируется цепная коагуляция в межэлектродном промежутке, приводящая к перемыканию промежутка проводящим мостиком. Энергия источника выделяется на сопротивлении мостика, он нагревается, уменьшается его плотность, он всплывает и распадается на отдельные части.

На кадрах с 26 секунды процесса наглядно демонстрируется процесс переноса тока через промежуток, который состоит из следующих этапов. Глобула на электроде, совершая скачкообразные перемещения, выбрасывает в сторону ближайшей глобулы «факел», осуществляя тем самым электрический контакт. После этого контакта, глобула приобретает избыточный заряд, и начинает двигаться к заземленному электроду подобно тому, как это происходит при постоянном электрическом поле.

**4. Качественное описание поведения коллектива глобул.** При описании поведения коллектива глобул воды в нефти при воздействии однородного постоянного и переменного электрического поля нужно учитывать, что в выбранной модельной среде электрические характеристики процесса имеют лишь качественное соответствие реальным процессам в ВНЭ. Так, например, в данных опытах не удалось измерить изменения тока от перемещений глобул ввиду их малости на фоне темного тока через промежуток, который составлял всего от 10 до 50 мкА.

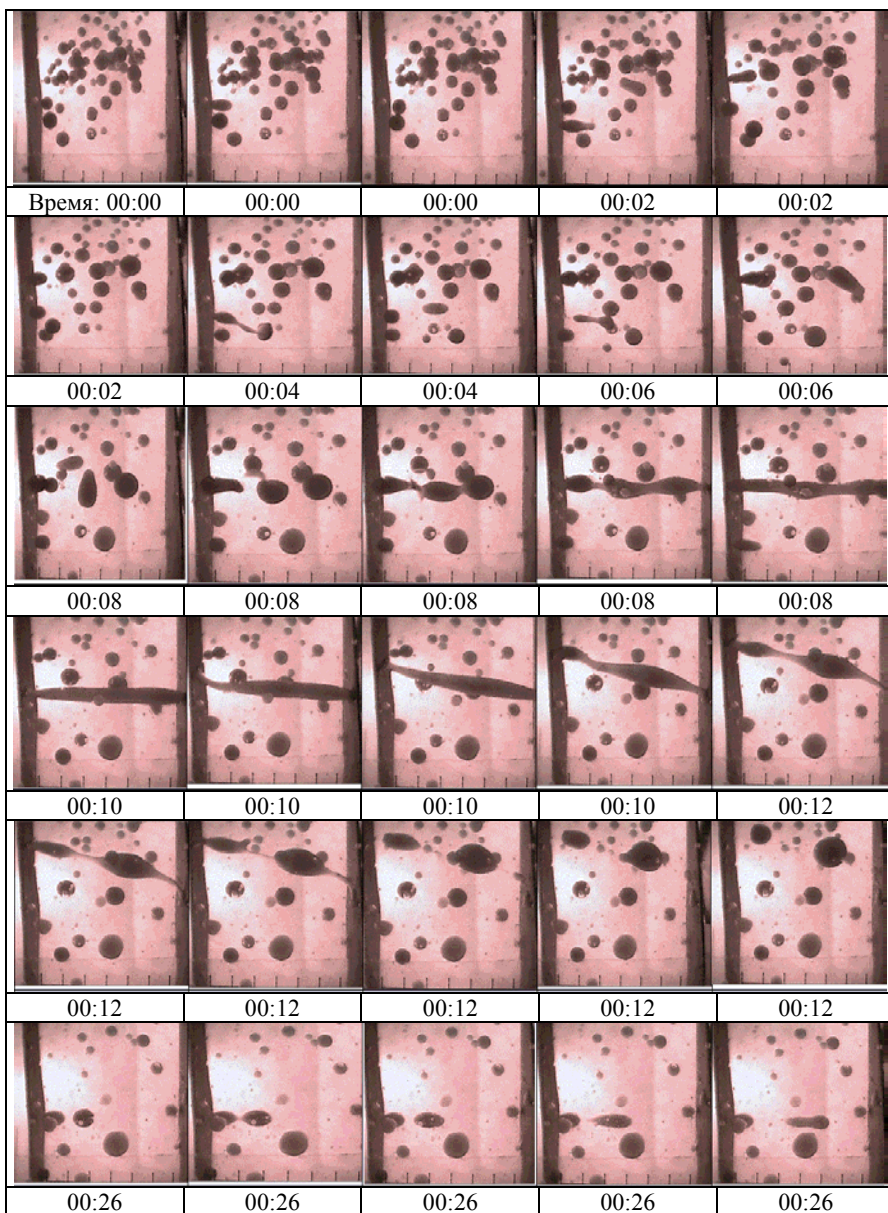


Рисунок 5 – Поведение капель в однородном переменном электрическом поле  $E_0 = 10^5$  В/м. (Длительность экспозиции кадра  $\sim 0,03$  с, цена деления шкалы внизу кадра – 5 мм)

Качественный анализ поведения тока в таком межэлектродном промежутке проследим по характеру изменению удельной электропроводности среды, поскольку направленное движение заряженных частиц независимо от вида, в нашем случае, например, глобул, приводит к переносу зарядов, то есть протеканию электрического тока.

Удельную электропроводность среды, определяемую перемещением этих зарядов, запишем в соответствии с выражением [13] как:

$$\sigma_0 = F Z_+ n_{0+} (u_+ + u_-) / N_A, \quad (4)$$

где  $F$  – число Фарадея, Кл/моль ( $F = 96485,3$  Кл/моль);

$Z_+$  – заряд положительно заряженных частиц в среде, Кл;

$n_{0+}$  – концентрация положительно заряженных частиц в среде,  $1/\text{м}^3$ ; (для простоты рассмотрения пусть  $Z_+ n_{0+} = Z_- n_{0-}$ );

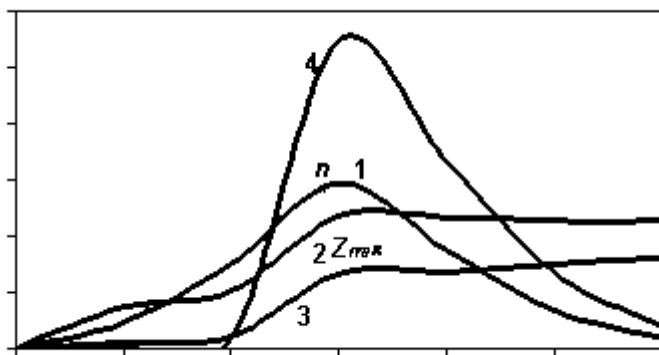
$u_+$ ,  $u_-$  – подвижность положительных и отрицательных заряженных частиц, соответственно, м/с;

$N_A$  – постоянная Авогадро, 1/моль ( $N_A = 6,02212 \cdot 10^{23}$  1/моль).

Очевидно, что изменение во времени удельной электропроводности среды будет иметь сложный характер, определяемый изменением во времени каждого из членов выражения (4).

Так, например, принимая, исходя из наблюдений, что в нулевой момент времени в межэлектродном промежутке имеются только незаряженные глобулы, получаем, что концентрация заряженных глобул  $n_{0+}$  (кривая 1) равна нулю и заряд глобул (кривая 2) тоже равен нулю (рис. 6).

$n, Z, U, \sigma_0$



время

Рисунок 6 – Качественные зависимости некоторых характеристик коллектива глобул, помещенных в электрическое поле, от времени:

1 – концентрация заряженных частиц; 2 – заряд частиц;

3 – подвижность частиц; 4 – удельная электропроводность эмульсии

Концентрация глобул, которые впоследствии будут заряжены, может быть существенно меньше исходной концентрации, поскольку в первый момент включения поля произойдет первый этап слияний близлежащих глобул под действием поляризации. Как мы помним, этот процесс не приводит к появлению заряда на образовавшихся глобулах. Постепенно глобулы накапливают заряд (кривая 2), начинают перемещаться под действием поля, т.е. возрастает их подвижность (кривая 3), а концентрация заряженных частиц (кривая 1) стремится к некоторому максимальному значению. В определенное время глобулы, достигая электродов, приобретают максимальный заряд  $Z_{max}$  и подвижность их (кривая 3) в этот момент становится максимальной. Именно с этого времени начинается интенсивное слияние глобул в процессе столкновений и осаждение укрупненных глобул, т.е. уменьшения концентрации их вплоть до нуля.

Результирующая зависимость удельной электропроводности среды  $\sigma$  (кривая 4), представляющая собой произведение рассмотренных параметров, имеет куполообразную форму.

Можно считать, что изменение во времени концентрации заряженных глобул фактически определяет поведение удельной электропроводности среды и электрического тока через межэлектродный промежуток, форма значений которого во времени тоже будет иметь куполообразный вид.

Основываясь на качественных наблюдениях представим предполагаемые механизмы появления избыточного заряда на глобулах воды, поскольку этот процесс лежит в основе вообще всякого изменения состояния эмульсии и имеет принципиальное значение для понимания, прогнозирования и управления процессами обезвоживания эмульсий. По сути явления, возникновение избыточного заряда на глобуле приводит к возбуждению активности глобул при взаимодействии с полем, поэтому будем употреблять термин «активация» для описания этого процесса.

Первым механизмом активации эмульсии можно считать зарядку глобул за счет протекания «темнового» тока в межэлектродном промежутке.

При таком подходе каждую из множества глобул можно уподобить маленькому конденсатору, а плотность их зарядов  $Q$  будет пропорциональна произведению плотности тока зарядки  $j$  и времени зарядки  $t$

$$Q = j \cdot t = \sigma_m \cdot E_0 \cdot t, \quad (5)$$

где  $Q$  – плотность зарядов, Кл/м<sup>2</sup>;

$j$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;

$\sigma_m$  – удельная электропроводность трансформаторного масла, Ом<sup>-1</sup> · м<sup>-1</sup>.

Из выражения (5) следует, что при неизменности проводимости дисперсной среды  $\sigma_m$  изменением напряженности электрического поля  $E_0$  и временем его воздействия  $t$  можно управлять активацией дисперсной среды. Другими словами, одинакового уровня активации среды можно добиваться при выполнении условия  $E_0 \cdot t = \text{const}$ .

Вторым вероятным механизмом активации можно считать потерю глобулами зарядов определенного сорта через механизм инжектирования их из жидкости в масло, что может происходить под воздействием высокой напряженности электрического поля на кончиках поляризованной глобулы.

Третьим возможным механизмом активации эмульсии можно считать разделение зарядов при разрыве глобулы на отдельные частицы под воздействием внешнего электрического поля. При этом образующиеся частицы имеют противоположные по знаку заряды, а величина их может быть значительной.

Особенность данного механизма состоит в том, что при некотором конкретном значении напряженности внешнего поля разрыву подвергается не каждая глобула, а только та, которая достигла соответствующего размера (см. формулу 3). Процесс укрупнения глобул идет сразу после включения поля (как это видно из кинограмм), поэтому приложенное поле сразу начинает смещать дисперсионный состав эмульсии в сторону повышения вероятности возникновения разрывов глобул и разделению зарядов.

Необходимо отметить, что все перечисленные механизмы могут работать как по очереди, так и одновременно в зависимости от амплитуды приложенного напряжения, длительности приложения (длительности импульса), рода приложенного напряжения, а также дисперсионного состава эмульсии в каждый конкретный момент времени.

**5. Исследования токовых зависимостей натуральных ВНЭ.** На втором этапе работы воздействию переменного и постоянного электрического поля подвергались натуральные высокообводненные ВНЭ. Результаты измерения электрического тока через межэлектродный промежуток приведены на рис. 6.

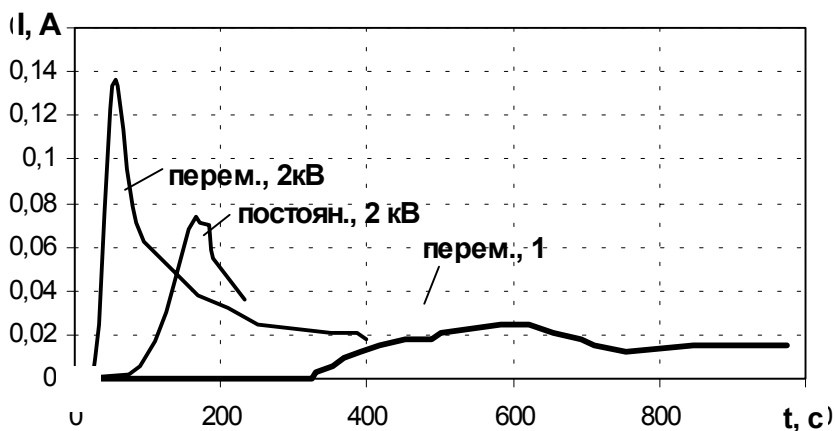


Рисунок 7 – Зависимости изменения тока в ВНЭ от времени

Как следует из рис. 7 зависимости изменения электрического тока от времени для натуральных ВНЭ имеет куполообразную форму при приложении как переменного, так и постоянного напряжения в соответствии с предложенной качественной моделью. Кроме того, видно, что начало интенсивного роста тока через промежуток запаздывает от момента приложения напряжения, что также соответствует качественной модели.

**Выводы.** В результате проведенных исследований поведения глобул воды в трансформаторном масле предложена, и на натуральных ВНЭ апробирована, качественная модель изменения удельной электропроводности высокообводненных эмульсии. Показано, что электрический ток через межэлектродный промежуток, заполненный ВНЭ, имеет во времени куполообразную форму и определяется концентрацией заряженных глобул.

Проведенные исследования могут быть полезны при направленном воздействии на ВНЭ с целью управления процессами коагуляции водной фазы, а также для анализа процессов формирования высоковольтного разряда в эмульсиях, являющихся рабочими средами в электроразрядных установках и технологиях.

**Список литературы:** 1. Клейтон В. Эмульсии / Пер. с англ. Н.А. Плетеневой, К.А. Попеловой; Под ред. акад. П.А. Ребиндера. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 680 с. 2. Болога М.К., Берилл И.И. Рафинация подсолнечного масла в электрическом поле. – Кишинэу: Stiinta, 2004. – 216 с. 3. Коробко А.И., Золотко В.А., Галенюк Г.У. и др. Определение оптимального температурного режима эксплуатации установок электростатической очистки трансформаторного масла // Вісник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. – Тем. вип. «Техніка і електрофізика високих напруг». Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 17. – С. 176-180. 4. Левченко Д.Н., Берита Н.В., Худякова А.Д., Николаева Н.М. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения. – М.: Химия, 1967. – 200 с. 5. Левченко Д.Н., Бернштейн Н.В., Николаева Н.М. Технология обессоливания нефтей на нефтеперерабатывающих предприятиях. – М.: Химия, 1985. – 168 с. 6. Мартыненко А.Г., Коноплев В.П., Ширяев Г.П. Очистка нефтепродуктов в электрическом поле. – М.: Химия, 1974. – 312 с. 7. Панченков Г.М., Цабек Л.К. Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле. – М.: Химия, 1969. – 242 с. 8. Кочанов Э.С., Кочанов Ю.С., Скачков А.Е. Электрические методы очистки и контроля судовых топлив. – Л.: Судостроение, 1990. – 216 с. 9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.. Электродинамика сплошных сред. – М.: Гостехтеоретиздат, 1957. – 532 с. 10. Waterman Z.C. Hydrocarbon Proc. Petrol // Ref. 1965. – V. 44, № 2. – P. 133-139. 11. Панченков Г.М., Папко В.В., Цабек Л.К. Изучение влияния частоты внешнего электрического поля на коалесценцию водяных капель в эмульсии типа "вода в масле" // Химия и технология топлив и масел. – 1969. – № 11. – С. 35-40. 12. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло / 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с. 13. Яворский Б.М., Деглаф А.А. Справочник по физике / 5-е изд. – М.: Наука, 1971. – 939 с.

*Поступила к редколлегии 27.06.2007*



**В.И.КРАВЧЕНКО**, докт.техн.наук; **И.В.ЯКОВЕНКО**,  
докт.физ–мат.наук; **В.И.ЯКОВЕНКО**; **Ф.В.ЛОСЕВ**; НТУ» ХПИ»

## **ВОЗБУЖДЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКИ НАВЕДЕННЫМИ ТОКАМИ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТОРОННЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього ЕМВ. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання ( ЕМВ) на електровироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах ЕРВ і утворенням їх внутрішніх полів.

The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor structure have been determined. The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields.

**Введение.** Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), однако вопросы связанные с определением различного рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделия при воздействии ЭМИ остаются открытыми.

Все многообразие отказов, возникающих в РЭА как результат воздействия сторонних факторов, принято разделять на обратимые и необратимые [1, 2]. Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности Р Э А. Они наступают в случае , когда изменение внутренних параметров аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего ЭМИ необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектующих). Для обратимых отказов характерна временная утрата работоспособности, приводящая к искажению выходных характеристик.

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц , наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

**Основные результаты.** Пусть моноэнергетический поток заряженных частиц, наведенный внешним электромагнитным полем, с плотностью  $n_0$  проходит с постоянной скоростью  $v_0$  через периодическую структуру (период  $d$ ), состоящую из чередующихся плазменных слоев  $d_1, d_2$  и различающихся диэлектрическими постоянными  $\varepsilon_{01}, \varepsilon_{02}$  и концентрациями электронов проводимости  $N_{01}, N_{02}$ . Определим спектр и затухание (нарастание) электромагнитных колебаний такой системы. Выбираем систему отсчета таким образом, чтобы оси  $X, Y$  были направлены параллельно, а ось  $Z$  – перпендикулярно границе раздела. Заметим, что потери энергии заряженной частицы при прохождении через слоистый диэлектрик впервые рассматривались в работе [4].

Для описания электромагнитных свойств структуры состоящей из плазменных слоев, в пренебрежении эффектами запаздывания, воспользуемся следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= 0; \quad \operatorname{div}[\varepsilon_0(z)\vec{E}] = 4\pi e(N+n); \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \operatorname{div}[N_0(z)\vec{u}] &= 0; \quad m \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = e\vec{E}; \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n_0\vec{v} + \vec{v}_0 n) &; \quad m\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + v_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial z}\right) = e\vec{E}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $n(r,t), N(r,t), v(r,t), u(r,t)$  – возмущенные концентрации и скорости электронов пучка и неподвижной плазмы,  $\varepsilon_0(z); N_0(z)$  – являются периодическими функциями, принимающими в пределах  $d = d_1 + d_2$  значения  $\varepsilon_{01,02}; N_{01,02}$ . Индексы «1» и «2» будут означать принадлежность величин, входящих в уравнения (1) к слоям с индексами толщины «1» и «2». В дальнейшем необходимо ввести скалярный потенциал  $\varphi(r,t); (\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi)$ .

На границе слоев выполняются условия непрерывности потенциалов и полных токов  $J_i$  (смещения и проводимости):

$$\begin{aligned} \varphi_1(0) &= \varphi_2(0); \\ J_1(0) &= J_2(0), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } J_i = \frac{\varepsilon_{0i}}{4\pi} \frac{\partial E_{iz}}{\partial t} + e(N_{0i}u_{iz} + n_0v_{iz} + v_0n_i), \quad i = 1, 2.$$

В связи с образованием в структуре волн пространственного заряда (ВПЗ), обусловленных движущимся потоком частиц, возникает необходимость в дополнительных граничных условиях. В качестве таковых используются непрерывности потоков заряженных частиц и их импульсов. Эти условия имеют вид:

$$\begin{aligned} n_1(0) &= n_2(0); \\ v_{1z}(0) &= v_{20}(0). \end{aligned} \quad (3)$$

Используя свойство трансляционной симметрии

$\varphi(z+d) = \varphi(z) \exp(ikd)$  ( $k$  – произвольный волновой вектор), можно представить граничные условия на плоскостях, разделяющих слои, следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi_1(d_1) &= \varphi_2(-d_2) \exp(ikd); & J_1(d_1) &= J_2(d_2) \exp(ikd); \\ n_1(d_1) &= n_2(-d_2) \exp(ikd); & v_{1z}(d_1) &= v_{2z}(-d_2) \exp(ikd). \end{aligned} \quad (4)$$

Представляя зависимость всех переменных величин от координат и времени экспоненциальной, легко получить решение уравнений (1) в каждом слое. С помощью граничных условий (2)-(4) можно исключить неопределенные константы и получить дисперсионное уравнение, связывающее между собой частоту, волновые векторы  $-\omega$ ,  $q_x, y$ ,  $k$  и параметры среды.

Рассмотрим одномерный случай:  $q_x, q_y = 0$ . Решение системы уравнений (1) в  $i$ -м слое имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_i(z) &= A_i z + B_i + \frac{4\pi e^2 v_0}{\varepsilon_i} \left[ \frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{(\omega + v_0 \lambda_i)^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{(\omega - v_0 \lambda_i)^2} \right] \exp\left(i \frac{\omega}{v_0} z\right); \\ E_i &= -A_i - \frac{4\pi i e v_0}{\varepsilon_i} \left[ \frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0 \lambda_i} + \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0 \lambda_i} \right] \exp\left(i \frac{\omega}{v_0} z\right); \\ n_i &= (C_i \exp(i\lambda_i z) + F_i \exp(-i\lambda_i z)) \exp\left(i \frac{\omega}{v_0} z\right); \\ v_i &= -\frac{4\pi e^2}{m\lambda_i \varepsilon_i} \left[ \frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0 \lambda_i} - \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0 \lambda_i} \right] \exp\left(i \frac{\omega}{v_0} z\right) + \frac{eA_i}{im\omega}, \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$ ;  $\lambda_i = \frac{\omega_0}{v_0 \sqrt{\varepsilon_i}}$ ;  $\omega_{0i}; \omega_0$  – ленгмюровские частоты

электронов неподвижной плазмы и пучка  $A, B, C, F$  – произвольные постоянные. Видно, что потенциал содержит слагаемые различного рода. Первое и второе представляют собой решение уравнения Лапласа  $\partial^2 \varphi / \partial z^2 = 0$ , третье и четвертое – потенциалы, создаваемые ВПЗ. Легко убедиться, что граничные условия допускают решения  $A_i = 0$ , так как при этом  $J_i(z)$  тождественно обращается в нуль, концентрация и скорость частиц зависят от констант  $C, F$ , а граничные условия для потенциалов (3) и (4) позволяют определить  $B_1, B_2$  через  $C, F$ . При этом из граничных условий получим дисперсионное уравнение:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right) d = \cos \lambda_1 d_1 \cos \lambda_2 d_2 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{2\lambda_1 \lambda_2} \sin \lambda_1 d_1 \sin \lambda_2 d_2. \quad (6)$$

Это уравнение впервые было получено в работе [4], где была показана

возможность возникновения неустойчивых состояний. При этом в не принимались во внимание связанные с частотной дисперсией диэлектрической проницаемости собственные колебания, существующие в структуре в отсутствие пучка.

В случае малой плотности пучка  $\lambda_1 d_1 \ll 1$ ;  $\lambda_2 d_2 \ll 1$  уравнение (6) преобразуется к виду:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = 1 - \frac{\omega_0^2 d^2}{2v_0^2 \varepsilon_{zz}}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{zz}(\omega) = d\varepsilon_1 \varepsilon_2 / (d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1)$  – компонента тензора диэлектрической проницаемости мелкодисперсной среды.

В случае слабой пространственной дисперсии:  $\omega d/v_0 \ll 1$ ;  $kd \ll 1$  из выражения (7) получим:

$$\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)^2 = \frac{\omega_0^2}{v_0^2 \varepsilon_{zz}}. \quad (8)$$

Закон дисперсии колебаний имеет тот же вид, что и в однородной среде, диэлектрическая проницаемость которой равна  $\varepsilon_{zz}(\omega, d_1, d_2)$ . Из выражения (8) в приближении малой плотности пучка полагая получим:

$$\Delta\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_{zz}(\omega = kv_0)}; \quad \Delta\omega \ll kv_0. \quad (9)$$

В этом случае возникают колебания с частотой, определяемой временем пролета  $\tau$  частицей пространственного периода структуры  $\tau = d/v_0$ . Целое число  $l$  равно отношению времени пролета к периоду колебаний.

Колебания становятся неустойчивыми при условии  $\varepsilon_{zz} < 0$ ; ( $\Delta\omega^2 < 0$ ), то есть диэлектрическая проницаемость хотя бы одного из слоев должна обладать частотной дисперсией и быть отрицательной.

Пусть  $\varepsilon_2 > 0$ ;  $\varepsilon_1 < 0$ . Тогда из формул (8)-(9) следует:

$$\Delta\omega^3 = \frac{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1}{2\varepsilon_{01} d}. \quad (10)$$

Инкремент неустойчивости равен:

$$\text{Im } \Delta\omega = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1}{2\varepsilon_{01} d} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где  $\omega_{p1} = \frac{\omega_{01}}{\sqrt{\varepsilon_{01}}}$ .

Если  $\omega = kv_0$  то мы имеем неустойчивость в условиях черенковского резонанса с инкрементом, который в  $(d_1/d_2)^{\frac{1}{3}}$  раз меньше чем в однородной

плазме. В случае  $\omega_p = \frac{2\pi\nu_0}{d}l$  неустойчивость связана с черенковским параметрическим излучением заряженной частицы [3]. Из выражения (8) следует, что неустойчивость возникает также при условии когда  $\varepsilon_{zz}$  является комплексной величиной и  $\text{Re } \varepsilon_{zz} > 0$ .

Очевидно, что заслуживает внимания и другая ситуация, когда необходимо учитывать решение уравнения  $\text{div}\vec{E} = 0$  в каждом слое. Для описания взаимодействия волн и частиц в этом случае рассмотрим более подробно собственные колебания продольного электрического поля в слоисто-периодической среде. В отсутствие пучка как видно из формулы (8) потенциал в  $i$ -м слое имеет вид:  $\varphi_i(z) = A_i z + B_i$ . Электрическое поле  $E_i = -A_i$  и полный ток  $j_i = \frac{i\omega}{4\pi}\varepsilon_i A_i$  не зависят от  $Z$ . Из граничных условий для потенциала и тока следует:

$$\begin{aligned} B_1 &= B_2; & A_1 d_1 + B_1 &= (B_2 - A_2 d_2) \exp(ikd); \\ A_1 \varepsilon_1 &= A_2 \varepsilon_2; & A_1 \varepsilon_1 &= A_2 \varepsilon_2 \exp(ikd). \end{aligned} \quad (11)$$

Откуда получаем два условия существования продольных колебаний. Первое:

$$\varepsilon_1 = 0; \quad A_2 = 0; \quad A_1 d_1 = B_1 (\exp(ikd) - 1); \quad kd \neq 2\pi l. \quad (12)$$

Закон дисперсии этих колебаний соответствует обращению в нуль  $\varepsilon_{zz}$ .

Второе условие:

$$kd = 2\pi l; \quad \varepsilon_1 d_2 = \varepsilon_2 d_1; \quad A_1 d_1 = -A_2 d_2. \quad (13)$$

Оно отвечает требованию обращения в нуль  $\varepsilon_z^{-1}$ . Частота колебаний равна

$$\omega' = \left( \frac{\omega_{01}^2 d_2 + \omega_{02}^2 d_1}{\varepsilon_{01} d_2 + \varepsilon_{02} d_1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Можно показать, что взаимодействие колебаний с пучком малой плотности в условиях резонанса  $\omega' = \frac{2\pi\nu_0}{d}l$  дает поправку к частоте, определяемую из выражения:

$$\Delta\omega^3 = \frac{2\omega_0^2 \nu_0^2 d}{\omega' d_1 d_2 (\varepsilon_{01} d_2 + \varepsilon_{02} d_1)} \left[ 1 - (-1)^l \cos \frac{\pi l}{d} (d_1 - d_2) \right]. \quad (15)$$

Если  $d_2 = d_1$  то закон дисперсии сводится к выражению  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0$  и на длине  $d_1 = d/2$  укладывается целое число полуволн Ван-Кампена. В этом случае для четных  $l$  фазы колебаний при влете в пространство взаимодействия и вылете из него совпадают и инкремент колебаний равен нулю.

Напротив, для нечетных  $l$  фазы противоположны и инкремент:

$$\gamma = \sqrt{3} \left[ \frac{4\omega_0^2 v_0^2}{\omega' d^2 (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02})} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (16)$$

Очевидно, что с практической точки зрения заслуживает внимания вопрос о резонансном взаимодействии волн и частиц, когда периодическая структура и поток частиц разделены в пространстве. Найдем спектр и инкремент (декремент) колебаний, когда поток заряженных частиц занимает полупространство  $y > 0$ ,  $y < 0$  – слоисто-периодическая среда.

Тогда в области  $y > 0$  поля описываются системой уравнений (1), где  $N = N_0 = 0$ , а  $N_0 = \varepsilon_d$  ( $\varepsilon_d = 1$ ).

В области  $y < 0$  предполагается  $n_0 = 0$ . На границе  $y = 0$  выполняются условия непрерывности потенциалов. Нормальная составляющая векторов индукции при этом испытывает разрыв, связанный с наличием потока заряженных частиц над границей.

Прежде всего покажем, что на границе сверхрешетка (СР) – диэлектрик существуют так называемые косые поверхностные волны и найдем их спектр. Ограничимся случаем слабой пространственной дисперсии, когда обратные волновые числа  $1/q_{x,y,z}$  велики по сравнению с периодом  $d$  (мелко-дисперсная среда).

В этом случае потенциал  $\varphi$  можно представить в виде:

$$\varphi(r, t) = A \exp i(q_x x + q_y y + q_z z - \omega t). \quad (17)$$

Электромагнитные свойства такой среды описываются тензором диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ij}(\omega)$ :

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \frac{\varepsilon_1 d_1 + \varepsilon_2 d_2}{d}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{d\varepsilon_1\varepsilon_2}{d_1\varepsilon_2 + d_2\varepsilon_1}. \quad (18)$$

Остальные компоненты тензора равны нулю.

Первое уравнение (1) следует заменить равенством:

$$\vec{q} \vec{D} = 0; \quad D_i(\omega) = -i\varphi \varepsilon_{ij}(\omega) q_j. \quad (19)$$

где  $D_i(\omega)$  – электрическая индукция.

Волновые числа связаны между собой соотношениями:

$$q_y^2 = -q_x^2 - q_z^2 \frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xx}}. \quad (20)$$

Легко показать, что эти соотношения следуют непосредственно из дисперсионного соотношения для слоисто-периодической структуры

$$\cos kd = \operatorname{ch} q d_1 \operatorname{ch} q d_2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) \operatorname{sh} q d_1 \operatorname{sh} q d_2. \quad (21)$$

при  $q d_{1,2} \ll 1; kd \ll 1; q^2 = q_x^2 + q_y^2; k = q_z$ .

Видно, что поле является заведомо поверхностным при

$q_x^2 > q_z^2 \frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xx}}$  ( $\text{Im } q_y > 0$ ). В области  $y > 0$  потенциал  $\varphi(r, t)$  имеет вид:

$$\varphi(r, t) = B \exp(-qy + i(q_x x + q_z z - \omega t)). \quad (22)$$

На границе  $y = 0$  имеем:

$$\varphi(-0) = \varphi(+0) \quad D_y(-0) = D_y(+0). \quad (23)$$

Отсюда при  $q_x^2 \gg q_z^2$  (косые волны) получаем следующий закон дисперсии:

$$\varepsilon_d + \varepsilon_{yy}(\omega) = 0; \quad \omega_p^2 = \frac{\omega_{01}^2 d_1 + \omega_{02}^2 d_2}{d\varepsilon_d + d_1\varepsilon_{01} + d_2\varepsilon_{02}}. \quad (24)$$

Наличие потока частиц, движущегося над поверхностью сверхрешетки, приводит к изменению граничных условий для нормальных составляющих вектора индукции, поскольку на границе возникает поверхностный заряд  $n_S$ :

Учитывая  $n_S$  граничные условия для  $D_y$  принимают вид:

$$D_y(+0) - D_y(-0) = \frac{\omega_0^2}{(\omega - q_z v_0)^2} q \varphi(0). \quad (25)$$

В результате закон дисперсии запишется следующим образом:

$$\varepsilon_d - \frac{\omega_0^2}{(\omega - q_z v_0)^2} + \varepsilon_{yy}(\omega) = 0. \quad (26)$$

В условиях резонанса  $\omega_p = q_z v_0$  инкремент равен:

$$\gamma = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\omega_0^2 \omega_p}{2\bar{\varepsilon}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (27)$$

где  $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_d + \frac{\varepsilon_{01} d_1 + \varepsilon_{02} d_2}{d}$ .

Эта формула справедлива в условиях  $\frac{\omega_p}{v_0} d \ll 1$ . Преимущества слоисто-

периодической плазменной средой перед сплошной средой состоит в том, что в них можно получать медленные волны в силу малых частот столкновений носителей заряда и добиться выполнения указанных резонансных условий.

Исследуемая модель взаимодействия наведенных токов и колебаний в полупроводниковых комплектующих ЭРИ является достаточно универсальной и позволяет рассмотреть ряд частных случаев наиболее интересных при проведении экспериментов по определению критериев стойкости в области обратимых отказов.

**3. Численные оценки.** В таблице приведены численные оценки инкрементов неустойчивостей собственных электромагнитных колебаний полу-

проводниковых слоистых структур, обусловленные их взаимодействием с потоками заряженных частиц, наведенных сторонним ЭМИ, электростатических колебаний. Результаты приведены для ряда полупроводниковых структур [5], используемых в современной СВЧ – электронике.

Амплитуда тока  $O \approx 10$  мА, длительность импульса прямоугольной формы 500 нс.

Структура М Д П	Концентрация носителей $n_0(\text{см})^{-3}$ . Толщина сверхрешетки $d(\text{см})$	Инкремент неустойчивости $\delta\omega(\text{с}^{-1})$
Au-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -GaAs	$n_0 = 5 \times 10^{14}$ ; $d = 3 \times 10^{-4}$	$\delta\omega = 2 \times 10^{11}$
Au-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -AlGaAL	$n_0 = 1,3 \times 10^{15}$ ; $d = 2 \times 10^{-4}$	$\delta\omega = 4,7 \times 10^{11}$
Au-SiO <sub>2</sub> -CuInAs	$n_0 = 3,6 \times 10^{14}$ ; $d = 9 \times 10^{-5}$	$\delta\omega = 5,2 \times 10^{11}$
Au-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -AlGaAL	$n_0 = 1,2 \times 10^{15}$ ; $d = 3 \times 10^{-3}$	$\delta\omega = 2,9 \times 10^{11}$
Au-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -Si	$n_0 = 3 \times 10^{15}$ ; $d = 1,6 \times 10^{-4}$	$\delta\omega = 3,2 \times 10^{11}$
Au-Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Si	$n_0 = 3 \times 10^{15}$ ; $d = 3,6 \times 10^{-5}$	$\delta\omega = 2 \times 10^{11}$
Au-SiO <sub>2</sub> -Si	$n_0 = 3 \times 10^{15}$ ; $d = 3 \times 10^{-4}$	$\delta\omega = 6,1 \times 10^{11}$

### Выводы.

- Предложена модель взаимодействия наведенных внешним ЭМИ токов с электростатическими колебаниями полупроводниковой сверхрешетки, основанная на реализации резонансного (черенковского) взаимодействия движущихся зарядов и электромагнитных колебаний в условиях, когда совпадают фазовая скорость волны и скорость заряженной частицы.
- Получены расчетные соотношения, связывающие величину инкремента неустойчивостей с величиной наведенных токов и параметрами МДП-структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры.
- Приведенные количественные оценки показывают, что величина энергии излучения лежит в пределах чувствительности современных приемников излучения субмиллиметрового диапазона ( $\partial W/\partial t \approx 10^{-11}$  Вт).

**Список литературы:** 1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А.* Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М., Вюраль Б.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М.* Электромагнитные явления СВЧ-диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – Киев: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

*Поступила в редколлегию 10.11.2007*



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>М.И.БАРАНОВ, Г.М.КОЛИУШКО, В.И.КРАВЧЕНКО, О.С.НЕДЗЕЛЬСКИЙ, М.А.НОСЕНКО</b> Мощный высоковольтный малогабаритный двухэлектродный воздушный разрядник генератора тока молнии . . . . .	3
<b>В.В.КНЯЗЕВ, Ю.С.НЕМЧЕНКО, И.П.ЛЕСНОЙ, С.Б.СОМХИЕВ, Т.Н.ОСТРОВЕРХ</b> Установка для испытаний технических средств на устойчивость к воздействию повторяющихся колебательных затухающих помех с частотой 100 кГц . . . . .	9
<b>А.Ю.БОНДАРЕНКО</b> Влияние динамики процесса электродинамического притяжения плоской заготовки к индуктору на величину требуемых усилий . . . . .	16
<b>А.В.БОРЦОВ</b> Влияние измерительной цепи на согласованный делитель напряжения . . . . .	24
<b>Ю.Н.ГИРКА, Ю.С.НЕМЧЕНКО</b> Методические аспекты проведения метрологической аттестации средств измерения электромагнитных полей на эталоне РЭМП . . . . .	29
<b>В.С.ГЛАДКОВ, Л.В.ВАВРИВ, А.А.ГУЧЕНКО, А.В.ШЕСТЕРИКОВ</b> К вопросу о выборе системы электродов для электрофизических устройств электрической обработки трансформаторного масла . . . . .	35
<b>В.С.ГЛАДКОВ, П.Н.МЕЛЬНИКОВ, В.В.РУДАКОВ, И.И.МАГДА</b> Источник импульсного заряда малоемкостной нагрузки напряжением до 1,0 МВ . . . . .	39
<b>Е.А.ГОРЮШКИН, А.Е.ГОРЮШКИН</b> Статистична обробка результатів вимірів параметрів імпульсів малої тривалості . . . . .	49
<b>Л.С.ЕВДОШЕНКО</b> Стартовая ступень генератора высоковольтных импульсов . . . . .	57
<b>А.И.ИВАНЬКИНА</b> Источник питания для генераторов электрофизических установок . . . . .	66
<b>Д.Г.КОЛИУШКО</b> Интерфейс программного комплекса для расчета заземляющих устройств электроэнергообъектов . . . . .	71
<b>А.А.ПЕТКОВ</b> Разряд двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку . . . . .	79
<b>В.В.РУДАКОВ, Ю.В.КРАВЧЕНКО, В.О.ЛЫСЕНКО</b> «Краевой эффект» у скошенного края обкладки конденсатора . . . . .	85

<b>О.Н.СИЗОНЕНКО, Э.И.ТАФТАЙ, Р.И.МАЛАЯ, Р.П.КОЛМОГорова</b> Исследования влияния способов электроразрядного воздействия на агрегативную устойчивость высокоустойчивых эмульсий . . . . .	92
<b>А.И.СКИБЕНКО, Ю.В.ЛАРИН, А.В.ПРОКОПЕНКО, Ю.Н.НЕЗОВИБАТЬКО, Ю.В.КОВТУН, Е.И.СКИБЕНКО, В.Б.ЮФЕРОВ</b> Создание и исследование имитационной плазмы на тяжелых газах и парах металлов в импульсном отражательном разряде для сепарационных технологий . . . . .	104
<b>О.В.ХВОЩАН, Ю.И.КУРАШКО, В.В.ЛИТВИНОВ, Ю.И.МЕЛЬХЕР</b> Оптимизация габаритных размеров высоковольтного трансформатора погружных электроразрядных устройств повышенной мощности . . . . .	112
<b>В.Г.ЖЕКУЛ, И.С.ШВЕЦ, С.Г.ПОКЛОНОВ, Э.И.ТАФТАЙ, Р.П.КОЛМОГорова, А.П.СМИРНОВ</b> Коагуляция водной фазы в высокоустойчивых нефтяных эмульсиях под воздействием различных электрических полей . . . . .	119
<b>А.И.КОРОБКО</b> Импульсный электромагнитный генератор типа «Калибратор» на конической линии . . . . .	127
<b>А.И.КОРОБКО</b> Принудительный останов двигателей внутреннего сгорания движущихся автомобилей с помощью высоковольтных наносекундных генераторов контактного типа . . . . .	132
<b>С.Г.ПОКЛОНОВ, В.Г.ЖЕКУЛ, Э.И.ТАФТАЙ, И.С.ШВЕЦ</b> Качественная модель поведения коллектива глобул воды в нефтяных эмульсиях при воздействии электрических полей . . . . .	136
<b>В.И.КРАВЧЕНКО, И.В.ЯКОВЕНКО, В.И.ЯКОВЕНКО, Ф.В.ЛОСЕВ</b> Возбуждение собственных электромагнитных колебаний полупроводниковой сверхрешетки наведенными токами, при воздействия стороннего электромагнитного излучения . . . . .	152

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО**  
**УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Тематичний випуск  
«Техніка і електрофізика високих напруг»

Випуск № 34'2007

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

Технічний редактор Л.В.Ваврів

Відповідальний за випуск В.М.Луцьова

Обл.вид. № 192-07

Підп. до друку 12.12.2007 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. № 408. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ».  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

ФЛП Костинский А.В.

---