

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ  
ИНСТИТУТ "МОЛНИЯ"

На правах рукописи

Иванов Владимир Михайлович

УДК 621.35.035:621.365

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ  
КОММУТАТОРАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
УСТАНОВОК**

05.09.13 – Техника сильных электрических и магнитных полей

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор,  
Бойко Николай Иванович

Харьков – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....   | 7  |
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 8  |
| РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРИНЦИПОВ И<br>УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО<br>НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯХ .....                           | 16 |
| 1.1. Принципы формирования импульсов высокого напряжения<br>или тока .....   | 16 |
| 1.2. Устройства для получения высокого напряжения .....  | 16 |
| 1.2.1. Схемы источников высокого напряжения, использующие в<br>качестве накопителя энергии емкостные накопители энергии<br>(конденсаторы) .....            | 18 |
| 1.2.2. Источники напряжения, использующие в качестве<br>накопителя энергии индуктивные накопители .....  | 26 |
| 1.2.3. Устройства для получения высокого напряжения с<br>индуктивно-емкостным комбинированным способом получения<br>высокого напряжения .....              | 28 |
| 1.3. Силовые полупроводниковые приборы, используемые в<br>электротехнологических установках .....  | 30 |
| 1.3.1. Диоды .....   | 31 |
| 1.3.2. Тиристоры .....   | 34 |
| 1.3.3. Силовые транзисторы .....   | 35 |
| Выводы к разделу 1 .....   | 37 |
| РАЗДЕЛ 2. ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДИК ИССЛЕДОВАНИЯ<br>ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ<br>ТРАНСФОРМАТОРАХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ<br>КОММУТАТОРАМИ ..... | 39 |
| 2.1. Особенности импульсных высоковольтных трансформаторов<br>для электротехнологических установок .....   | 39 |

|  |    |
|--|----|
|  | 3  |
| 2.2. Обоснование выбора направления исследования .....   | 40 |
| 2.3. Обоснование преимущества импульсных трансформаторов как<br>ключевого элемента высоковольтных источников питания в<br>электротехнологических установках .....                        | 42 |
| 2.4. Обоснование целесообразности уменьшения числа витков .....  | 61 |
| 2.5. Обоснование преимущества использования<br>полупроводниковых элементов как коммутирующего элемента<br>высоковольтных источников питания в электротехнологических<br>установках ..... | 68 |
| 2.6. Выбор методов экспериментальных исследований .....  | 70 |
| 2.6.1. Технология экспериментальных исследований для режима с<br>высокой частотой следования импульсов в высоковольтных<br>импульсных трансформаторах .....                              | 70 |
| 2.6.2. Технология экспериментальных исследований работы<br>высоковольтных импульсных трансформаторов в режимах одиночных<br>импульсов .....  | 70 |
| 2.7. Технология компьютерного моделирования электромагнитных<br>процессов в электрических элементах .....  | 71 |
| 2.7.1. Модель линейной индуктивности .....   | 71 |
| 2.7.2. Модель нелинейной индуктивности .....   | 72 |
| 2.7.3. Модель магнитной связи .....  | 72 |
| 2.7.4. Принцип подобия электрических и магнитных цепей .....   | 73 |
| 2.7.5. Узел для получения кривой намагничивания магнитопровода   | 77 |
| Выводы к разделу 2 .....   | 79 |
| <b>РАЗДЕЛ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b><br><b>ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В МОЩНЫХ</b><br><b>НИЗКОИНДУКТИВНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ</b> .....                                    | 81 |
| 3.1. Высоковольтные импульсные трансформаторы с низкой<br>индуктивностью рассеяния в генераторе импульсов напряжения до<br>1 МВ .....  | 81 |

|   |     |
|---|-----|
|   | 4   |
| 3.1.1. Принцип построения генератора импульсов напряжения с импульсным трансформатором .....  | 81  |
| 3.1.2. Зарядное устройство и первичный накопитель энергии .....   | 84  |
| 3.1.3. Блок повышения импульсного напряжения .....  | 85  |
| 3.1.3.1. Конструкция импульсных трансформаторов .....   | 86  |
| 3.1.4. Схема предварительных испытаний импульсного трансформатора .....   | 91  |
| 3.1.5. Экспериментальные результаты предварительных испытаний импульсного трансформатора .....  | 92  |
| 3.1.6. Экспериментальные результаты, полученные при работе генератора импульсов до 1 МВ .....   | 94  |
| 3.2. Высоковольтные импульсные трансформаторы для обработки сточных вод и органических веществ при помощи комплекса высоковольтных импульсных воздействий .....   | 98  |
| 3.2.1. Состав и устройство установки .....  | 99  |
| 3.2.2. Конструкция высоковольтных импульсных трансформаторов .....  | 102 |
| 3.2.3. Тиристорный генератор импульсов .....  | 102 |
| 3.2.4. Стартовые и обостряющие разрядники установки .....   | 104 |
| 3.2.5. Нагрузка – рабочая камера установки .....  | 104 |
| 3.2.6. Полученные экспериментальные результаты по обработке жидких веществ .....  | 106 |
| Выводы к разделу 3 .....  | 108 |
| <b>РАЗДЕЛ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>   |     |
| <b>ИМПУЛЬСНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИКР ..</b>  |     |
| 4.1. Анализ работы высоковольтного импульсного трансформатора в компактном генераторе высоковольтных импульсов с полупроводниковым размыкающим коммутатором и высокой частотой следования импульсов ..... | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.1.1. Трансформаторный источник компактного генератора коротких высоковольтных импульсов со встроенной нагрузкой – реактором с коронным разрядом .....  | 110 |
| 4.1.2. Электрическая схема генератора и выбор режима его работы .....  | 111 |
| 4.1.3. Особенности выполнения генератора .....   | 113 |
| 4.1.4. Анализ процессов в электрической цепи и полученные экспериментальные результаты .....   | 115 |
| 4.1.5. Расчет индуктивностей намагничивания и рассеивания импульсного трансформатора с использованием осциллограмм .....   | 126 |
| 4.1.6. Импульсный трансформатор компактного генератора .....   | 126 |
| 4.2. Особенности работы высоковольтного импульсного трансформатора на ёмкостно-омическую нагрузку в виде реактора с коронными и барьерными разрядами .....   | 127 |
| 4.2.1. Устройство и состав генератора высоковольтных импульсов .....   | 128 |
| 4.2.2. Режимы работы импульсного трансформатора для варианта использования полупроводникового ключа в качестве размыкающего ключа .....  | 129 |
| 4.3. Сравнение работы импульсного трансформатора в режимах использования полупроводникового ключа как замыкающего и размыкающего коммутатора .....   | 134 |
| 4.4. Импульсный трансформатор с полупроводниковым ключом в электротехнологической установке для получения синтез-газа с использованием объёмных высоковольтных импульсных разрядов: коронного и барьерного ..... | 135 |
| 4.4.1. Схема и особенности установки .....   | 135 |
| 4.4.2. Экспериментальные результаты апробации установки и технологии в заводских условиях .....  | 140 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.5. Экспериментальные исследования электромагнитной<br>стойкости новейших полупроводниковых устройств в составе<br>генератора с импульсным трансформатором при высокой частоте<br>прохождения импульсов ..... | 145 |
| Выводы к разделу 4 .....   | 147 |
| ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....   | 150 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ .....   | 154 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....   | 159 |