

**ВВМУ „НИКОЛА ЙОНКОВ ВАПЦАРОВ”
ФАКУЛТЕТ „ИНЖЕНЕРЕН”**

Катедра „Електротехника”

маг. инж. МИЛЕНА ДИМИТРОВА ИВАНОВА

**ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПРОЦЕСИ ВЪВ ВЕРИГИ ЗА
ГЕНЕРИРАНЕ НА ВИСОКОВОЛТОВ
РАЗРЯДЕН ИМПУЛС В ТЕЧНА СРЕДА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на
ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД

за придобиване на научна степен
„ДОКТОР”

Професионално направление, специалност:
„Транспорт, корабоплаване и авиация”
„Електроснабдяване и електрообзавеждане (по отрасли)”

Научен ръководител: проф. д.н. инж. Стефан Тодоров Барудов

Варна, 2016г.

Докторантът работи в Технически университет-Варна, Електротехнически факултет, катедра „Електроенергетика“ и е зачислен в самостоятелна форма на обучение в катедра „Електротехника“ при факултет „Навигационен“ на ВВМУ „Н.Й.Вапцаров“.

Изследванията от дисертационния труд са извършени във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров” и ТУ-Варна.

Дисертационният труд е насочен за защита от
(факултет „Инженерен” при ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”) в
съответствие на чл.5, ал.1 от ЗРАС.

Автор: маг. инж. Милена Димитрова Иванова

Заглавие: „ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПРОЦЕСИ ВЪВ ВЕРИГИ ЗА
ГЕНЕРИРАНЕ НА ВИСОКОВОЛТОВ РАЗРЯДЕН ИМПУЛС В
ТЕЧНА СРЕДА“

Тираж: 30

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Високите стандарти за качество на питейната вода, както и обработката на вода за технологични нужди и отпадни води и увеличаването на замърсяването на околната среда изискват разработването на нови технологии за обработка на вода, което ще позволи подобряване на ефективността на пречистването. Това представлява основен проблем в световен мащаб.

Електрическият разряд в течност е обект на изучаване от много години и интересът към този процес непрекъснато расте. Това е така, защото той концентрира голямо количество електромагнитна енергия, топлина и светлина в пространството и се характеризира с висока динамика и мощност. Ограничението в параметрите на електрическия разряд преди всичко е свързано с техническите възможности за управление на процеса на разряда. Целенасоченото използване на разряда е свързано с развитието му в специфична изкуствено създадена среда.

Импулсният разряд във водна среда се характеризира с:

- възникване на механична ударна вълна (електрохидравличен ефект), породена от процесите на бързо загряване и охлаждане, което води до разрушаване на бактерии и микроорганизми, както и разрушаване на защитната обвивка и мембраните на други такива и излагането им на ултравиолетовото излъчване, генерирано при формирането на разрядния импулс;
- възникване на йонизационни процеси и появата на свободни електрони, йони, водороден пероксид H_2O_2 , озон, свободни радикали като ОН и други. Последните са химически активни и директно атакуват бактериите и вирусите и на базата на химични реакции отстраняват биологични остатъци.

Всичко това осигурява възможност за пречистване на различни флуиди и по-конкретно вода с приложение в различни области:

- за битови нужди;
- допълнителна обработка на отпадни и питейни води;
- в морския транспорт – за обработка на баластни и питейни води на корабите. Приложението на импулсни електрически разряди в морския транспорт е навлязло по-чувствително през последните десетилетия, поради тяхната екологичност като технология.
- в хранително-вкусовата промишленост, козметичната промишленост, фармацевтичната промишленост и други;

- осигуряване на периодично почистване на тръбопроводи от образувани накипи и отлагания при преминаването на флуиди през тях

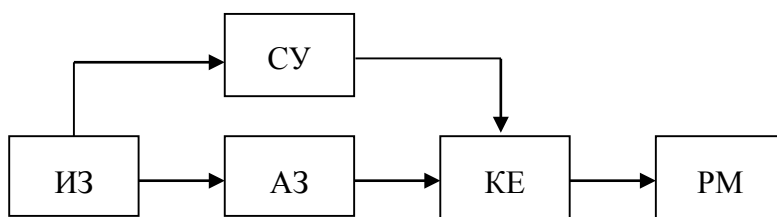
В последните години се работи усилено върху приложението на импулсния разряд във вода за биологично почистване като се търси комбинирането му с филтрация, химични, озониращи и други методи с цел постигане на по-добри резултати от пречистването и повишаване на енергоефективността на процеса.

При проектирането на устройство за генериране на високоволтови импулсни разряди в течност е необходимо да се познават всички електрически параметри на блоковете в устройството, електрическите параметри на разрядния импулс в течността и взаимодействието на експерименталния прототип със захранващата мрежа.

Процесите, свързани с електрическите разряди в течна среда, са много динамични. Основните фактори, които определят цялостния механизъм на възникване на разряда са:

- параметри на разрядната верига (РВ) – капацитет на работната кондензаторна батерия (РКБ) - C , индуктивност L на разрядната верига и съпротивлението R .
- форма на електродите на разрядната междина (РМ) и взаимното им разположение;
- състав и физико-химични свойства на компонентите на течната среда, наличие на твърди тела, газове и техните свойства.

За формирането на разряди в течна среда се използват най-общо системи от вида, показан на фиг.В.2.



Фигура В.2 Блокова схема на устройство за генериране на ВВР в течна среда където: ИЗ – източник на захранване; АЗ – акумулиращо звено (кондензаторна батерия); КЕ – комутиращ елемент; СУ – система за управление; РМ – разрядна междина в течността

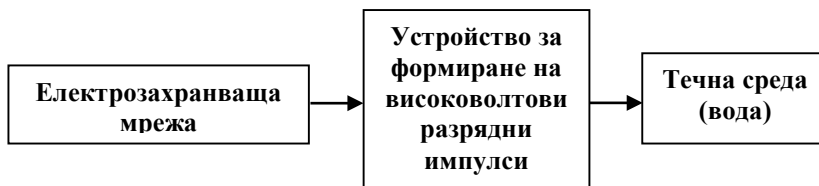
Под действието на напрежителния импулс, подаден на електродите на РМ възниква електрически пробив, при което може да се оформи разряден канал.

Разглеждайки устройствата със структура от фиг.В.2, в литературата отсъстват:

- сведения за проведени изследвания, обхващащи системата „захранваща мрежа - преобразуватели – параметри на генерираните разрядни импулси“, включително и диапазон, в който се изменят;
- сведения за използването на системи от преобразуватели, обвързващи параметрите на захранващата мрежа, енергетичните параметри на ВВРИ и динамиката на изменение на течната среда;
- алгоритми за управление на системите от преобразуватели съгласно функционалната им обвързаност и при отчитане на схемотехническите им решения, както и моделиране на работата на последните с оглед оразмеряване при конкретни параметри съгласно приложението. Всичко това силно затруднява проектирането на такива системи.

ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обект на изследването е системата „електрозахранваща мрежа – система за формиране на високоволтов разряд - течна среда“ - фиг.В.3.



Фигура В.3 Обект на изследване

Устройството за формиране на ВВРИ включва система от преобразуватели за капацитивно натрупване на енергия и формиране на разряден импулс, който са декомпозирани, но взаимно обвързани и осигуряването на електромагнитна съвместимост между постоянноковата част на зарядната верига и високоволтовата високочестотна разрядна верига в условията на галванична връзка между тях.

ПРЕДМЕТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследване на електрическите параметри на разряда с отчитане взаимното влияние на електропреносната мрежа, натоварването на преобразувателя за капацитивното натрупване на енергия и характеристиките на течната среда при различни технически решения и различни режими на работа.

ЦЕЛ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Целта на дисертационния труд е разработването на гъвкава система от преобразуватели, обхващаща взаимното влияние на параметрите на входната хранваща мрежа, енергетичните параметри на формираня високоволтов разряден импулс, както и динамиката на изменение на параметрите на течната среда по време на разрядния процес и нейното експериментално и аналитично изследване.

ЗАДАЧИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ

1. Структурен синтез на системи от преобразуватели във вериги за капацитивно натрупване на енергия за формиране на високоволтови разрядни импулси при отчитане на спецификите на декомпозираните, но взаимно свързани зарядна и разрядна вериги и осигуряващи възможност за управление на големината на входното хранващо напрежение.
2. Разработване на математически модели на електрическите процеси във веригите за капацитивно натрупване на енергия и разрядната верига на базата на експериментално-аналитичен подход при обхващане на параметрите на входната хранваща мрежа, изходни параметри на отделни преобразуватели и енергетичните параметри на ВВРИ и провеждане на многофакторен компютърен симулационен анализ.
3. Разработване на алгоритми за работата на системите за капацитивно натрупване на енергия, които обхващат процеса на зареждане на работната кондензаторна батерия и стабилизиране на напрежението върху последната и алгоритми за управление на силови преобразуватели, осигуряващи оптимизиране на натоварването на електрохранващата мрежа.
4. Експериментално изследване на системите с капацитивно натрупване на енергия за формиране на високоволтов периодично затихващ разряден импулс с цел верификация на съставените математически модели и оценка на ефективността при третиране на замърсена вода и отстраняване на накипи и отлагания по тръбопроводи.

МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

За решаване на поставените задачи и постигане на целта са използвани:

- теоретични изследвания, основани на математическо моделиране, базирано на методите за анализ на електрически вериги и числените методи за решаване на системи диференциални уравнения;
- експериментални изследвания в лабораторни условия, компютърни симулации на нелинейни електрически вериги в интегрираната среда MATLAB;

- съпоставяне на теоретичните и експериментални изследвания за сравнителен анализ и количествена оценка на точността на моделирането по отношение на основните положения в дисертационния труд.

НАУЧНА НОВОСТ В ИЗСЛЕДВАНЕТО

1. Предложена е система от преобразуватели за формиране на високоволтов разряден импулс, базирана на капацитивно натрупване на енергия.

2. Предложен е алгоритъм за управление на големината на входното захранващо напрежение във функция от параметрите на разрядните импулси.

Разработена е система за управление на високоволтови периодично затихващи разрядни импулси в течна среда със стъпален регулатор за управление на големината на входното захранващо напрежение, позволяващ при широк диапазон на изменение на енергетичните параметри на високоволтовите импулси, осигуряване на намалено натоварване на електропреносната мрежа и на елементите на силовите вериги. Новостта е защитена със свидетелство за полезен модел.

3. Предложен е експериментално-аналитичен подход за моделиране на разряда в течна среда чрез използване на интегралните хаактеристики на средата.

4. Разработени са математически модели за описание на зарядно-разрядните процеси в системата от преобразуватели и разрядната вериги.

Математическите модели позволяват многофакторен симулационен анализ и могат да се разглеждат като методика за проектиране на подобни системи за конкретни технологични приложения.

ПРАКТИЧЕСКА ЗНАЧИМОСТ НА РАБОТАТА

Настоящата дисертационна работа е насочена към разработване на прототип за техника и технологии за почистване на отпадни води в т.ч. и за нуждите на морския транспорт и експерименталното му изследване при параметри: напрежение на зареждане на кондензаторната батерия до 12kV; енергия на разрядния импулс до 300J и честота на следване на последните до 5Hz.

ВНЕДРЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Разработването на дисертационния труд е финансирано от проект с договор: Д002-18/23.02.2009г. на тема „Техника и технологии за почистване на вода, базирани на използването на импулсни разряди“, към фонд „Научни Изследвания“ на МОН. По проекта е разработен прототип за реализиране на

високоволтов периодично затихващ разряден импулс в течна среда с възможност за биологично очистване на вода и очистване на накипи и отлагания по тръбопроводи.

Резултати от дисертационния труд са използвани и при разработването на други два научно-изследователски проекта:

1. Договор №469-ПФ/27.03.2008г., тема „Приложение на импулсни разряди за биологично очистване на вода“, финансиран целево от държавния бюджет – ТУ-Варна. Разработен е прототип на многофункционално устройство за формиране на разряд във вода с възможност за промяна на параметрите на разрядния импулс. Публикуван отчет - Годишник на ТУ-Варна, т.ІІІ, с.5-6, 2008, ISSN 1311-896X.
2. Договор № 828-ПФ/27.05.2010г., тема “Системи за генериране на химически активни компоненти в газова среда с повишено налягане”, финансиран целево от държавния бюджет – ТУ-Варна. Разработен е прототип на генератор на химически активни компоненти, работещ при едновременното формиране и на коронен разряд и на импулсни разряди при широк диапазон на управление на честотата на импулсните разряди и продължителността на формираните импулси. Публикуван отчет - Годишник на ТУ-Варна, т. ІІІ, с.5-6, 2010, ISSN 1311-896X.

АПРОБАЦИЯ НА РАБОТАТА

Основните положения и резултати от дисертационната работа са докладвани и обсъждани на:

- Международна конференция “International Scientific conference on information, communication and energy systems and technologies – ICEST, 2010, в Македония;
- Международна конференция “Materials, Methods and Technologies”, Сл. Бряг, 2010 и 2012г.;
- Юбилейната научна международна конференция "50 години катедра ЕТЕТ", 2013, ТУ-Варна;
- Морски научен форум, ВВМУ "Н.Й.Вапцаров", 2013г., Варна;
- Международен научен симпозиум „Електроенергетика 2014”, Варна.
- Международна научна конференция „Science and technology for sustainable maritime development“, ВВМУ „Н.Й.Вапцаров“, 2015г., Варна.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Основната част от дисертационния труд е публикувана в девет публикации, от които една е самостоятелна, в три от останалите публикации дисертантът е на първо място сред авторите и 1 свидетелство за полезен модел.

Публикации в списания

1. **Dicheva M., Barudov, S.** Electrical processes and devices for control of pulse discharge in liquid medium. //Journal of International Scientific Publication: Materials, Methods & Technologies, 2010, vol. 4, part 1, p.387-412, ISSN 1313 2539. Available from: <http://www.scientific-publications.net/en/archive/>
2. **Ivanova, M.** Comparative experimental study of the influence of different controllable high-voltage switches over the formation of discharge pulse in liquid medium. //Journal of international scientific publications: Materials, methods and technologies, 2012, vol. 6, part 2, p.60-75, ISSN 1313 2539. Available from: <http://www.scientific-publications.net/en/archive/>

Публикации в университетски периодични издания

3. Барудов, С., Дичева, М. Хибриден регулиращ елемент във високоволтовата верига за формиране на импулсен разряд в течна среда. //Годишник на ТУ-Варна, 2009, с. 129-134, ISSN 1311-896X.

Публикации на международни конференции

4. Barudov S., **Dicheva, M.** Modeling of a discharge pulse in a circuit with two discharge gap. //ICEST, Ohrid, 2010, vol.2, p.823-827, ISBN: 978-9989-786-58-7.
5. **Иванова, М.,** Барудов, С. Изследване на параметрите на възникващата ударна вълна при високоволтов периодично затихващ разряд в течност. //Юбилейна научна международна конференция "50 години катедра ЕТЕТ", 2013, с.9-14, ISSN 1311-896X.
6. **Иванова, М.,** Барудов, С. Моделиране на високоволтов периодично затихващ разряд в течност с управляем високоволтов ключ тригатрон. //Морски научен форум, ВВМУ "Н.Й.Вапцаров", 2013, с.118-123, ISSN 1310-9278.
7. **Ivanova, M.,** Barudov, E. System for capacitive energy accumulation with discrete alternating voltage regulators. //International Scientific Symposium "Electrical Power Engineering 2014", 2014, p.128-131, ISBN 978-954-20-0497-4.
8. Dankov, L., **Ivanova, M.** Experimental study and analysis of the temperature influence at high voltage periodically attenuating discharge in water. //International scientific conference "Science and technology for sustainable maritime development, Conference proceedings, Nikola Vaptsarov Naval Academy, Varna, 2015, p.87-94, ISBN 978-954-8991-81-0.

Свидетелство за регистрация на полезен модел

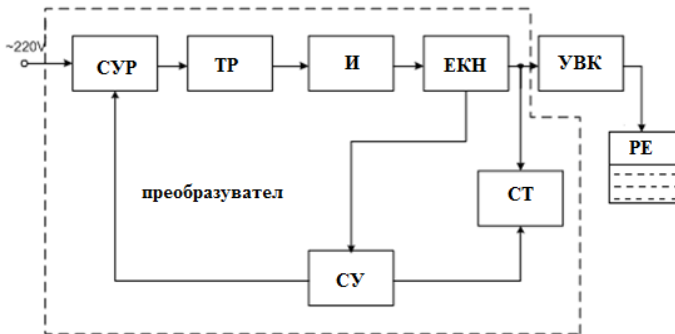
9. Барудов, С., Панов, Е., Барудов, Е., **Иванова, М.** Дискретен стабилизатор на променливо напрежение. Свидетелство за полезен модел, България, BG1727 U1 - 07.08.2013.

Структура и обем на дисертацията

Дисертационният труд съдържа 160 страници, включително 103 фигури, 19 таблици и 2 приложения. Оформен е като въведение, четири глави, изводи и списък на използваната литература от 158 заглавия.

ОСНОВНО СЪДЪРЖАНИЕ НА РАБОТАТА

В първа глава се определят и анализират процесите, които влияят върху електрическите параметри на течната среда при възникване на ВВР и възможните управляеми високоволтови ключове, които могат да се използват. Блоквата схема на устройство за управление на импулсен разряд в течна среда е представена на фиг.1.1.

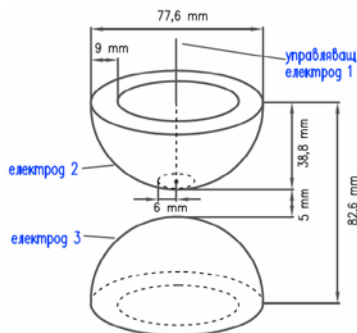


Фигура 1.1. Блокова схема на устройство за управление на импулсен разряд в течна среда

Където: СУР - система за управление на разряда; ТР - трансформатор; И - изправител; ЕКН - елемент за капацитивно натрупване на енергия (работна кондензаторна батерия); СТ - стабилизатор на напрежението на работната кондензаторна батерия; УВК - управляем високоволтов ключ; PE - разряден елемент (течна среда); СУ - схема за управление.

При формирането на високоволтов импулсен разряд във вериги с капацитивно натрупване на енергия, често като ключов елемент се използва управляем въздушен разрядник - тригатрон.

Тригатронът (фиг.1.4) представлява триелектроден въздушен разрядник с две обособени разрядни вериги и два пространствено различни газоразрядни канала, развиващи се последователно във времето. Единият обезпечава възникването на разряда между управляващия електрод 1 и електрод 2, на базата на един пакет високоволтови високочестотни импулси, а вторият формира високоволтов импулсен разряд, на базата на енергията, натрупана в кондензаторна батерия между полусферичните електроди 2 и 3.



Фигура 1.4 Триелектроден управляем разрядник



Фигура 1.6 Тиратрон

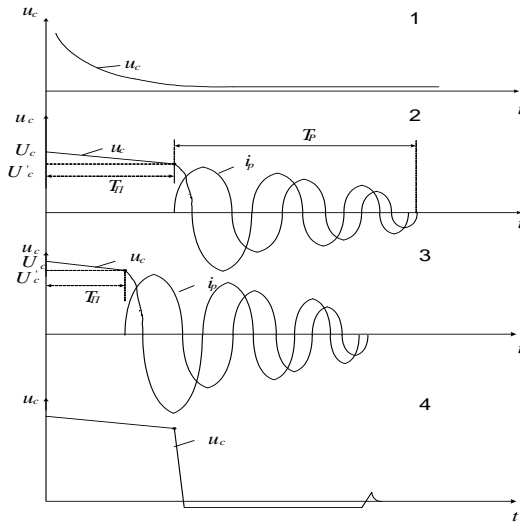
Другият вид използвани високоволтови ключове са тиратроните. Те комутират високи напрежения до 200kV и амплитуда на тока до 100kA, позволяват ширина на импулса от десетки наносекунди до стотици микросекунди и повторяемост на импулса до 70kHz. За експерименталните изследвания в дисертацията е използван водороден тиратрон ТГИ-1000-25.

Процесът на оформяне на разрядния канал (стримера) има статистически характер, затова при изследването му е необходимо да се правят определен брой измервания за постигане на необходимата достоверност на резултатите.

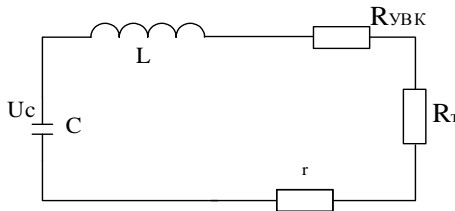
В зависимост от напрежението, до което е зареден кондензаторът C , са възможни различни случаи на развитие на разрядния процес – фиг.1.12:

- 1 – ниско напрежение, следва режим на аperiодично разреждане на кондензатора C през малкото съпротивление на водата между електродите.
- 2,3 – при достатъчно високо напрежение последователно се развиват два процеса: предразряд с време T_n и разряд – T_r . В процеса на предразряда средата между електродите се насища с токоносители. При достигане на определена концентрация на токоносителите се създават условия и възниква разряд. Рязко се разширява разрядния канал.

При отчитане на възможни различни конфигурации на УВК, параметрите на течната среда и енергетичните режими (капацитет на РКБ и напрежение, до което е заредена преди формиране на разрядния импулс) е определен характера на разрядния импулс и са разработени модели с участието само на УВК – $R_{УВК}$ в разрядната верига и на последователно свързаните РМ в УВК ($R_{УВК}$) и РМ в течната среда (R_T) – фиг.1.13.



Фигура 1.12 Развитие на разряда в течност във времето



Фигура 1.13 Разрядна верига с две разрядни междини

Където: $R_{\text{УВК}}$ - съпротивлението на УВК; R_T – РМ в течността; r – отчита съпротивлението на свързващите проводници и паразитното съпротивление на кондензатора; C – капацитет на РКБ; L – индуктивност на свързващите проводници и паразитните индуктивности на паралелно и/или последователно свързаните кондензатори от РКБ.

Разрядният ток за схемата на фиг.1.13 може да се определи от ур.1.18:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\delta \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0 \quad (1.18)$$

Аперидичният режим се получава при по-ниски напрежения (фиг.1.12 - 1). Извършено е моделиране на верига с две разрядни междини – УВК и РМ в течността, като е предложен нелинейно параметрично диференциално уравнение за разрядния ток във веригата. Тъй като, в практиката се използват предимно периодично затихващи ВВРИ, поради техните по-високи енергийни

показатели и следователно по-голяма ефективност при обработката, е целесъобразно изследването да се насочи към този вид разряд.

Анализът на електрическите процеси във вериги за формиране на разряден импулс предполага решаване на проблема с моделирането на разряда.

В най-общ аспект, моделът на разряда има вида – ур.1.19:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k, t), \quad (1.19)$$

$$\frac{dx_p}{dt} = f_p(x_1, x_2, \dots, x_n, t),$$

където:

$i=1,2,\dots,k$; $p=k+1,k+2, \dots, n$

x_1, x_2, \dots, x_k – геометрични параметри (пространствена ориентация) и външни фактори – температура и др.

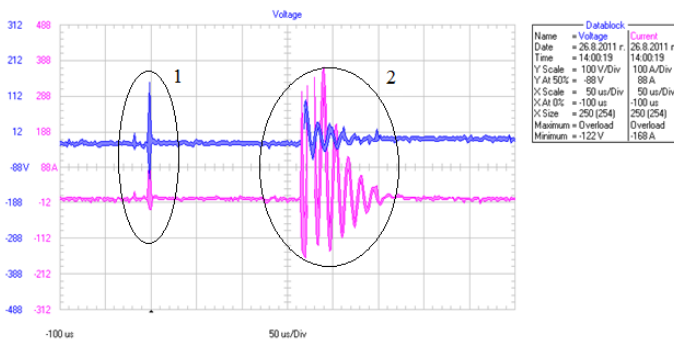
$x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_n$ – енергетични параметри

Моделирането на разряда предполага разкриване характера на функциите, посочени в ур.1.19.

В условията на реализация на високоволтови разрядни импулси следва да се отчете и правото и обратно влияние между газоразрядната междина в УВК и устройството.

Отчитането на всички тези фактори води до трудности при моделирането на такива вериги. Те от своя страна предполагат комбиниран подход, съчетаващ експерименталното изследване на разрядния процес и аналитичното описание на периодично затихващия процес.

Проведени са експериментални изследвания за РВ с РКБ кондензатор с капацитет $0,5\mu\text{F}$ и напрежение, до което е заредена РКБ – $U_C=11,5\text{kV}$ и една РМ - УВК – тригатрон, управляван с един пакет високоволтови високочестотни запалителни импулси (фиг.1.14).



Фигура 1.14 Времедиаграма на високоволтовия разряден импулс при параметри $C=0,5\mu\text{F}$, $U_C=11,5\text{kV}$ във верига с УВК – тригатрон

На фиг.1.14:

1 – Изменението на разрядния ток $i_p=i_p(t)$ (долната крива) и разрядното напрежение $u_p=u_p(t)$ (горната крива) на тригatrona, веднага след подаване на високоволтовите, високофреотни импулси. Следва време за нарастване на концентрацията на токоносителите след подаване на високоволтовите високофреотни импулси - приблизително 160 μ s. Това време зависи от геометрията на УВК и параметрите на пакета високоволтови високофреотни импулси и почти не се влияе от капацитета С на РКБ и напрежението, до което тя е заредена. Причината е, че става дума за два пространствено декомпозирани газоразрядни канала – първият е между управляващия електрод 1 и електрод 2 – фиг.1.4, а вторият е между електроди 2 и 3 в две различни разрядни вериги.

2 - След достигане на необходимата концентрация на токоносителите започва развитието на периодично затихващ импулсен разряд между електродите 2 и 3 – фиг.1.4.

Резултати от експерименталното изследване на разрядна верига с две разрядни междини (УВК и системата електроди в течната среда) също показват периодично затихващ характер на разрядния процес.

Предложена е методика, която позволява на базата на известни капацитет С на РКБ и експериментално определено изменение на разрядния ток във времето във веригата от фиг.1.13 (период и амплитуди на трептенията на затихващото периодично колебание), да се определят останалите параметри на разрядната верига - нелинейното съпротивление R на последователно свързаните РМ и индуктивността L на свързващите проводници и паразитните индуктивности на паралелно и/или последователно свързаните кондензатори от кондензаторната батерия. Разработеният модел на разрядната верига дава възможност за провеждане на многофакторен анализ.

Определянето на съпротивлението и индуктивността на разрядната верига от друга страна може да се използва за оценка на ефективността на възникналия разряд от гледна точка на възникналата ударна вълна.

На базата на модела, след определяне на параметрите на РВ, е определено и налягането (ур.1.37) на повърхността на разрядния канал (p_k) в течната среда, което може да се използва при различни технологични приложения на възникналия високоволтов периодично затихващ импулс.

$$p_k = U_c \left[\frac{K_u \rho_0 (\beta - 1)}{2\pi^3 L \ell_k} \right]^{1/2} . \quad (1.37)$$

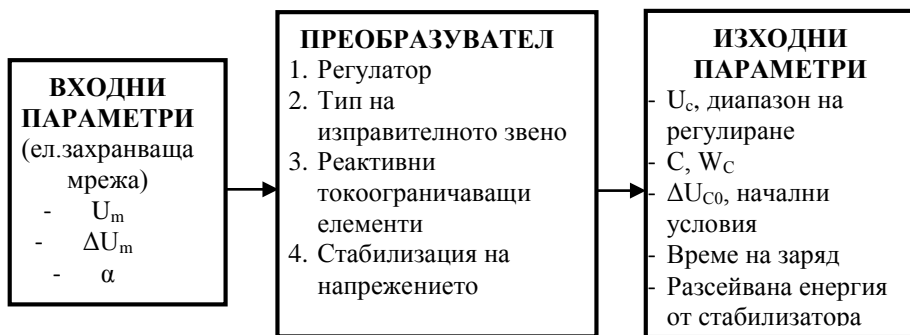
където: U_c – напрежение на кондензаторната батерия в момента на пробив в РМ във водата; K_u – коефициент на използване на РКБ; L –

индуктивност на разрядната верига; ρ_v – плътност на течността (вода); ℓ_k – дължина на разрядния канал.

Във втора глава е извършено моделиране на вериги за капацитивно натрупване на енергия при удовлетворяване на основните изисквания към тези преобразуватели:

- необходимост от регулиране на запасената енергия в широк диапазон, като времето на заряд е ограничено от честотата на разрядните импулси;
- възможност за кратковременна работа в режим близък до късо съединение, тъй като в момента на формиране на разряда, съпротивлението на течната среда е много малко;
- при формиране на периодично затихващи високоволтови разрядни импулси възможност за работа при промяна поляритета на работния кондензатор;
- стабилизация на зарядното напрежение за осигуряване повторемост на генерираните импулси. Подходящо е да се използват паралелни компенсационни стабилизатори, свързани директно към работния кондензатор, както и вериги за предразряд при ниска честота на разрядните импулси.
- ограничаване на зарядния ток с различни токоограничаващи реактивни елементи.

Веригата за натрупване на енергия може най-общо да се представи като преобразувател, на който трябва да се имат в предвид връзките между входните и изходните параметри – фиг.2.1.



Фигура 2.1 Блокова схема на връзките между входните и изходните параметри на верига за капацитивно натрупване на енергия

където: $U_m, \Delta U_m$ – амплитуда и изменението на входното напрежение; α – ъгъл на проводимост на регулатора; C, W_c – капацитет на кондензаторната батерия и енергия, запасена в нея; ΔU_{c0} – начално напрежение на заряд.

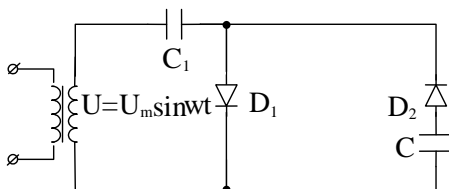
Отчита се, че веригата е нелинейна и времето на заряд зависи от редица фактори – $t_3 = t_3(C, U_c, U_m, \Delta U_m, \alpha)$. Максималният заряден ток $i_{3,max} = i_{3,max}(C, U_m, \Delta U_m, \alpha)$ и разсейваната мощност от стабилизатора $P = P(C, U_c, U_{C0}, U_m, \Delta U_m, \alpha)$ също са функция на параметрите на захранващата електропреносна мрежа и тези на елементите от силовите вериги на преобразувателя.

Процесът на работа на преобразувателното звено може да се раздели на два периода:

- $U_c < U_{C0}$ - капацитивно натрупване на енергия;
- $U_c \geq U_{C0}$ - процес на стабилизация.

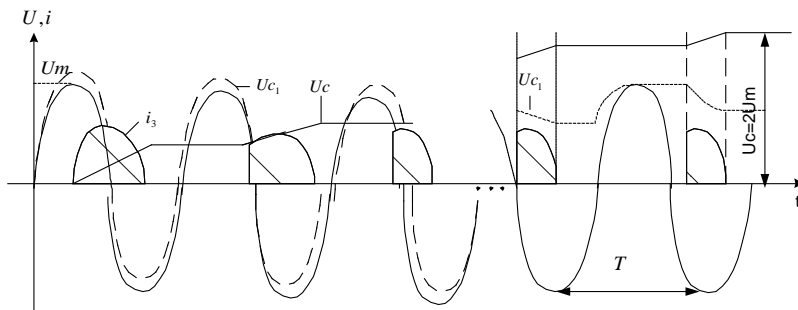
Разработено е унифицирано схемно решение на преобразувател във вериги за капацитивно натрупване на енергия, базиран на повишаващ трансформатор с разсейване и променливотоков регулатор от страна ниско напрежение, изправителни звена с капацитивно токоограничаване (схема Греци и удвоител на напрежение) и паралелен стабилизатор включен към РКБ.

Извършено е моделиране на процесите в зарядни вериги за капацитивно натрупване на енергия, които трябва да удовлетворяват изискванията към зарядния процес, реализирана със схема Греци или с удвоител на напрежение (фиг.2.9).



Фигура 2.9 Верига за капацитивно натрупване на енергия с използване на удвоител на напрежение.

Представено е математическо описание на зарядния процес (фиг.2.10) на ЗВ с удвоител на напрежение от процеса на зареждане на РКБ за веригата от фиг.2.9.



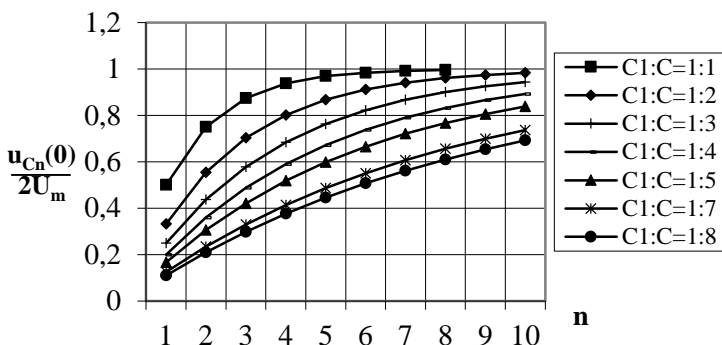
Фигура 2.10 Заряден процес в удвоител на напрежение

$$\frac{u_{C_n}(0)}{2U_m} = 1 - (1 - A)^{n-1}, \quad (2.10)$$

където: $u_{C_n}(0)$ е напрежението, до което се зарежда РКБ след n периода. U_m - амплитудна стойност на входното захранващо напрежение, ω - кръгова честота; $A = \frac{C_1}{C_1 + C}$, $n - 1 = \frac{t}{\Delta t} = \frac{\omega t}{\pi}$ - предходен интервал на зареждане.

Ограничаването на зарядния ток може да се осъществи в променливотоковата част на изправителната секция. Токо-ограничаващият елемент може да бъде елемент от самото изправително звено, единият кондензатор в несиметричен удвоител - C_1 (фиг.2.9) или допълнително включени capacitивни токоограничаващи елементи.

На фиг. 2.11 е представено напрежението на зареждане на РКБ в зависимост от отношението $C_1:C$.



Фигура 2.11 Нарастване на напрежението за първите 10 периода във функция от отношението между токоограничаващия C_1 и работния кондензатор C

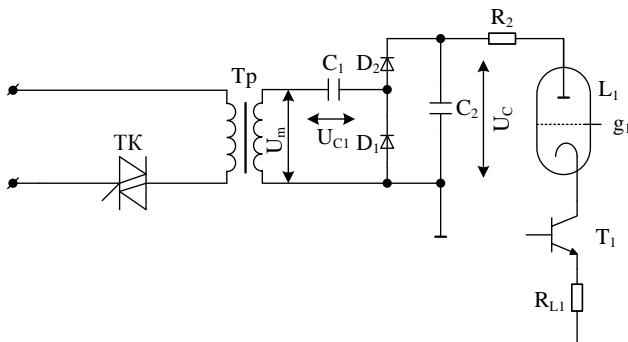
Амплитудата на импулса на зарядния ток може да се определи чрез ур.2.11:

$$I_{3m} = U_m \omega \frac{C_1 \cdot C}{C_1 + C}. \quad (2.11)$$

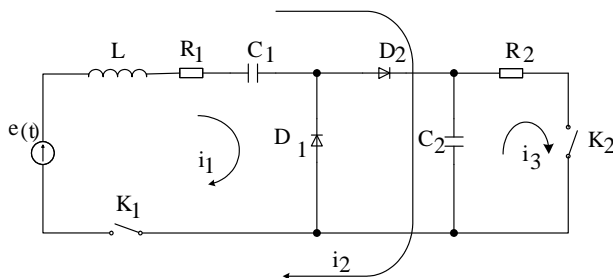
Стабилизацията на зарядно напрежение при $U_C \geq U_{C0}$ се осъществява чрез включен паралелен стабилизатор към РКБ – фиг.2.20.

На показаната на фиг.2.20 система са формирани два кръга за управление – регулатор на променливо напрежение на входа и паралелен стабилизатор на изхода. Това дава възможност при независимо задаване в широк диапазон на контролираните параметри – време на заряд и напрежение, до което се зарежда РКБ, да се осигурява нестабилност на последното под 1% и намалено

натоварване на елементите от преобразувателя и входната електрозахранваща мрежа.



Фигура 2.20 Принципна схема на ЗВ с паралелен стабилизатор
 Еквивалентната схема за анализ на фиг.2.20 е показана на фиг.2.21.



Фигура 2.21 Еквивалентна схема на система за кондензаторно натрупване на енергия, реализирана като удвоител с ключ за управление в променливотоковата страна и паралелен стабилизатор в постояннотоковата страна

където: $e(t)$ е напрежението на вторичната страна на входния трансформатор $ВТр_1$; L и R_1 са приведените индуктивност и съпротивление на вторичната намотка на трансформатора; K_1 – ключ за представяне на тиристорен ключ; R_2 , K_2 – паралелен стабилизатор.

Допусканията са, че трансформаторът може да се представи само с $e(t)$, L и R_1 , т.е. не се отчитат загубите в стоманата; ключовете в променливо - и постояннотоковата вериги са идеални и времекоптантата във веригата за управление на тиристорния ключ (два паралелно свързани тиристора) е достатъчно голяма, т.е. ъгълът на управление α в хода на зарядния процес не се променя.

Веригата от фиг.2.21 е анализирана по метода с променливите на състоянието, като се формират няколко интервала във времевата област, които се повтарят циклично в процеса на зареждане на кондензатора C_2 .

За n -тия интервал от процеса на зареждане електрическите процеси в схемата от фиг.2.21 е валидно ур.2.21:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{C_2}(t) \\ u_{C_1}(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 & \frac{1}{C_2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_1} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & -\frac{R_1}{L_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{C_2}(t) \\ u_{C_1}(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} [e(t)] \quad (2.21)$$

Решението му е от вида:

$$[x_2(t)] = \begin{bmatrix} u_{C_2}(t) \\ u_{C_1}(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = [x_2(t_e +)] e^{[A_3](t-t_e)} + e^{[A_3]t} \cdot \int_{t_e}^t e^{-[A_3]\tau} \cdot [B_3] [f(\tau)] d\tau$$

Където:

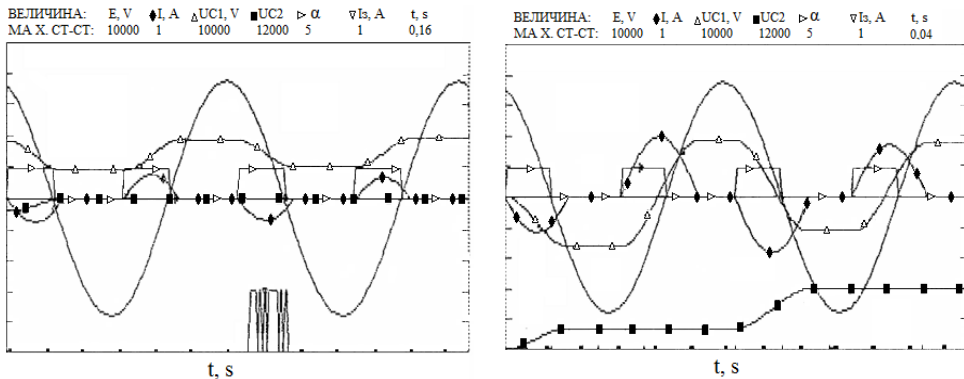
$$[A_3] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 & \frac{1}{C_2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_1} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & -\frac{R_1}{L} \end{bmatrix}; \quad [B_3] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}; \quad [f(\tau)] = [e(\tau)] \quad (2.22)$$

Решението е съгласно уравнението на Коши.

При решението ѝ е използван MATLAB. Началото и края на зарядния процес са представени на фиг.2.26, използвайки програмен продукт MATLAB за ъгъл на проводимост $\alpha=1,9$ rad; $L=50$ H; $R_1=3$ k Ω ; $C_1=0,25$ μ F; $C_2=1$ μ F и $R_2=30$ k Ω .

Методът на описание на ЗВ позволява и въвеждането на ненулеви начални условия.

Следователно за определен ъгъл и режим (време на заряд и зарядно напрежение) може да се дефинира подходящ ъгъл на проводимост за тиристорния ключ, който да осигури режима и намалено натоварване на елементите в зарядната верига. Такъв ъгъл на проводимост следва да намалява, когато е включен паралелния стабилизатор. Заедно с това намалява и разсейваната мощност от паралелния стабилизатор.



Фигура 2.26 Заряден процес

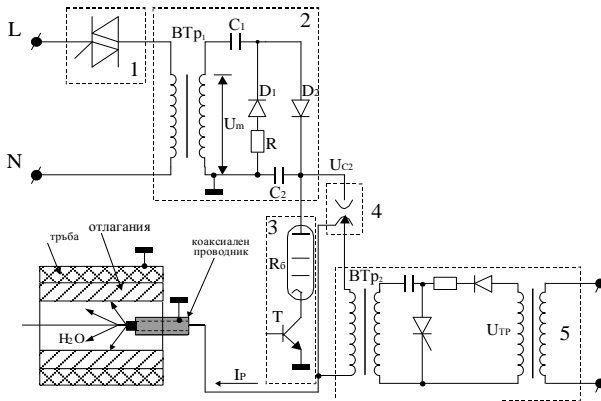
Трета глава е посветена на синтез на схеми на преобразуватели за кондензаторно натрупване на енергия и формиране на високоволтов периодично затихващ разряден импулс в течна среда.

В системите за реализиране ВВРИ, управлението на процеса на натрупване на енергия може да се осъществи чрез управляем тиристорен ключ (ТК), пропускащ части от синусоида на входното захранващо напрежение. Недостатък на такова схемно решение се явяват високото ниво на хармонични и нисък $\cos \phi$, зависещи от режима на работа на ключа. Част от тези недостатъци могат да се преодолеят като управляемия ТК се замени със стъпален дискретен регулатор на големината на входното променливо напрежение (СРГПН).

Принципна схема на система за реализиране на високоволтови разрядни импулси в течна среда с използване на ТК е представена на фиг.3.1.

Предложеното схемно решение за преобразувател включва: тиристорен регулатор на променливо напрежение, реализиран с ТК (1); повишаващ трансформатор с разсейване (2); несиметричен удвоител на напрежение с ограничаване на тока през изправителни диоди при възникването на периодични затихващи разрядни импулси през съпротивлението R (2); паралелен стабилизатор (3); УВК – тригatron (4) и съответната му схема за управление (5).

Схемата представя едно от възможните технологични приложения на високоволтов импулсен разряд в течна среда, а именно почистване от накипи и отлагания. В метални тръби разрядът се реализира между жилото на коаксиалния проводник и заземената метална тръба, а при неметални тръби – между жилото и заземената оплетка на коаксиалния проводник.



Фигура 3.1 Блокова схема на устройство за управление на разряд в течна среда

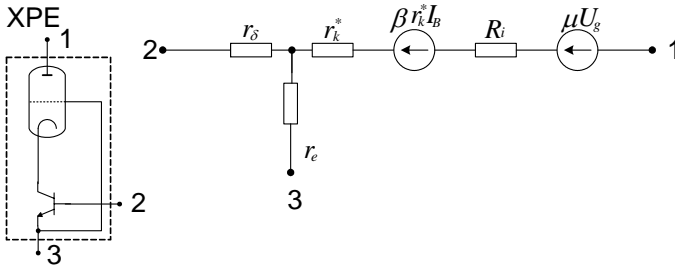
Системата дава възможност, при осигуряване на контролираните параметри време на заряд на РКБ t_3 и напрежението, до което е заредена РКБ - U_{C2} чрез подбор на U_m и α , да се реализира и намалено токово натоварване за периода $U_{C2} < U_{C0}$ и след това при $U_{C2} \geq U_{C0}$ с промяна на α да се осъществи намаляване на разсейваната мощност.

За повтораемост на параметрите на разрядните импулси е необходимо стабилизиране на напрежението на заряд върху работния кондензатор. За стойности на $U_{C2} = 6 \div 12 \text{ kV}$ регулиращият елемент на стабилизатора може да бъде само хибриден лампово-транзисторен (ХРЕ).

На фиг.3.2 е посочен вариант на лампово-транзисторен ХРЕ, като транзисторът изпълнява ролята на катоден динамичен товар. На същата фигура е посочена и заместващата схема на ХРЕ, Където: r_δ , r_k^* , r_e и $\beta r_k^* I_b$ са елементи от Т - образната заместваща схема на транзистор; R_i и μU_g - представят заместваща схема на електронната лампа; $\mu = \frac{U_a}{U_g}$, U_a -

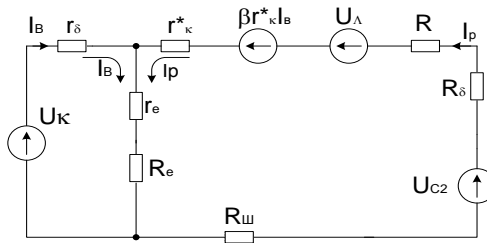
напрежение на анода на лампата, а U_g - на управляващата решетка; $R_i = \frac{U_a}{I_a}$

, I_a е аноден ток на лампата.



Фигура 3.2 Лампово - транзисторен XPE

Заместващата схема на силвата верига от фиг.3.4 е посочена на фиг.3.5.



Фигура 3.5 Заместваща схема на силвата верига от фиг.3.4

Представен е математически модел на електрическия процес за случаите на използване на параметричен и компенсационен стабилизатор – съответно ур.3.2 и ур.3.3:

$$\begin{cases} I_B A_1 + I_P [(\mu - 1)(R_e + r_e + r_k^*) - R_i - R_\delta] = -U_{C2} \\ I_B A_2 + I_P (R_e + r_e) = U_0^* \end{cases}, \quad (3.2)$$

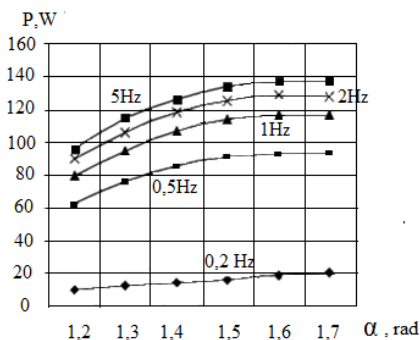
$$\begin{cases} I_B A_1 + I_P [(\mu - 1)(R_e + r_e + r_k^*) - R_i - R_\delta - R_{ш}] = -U_{C2} \\ I_B A_2 + I_P (R_e + kR_{ш} + r_e) = kU_0^* \end{cases}. \quad (3.3)$$

където: $A_1 = \beta r_k^* (\mu + 1) + (r_e + R_e)(\mu - 1)$, $A_2 = r_e + R_e + r_e$.

Предложени са схеми за управление на транзистора в катодната верига на електронната лампа от XPE.

Изследвана е нестабилността за случай на електронна лампа ГИ7Б и транзистор КТ809 и за $\Delta U_{C2} = 10\%$, $\Delta R_i = 10\%$, $\Delta r_k^* = 10\%$, $\Delta \mu = 10\%$. Определена е мощността P разсейвана от XPE за параметрите $L=50\text{H}$, $R=3\text{k}\Omega$, $C_1=0,25\mu\text{F}$, $C_2=1\mu\text{F}$ и $R_\delta=30\text{k}\Omega$ и $U_{C0}=6\text{kV}$ при различна честота на управление

на разрядните импулси - 0,2; 0,5; 1; 2 и 5 Hz и ъгъл на проводимост на тиристорния ключ α (фиг.3.1) в диапазона $1,2 \div 1,7$ rad – фиг.3.7.



Фигура 3.7 Разсейвана мощност от ХРЕ в зависимост от ъгъла на проводимост на симисторния ключ

Аналитично получените резултати са сравнени с експериментални за ХРЕ базиран на триод ГИ7Б и транзистор КТ809 и показват добро съвпадение – нестабилност под 3% и разсейвана мощност не по-висока от 140W.

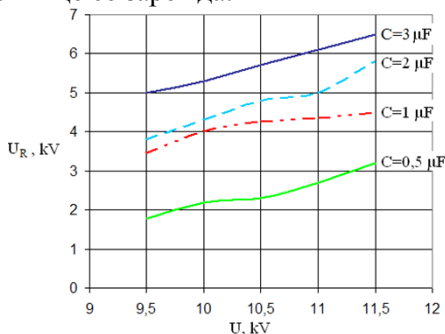
Недостатъци на системата от фиг.3.1 се явяват високото ниво на хармонични и нисък $\cos \varphi$, зависещи от режима на работа на управляемия ТК.

Процесите в ЗВ и РВ на системата за формиране на ВВРИ са взаимно свързани. За реализацията на устройството е изследвана електромагнитната съвместимост по отношение на защита на системата от преобразуватели в ЗВ от разпространението на ВВРИ импулс.

Възникването на високоволтовия импулс не е синхронизирано с мрежовото захранващо напрежение т.е. описания процес може да се насложи във всеки произволен момент от работата на несиметричния удвоител от фиг.3.1. Формираният еднополярен импулс с продължителност $t=1/2f_0$ при отпушването на D_1 и D_2 прави пад върху R , който се прилага върху последователно свързаните C_1 и високоволтовите намотки на BT_{p1} – фиг.3.1. Следователно, изолационното ниво на тези намотки следва да бъде определено за U_c спрямо първичната намотка на BT_{p1} и спрямо магнитопровода на последния.

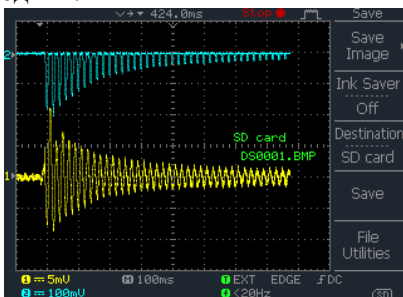
Съпротивлението R участва в процеса на работа на несиметричния удвоител в едната полуваляна при зареждането на C_1 , увеличава времето на зареждане на C и следва да се отчита при определяне максималната честота на следване на разрядните импулси. Изследвано е изменението на напрежението върху R при различни U_c (фиг.3.12). Получените резултати дават възможност за избор на R за защита върху D_1 и D_2 , при минимални загуби в процеса на

зареждане при избран капацитет на работната кондензаторна батерия и напрежение, до което тя ще се зарежда.

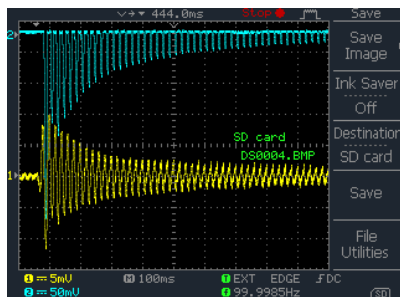


Фигура 3.11 Изменението на U_R във функция от U_c при параметър C за първата полуълна

Проведените са експериментални изследвания за пада върху R за капацитет на РКБ $C=0,5; 1; 2$ и $3 \mu\text{F}$ и напрежение на зареждане на РКБ $U_c=9,5 \div 11,5 \text{ kV}$ при $U_{c0}=0$ и при не напълно разреждана РКБ. Получените резултати дават възможност за оценка на продължителността на процеса на зареждане т.е. максималната честота на следване на зарядните импулси, както асиметрията в натоварването на VT_{p1} , което е от значение на проектирането на последния.



а) $U_c = 9,5 \text{ kV}$



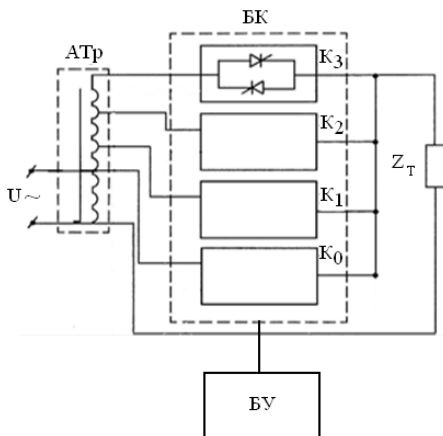
б) $U_c = 10 \text{ kV}$

Фигура 3.12 Процес на заряд на РКБ с капацитет $C=3\mu\text{F}$ при начално напрежение $U_c = 0$ (горната графика – зарядно напрежение, долната графика – заряден ток)

Изследван е вариант с използване на монофазен стъпален регулатор на големината на променливо напрежение (СРГПН), който дава възможност да се регулира входното напрежение в рамките на различните периоди на зареждане на РКБ. На фиг. 3.14 е показана силовата верига на монофазен СРГПН, където БК е блок комутатор. БК е изграден на базата на полупроводникови ключове $K_0 \div K_3$. БУ е блок за управление, който подава управляващите сигнали за

включване и изключване на ключовете. Броят на ключовете зависи от границите на стабилизиране на изходното напрежение и най-ниската стойност на входното захранващо напрежение.

Превключването на тиристорните ключове (ТК) се извършва след определен брой периоди на входното напрежение, считано от началото на процеса на заряд на РКБ. Разгледано е функционалното действие на СРГПН и принципна схема на два съседни тиристорни ключа.



Фигура 3.14 Силова верига на монофазен стъпален регулатор на големината на променливо напрежение

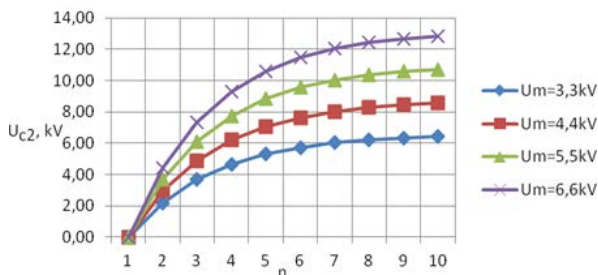
С използване на СРГПН се осигурява възможност за регулиране на големината на входното напрежение с цел осигуряване на по-малко натоварване на елементите на веригата за капацитивно натрупване на заряд и на електропреносната мрежа. Чрез промяна на стъпката на регулиране на входното напрежение през различните периоди могат да се осигурят подходящи режими на зареждане за различни технологични приложения.

На базата на ур.2.10 и при параметри параметри на елементите от фиг.3.1, посочени в табл.3.1, е проведено изследване на зарядния процес на кондензатора C_2 .

$C_1, \mu F$	1			
$C_2, \mu F$	2	4		
U_{c2}, kV	6	8	10	12
U_m, kV	3,3	4,4	5,5	6,6
$T, \text{бр.периоди}$	10			

Таблица 3.1 Параметри при изследването

При използване на управляем ТК, изменението на напрежението u_{c2} за първите 10 периода на подаване на входното захранващо напрежение при $C_2=2\mu\text{F}$ е представено на фиг.3.29.



Фигура 3.17 Графика на изменението на u_{c2} за първите 10 периода на зареждане на кондензаторната батерия при $C_2=2\mu\text{F}$ без въвеждане на корекция на големината на входното захранващо напрежение.

Предложени са няколко варианта на корекция на амплитудите на захранващото напрежение през различните периоди от процеса на зареждане на РКБ – табл.3.4, които могат да се постигнат с такъв СРГПН.

№ период	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Корекция 1	U_m	U_m	U_m	U_m	U_m	$1U_m$	$1U_m$	$1U_m$	$1U_m$	$1U_m$
Корекция 2	U_m	U_m	U_m	U_m	U_m	$2U_m$	$2U_m$	$2U_m$	$2U_m$	$2U_m$
Корекция 3	U_m	U_m	U_m	$1,1U_m$	$1,1U_m$	$1U_m$	$2U_m$	$2U_m$	$2U_m$	$2U_m$
Корекция 4	U_m	U_m	U_m	$1,1U_m$	$1,1U_m$	$1U_m$	$4U_m$	$4U_m$	$4U_m$	$4U_m$
Корекция 5	U_m	U_m	U_m	$1,2U_m$	$1,2U_m$	$2U_m$	$4U_m$	$4U_m$	$4U_m$	$4U_m$

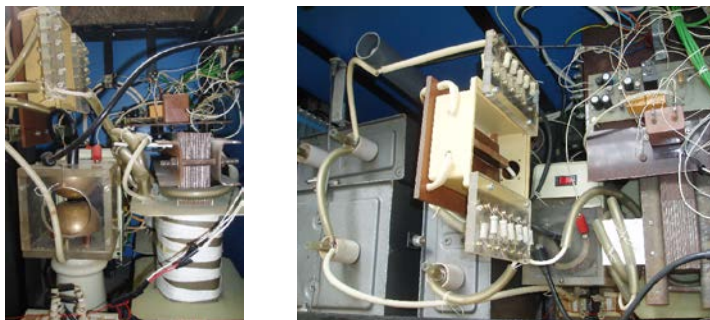
Таблица 3.4 Корекция на амплитудата на входното захранващо напрежение при използване на ДРГПН.

За изследване на електромагнитната съвместимост със захранващата мрежа е определен експериментално THD с измервател на качеството на електрическата енергия FLUKE 43B на входа и изхода на СРГПН. В хармоничния състав на входното напрежение на СРГПН при работа на системата за формиране на ВВРИ във вода се забелязва наличието на по-висока пета хармонична, но стойностите на всички хармонични са под допустимите според БДС EN50160 [8] и под допустимите стойности за електроенергийните корабни мрежи. При комутация на СРГПН нивата на хармониците също не надвишават определените стойности.

Управлението на големината на входното захранващо напрежение чрез дискретен тиристорен регулатор в системи за капацитивно натрупване на енергия е новост, защитена със свидетелство за полезен модел.

В четвърта глава е проведено експериментално изследване на системи с капацитивно натрупване на енергия за формиране на високоволтов периодично затихващ разряден импулс във вода на системата от фиг.3.1 при два различни УВК – тригатрон и тиратрон ТГИ-1000/25.

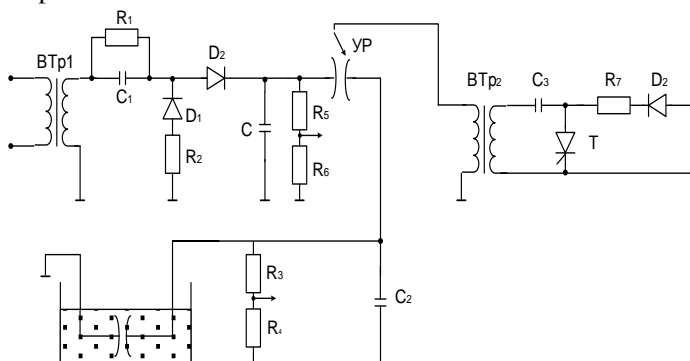
Системата е проектирана и изградена, като са отчетени спецификите на зарядните и разрядните вериги, които са разгледани в предходните глави – фиг.4.1.



Фигура 4.1. Експериментален прототип за формиране на ВВРИ в течна среда

В зарядната верига се използва несиметричен удвоител на напрежение за зареждане на система за капацитивно натрупване на енергия (кондензаторна батерия, включваща последователно и/или паралелно свързани кондензатори с капацитет $C=0,5\div 2\mu F$ до напрежение $U_C = 9,5\div 11,5kV$. За свързване на РМ във водата със системата са използвани коаксиални кабели, които имат малка индуктивност. Това влияе върху честотата и отдаваната енергия в РМ.

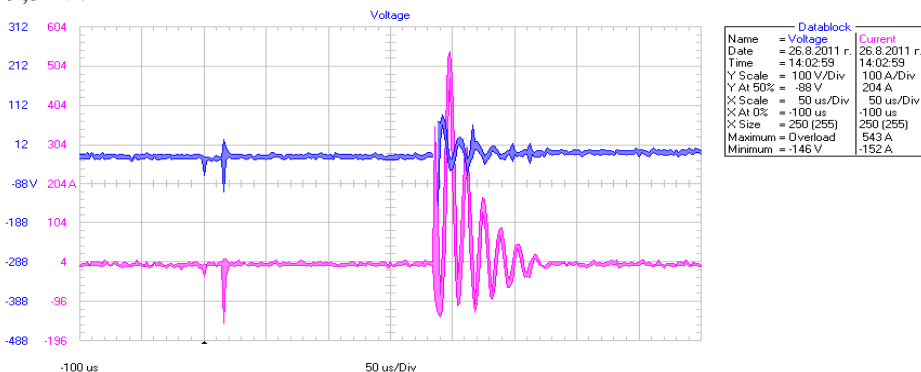
Схемата на разрядния и зарядния контур при използване на тригатрон е показана на фиг.4.2.



Фигура 4.2 Принципна схема на зарядна и разрядна вериги на система за формиране на високоволтов периодично затихващ разряд в течна среда с използване на УВК- тригатрон

Експерименталните изследвания са проведени при РВ натоварена само с УВК (една разрядна междина) и натоварена с УВК и РМ във вода (две разрядни междини). От получените резултати за разрядния процес в РВ е изследвано изменението на разрядния ток – $i_{УВК}=i_{УВК}(t)$; напрежението върху УВК – $u_{УВК}=u_{УВК}(t)$; напрежението, до което остава заредена РКБ – C , след разпадане на газоразрядния канал в УВК (преустановяване на разрядния процес) - U_c^* ; енергията W, J , отдавана в газоразрядната междина; съпротивлението $R_{УВК}=R_{УВК}(t)$ на газоразрядната междина на УВК при параметри капацитет на РКБ и напрежение, до което е заредена преди формиране на разрядния импулс – U_c .

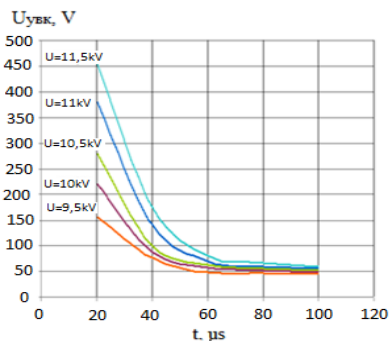
Управлението на тригatron се реализира с подаване на високоволтови високочестотни импулси. Развитието на периодично затихващия импулсен разряд може да се проследи на фиг.4.3 за капацитет на РКБ $C=0,5\mu F$ и $U_c=9,5kV$.



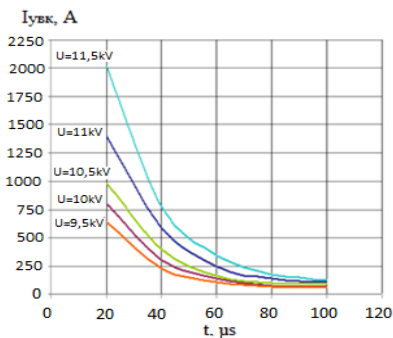
Фигура 4.3 Разряден процес с използване на УВК - тригatron при $C=0,5\mu F$

Характерът на разрядния процес е периодичен затихващ, като времето на нарастване на концентрацията на токоносителите след подаване на високоволтовите високочестотни импулси почти не се променя. Това време зависи от геометрията на управляемия разрядник и параметрите на пакета високочестотни импулси и почти не се влияе от капацитета C на кондензаторната батерия и напрежението, до което тя е заредена U_c . Разрядният ток $I_{УВК}$, напрежението на разряд $U_{УВК}$ и продължителността на разрядния процес се увеличават, като това се дължи на по-голямата енергия, запасена в РКБ при РВ натоварена само с РМ на УВК.

В съответствие с получените резултати, изменението на обвивната крива на амплитудите на колебанията по напрежение върху УВК-тригatron (а) и ток (б) в първите $100\mu s$ при параметри капацитет на РКБ и напрежение, до което е заредена – U_c , може да се проследи на фиг.4.5 за стойност $C=0,5\mu F$.



а) $U_{увк} = U_{увк}(t)$



б) $I_{увк} = I_{увк}(t)$

Фигура 4.5 Обвивни криви на разрядния ток и напрежение при $C=0,5 \mu F$

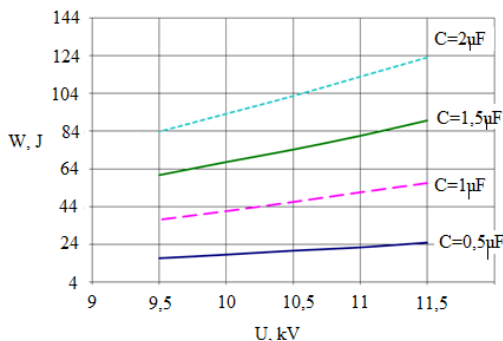
Изследването е проведено за стойности на capaciteta $C=0,5; 1; 1,5; 2 \mu F$.

Напрежението, до което остава заредена РКБ, след възникването на разряда U_c^* се изменя в границите $2,5kV \div 5,7kV$ за различни стойности на C и нараства с увеличаване на напрежението, до което е заредена РКБ – $U_c=9,5 \div 11,5kV$. Характерът на изменението на U_c^* зависи от параметрите на процесите в газоразрядната междина, изразяващи се в нарастване на $R_{увк} = R_{увк}(t)$ при увеличаване на U_c и намаляване на C .

Изменението на U_c^* оказва влияние и на енергията W на разрядния импулс – ур. 4.1.

$$W = \frac{C}{2} (U_c^2 - U_c^{*2}) \quad (4.1)$$

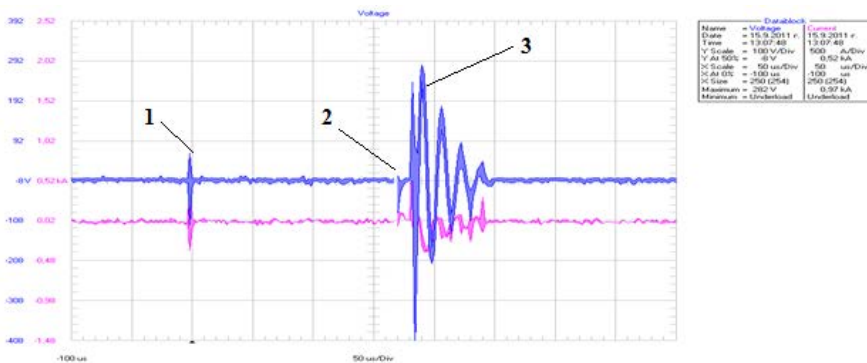
На фиг.4.10 е посочено изменението на $W=W(U_c)$ при параметър capacitет на РКБ.



Фигура 4.10 Зависимост на енергията на разрядния импулс, запасена в РКБ от напрежението, до което е заредена

Проведени са експериментални изследвания за разрядна верига натоварена с две РМ (тригatron и течна среда) при капацитет на РКБ $C=0,5\div 2\mu\text{F}$ и $U_c=9,5\div 11,5\text{kV}$. Разрядът и в този случай е затихващ периодичен – фиг.4.11в, като се наблюдават три времеви интервала:

1. Подаване на високоволтовите, високочестотни импулси за управление на тригatrona. Следва време за нарастване на концентрацията на токоносителите след подаване на високоволтовите високочестотни импулси - приблизително $160\ \mu\text{s}$.
2. След достигане на необходимата концентрация на токоносителите започва развитието на периодично затихващ импулсен разряд между електродите 2 и 3 – фиг.1.4. Следва време за нарастване на концентрацията на токоносителите (време на предразряд) във водата. Скоростта на намаляването на напрежението през периода на предразряд зависи от съпротивлението на РМ.
3. Възникване на разряден импулс в течната среда.

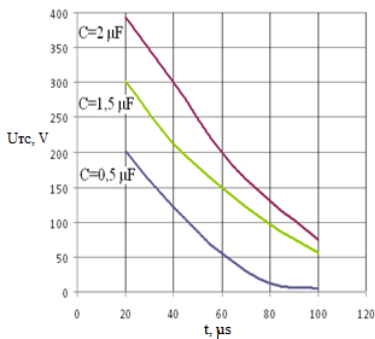


в) $U_c=9,5\text{kV}$

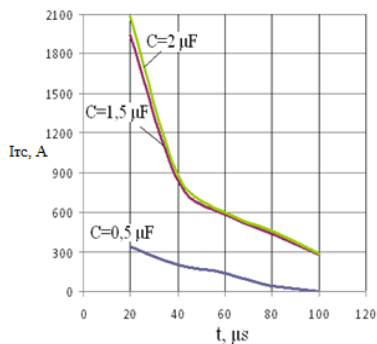
Фигура 4.11 Разряден процес във верига с УВК – тригatron и течна среда при $C=0,5\mu\text{F}$

Получени са обвивните криви за разрядния ток през двете последователно свързани УВК и РМ и разрядното напрежение в течната среда – фиг.4.14.

При намаляване на напрежението приложено към УВК - U_c^* под определена стойност започва процес на разпадане на газоразрядната плазма в УВК. Измененията във времето на електропроводимостта и токопроводимостта при разпадане на газоразрядната плазма имат експоненциално намаляващ характер, но с различни времеконстанти.



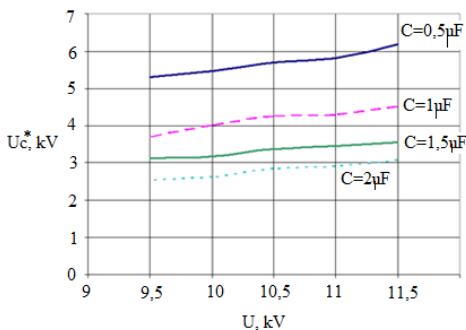
а) $U_{TC} = U_{TC}(t)$



б) $I_{TC} = I_{TC}(t)$

Фигура 4.14 Обвивни криви на разрядния процес в течната среда при $U_c = 11,5 \text{ kV}$

Проведените експериментални изследвания показват, че процесът на преустановяване на разряда зависи както от напрежението, до което е заредена РКБ, така и от капацитета ѝ. На фиг.4.15 е посочено изменението на $U_c^*(U_c)$ за случай на последователно свързаните УВК и РМ във вода, присъединени към РКБ.

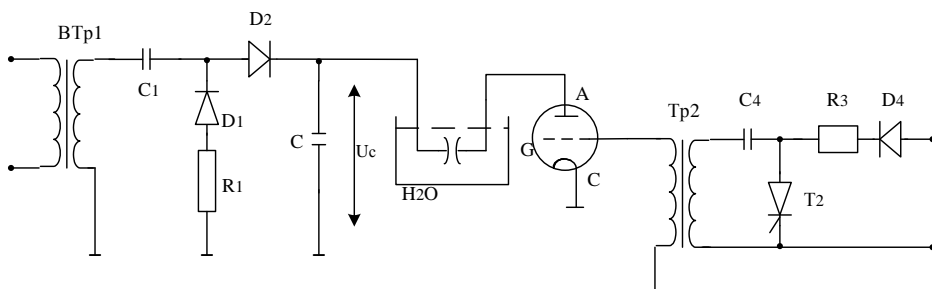


Фигура 4.15 Зависимост на напрежението, до което остава заредена РКБ след преустановяване на разряда от напрежението, до което е заредена в началото РКБ

За експериментално полученият високоволтов разряден процес при използване на системата от фиг.4.2, за РВ с две разрядни междини отново се наблюдава затихващ периодичен характер на разрядния процес. Нелинейностите на разрядните среди оказват влияние върху характера на затихването, определен експериментално в диапазона $20 \div 100 \mu\text{s}$ след формирането на високоволтовият разряд. Напрежението на преустановяване на разряда в управляемия въздушен разрядник нараства в зависимост от

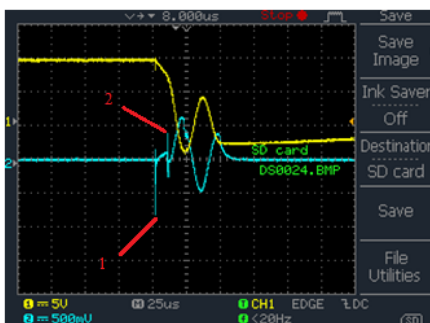
енергията натрупана в работната кондензаторна батерия преди формиране на високоволтовия разряд и количествено е оценено.

Изследвана е и система за формиране на високоволтов разряден импулс в течна среда с използване на управляем разрядник – тиратрон ТГИ-1000/25 - фиг.1.10, като високоволтов ключ – фиг.4.16.



Фигура 4.16 Принципна схема за реализиране на импулсен разряд във вода с използването на тиратрон

На фиг. 4.17д е отбелязан моментът 1, в който възниква разряд в УВК (тиратрона), следва време на нарастване на токоносителите в течната среда и настъпва момент 2 - възникване на разряда в течната среда. Продължителността на разрядния процес се увеличава при по-голяма стойност на капацитета на РКБ. В зависимост от състоянието на РМ преди началото на всеки разряден процес и енергията, запасена в РКБ, процесът може да се получи и с аperiодичен характер.



д) $U_C=9.5kV$

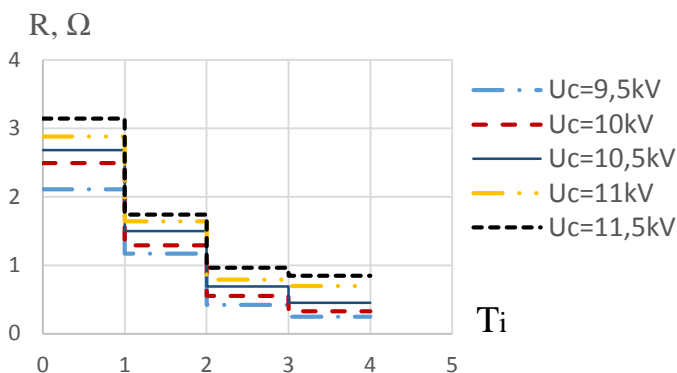
Фигура 4.17 Разряден процес с използване на УВК – тиратрон при $C=0.5\mu F$

Недостатък на схемата за управление на тиратрона е необходимостта от подаване на обратно анодно напрежение в условията на периодично затихващ разряден импулс.

Извършен е сравнителен анализ на експериментално получените резултати за импулсен разряд във вода при използването на два варианта на високоволтов ключ – тригатрон и тиратрон

На базата на получените експериментални резултати при изследване на системата за формиране на ВВРИ с УВК тригатрон и тиратрон, с една и две разрядни междини, са определени параметрите на разрядните вериги – $R_{УВК}(t)$, $R(t)$, $L(t)$.

За случая на РВ натоварена с УВК – тригатрон и РМ в течната среда, зависимостта на съпротивлението $R_1 = R_{УВК1} + R_{TC} = R_1(t)$ е представена на фиг. 4.29 при $C=0,5\mu F$, като стойностите на R_1 при различни C достигат $5,55\Omega$. Резултатите за $R_2 = R_{УВК2} + R_{TC} = R_2(t)$ при използване на тиратрон и РМ в течна среда при различни C достигат $4,09\Omega$.



Фигура 4.29 Зависимост $R_1 = R_1(T_i)$ при $C=0,5\mu F$

Оценено е използването на РКБ за двата вида УВК посредством определяне на коефициент на използване на РКБ. Стойностите на коефициента на използване на РКБ за двата вида УВК са най-големи през първия период на периодично затихващия ВВРИ, което се дължи на по-голямата енергия на разрядния импулс в рамките на този период.

Характерът на кривите за $R_{УВК}(T_i)$ и $R(T_i) = R_{УВК} + R_{TC}$ позволява математическо моделиране на процеса чрез апроксимация с хипербола

$R = \frac{a}{t} + b$. Определени са стойностите на коефициентите a и b за апроксимиране на получените резултати за изменението на $R_{УВК}(t)$ и $R(t)$.

Изчислената грешка от апроксимацията показва добро съвпадение. Коефициентите на апроксимация а и б са функция от капацитета на РКБ и напрежението, до която тя е заредена: $a = a(C, U_c)$ и $b = b(C, U_c)$ и зависят от броя проведени експерименти. След експериментално изследване могат да се определят аналитични зависимости за последните.

На базата на получените резултати за L_k и K_n , от ур.1.37 е определено налягането в разрядния канал при параметри – $\rho_v=1000\text{kg/m}^3$, $l_k=3\text{ mm}$ при възникване на ВВРИ за първите четири периода на затихващото трептене.

Съответно при увеличаване на РМ във водата, стойностите на налягането намаляват. Налягането на ударната вълна при използване на УВК - тригatron е значително по-голямо (почти два пъти) в сравнение със същото при възникване на разряд във верига с УВК - тирatron. Следователно ударната вълна при използване на УВК - тригatron ще има по-голяма ефективност при премахването на накипи и отлагания по тръбопроводи и биологично почистване на различни води.

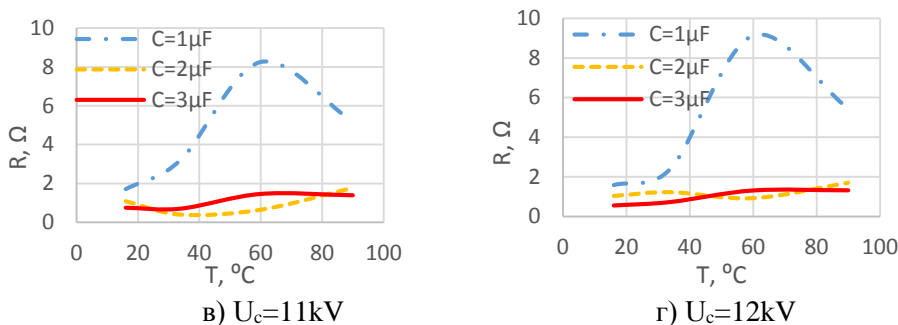
Проведени са експерименти за оценка на биологичното въздействие на система с капацитивно натрупване на енергия за формиране на ВВРИ във вода. Третираната вода е предварително замърсена с бактерии E.Coli (отпадна вода). Параметрите на прототипа са капацитет на РКБ $C=3\mu\text{F}$ и напрежение на зареждане на РКБ – $U_c=11\text{kV}$. Началните параметри на пробата на водата преди третирането са: $T=20^\circ\text{C}$, $\text{pH}=7,01$, електропроводимост - $570\mu\text{S}$, разтворени частици – 287ppm . Извършена е обработка с 50 импулса на отпадната вода с обем 2л. Биологичният анализ на пробата на водата след третирането показва понижаване на концентрацията на E.Coli с 40%. След обработката се наблюдава повишаване на pH на водата, понижаване на концентрацията на разтворените частици и понижаване на електропроводимостта. Резултатите за биологичното почистване са добри с оглед на това, че е използван експерименталния прототип за формиране на ВВРИ във вода без да се комбинира с други технологии.

Системата с УВК- тригatron е експериментирана и за почистването на накипи и отлагания на тръби. Осигурявайки линейно преместване на коаксиалния проводник навътре в тръбата последователно се обработва вътрешната повърхност на последната. Разрушените отлагания се отмиват с течаща вода. Скоростта на процеса зависи от количеството на отлаганията и параметрите на разрядния импулс – енергия, честота.

Системата е работоспособна и при 100% отлагания в светлия отвор на тръбата. В този случай в началото със свредло се пробива отвор, за да влезе в него коаксиалният кабел. При по-голям диаметър на тръбата е необходимо повишаване капацитета на работния кондензатор и напрежението до което той се зарежда.

Оценено е влиянието на температурата на водата върху разрядния процес ($T=16; 34; 60; 90^{\circ}\text{C}$). При по-големи стойности на капацитета C се наблюдава намаляване на съпротивлението на течната среда по време на разряда, при всички стойности на температурата на водата.

При възникването на високоволтови периодично затихващи разрядни импулси в течна среда, основната част от енергията се отделя по време на първата полувълна ($>80\%$), следователно интерес представлява изменението на съпротивлението в зависимост от температурата в рамките на този полупериод. За различни стойности на напрежението, до което е заредена работната кондензаторна батерия - U_c , резултатите за съпротивлението в зависимост от температура на течната среда са представени на фиг.4.36.



Фигура 4.36 Съпротивление на течната среда при $T=34^{\circ}\text{C}$

Характерът на изменението е еднакъв при различните стойности на U_c , което позволява аналитично моделиране на характеристиката да се извърши с подходяща математическа функция. С достатъчна точност изменението на съпротивлението на водата през първия полупериод на разрядния процес може да се апроксимира с полином от трета степен - $y=ax^3+bx^2+cx+d$. За всички стойности на C и U_c могат да се съставят системи от уравнение - полиноми от трета степен, описващи изменението на съпротивлението през първия полупериод на периодично затихващия разряден импулс в зависимост от температурата на течната среда.

ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ РАБОТАТА

НАУЧНИ ПРИНОСИ

Резултатите от проведените научни изследвания са основание за обобщаване на следните научни приноси:

1. Синтезирана е система от преобразуватели за формиране на високоволтов периодично затихващ импулс в течна среда, базирана на капацитивно натрупване на енергия, включваща:
 - управление на големината на входното захранващо напрежение във функция от параметрите на генерираните разрядни импулси, честота на повторение, напрежение на работната кондензаторна батерия и капацитет на последната;
 - осигуряване на възможност за повторемост на параметрите на разрядните импулси чрез стабилизиране на напрежението върху работната кондензаторна батерия;
 - осигуряване на електромагнитна съвместимост между галванично свързаните зарядна и разрядна вериги при отчитане различията на процесите в двете вериги.

2. Предложен е алгоритъм на работа на системата от преобразуватели, осигуряващ развитието на последователно във времето на процесите на нарастване на напрежението на работната кондензаторна батерия и стабилизиране на последното, както и алгоритъм за управление на преобразувателя, коригиращ амплитудата на входното захранващо напрежение във функция от параметрите на разрядния импулс.

Управлението на големината на входното захранващо напрежение чрез стъпален тиристорен регулатор в системи за капацитивно натрупване на енергия е новост, защитена със свидетелство за полезен модел.

3. Предложен е експериментално-аналитичен подход за моделиране на разряда в течна среда чрез използване на интегрални характеристики, стъпално променяйки се във времето и запазвайки големината си в рамките на един полупериод на високоволтовия периодично затихващ разряден импулс, при което декрементът на затихване е нелинейно изменяща се във времето функция.

4. Разработени са математически модели, описващи електрическите процеси в системата от преобразуватели, като е отчетено:
 - модифицирането на изправителни звена с цел осигуряване на електромагнитна съвместимост между зарядната и разрядната вериги;
 - декомпозирането във времето на нарастването на напрежението върху работната кондензаторна батерия и стабилизиране на последното;
 - особеностите на различни управляеми високоволтови ключове в разрядната верига за формиране на високоволтовия периодично затихващ разряд.

Математическите модели обхващат повече параметри и спецификата на реализация на силовите вериги на отделните преобразуватели и позволяват по-точно определяне на контролираните параметри: време на заряд, зарядно напрежение и нестабилността му, както и по-точно се дефинират изисквания към елементите от веригата на преобразувателя. Предложените модели може да се разглеждат като методики за проектиране и да се използват при разчет на подобни системи.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Конкретизирани са преобразувателите, осигуряващи формирането на високоволтов периодично затихващ разряден импулс в течна среда, при което:
 - зарядната верига включва: стъпален преобразувател за управление на амплитудата на входното захранващо напрежение или такъв, реализиран чрез управляеми ключове изменящи времето на проводимост в рамките на един полупериод на мрежовото захранващо напрежение; модифицирано изправително звено – несиметричен удвоител с капацитивен реактивен баласт за ограничаване на токовото натоварване в процеса на заряда; паралелен стабилизатор на напрежението върху работната кондензаторна батерия с хибриден лампово-транзисторен баласт, като транзистора изпълнява ролята на динамичен катоден товар;
 - разрядната верига включва високоволтови ключове, стартиращи формирането на разрядния импулс – тригатрон и тиратрон.
2. Проведено е многофакторно експериментално и аналитично изследване при обхващане спецификата на конкретизираните преобразуватели в зарядната и разрядната вериги при конкретни стойности на енергетичните параметри (капацитет на работната кондензаторна батерия $1 \div 3 \mu\text{F}$; напрежение, до което е заредена последната - $6 \div 12 \text{kV}$, честота на повторемост на разрядните импулси – до 5Hz). Определени са честотата и продължителността на високоволтовия периодично затихващ разряден импулс.

В процеса на изследването е отчетено и влиянието на температурата на течната среда.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. За различни прототипи са предложени схемотехнически решения за работата на отделните преобразуватели и схемотехнически решения за реализация на алгоритмите за управление, осигуряващи функционалната

съвместимост между отделните преобразуватели по време на зарядно-разрядните процеси.

Прототипите са разработени в рамките на три научно-изследователски проекта:

- договор Д002-18/23.02.2009г., тема „Техника и технологии за почистване на вода, базирани на използването на импулсни разряди“, към фонд „Научни Изследвания“ на МОН, на стойност 44700лв. По проекта са приети отчетите за първата и втората година на работната програма.
 - договор №469-ПФ/27.03.2008г., тема „Приложение на импулсни разряди за биологично почистване на вода“, финансиран целево от държавния бюджет – ТУ-Варна. Публикуван отчет - Годишник на ТУ-Варна, 2008, т.Ш, с.5-6, ISSN 1311-896X.
 - договор № 828-ПФ/27.05.2010г., тема “Системи за генериране на химически активни компоненти в газова среда с повишено налягане”, финансиран целево от държавния бюджет – ТУ-Варна. Публикуван отчет - Годишник на ТУ-Варна, 2010, т. Ш, с.5-6, ISSN 1311-896X.
2. Извършена е оценка на биологичното почистване на отпадна вода при обработка с експериментален прототип. Получените резултати доказват ефективността на избраното схемотехническо решение за генериране на високоволтови разрядни импулси като технология за за обработка на вода.

ОСНОВНИ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Публикации в списания

1. **Dicheva M., Barudov, S.** Electrical processes and devices for control of pulse discharge in liquid medium. //Journal of International Scientific Publication: Materials, Methods & Technologies, 2010, vol. 4, part 1, p.387-412, ISSN 1313 2539. Available from: <http://www.scientific-publications.net/en/archive/>
2. **Ivanova, M.** Comparative experimental study of the influence of different controllable high-voltage switches over the formation of discharge pulse in liquid medium. //Journal of international scientific publications: Materials, methods and technologies, 2012, vol. 6, part 2, p.60-75, ISSN 1313 2539. Available from: <http://www.scientific-publications.net/en/archive/>

Публикации в университетски периодични издания

3. Барудов, С., Дичева, М. Хибриден регулиращ елемент във високоволтовата верига за формиране на импулсен разряд в течна среда. //Годишник на ТУ-Варна, 2009, с. 129-134, ISSN 1311-896X.

Публикации на международни конференции

4. Barudov S., **Dicheva, M.** Modeling of a discharge pulse in a circuit with two discharge gap. //ICEST, Ohrid, 2010, vol.2, p.823-827, ISBN: 978-9989-786-58-7.
5. **Иванова, М.**, Барудов, С. Изследване на параметрите на възникващата ударна вълна при високоволтов периодично затихващ разряд в течност. //Юбилейна научна международна конференция "50 години катедра ЕТЕТ", 2013, с.9-14, ISSN 1311-896X.
6. **Иванова, М.**, Барудов, С. Моделиране на високоволтов периодично затихващ разряд в течност с управляем високоволтов ключ тригатрон. //Морски научен форум, ВВМУ "Н.Й.Вапцаров", 2013, с.118-123, ISSN 1310-9278.
7. **Ivanova, M.**, Barudov, E. System for capacitive energy accumulation with discrete alternating voltage regulators. //International Scientific Symposium "Electrical Power Engineering 2014", 2014, p.128-131, ISBN 978-954-20-0497-4.
8. Dankov, L., **Ivanova, M.** Experimental study and analysis of the temperature influence at high voltage periodically attenuating discharge in water. //International scientific conference "Science and technology for sustainable maritime development, Conference proceedings, Nikola Vaptsarov Naval Academy, Varna, 2015, p.87-94, ISBN 978-954-8991-81-0.

Свидетелство за регистрация на полезен модел

9. Барудов, С., Панов, Е., Барудов, Е., **Иванова, М.** Дискретен стабилизатор на променливо напрежение. Свидетелство за полезен модел, България, BG1727 U1 - 07.08.2013.