

# **ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА**

**маг. инж. Данаил Петев Станчев**

## **ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПОДСТАНЦИИ 220 KV**

### **АВТОРЕФЕРАТ**

**на дисертация за получаване на образователна и  
научна степен “доктор”**

**по докторска програма „Електроенергийни системи“ към  
професионално направление 5.4. Енергетика**

**Научен ръководител:  
доц. д-р инж. Маргрета Парашкеванова Василева**

**Рецензенти:**

1. ....
2. ....

**Варна, 2020**

**Дисертационният труд е обсъден на ..... в катедра “Електроенергетика” на катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна № .... /..... и насочен за защита. Докторантът работи в ЕСО ЕАД МЕР Шумен и катедра “Електроенергетика”.**

**Автор:** маг. инж. Данаил Петев Станчев  
**Заглавие:** Изследване и анализ на пренапрежения в електрически подстанции 220 kV

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА**

маг. инж. Данаил Петев Станчев

**ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА  
ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ  
ПОДСТАНЦИИ 220 KV**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**на дисертация за получаване на образователна и  
научна степен “доктор”**

**Варна, 2020**

**Дисертационният труд съдържа 168 страници, включително 122 фигури, 35 таблици, и 10 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 146 заглавия, от които 6 на кирилица и 140 на други езици.**

**Защитата на дисертационния труд ще се състои на .....Г. от.....Ч. в.....на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора № ..... / ..... Г.**

**Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се в Докторантския център, стая 318 НУК.**

# ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

## АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА:

В днешното общество зависещо от технологии, електроенергийната система играе изключително важна роля в съвременният начин на живот на хората. Електроенергийната система, както всяка отделна система си има своите специфични принципи на управление. С повишаване нивото на надеждността и нарастващите изисквания към електроснабдяването се появява и постоянната нужда от изучаване и изследване на преходните процеси протичащи във всеки един енергиен възел. Преходните процеси в ЕЕС пораждани от къси съединения, превключвания, удар на мълния или промяна в товара подлагат съоръженията на значително претоварване и могат сериозно да ги увредят. Това прави тяхното изучаване изключително важно за надеждната работа на съоръженията и ЕЕС. Поради спецификата на електроенергийната система прякото изследване в много от случаите е невъзможно или не се допуска. Това е причината моделните симулации на електромагнитни преходни процеси с компютърни програми да станат едни от най-предпочитаните в днешно време методи за изследване и анализ работата на ЕЕС.

Атмосферните и комутационните пренапрежения са ежедневна част от работата на ЕЕС. Пренапреженията могат да доведат до отказ на съоръжения вследствие пробив на изолацията (твърда или течна) или разряди във въздушна среда. Поради тази причина определянето нивата на въздействащите пренапрежения е от изключителна важност за изграждането на правилно действаща защита от пренапрежения. Поради специфичните особености на пренапреженията и ЕЕС, симулациите чрез моделни схеми на реални обекти са предпочитани при провеждането на изследвания в тази област. За координация на изолацията на изграждащите се или вече изградени подстанции е необходимо да се направи процедура съгласно действащите стандарти на ИЕС. За подобряване качеството на процеса, както и обхващането на по-голям брой от изследвани случаи е необходимо провеждането на вариантни моделни изследвания за различни конфигурации на разглежданата част от мрежата чрез софтуерни продукти, както и следването на определена последователност или методика при провеждането на изследването. Към настоящият момент методика, описваща и представяща последователност за работа в тази насока не е налична.

## **ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

Целта на дисертационната работа е да се разработи методика за координация и проверка на изолацията на електроенергийни съоръжения в ЕЕС чрез моделно изследване в подстанции 220 kV.

За постигане на тази цел е необходимо да се решат следните задачи:

- 1. Да се направи литературен обзор относно видовете пренапрежения, основните насоки при моделиране на елементите на ЕЕС при различни въздействия и методите за координация на изолацията.**
- 2. Да се съставят заместващи схеми на електрическа подстанция 220 kV при въздействие на атмосферни и комутационни пренапрежения.**
- 3. Да се разработят симулационни модели на подстанция 220 kV при въздействие на атмосферни и комутационни пренапрежения.**
- 4. Да се направят вариантни изследвания на симулационните модели на подстанция 220 kV.**
- 5. Да се разработи методика за координация на изолацията на подстанция 220 kV чрез подробно моделно изследване.**

### **ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ**

Обект на изследването е реална електрическа подстанция 220/110/20/10 kV като изследването е направено за ОРУ 220 kV.

### **ПРЕДМЕТ И МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕ**

Моделните изследвания в дисертационния труд са проведени върху моделни заместващи схеми на подстанция “M1” в програмната среда на АТР-ЕМТР.

### **МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ**

Обхващат моделни изследвания на пренапрежения в подстанция 220 kV, симулации на вариантни случаи, обработка на резултатите, както и статистическа обработка на част от резултатите. Направена е и процедура по координация на изолацията на електрическата подстанция 220 kV.

### **НАУЧНА И ПРАКТИЧЕСКА НОВОСТ**

- 1. Представена е методика за координация и проверка на изолацията на електроенергийни съоръжения в ЕЕС чрез подробно моделно изследване.**

2. Определени са нивата на въздействащите атмосферни пренапрежения при попадение на мълния в близост до подстанция 220 kV чрез моделни изследвания.
3. Определени са нивата на въздействащите комутационни пренапрежения за подстанция 220 kV чрез моделни изследвания.
4. Направени са моделни схеми за изследване възстановяващото се напрежение на контактите на прекъсвач 220 kV при изключване на повреда.
5. Изследвани и анализирани са нивата на енергийна способност на металоокисни вентилни отводи.
6. Анализ на различните фактори влияещи върху нивата на пренапреженията възникващи в подстанции 220 kV.
7. Натрупана база от данни улесняваща моделирането на различните съоръжения за изследване на различните преходни процеси за подстанция 220 kV.
8. Използваните моделни схеми могат да се приложат за обучение на студенти.
- 9.

### **РЕАЛИЗАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ**

Получените резултати, направените моделни схеми и представената методика могат да бъдат използвани и внедрени в електроенергийната система. Като моделните схеми могат да се използват при обучението на студенти.

### **АПРОБАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ**

По темата на дисертационния труд основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните международни и национални форуми с международно участие и издания:

#### **Рецензирани международни конференции:**

- *1st International Conference “Applied Computer Technologies” ACT 2018, Proceedings. Ohrid: Macedonia*

#### **Рецензирани национални конференции с международно участие:**

- *10th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Sozopol, Bulgaria, 2018 (SCOPUS).*
- *11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2019(SCOPUS).*

По темата на дисертационния труд предстои да бъдат докладвани и

публикувани в следният национален форум с международно участие:

**Рецензирани национални конференции с международно участие:**

- *7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), 12-14 November, Ruse, Bulgaria, 2020(SCOPUS)*

## **СТРУКТУРА И ОБЕМ НА ДИСЕРТАЦИЯТА**

Дисертационният труд съдържа 168 страници, включително 122 фигури, 35 таблици, и 10 приложения, оформени в 4 глави. Основният текст е изложен на 119 страници и се състои от съдържание, списък на използваните съкращения, списък на използваните символи и техните значения, въведение, четири глави с изводи за всяка, изводи и заключение на получените резултати, библиография, списък на публикациите по темата на дисертационния труд, списък с бъдещите публикации по темата на дисертационния труд и планирани бъдещи изследвания.

В автореферата са приети означения на фигурите и формулите, съответстващи на тези от дисертацията.

## **КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **ГЛАВА ПЪРВА**

#### **ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР. ВИДОВЕ ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ. КЛАСИФИКАЦИЯ. МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ ОБЕКТИ ПРИ ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА РАЗЛИЧНИ ВИДОВЕ ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ. КООРДИНАЦИЯ НА ИЗОЛАЦИЯТА**

В първа глава е направена класификация на типовете пренапрежения, основните причини за възникване, максималните нива на пренапрежения възникващи при различните въздействия, както и основните изпитвателни стойности дадени от международните стандарти. Направен е обзор на основните насоки при моделиране елементите на електроенергийната система, както и използваните заместващи схеми при въздействие на различен тип пренапрежение. Представени са моделите препоръчвани от международната електротехническа комисия за изследване на различните въздействия. Изброени са най-често използваните програмни продукти за изследване и анализиране на електромагнитни преходни процеси в ЕЕС. Направен е литературен обзор на процесите и последователностите при процедурите по координация на изолацията.



## **ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ПЪРВА ГЛАВА**

1. Определящи при установени пренапрежения са тези вследствие на късо съединение;
2. За оразмеряване на изолационните конструкции за ниво на напрежение 220 kV при нормален режим на работа, определящи са атмосферните пренапрежения, а при аварийни режими и замърсявания- комутационните пренапрежения;
3. Моделното изследване на преходни процеси в ЕЕС е един от най-предпочитаните способности за изследване;
4. Програмният продукт АТР-ЕМТР е най-подходящ за изследване на преходни процеси в ЕЕС поради лесният достъп и големите възможности при моделирането на електроенергийни обекти;
5. Задачите решавани от координация на изолацията дават пълна информация за характеристиките и надежността на всяка изолационна система в ЕЕС.

Въз основа на направеният литературен обзор се дефинира целта на дисертационната работа.

## **ГЛАВА ВТОРА**

### **СЪСТАВЯНЕ НА МОДЕЛНИ СХЕМИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ПОДСТАНЦИЯ 220 kV ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ ПРИ ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ**

В настоящата глава са решени задачи №2 и №3, дефинирани в края на първа глава. Представени са избраните модели на съоръжения в ПС, както и съставените моделни заместващи схеми на електрическата подстанция 220 kV за изследване въздействие на:

- Атмосферни пренапрежения (пряк удар по фазов проводник в близост до подстанцията, удар по стълб в близост до подстанцията);
- Комутационни пренапрежения (включване на ВЕЛ, АПВ, изключване на ВЕЛ при ликвидиране на повреда).

#### **2.1. Моделна схема на електрическа подстанция 220 kV при въздействие на атмосферни пренапрежения**

Съставени са моделни схеми в софтуерната среда на АТР-ЕМТР на базата на заместваща схема на електрическата подстанция. Съоръженията в подстанцията, в този случай на изследване, се заместват с капацитетите им към земя. Свързващите проводници, шинните системи, както и електропроводната линия се заместват с техните реални дължини и геометрия. За моделирането им в АТР-ЕМТР е използван модел на линия с разпределени

параметри JMarti [67]. Отчитат се скин ефекта при високи честоти, честотната зависимост на параметрите на линията, както и специфичното съпротивление на почвата, която в случая е чернозем. За моделиране на ВЕЛ 220 kV към подстанцията са използвани данни за стълб 220 kV с една тройка фазови проводници с триъгълно разположение на фазите.

Вариантните изследвания при удар на мълния върху стълб в близост до подстанция “M1“ изследват явлението “обратен разряд“. При тези моделни изследвания са използвани идентични модели на ВЕЛ и шинните системи, като при тях допълнително са моделирани стълбовете в близост до подстанцията до 4-5 междустълбия преди подстанцията. За моделирането на стълбовете е използван multistory tower model [98], като стойностите за вълновите импеданси  $Z_1$  и  $Z_4$  в модела са взети от препоръчаните стойности от авторите на [96].

Използван е модел препоръчан от CIGRE за представяне на заземителното съпротивление. Моделът на CIGRE е реализиран в програмната среда на ATP-EMTP чрез ATP-Draw обект TGIR създаден от авторите на [135]. Multistory tower model [98] е реализиран чрез стандартни елементи от библиотеката на ATP-EMTP. Моделите на ВЕЛ и първи стълб с multistory tower model са реализирани в програмната среда на ATP-EMTP. За представянето на разрядните процеси по изолаторната верига. В настоящото изследване е използван метода чрез волт-секундни характеристики на изолацията. Разрядното напрежение е изразено като функция на дължината на изолаторната верига. Разрядното напрежение в ATP-EMTP е представено чрез модела ISF на авторите от [136].

В различните вариантни изследвания МОВО са моделирани по два начина. При първият са използвани волт-амперните характеристики на вентилните отводи. В програмната среда на ATP-EMTP те са представени с нелинеен елемент тип 92 с изчислената V-I характеристика. При вторият вариант за представяне на МОВО е използван модела на авторския колектив от [122]. Той е модификация на IEEE модела представен в [138]. Предимството на използваният модел е, че са необходими само електрическите характеристики от производителя.

Системата може да бъде обобщена и представена с източник на напрежение и импеданс по приблизителен подход. За обобщаването на системата е използвана мощността на трифазно късо съединение за ниво на напрежение 220 kV. Използвано е приближението, че  $Z_s \approx X_s$ . В програмната среда на ATP-EMTP за  $U_s$  се използва стандартен елемент за променлив източник на напрежение.

Тока на мълнията и съпротивлението на канала на мълнията са представени в ATP-EMTP с идеален източник на ток и съпротивление свързано паралелно, както е показано на фиг. 2.17 [63]. Функцията използвана за тока на мълнията е функция на Хейдлер [114]. Паралелното съпротивление

е представено със стандартен елемент от библиотеката със стойност  $Z_{ip}=1000\Omega$ .

## **2.2. Моделна схема на електрическа подстанция 220 kV при въздействие на комутационни пренапрежения**

Разгледаните въздействия на комутационни пренапрежения са:

- При включване;
- При автоматично повторно включване (АПВ);
- При ликвидиране на късо съединение.

### **2.2.1. Моделна схема на електрическа подстанция 220 kV при въздействие на пренапрежения при включване на електропроводна линия и автоматично повторно включване**

За моделирането на електропроводните линии е използван модел на линия с разпределени параметри JMarti [67]. За геометрията на стълбовните линии и използваните фазов и мълниезащитен проводник са използвани реалните данни.

За представяне на прекъсвача е използван статистически ключ от библиотеката на АТР-ЕМТР. Чрез този тип ключове се позволява статистическо изследване на разпределението на пренапреженията за голям брой от симулации и варианти.

Другият разгледан случай от този тип въздействия е пренапреженията получавани при автоматично повторно включване. Обобщаването и моделирането на подстанциите се извършва по същият начин споменат по-горе. Използваният модел за електропроводна линия отново е JMarti [67]. Използвани са няколко такива ключа за реализирането на логиката на АПВ. За всяка фаза са използвани по два статистически ключа.

### **2.2.2. Моделна схема на електрическа подстанция 220 kV при въздействие на пренапрежения при ликвидиране на повреда**

Пренапреженията възникващи при изключване в следствие на повреда се получават между контактите на прекъсвача и зависят от възстановяващо се напрежение (TRV). Системата е обобщена до шинната система на подстанция M1 отново по метода описан в предходните подточки. Подстанцията е представена също чрез еквивалентен капацитет отразяващ всички монтирани съоръжения, както и шинните системи. За определяне на параметрите на разразяващата се дъга между контактите на прекъсвача са използвани напрежения и токове от симулацията, които са заместени в диференциалните уравнения даващи модела на дъгата. При моделирането на дъгата между контактите на елегазов прекъсвач 220 kV е използван модела на Шварц-Авдонин, който от своя страна е модификация на може би най-използваният модел за представяне на електрическа дъга, а именно уравнението на Cassie-Mayr [85], [141].

Моделът е имплементиран в програмната среда на АТР-ЕМТР, програмният код на използваният модел е представен в приложение №6, както е тестван и сравнен с референтни модели в [142]. За изследване на възстановяващото се напрежение модела е предоставен от Božidar Filipović-Grcić.

## **ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ВТОРА ГЛАВА**

В тази глава са представени съставените моделни схеми на подстанция “М1” и параметрите на елементите ѝ за изследване на:

- Пряк удар на мълния по фазов проводник в близост до подстанция 220 kV;
- Попадение на мълния върху първи стълб до подстанция 220 kV;
- Комутационни пренапрежения вследствие на включване и автоматично повторно включване на линия 220 kV свързана към изследваната подстанция 220 kV;
- Комутационни пренапрежения вследствие на изключване на повреда.
- Направените моделни схеми могат да бъдат използвани за изследвания на вълнови процеси в електрически подстанции, както и за обучение на студенти.
- Чрез такъв тип моделиране на ЕЕС е възможно прилагането на моделно изследване за модернизация на мрежата, подобряване работата на съоръженията, изследване на изключвания, намаляване на аварийността в ЕЕС.

## **ГЛАВА ТРЕТА**

### **ВАРИАНТНИ МОДЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ В ПРОГРАМНАТА СРЕДА НА АТР-ЕМТР. РЕЗУЛТАТИ**

В настоящата глава е решена задача номер 4 дефинирана в края на първа глава. Въз основа на литературния обзор, направените заместващи схеми и симулационни модели в софтуерната среда АТР-ЕМТР са направени вариантни моделни изследвания.

#### **3.1. Вариантни моделни изследвания при пряк удар на мълния по фазов проводник в близост до подстанция “М1”. Резултати**

Моделните изследвания на пряк удар на мълния в близост до п/ст М1 са направени за различни разстояния от мястото на удара до подстанцията, както и за различни големина на амплитудната стойност на тока на мълнията. Сравнени са случаите без монтирани металоокисни вентилни отводи и с монтирани такива на входа на подстанцията.

### 3.1.1. Пряк удар на мълния по фазов проводник в близост до подстанция “М1“ без монтирани МОВО на входа на подстанцията

Получените резултати при директен удар на мълния по фазов проводник на фаза А на различни разстояния от входа на подстанцията с амплитуда 30 kA са представени на таблица 3.1.

Таблица 3.1. Обобщени резултати

Напряжения в различни точки на ОРУ 220 , MV			
Разстояние до п/ст	50m	100m	500m
Вход на подстанцията	5.73	5.62	5.4
Измервателни трансформатори	5.67	5.52	5.37
Шинна система А 220 kV	4.48	4.36	4.3
При МОВО в “Мерене А“ 220kV	0.56	0.515	0.522
Автотрансформатор	1.1	1.12	1.12

Получените пренапряжения показани на таблица 3.1 достигат стойности изключително опасни за съоръженията в някои от вариантите. От показаните резултати се вижда защитното действие на монтираните вентилни отводи, като пренапряженията са ограничени до нива безопасни за съоръженията свързани в близост до точки с монтирани вентилни отводи. Безопасните за съоръженията нива в тези точки се дължат на монтираните комплекти МОВО в подстанцията.

### 3.1.2. Пряк удар на мълния по фазов проводник в близост до подстанция “М1“ с монтирани МОВО на входа на подстанцията

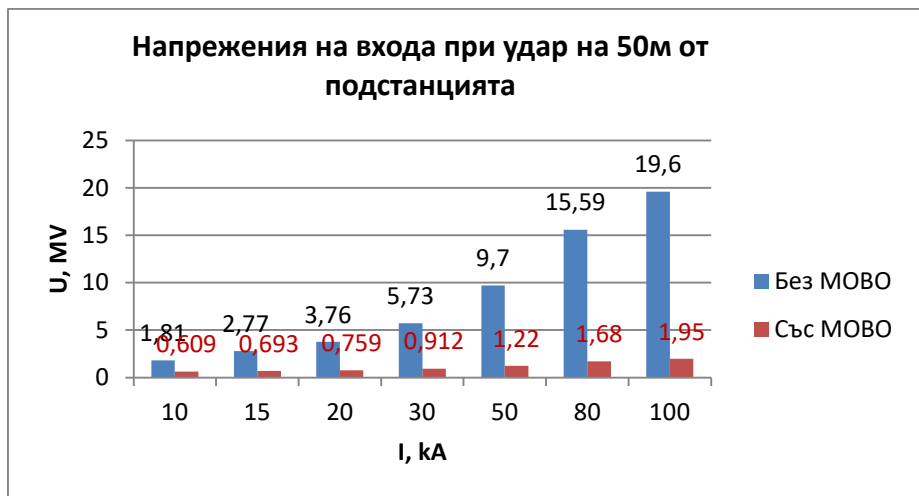
Другият вариант на изследване е при същите условия на симулациите, но с инсталирани комплекти МОВО на входа на подстанцията. Обобщени резултати за разстояния 50m, 100m и 500m са показани в таблица 3.2. От резултатите получени на входа на подстанцията се вижда намаляване на нивата на пренапряжението на поразената фаза и на другите две до безопасни за съоръженията нива. Чрез графиките представени на фигури 3.7 до 3.10 са

Таблица 3.2. Обобщени резултати с МОВО на входа на подстанцията

Напряжения в различни точки на ОРУ 220, kV			
Разстояние до п/ст	50m	100m	500m
Вход на подстанцията	912	910	870
Измервателни трансформатори	1160	1170	1100
Шинна система А 220 kV	1150	1160	1120
При МОВО в “Мерене А“ 220kV	428	432	434
Автотрансформатор	545	561	531

показани сравнителни резултати на някои от разгледаните вариантни изследвания. От представените резултати на фигура 3.7. се вижда как близкото

разстояние при попадение на мълния значително повишава нивата на пренапреженията, дори да са монтирани МОВО на входа на подстанцията. Въпреки това се наблюдават много по-ниски нива на пренапрежения при монтирани комплект вентилни отводи на входа на подстанцията. С оглед на получените резултати се забелязва намаляването на пренапреженията при отдалечаване от подстанцията.



Фигура 3.7. Обобщени резултати за разстояние 50m

Направена е оценка на енергийната способност на МОВО. В таблица 3.3 е представена обобщена информация за абсорбираната енергия за всички разгледани случаи.

Таблица 3.3. Обобщени резултати на разгледаните случаи

Амплитуда, kA	Абсорбирана енергия, kJ/kV
50	1.1
100	2.9
150	5.06
200	7.59

### 3.2. Вариантни моделни изследвания при попадения на мълния върху първи стълб до подстанция "М1"

Представени са моделни изследвания при попадение на мълния върху първи стълб до подстанцията. Разгледани са варианти без монтирани вентилни отводи и със комбинация от монтирани вентилни отводи, както на входа така и на стълба. За изследване влиянието на заземителното съпротивление  $R_0$  върху нивата на пренапреженията то е изменено в граници от 5 до 100Ω.

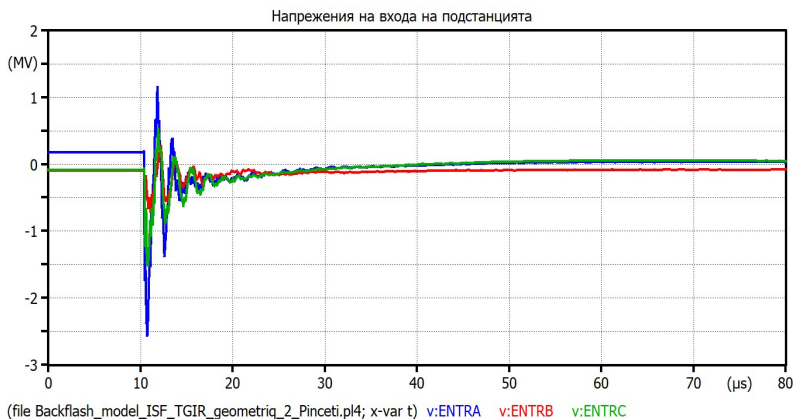
### 3.2.1. Попадение на мълния върху първи стълб до подстанцията без монтирани вентилни отводи

Получените резултати за мълния с форма на тока  $1,2/50\mu\text{s}$  са представени в настоящата глава, а останалите резултатите са поместени в приложение №7 към дисертационният труд. В таблица 3.4 са представени получените резултати за импулсна вълна  $1,2/50\mu\text{s}$  без монтирани вентилни отводи на входа и първи стълб. С “Да“ и “Не“ е отбелязано наличието или отсъствието на “обратен разряд“.

Таблица 3.4. Обобщени резултати за  $1,2/50\mu\text{s}$   
Получените резултати за  $I_m=100\text{kA}$  на входа на подстанцията са

R <sub>0</sub> , Ω	I <sub>m</sub> =15kA			I <sub>m</sub> =30kA			I <sub>m</sub> =50kA			I <sub>m</sub> =100kA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
5	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да
10	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да
20	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да
30	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да
40	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да
50	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да
60	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да
70	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да
80	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да
100	Не	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Не	Да	Не	Да

представени на фигура 3.13.



Фигура 3.13. Напряжения на входа на подстанцията при обратен разряд на първи стълб

От резултатите на “входа“ и на шинната система се вижда как единствените места с опасни пренапряжения за съоръженията на подстанцията са точките от уредбата, които са на близко разстояние до “входа“ на

поразеният електропровод. Напреженията в точките на поле “Мерене А 220kV” и “Автотрансформатор 3” са в безопасни граници поради наличието на правилно избрани вентилни отводи. Нивата на пренапреженията са пряко свързани с фронта и дължината на вълната. Причината за разглеждането различни стойности на  $R_0$  е зависимостта на големината на индуктираните в стълба пренапрежения от заземителното съпротивление.

### **3.2.2. Попадение на мълния върху първи стълб при монтирани вентилни отводи на първи стълб**

При разглежданите случаи не се наблюдава обратен разряд. Представени са резултати за най-тежкия случай при ток на мълнията 100kA и форма на вълната 1,2/50 $\mu$ s. Въпреки монтираните вентилни отводи на първи стълб нивата на пренапреженията превишават безопасните стойности за съоръженията и достигат над 2MV, което може да доведе до авария. Положителното в случая е липсата на разряд и изключване. Другите възли в които се следят нивата на напреженията са измервателните трансформатори, поле “Мерене А 220kV” и изводите на автотрансформатор 3.

При това вариантно изследване са разгледани също и енергията която се абсорбира във вентилните отводи монтирани на стълба. Абсорбираната енергия от вентилните отводи в изследваните случаи е далеч от енергийните възможности на металоокисните вентилни отводи за високо напрежение.

### **3.2.3. Попадения на мълния върху първи стълб и монтирани на вентилни отводи на “входа” на подстанцията и стълба**

Вариантно изследване при монтиране на вентилни отводи на “входа” на подстанцията и стълба е другият разгледан случай. Разгледан е случай при 1,2/50 $\mu$ s с амплитуда на тока на мълнията  $I_m=100kA$ .

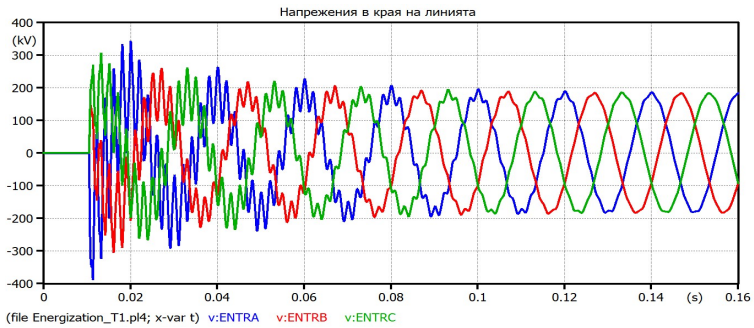
От получените резултати се наблюдава намаляването на нивата на пренапрежения до безопасни за съоръженията стойности. Напреженията в контролните точки са ограничени и безопасни за съоръженията. Тук, също е разгледана енергийната способност на монтираните МОВО.

## **3.3. Вариантни моделни изследвания при включване на електропроводна линия свързана към подстанция “M1”**

### **3.3.1. Включване на електропроводна линия свързана към подстанция “M1” без монтирани МОВО**

Това вариантно изследване разглежда случай при включване на електропроводна линия от отсрещната подстанция при изключен прекъсвач в подстанция “M1”. За всеки от изследваните случаи е направена статистическа обработка на резултатите. Следят напреженията в началото, средата и края на електропроводната линия. Получените резултати за напреженията в края на линията за момент на включване  $t=10ms$  са представени на фигура 3.36.



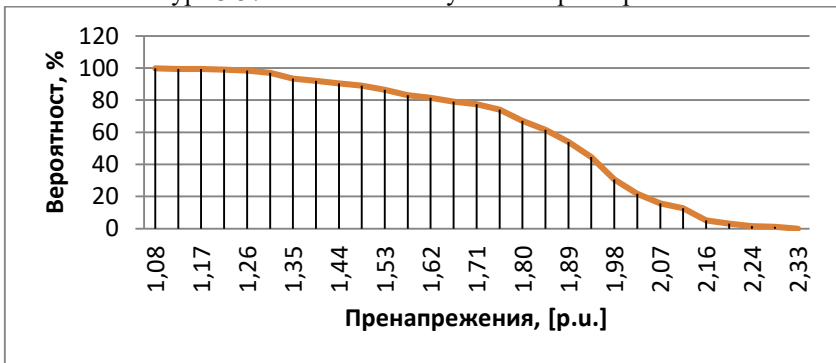


Фигура 3.36. Напрежения в края на линията

От Направените 200 на брой симулации за момент на включване  $t=10\text{ms}$  е направена статистическа извадка с честотата и вероятността на получените пренапрежения. Това е показано на фигури 3.37 и 3.38.



Фигура 3.37. Честота на получените пренапрежения



Фигура 3.38. Вероятност за поява на пренапрежение

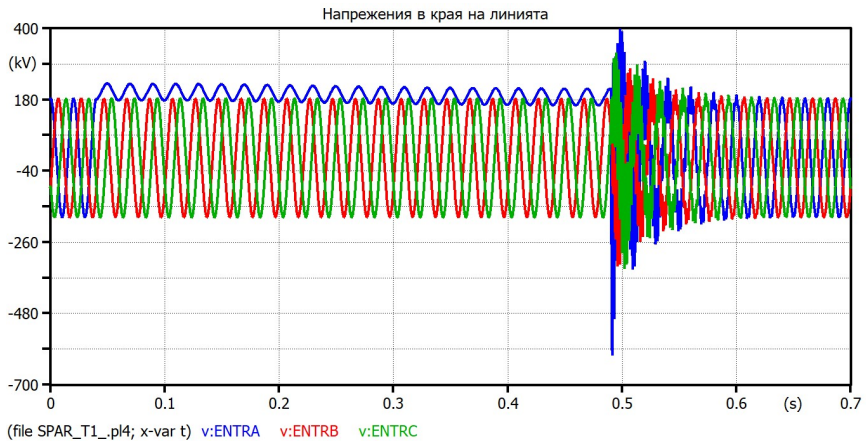
От получените резултати се вижда че с най-голяма честота на получаване са пренапрежения със стойности около 2 р.у., като вероятността за получаването им е около 20 до 30%. Пренапреженията със стойност над 2 р.у. за този момент на включване са с малка честота и сравнително ниска вероятност. При  $t=20\text{ms}$  се наблюдава увеличаване на получените пренапрежения в сравнение с тези при  $t=15\text{ms}$ . Честотата на получаване на пренапрежения с големи стойности се увеличава. Най-вероятни за получаване са пренапрежения до 1,5 р.у.

### **3.3.2. Включване на електропроводна линията при монтиран комплект металоокисни вентилни отводи на линията при подстанция “М1”**

Вариантно моделно изследване с монтиран комплект металоокисни вентилни отводи на линията при подстанция “М1” е другото вариантно изследване на включване на електропроводна линията. Условиата на направените моделни симулации са същите, както в 3.3.1. Резултатите от това изследване, както и другите вариантни изследвания са представени в дисертацията и приложение №8 към дисертацията. От получените резултати, се вижда ограничаващото действие на монтираните вентилни отводи. Напреженията и в трите точки са с по-ниски нива в сравнение с варианта без МОВО. Вследствие на монтираните металоокисни вентилни отводи честотата на възникване на пренапрежения е голяма за значително по-ниските стойности. Статистическа извадка за другите изследвания е поместена в приложение №8 към дисертацията.

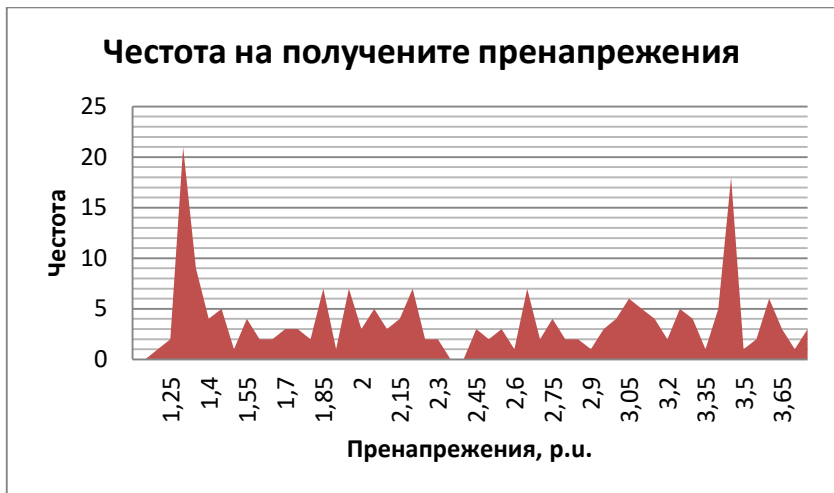
### **3.4. Вариантни моделни изследвания при автоматично повторно включване**

При това вариантно изследване е разгледан случаи при който става автоматично повторно включване. Линията бива изключена от двете страни и се разглежда момента на включване от едната страна и получените пренапрежения по протежение на линията. Повредата става на фаза А, като фази В и С остават включени. Разгледан е случай, в който остатъчното напрежение на линията е равно на 1 р.у. и включването става в противофаза на захранващото напрежение. Направени са 200 симулации и статистическа извадка на получените пренапрежения. Напреженията получени в началото на линията са показани на фигура 3.48 от дисертацията. Напрежението на повредената фаза е най-високо и достига 403kV. Стойностите получени за другите две фази са около 1 р.у. Напреженията получени в средата на електропроводната линия са показани на фигура 3.49 от дисертацията. Тук напрежението на повредената фаза се покачва до 570kV. Напреженията на другите две фази е в порядъка от 294 и 312 kV. Получените резултати за напреженията в края на линията очаквано са с най-високи стойности от другите два възела. Напреженията могат да се видят на фигура 3.50.



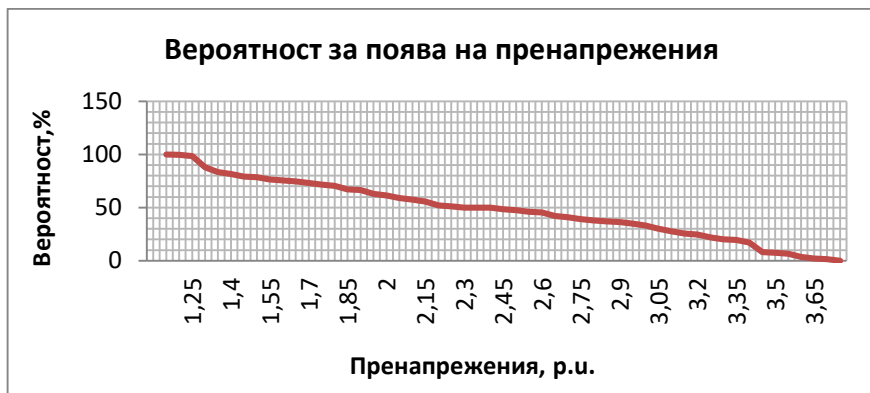
Фигура 3.50. Напряжения в края на линията

Тук стойността на повредената фаза достига 606 kV, докато фази В и С достигат 330 и 338kV. От направените 200 на брой симулации е направена статистическа извадка за честотата и вероятността за поява на пренапрежения с определена стойност в трите контролни точки. Честотата на получените пренапрежения в тези симулации е показана на фигура 3.51.



Фигура 3.51. Честота на получените пренапрежения

Другата част от статистическата извадка, а именно вероятността за поява на пренапрежения с определена стойност по протежението на линията е показано на фигура 3.52.



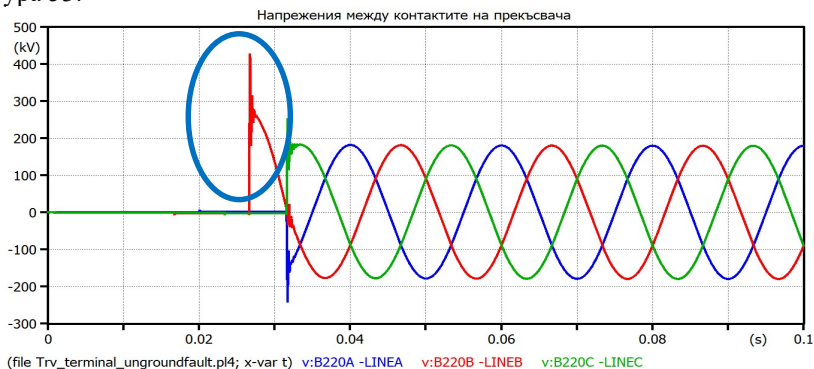
Фиг. 3.52. Вероятност за поява на пренапрежение

### 3.5. Вариантни моделни изследвания при изключване на повреда

Разгледаните варианти за изследване на възстановяващото се напрежение на контактите на прекъсвача при ликвидиране на повреда са:

- Трифазно късо съединение;
- Трифазно късо съединение към земя;
- Къси съединения на близки разстояния от прекъсвача по ВЕЛ.

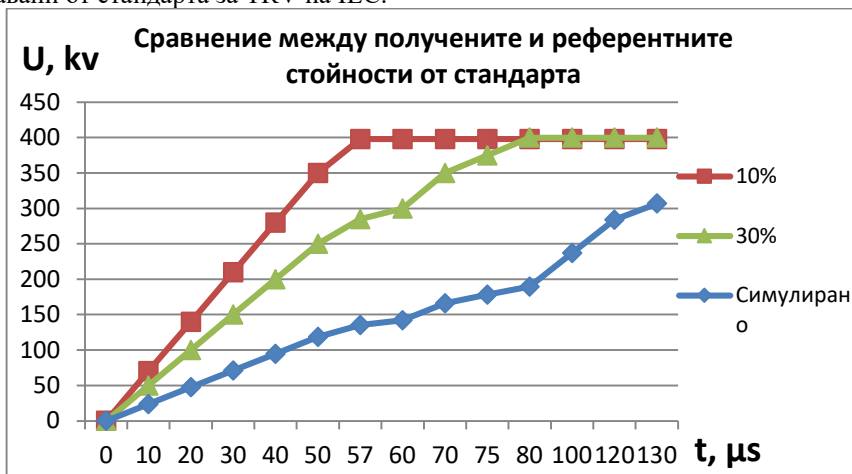
Изследваните варианти за трифазно късо съединение са направени за к.с. на изводите на прекъсвача. Напреженията се следят от страната на линията и от страната на шинната система. Получените резултати от моделното изследване на трифазно късо съединение на изводите на МП са показани на фигура 53.



Фигура 3.53. Напрежение между контактите на прекъсвача

Коефициента на нарастване на възстановяващото се напрежение е  $RRRV=0,213\text{kV}/\mu\text{s}$ . Получените резултати при трифазно късо съединение към земя на изводите на прекъсвач са показани в дисертационният труд.

На база времето за достигане на максимума или т.нар RRRV може да се съди за действието на прекъсвача и неговото успешно комутиране. На фигура 3.57 е показано сравнение на получените симулирани данни и тези давани от стандарта за TRV на IEC.



Фигура 3.57. Сравнение на полученият резултат със данните от стандартите

От фигурата се вижда, че симулираната повреда и кривата, която се получава е под стандартната такава следователно такъв тип комутация би била успешна и без нежелани последици.

### ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ И ИЗВОДИ КЪМ ТРЕТА ГЛАВА

- При пряк удар на мълния върху фазов проводник в близост до подстанцията се получават изключително високи пренапрежения, които могат да бъдат опасни за изолационните системи на съоръженията свързани в уредбата.
- Чрез направените изследвания се доказва и правилният подбор на вентилни отводи за ОРУ 220 кV.
- С така проведените вариантни изследвания са показани потенциално незащитени зони от действието на пренапрежения с опасни стойности и как чрез допълнителното монтиране на комплект металоокисни вентилни отводи могат да се защитят тези зони. В резултатите са поместени сравнителни графики показващи подобряването на защитата от пренапрежения за въздействието на мълния със стръмен фронт 1/10 $\mu\text{s}$ .
- Направена е оценка на енергийната способност на монтираните вентилни отводи при пряк удар на мълния върху фазов проводник в близост до подстанцията. Чрез получените резултати се показва как

монтираните вентилни отводи издържат на такова въздействие. Случаите, в които се превишава енергийната способност на монтираните вентилни отводи са тези при 200кА амплитуда на тока на мълнията.

- За попадение на мълния върху първи стълб до подстанцията “М1“ са показани резултати за липса или наличие на “обратен разряд“ от стълб към фазов проводник за различни стойности на тока на мълнията и заземителното съпротивление за този тип корона на стълба. Показани са получените пренапрежения в различни точки на ОРУ 220 kV за случай  $I_m=100\text{kA}$ .
- От резултатите за контролираните възли се виждат незащитени зони на входа на подстанцията при линейният разединител и нива на напреженията, които могат да бъдат опасни за съоръженията. Монтираните вентилни отводи са избрани правилно и ограничават напреженията до безопасни стойности. Разгледани са варианти за вълна  $5,5/75\mu\text{s}$  и  $1/10\mu\text{s}$  и е показано влиянието на фронта на вълната върху възникващите пренапрежения. Също така е показано и влиянието на заземителното съпротивление върху нивата на възникващите пренапрежения.
- Получените резултати от варианта с монтирани вентилни отводи на първи стълб показват как може да се избегнат разрядните процеси и подобряването на работата на ВЕЛ при удар на мълния и също така да се намалят нивата на постъпващите в уредбата вълни. Показани са резултати за мълния с форма на тока  $1,2/50\mu\text{s}$ .
- Направена е енергийна оценка на издържливостта на вентилните отводи, като монтираните такива издържат този тип въздействие и имат голям запас по енергия. Получените резултати показват подобрене от гледна точка на нивата на пренапрежение и енергийната натовареност на отводите.
- Резултатите показват как чрез комбинацията от монтирани вентилни отводи на входа на подстанцията и на първи стълб се защитават напълно съоръженията на подстанцията в близост до входа на линията, като нивата на пренапреженията са в допустими граници. Чрез този монтаж се облекчава енергийното натоварване на монтираният на входа вентилен отвод, също така може да бъде понижен енергийният клас на монтираният на входа на подстанцията вентилен отвод и с това да бъде, както подобрена така и икономична защитата от пренапрежения на уредбата.
- От изказаното до тук авторът на дисертацията препоръчва монтирането на вентилни отводи при възможност да се изпълнява чрез схема със т. нар. “стъпално“ монтиране на вентилни отводи на входа на уредбите с което нивата на пренапреженията да се намаляват постепенно.

- Разгледани са резултати от моделно изследване на включване на най-дългата електропроводна линия свързана към уредбата. Големината на получените пренапрежения за най-тежкият вариант очаквано е около 2 р.и. Напрежения с такова ниво не са опасни при нормални атмосферни условия, но е препоръчително да се имат в предвид за екстремални такива.
- Показана е честотата и вероятността за поява на определени нива на пренапрежения по електропроводната линия. От получените резултати във вариантните изследвания се вижда подобряване работата на устройствата за защитата от пренапрежения и намаляване на пренапреженията по цялата дължина на електропровода при монтаж на МОВО на входа на подстанция ‘‘М1‘‘.
- Резултатите от моделното изследване при най-тежкия случай на АПВ показват стойности на повредената фаза в края на линията от 606kV. Направената статистическа извадка показва честотата и вероятностите за получаване на дадено пренапрежение. Препоръчително е да има налична информация за нивата на тези пренапрежения. Също така резултати от такъв тип изследвания могат да бъдат полезни за бъдещи реконструкции и входни данни за други изследвания.
- Получените резултати от анализа и оценката на възстановяващото се напрежение между контактите на прекъсвача при трифазно късо съединение и трифазно късо съединение към земя показват, че така избраният прекъсвач може да изключи и издържи такъв тип повреда. Резултати от подобен тип могат да бъдат изключително полезни при разследване на повреди на прекъсвачи и други аварии.
- Получените вариантни резултати от моделните изследвания могат да се използват за координация на изолацията на изследваният обект. Такъв тип данни биха били от ползва при направа на координация на изолацията на електрически подстанции в ЕЕС за различни случаи.

## **ГЛАВА ЧЕТВЪРТА**

### **КООРДИНАЦИЯ НА ИЗОЛАЦИЯТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ПОДСТАНЦИЯ 220 KV**

#### **4.1. Методика за координация и проверка на изолацията на електроенергийни съоръжения в ЕЕС чрез моделни изследвания**

В настоящата глава е решена задача 5 от определените в края на първа глава задачи.

В тази глава е представена методика за координация и проверка на изолацията в ЕЕС чрез моделни изследвания. Предложената методика ще бъде представена като съвкупност от различни етапи.

Последователността на методиката за координация и проверка на изолацията на електроенергийни съоръжения в ЕЕС чрез моделни изследвания е следната:

1. Определяне на нужният тип изследване според целта на изследването и спецификата на обекта. Типовете изследвания могат да бъдат:
  - Изследване на установени пренапрежения или комбинация от тях;
  - Изследване на случаи при комутационни пренапрежения;
  - Изследване на случаи при атмосферни пренапрежения;
  - Изследване на случаи при пренапрежения със много бърз фронт.
2. Събиране на данни за обекта.
  - 2.1. Местоположение, степен на замърсеност и надморска височина на обекта;
  - 2.2. Специфични данни за това местоположение (мълниеносна активност и други);
  - 2.3. Номинални данни на всички съоръжения;
  - 2.4. Времена и настройки на релейни защиты и автоматика;
  - 2.5. Характеристики и разположение на вентилни отводи;
  - 2.6. Изолационни нива на всички съоръжения;
  - 2.7. Всички дължини и разстояния в обекта.
  - 2.8. Дължина на електропроводните линии, шинните системи и свързващите проводници;
  - 2.9. Геометрия на стълбовните линии, шинните системи и междустълббия;
  - 2.10. Заземителни съпротивления, специфично съпротивление на почвата.
3. Съставяне на моделна заместваща схема.
  - 3.1. Определяне на използваните модели за представяне на моделираното оборудване според изследването и целите му. Моделите се избират съгласно [64] и други действащи стандарти.
  - 3.2. Съставяне на моделна заместваща схема на изследваният обект със избраните модели за представяне на съоръженията;
  - 3.3. Съставяне на вариантни схеми на заместващият модел за представяне на възможно най-голям брой конфигурации на въздействия.
4. Провеждане на моделни симулации.
  - 4.1. Избор на софтуерен продукт за провеждане на моделното изследване с достатъчна точност;
  - 4.2. Въвеждане на заместващата схема в софтуерната среда и определяне на контролните точки;
  - 4.3. Настройка на параметрите на симулациите съгласно избраното изследване и изискванията за него;
  - 4.4. Провеждане на вариантите изследвания на всички разгледани конфигурации;
  - 4.5. Валидиране на получените резултати;
  - 4.6. Анализирание, обработка и обобщаване на получените резултати.



5. Използване на получените резултати чрез няколко варианта.
- 5.1. Входиране на данните във процедура по координация на изолацията съгласно изискванията на стандарта IEC-60071;
- 5.2. Сравняване на получените резултати с референтни такива, ако са известни;
- 5.3. Използване на получените резултати за изчисляване на оценъчни коефициенти и други изисквани от стандартите за проверка на изследваната конфигурация.
6. Оценка, анализ, технически решения и препоръки.  
В зависимост от избраните варианти се различават оценката, анализа, техническите решения и препоръки.
- 6.1. Оценка, анализ, технически решения и препоръки при координация на изолацията;
- 6.1.1. Оценка и анализ на избраните изолационни нива и минимални разстояния, както и наличието или липсата на специални изисквания;
- 6.1.2. Предлагане на технически решения и препоръки за покриване изискванията получени от процедурата по координация на изолацията;
- 6.2. Оценка, анализ, технически решения и препоръки при сравняване на получените резултати;
- 6.2.1. Оценка и анализ от сравнението на получените резултати с референтни такива;
- 6.2.2. Предлагане на технически решения и препоръки за подобряване резултатите и работата на съоръжението;
- 6.3. Оценка, анализ, технически решения и препоръки при използване на получените резултати за изчисляване на оценъчни коефициенти и други изисквани от стандартите за проверка на изследваната конфигурация.
- 6.3.1. Оценка и анализ на изчислените стойности;
- 6.3.2. Предлагане на технически решения и препоръки за подобряване на резултатите и работата на съоръжението;

#### **4.2. Приложение на методиката за координация и проверка изолацията на електрическа подстанция 220 kV “M1“ чрез моделни изследвания**

В тази част ще бъде приложена представената в част 4.1. методика за координация и проверка на изолацията на електроенергийни съоръжения в ЕЕС чрез моделни изследвания. Обект на процедурата е подстанция 220kV “M1”;

##### **4.2.1. Определяне типа на изследванията**

Използваните типове изследвания са:

- Установени пренапрежения;
- Комутационни пренапрежения;
- Атмосферни пренапрежения;

#### 4.2.2. Данни за изследваният обект

За изследваният обект са известни:

- Най-високото ниво на системата  $U_s=245\text{kV}$ ;
- Замърсеността на района: Ниска (Минимално специфично разстояние на пропъльзване е  $16\text{mm/kV}$ );
- Надморска височина  $H=204\text{m}$
- Номиналните данни на съоръженията са взети и използвани в моделните изследвания, характеристиките на вентилните отводи и разположението им е отчетено и приложено в изследванията;
- Изолационните нива в подстанцията са:  $950\text{ kV}$  и  $1050\text{ kV}$ ;
- Дължините на електропроводните линии свързани към отворена разпределителна уредба  $220\text{ kV}$ .
- Използваните геометрии на стълбовни линии и шинни системи са описани в предходните глави;
- За специфичното съпротивление на почвата на подстанцията е използвано  $\rho=30\Omega\text{m}$ , а за стълбовните линии е използвано  $\rho=100\Omega\text{m}$ ;

#### 4.2.3. Съставяне на моделна заместваща схема

Според избраните в т.4.2.1. изследвания за всеки тип е избран следният подход:

- Изследването на установените пренапрежения чрез моделно изследване е сведено до избирането на максимални стойности за фазното и линейното въздействащо напрежение.
- Препоръчаните и избраните модели и моделни заместващи схеми за изследване на атмосферни и комутационни пренапрежения са описани в глава 1 и глава 2.
- Съставените моделни заместващи схеми, както и вариантни модели за изследване са описани в глава 2.

#### 4.2.4. Провеждане на моделни симулации

Поради лесният достъп, огромните възможности, а също така и една от най-известните и използвани програми за електромагнитни преходни процеси в ЕЕС, АТР-ЕМТР е избрана за софтуерен продукт за провеждане на моделните изследвания. Избраните модели са въведени в софтуерната среда на АТР-ЕМТР и са направени моделните схеми за всяко от изследванията.

В тази част от методиката има възможност да се избират следните възможности:

- Входиране на данните във процедура по координация на изолацията съгласно изискванията на стандарта IEC-60071;
- Сравняване на получените резултати с референтни такива, ако са известни;

- Използване на получените резултати за изчисляване на оценъчни коефициенти и други изисквани от стандартите за проверка на изследваната конфигурация.

В настоящата работа е избрана първата възможност, а именно използване на получените резултати за процедура по координация на изолацията. Изчисленията и избирането на стандартно изолационно ниво и разстояния в подстанцията са направени с софтуерният продукт InsCo (Insulation coordination for power system) 2005 [146] разработен от катедра ‘‘Електрическа енергия‘‘ към Солунският университет.

#### **4.2.5.1. Определяне на въздействащите пренапрежения $U_{гр}$**

##### ***Определяне на $U_{гр}$ при установени пренапрежения***

За  $U_{гр}$  са приети максималните такива пренапрежения. Установените пренапрежения вследствие на късо съединение в мрежи с директно заземен звезден център достигат до 0,8 от линейното напрежение  $U_L$ , като нормално очаквани са стойности с кратност 1.3. Въздействащите пренапрежения са представени в таблици 4.4, 4.5 и 4.6.

##### ***Определяне на $U_{гр}$ при комутационни пренапрежения***

Определените въздействащи пренапрежения с отчитане на резултатите от вариантите изследвания с АПВ, както и избраните въздействащи пренапрежения за външна и вътрешна са представени в таблица 4.5. от дисертацията. Определените въздействащи пренапрежения и избраните въздействащи с отчитане на резултатите от включване на електропровода са поместени в таблица 4.4. от дисертацията.

##### ***Определяне на $U_{гр}$ при атмосферни пренапрежения***

Използваният софтуерен продукт InsCo има няколко опции за определянето на  $U_{гр}$ . Опцията да се въведат директно въздействащите пренапрежения получени от изследване. Следващата опция е пресмятането на въздействащите пренапрежения чрез три възможни формули. Те са представени в приложение №9. Разгледани са различни конфигурации и на база тях е изчислена стръмността  $S$  на постъпващата вълна. В дисертацията са представени стръмността и въздействащите пренапрежения изчислени по формула 4.1. Въздействащото пренапрежение изчислено по различните формули и подходи е представено обобщено в таблици 4.4., 4.5 и 4.6. От така изчислените въздействащи пренапрежения за вътрешна и външна изолация с цел отчитане на възможно най-много влияещи фактори са комбинирани различните резултати за получаване на вариантни случаи.

#### **4.2.5.2. Определяне на координираните издържани напрежения $U_{cw}$**

Определен е коефициента на координация  $K_{cd}=1$ .

### ***Определяне на $U_{cw}$ при установени пренапрежения***

За установените пренапрежения за вътрешна и външна изолация са представени в таблица 4.4, 4.5, 4.6.

### ***Определяне на $U_{cw}$ при комутационни пренапрежения***

За определяне на координираните издържани напрежения при включване на линия и при автоматично повторно включване използваме определените в 4.2.5.1. въздействащи напрежения. Избран е  $K_{cd}=1.1$  при изследването с АПВ. За вътрешна и външна изолация по детерминистичният метод за фазното напрежение е представено в таблици 4.5. и 4.6. За вътрешна изолация за междуфазното напрежение избираме  $K_{cd}=1.02$ . За  $U_{cw}$  получаваме:  $U_{cw(p-p)}=U_{ip(p-p)}K_{cd}=796 \text{ kV}$ .

За външна изолация се получават същите стойности. Окончателно за избраните напрежения са показани в таблица 4.5. и 4.6. За случая при включване на линия е избран  $k_{cd}=1.06$ . Така за вътрешна и външна изолация по детерминистичният метод за фазовото напрежение се получава:  $U_{cw(p-e)}=U_{ip(p-e)}K_{cd}=413.4 \text{ kV}$ . За вътрешна и външна изолация за междуфазното напрежение е избран  $K_{cd}=1$ . Координираните издържани напрежения при включване на линия се получават:  $U_{cw(p-p)}=U_{ip(p-p)}K_{cd}=766 \text{ kV}$ .

### ***Определяне на $U_{cw}$ за атмосферни пренапрежения***

При изчисляване на  $U_{cw}$  за атмосферни пренапрежения е избран  $K_{cd}=1$ . За вътрешна изолация по детерминистичният метод получаваме  $U_{cw}=1000 \text{ kV}$ . За вътрешна изолация с използване на статистическият опростен метод се получава  $U_{cw}=609 \text{ kV}$ . За външна изолация по детерминистичният метод се избира същата стойност, както при вътрешната изолация като това е така и със статистическият опростен метод.

### **4.2.5.3. Определяне на изискваните издържани напрежения $U_{rw}$**

#### ***Определяне на изискваните издържани напрежения $U_{rw}$ за установени пренапрежения***

За определяне на изискваните издържани напрежения  $U_{rw}$  се използват координираните напрежения получени в 4.2.5.2. Като за изчисляването на  $U_{rw}$  се използва коефициент на сигурност  $K_s$ , който за вътрешна изолация приема стойност 1,15, а за външна изолация се взема стойност 1,05. Така изчислените за вътрешна изолация изисквани издържани напрежения са представени в таблици 4.4, 4.5, 4.6.

Изискваните издържани напрежения за външна изолация изчислени с коефициент отчитащ надморската височина и замърсеността на изолаторите при ( $m=0,5; 0,8; 1$ ) и коефициент на сигурност са избрани и представени в таблици 4.4, 4.5, 4.6.

### ***Определяне на изискваните издържани напрежения $U_{гв}$ за комутационни пренапрежения***

Изискваните издържани напрежения се изчисляват по същата формула от т.4.2.5.3. Като за вътрешна изолация за случай с АПВ се получават:  $U_{гв(p-e)}=493,35 \text{ kV}$  и  $U_{гв(p-p)}=914,94 \text{ kV}$ . За външна изолация  $U_{гв}$  се получават:  $U_{гв(p-e)}=445,1 \text{ kV}$ ,  $U_{гв(p-p)}=824,89 \text{ kV}$ .

При отчитане на случая с включване на линия за изискваните издържани напрежения за вътрешна изолация се получава  $U_{гв(p-e)}=475.41 \text{ kV}$ ,  $U_{гв(p-p)}=881.11 \text{ kV}$ . Като за външна изолация се отчита  $m=1$ , както за фазовото така и за междуфазовото напрежение. Така изискваните издържани напрежения се получават  $U_{гв(p-e)}=445,07 \text{ kV}$ ,  $U_{гв(p-p)}=824,89 \text{ kV}$ .

### ***Определяне на изискваните издържани напрежения $U_{гв}$ за атмосферни пренапрежения***

За вътрешна изолация изискваното издържано напрежение при атмосферни пренапрежения се получава  $U_{гв}=700 \text{ kV}$ . За външна изолация с  $m=1$  получаваме  $U_{гв}=656 \text{ kV}$ .

Така избраните изисквани издържани напрежения за вътрешна изолация са:

- $U_{гв(p-e)}=700 \text{ kV}$ ,  $U_{гв(p-p)}=700 \text{ kV}$ .

За външна изолация избраните изисквани издържани напрежения са:

- $U_{гв(p-e)}=656 \text{ kV}$ ,  $U_{гв(p-p)}=656 \text{ kV}$ .

Ако разгледаме случаят с определянето на въздействащите напрежения чрез дадено изолационно ниво то за  $U_{гв}$  получаваме:

- За вътрешна изолация:  $1150 \text{ kV}$  ( $k_s=1,15$ );
- За външна изолация:  $1077 \text{ kV}$ .

### **4.2.5.4. Превръщане на изискваните издържани напрежения $U_{гв}$ към краткотрайни издържани напрежения с промишлена честота и импулсни издържани напрежения**

За да бъдат покрити изискванията на стандартите, изискваните издържани напрежения трябва да бъдат превърнати към стандартни издържани напрежения. Това се прави с коефициент на превръщане. Ако, за този коефициент няма стойности или не е зададен от стандарт или техническа комисия в обхват 1 на напреженията (IEC 71-1) той може да бъде изчислен с коефициентите дадени в IEC 71-2. За вътрешна изолация се използват коефициентите от фиг. 4.8. от дисертацията. За външна изолация се използват коефициентите на превръщане от фиг. 4.9. от дисертационния труд. Преобразуваните напрежения за чисти изолатори, използване на резултатите от включване на линия и използване на статистически опростеният метод за атмосферните пренапрежения изчислени на база фиг. 4.8 и фиг. 4.9. са представени в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

<b>Вътрешна изолация</b>	
<b>USDW(p-e), kV</b>	237,70
<b>USDW(p-p), kV</b>	440,55
<b>ULIW(p-e), kV</b>	475,41
<b>ULIW(p-p), kV</b>	881,11
<b>Външна изолация</b>	
<b>USDW(p-e), kV</b>	290,34
<b>USDW(p-p), kV</b>	548,51
<b>ULIW(p-e), kV</b>	500,33
<b>ULIW(p-p), kV</b>	941,73

Преобразуваните в краткотрайно издържано напрежение с промишлената и импулсно издържано напрежение при отчитане на случаят с АПВ са показани в табл. 4.3.

Таблица 4.3.

<b>Вътрешна изолация</b>	
<b>USDW(p-e), kV</b>	246,67
<b>USDW(p-p), kV</b>	457,47
<b>ULIW(p-e), kV</b>	493,35
<b>ULIW(p-p), kV</b>	914,94
<b>Външна изолация</b>	
<b>USDW(p-e), kV</b>	302,21
<b>USDW(p-p), kV</b>	571,69
<b>ULIW(p-e), kV</b>	520,50
<b>ULIW(p-p), kV</b>	980,89

#### 4.2.5.5. Избор на стандартно изолационно ниво

Последната стъпка от процедурата по координация на изолацията е избиране на номинално или стандартно изолационно ниво. На база получените превърнати в стандартни нива напрежения се избира стандартно изолационно ниво. В таблица 4.4. са обобщени резултатите от първият разгледан случай и избраното изолационно ниво съгласно стандарта за координация на изолацията IEC-71. Съгласно стандарта IEC-71-1 две стандартно издържани напрежения са достатъчни да определят изолационното ниво на оборудването. За ниво на напрежение попадащо в обхват I на стандарта нужните стандартни издържани напрежения са стандартно издържано импулсно напрежение и стандартно краткотрайно напрежение с промишлена честота. Избраните изолационни нива са показани в таблица 4.4. Спрямо тях за обхват I от IEC-71-

1[1] се избират минимални отстояния фаза към земя 1700mm и минимални отстояния 1900mm за фаза към фаза.

Таблица 4.4.

Тип на пренапрежението	Установени пренапрежения			
	Фаза към земя		Фаза към фаза	
Изоляция	Вътрешна	Външна	Вътрешна	Външна
Въздействащи пренапрежения $U_{gr}, kV$	183	183	245	245
Координирани издържани напрежения $U_{sw}, kV$	183	183	245	245
Изисквани издържани напрежения $U_{rw}, kV$	211	197	281	263
Тип на пренапрежението	Комутационни пренапрежения			
	Фаза към земя		Фаза към фаза	
Изоляция	Вътрешна	Външна	Вътрешна	Външна
Въздействащи пренапрежения $U_{gr}, kV$	390	390	766	766
Координирани издържани напрежения $U_{sw}, kV$	413	413	766	766
Изисквани издържани напрежения $U_{rw}, kV$	475	445	881	824
Тип на пренапрежението	Атмосферни пренапрежения			
	Фаза към земя		Фаза към фаза	
Изоляция	Вътрешна		Външна	
Въздействащи пренапрежения $U_{gr}, kV$	-		-	
Координирани издържани напрежения $U_{sw}, kV$	608		608	
Изисквани издържани напрежения $U_{rw}, kV$	700		655	
Избрани изолационни нива				
Изоляция	Вътрешна		Външна	
Стандартно краткотрайно напрежение с промишлена честота, kV	395		395	
Стандартно издържано импулсно напрежение, kV	950		950	
Минимално импулсно ниво на вътрешна изолация, kV				
Фаза към земя		Фаза към фаза		
750		950		

При разглеждане на вторият случай с отчитане на резултатите от изследване на автоматично повторно включване получените данни при проведената процедура по координация на изолацията са обобщени в табл. 4.5. Сравнени данните получени в таблицата и тези за обхват 1 за номинални напрежения на международната електротехническа комисия [1] се избират минимални отстояния:

- фаза към земя 1900mm;
- фаза към фаза 2100mm.

Таблица 4.5.

Тип на пренапрежението	Установени пренапрежения			
	Фаза към земя		Фаза към фаза	
Изолация	Вътрешна	Външна	Вътрешна	Външна
Въздействащи пренапрежения $U_{гр}, kV$	183	183	245	245
Координирани издържани напрежения $U_{св}, kV$	183	183	245	245
Изисквани издържани напрежения $U_{гв}, kV$	211	197	281	263
Тип на пренапрежението	Комутационни пренапрежения			
	Фаза към земя		Фаза към фаза	
Изолация	Вътрешна	Външна	Вътрешна	Външна
Въздействащи пренапрежения $U_{гр}, kV$	390	390	780	780
Координирани издържани напрежения $U_{св}, kV$	429	429	795	795
Изисквани издържани напрежения $U_{гв}, kV$	493	461	914	856
Тип на пренапрежението	Атмосферни пренапрежения			
	Фаза към земя		Фаза към фаза	
Изолация	Вътрешна		Външна	
Въздействащи пренапрежения $U_{гр}, kV$	-		-	
Координирани издържани напрежения $U_{св}, kV$	608		608	
Изисквани издържани напрежения $U_{гв}, kV$	700		655	
Избрани изолационни нива				
Изолация	Вътрешна		Външна	
Стандартно краткотрайно напрежение с промишлена честота, kV	395		460	
Стандартно издържано импулсно напрежение, kV	950		1050	
Минимално импулсно ниво на вътрешна изолация, kV				
Фаза към земя			Фаза към фаза	
750			950	

При разглеждане на случай с определяне на въздействащите пренапрежения по детерминистичен подход чрез използване на формула 9.3. (Приложение №9) се получават данните в таблица 4.6. Спрямо данните получени в таблицата и тези за обхват 1 на номинални напрежения IEC-71-1[1] се избират минимални отстояния фаза към земя 2200 mm и минимални



отстояния 2200mm за фаза към фаза.

Таблица 4.6.

Тип на пренапрежението	Установени пренапрежения			
	Фаза към земя		Фаза към фаза	
Изолация	Вътрешна	Външна	Вътрешна	Външна
Въздействащи пренапрежения $U_{гр}$ , kV	183	183	245	245
Координирани издържани напрежения $U_{св}$ , kV	183	183	245	245
Изисквани издържани напрежения $U_{гв}$ , kV	211	197	281	263
Тип на пренапрежението	Комутационни пренапрежения			
	Фаза към земя		Фаза към фаза	
Изолация	Вътрешна	Външна	Вътрешна	Външна
Въздействащи пренапрежения $U_{гр}$ , kV	390	390	780	780
Координирани издържани напрежения $U_{св}$ , kV	429	429	795	795
Изисквани издържани напрежения $U_{гв}$ , kV	493	461	914	856
Тип на пренапрежението	Атмосферни пренапрежения			
	Фаза към земя		Фаза към фаза	
Изолация	Вътрешна		Външна	
Въздействащи пренапрежения $U_{гр}$ , kV	1000		1000	
Координирани издържани напрежения $U_{св}$ , kV	1000		1000	
Изисквани издържани напрежения $U_{гв}$ , kV	1150		1076	
Избрани изолационни нива				
Изолация	Вътрешна		Външна	
Стандартно краткотрайно напрежение с промишлена честота, kV	460		460	
Стандартно издържано импулсно напрежение, kV	1175		1175	
Минимално импулсно ниво на вътрешна изолация, kV				
Фаза към земя		Фаза към фаза		
1175		1175		

## Изводи

От разгледаните варианти и приложената методика за проверка и координация на изолацията може да се заключи:

- Избраните изолационни нива и разстояния са напълно достатъчни за

- надежната работа на съоръженията в изследваният обект.
- Съществуващата защита от пренапрежения е изградена по всички норми и изисквания и въздействащите пренапрежения се ограничават до необходимите безопасни нива;
  - От процедурата по координация на изолацията се вижда влиянието на всеки един детайл върху определянето на изолационното ниво на оборудването. Също така от изключителна важност е използваният подход при определянето на въздействащите пренапрежения тъй като в последствие те влияят върху избраното изолационно ниво. За пример може да се вземе сравнение при използваните методи за определяне на въздействащите атмосферни пренапрежения. При тях използването на различните методи може до голяма степен да завиши използваното изолационно ниво, минимално допустимите разстояния, както и това да доведе до вдигане цената на даден проект. Поради тази причина е важно да се подчертае, че процедурата по координация на изолацията е баланс между практичност, надежност и икономическа изгода на дадено техническо решение;
  - За монтираните вентилни отводи е важно да бъдат подбрани и координирани въздействащите напрежения от установени пренапрежения, тъй като опита през годините показва голяма аварийност вследствие на установени пренапрежения;
  - При определяне на напреженията в различните стъпки от процедурата е необходимо да се разгледат възможно най-много ситуации за да бъдат отчетени възможно най-много варианти и да се направи добро техническо решение;
  - Процедурата може да се използва за подобряване работата на съществуващи съоръжения в ЕЕС, както и при проектирането на нови такива;
  - Координация на изолацията може да бъде полезна при изследване на изключвания в ЕЕС;
  - Процедурата по координация на изолацията може да бъде внедрена в учебният процес на студенти за запознаване с основните принципи и важни моменти при координиране на изолацията на електрическите обекти.

## **Заключение**

Нивата на пренапреженията, както и причините пораждащи ги в електроенергийната система винаги ще са актуален обект на изследване, поради неспиращото се развитие на мрежата, генерацията и технологиите изискващи все по-надеждни и непрекъсваеми електрозахранвания. Чрез направеният литературен обзор са обобщени основните характеристики на пренапреженията в ЕЕС, като са извадени и основните модели използвани за представянето на съоръженията при моделни изследвания.

Изградените в настоящата дисертационна работа, както и подобно изг-

радени заместващи и моделни схеми в софтуерната среда за други обекти могат да бъдат използвани за:

- Задълбочени изследвания свързани с подобряване защитата от пренапрежения;
- Максимално добро разположение на средствата за защита от пренапрежения;
- Определяне на потенциално слаби места на електрически уредби за защита от пренапрежения;
- Доказване на енергийната способност на МОВО за дадено техническо решение;
- Определяне на нивата на пренапрежения при въздействие на различни типове мълнии, както и потенциално опасните мълнии за дадена уредба;
- Определяне на зависимостта на нивата на атмосферните пренапрежения от заземителното съпротивление на стълбовните линии;
- Определяне на нивата на пренапреженията с монтирани МОВО за доказване на дадено техническо решение;
- Определяне нивата на пренапреженията при различни комутации в електроенергийната система;
- Определяне на нивата на пренапреженията, както и тяхното статистическо разпределение при дадена нова конфигурация или ново съоръжение;
- Пресъздаване на изключения, аварии и други процеси в ЕЕС;
- Обучение на студенти и направата на лабораторни упражнения свързани с пренапрежения в електрически подстанции.

Получените резултати при моделните изследвания на пренапрежения вследствие на пряко попадение показват нивата на пренапрежения в изследваната подстанция при въздействието на мълния на различни разстояния, с различни амплитуди. Резултатите доказват защитните свойства на металоокисните вентилни отводи. Нивата на напрежения при използване на МОВО за значително по-ниски от тези без монтирани МОВО. За оптимални резултати са нужни допълнителни изследвания за определяне точното място на монтаж на вентилните отводи. Чрез получените резултати е показана енергийната способност на монтираните вентилни отводи. Моделното изследване при попадение на мълния върху първи стълб до подстанцията показва наличието или липсата на обратен разряд за дадена амплитуда на тока на мълнията. Резултатите показват и нивата на пренапрежения при наличието на обратен разряд на първи стълб. Отново, както и при изследването на пряко попадение могат да се видят потенциално застрашените места от електрическата уредба. Чрез направеното изследване е показано, как чрез монтаж на комплект от вентилни отводи на определени места може да се подобрят, както нивата на пренапреженията в подстанцията, така и работата на

електропроводната линия. Предложени са различни технически решения за подобряване нивата на пренапреженията в подстанцията. Също така, е показана и енергийната способност на монтираните вентилни отводи. За оптимални резултати при подобряване работата на електропроводните линии могат да бъдат направени и допълнителни изследвания, както и да бъдат използвани усъвършенстваните вентилни отводи тип EGLA.

Определени са нивата на пренапреженията вследствие на някои от извършваните комутации в подстанции 220 kV. Резултатите могат да бъдат използвани за бъдещи технически решения или изследвания. Резултатите от такъв тип модели могат да бъдат използвани за изследване нивата на пренапреженията при кабелни мрежи и влиянието им върху системата. Моделите за изследване възстановяващото се напрежение между контактите на прекъсвач могат да се използват при проучване за нови технически решения и преконфигурации. Моделните схеми, както и подобни такива могат да се използват при разследване на изключения и аварии.

Чрез процедурата по координация на изолацията може да бъде подобрена сигурността и надеждността на работата на съоръженията в ЕЕС. Чрез използване на резултати от вариантни изследвания е възможно решаването на частни проблеми. Също така, е възможно доказването на избрана конфигурация и решение.

Представената методика за координация и проверка на изолацията на електроенергийни съоръжения в ЕЕС чрез моделни изследвания дава възможността за изследване, проучване и проверка на примерни конфигурации и решения за подобрене на дадена уредба. Чрез методиката е възможно решаването на проблеми свързани с надеждността на изолационните системи в ЕЕС с минимални средства и максимален резултат.

Бъдещето на електроенергийната система, както и на цялата индустрия е свързано с технологиите и тяхното развитие. Чрез използването на новите софтуерни продукти и натрупаното знание за ЕЕС е възможно създаването на една система с висока надеждност и сигурност на електрозахранването. Използването на моделни изследвания и оптимизирането им чрез реална информация от регистратори на преходни процеси монтирани в мрежата е бъдещето на електроенергийната система.

### ***Благодарности***

Изказвам благодарност към своят научен ръководител доц. д-р инж. Маргрета Василева за подкрепата, съдействието, насоките и идеите за работа. Благодарност на съпругата, семейството и приятелите ми, както и на катедра“Електроенергетика“, колектива на подстанция “Мадара“ и ЕСО ЕАД МЕР ШУМЕН за подкрепата им по време на разработването на дисертационният труд.

## Научно-приложни и приложни приноси

### Научен принос:

- Представена е методика за координация и проверка на изолацията на електроенергийните съоръжения в ЕЕС чрез моделни изследвания;

### Научно - приложен принос:

- Определени са нивата на пренапрежения и са предложени начини за тяхното намаляване при въздействие на пряко попадение на мълния в близост до подстанция “М1”;
- Определени са нивата на пренапрежения и начини за тяхното ограничаване и подобряване работата на линията при пряко попадение на мълния върху първи стълб в близост до подстанцията “М1”;
- Определени са нивата на пренапрежения при въздействие на комутационни пренапрежения, както и начини за тяхното ограничаване;
- Анализ на различните фактори влияещи върху нивата на пренапреженията възникващи в подстанции 220 kV;
- Направена координация на изолацията на подстанция 220 kV с разглеждане на различни варианти;
- Предложена е методика, позволяваща моделното изследване на различни конфигурации на ЕЕС;
- Показване енергийната способност и предимствата при използва-нето на металоокисни вентилни отводи при въздействие на атмосферни пренапрежения.

### Приложени приноси:

- Създаден модел в софтуерната среда на АТР-ЕМТР за изследване и анализ на атмосферни пренапрежения в подстанция “М1”;
- Създаден модел в софтуерната среда на АТР-ЕМТР за изследване и анализ на комутационни пренапрежения в подстанция “М1”;
- Създаден модел в софтуерната среда на АТР-ЕМТР за изследване и анализ на възстановяващото се напрежение между контактите на прекъсвач при изключване;
- Създадена методика, подпомагаща изследването на изключвания, аварии и пресъздаването на различни конфигурации;
- Натрупана база от данни улесняваща моделирането на различните съоръжения за изследване на различните преходни процеси;
- Възможност за обучение на студенти чрез създадените модели.

## Списък на публикациите по темата на дисертационния труд:

1. Vasileva, M., Stanchev, D. "Determination of dangerous lightning current levels for power substations 220 kV", Proceeding of International Conference "Applied Computer Technologies, Ohrid, Macedonia, 2018.  
Василева, М., Станчев, Д. "Определяне на опасните нива на тока на мълнията за подстанции 220 kV", сборник конференция АСТ, 2018.
2. Stanchev, D. "Model study of lightning overvoltages in substation due to backflashover of overhead transmission line 220 kV", 10th Electrical Engineering Faculty Conference (BuleF), Sozopol, Bulgaria, 2018, Electronic ISBN: 978-1-5386-7565-6 Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8646928>.  
Станчев, Д., "Моделно изследване на атмосферни пренапрежения в подстанция вследствие на обратен разряд на въздушна електропроводна линия 220 kV", 10-та Конференция на електротехнически факултет „БулЕФ 2018“.
3. Vasileva, M., Stanchev, D. "Lightning overvoltages in electrical substation 220 kv due to shielding failure of overhead transmission line", 10th Electrical Engineering Faculty Conference (BuleF), Sozopol, Bulgaria, 2018, Electronic ISBN: 978-1-5386-7565-6 Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8646957>.  
Василева, М., Станчев, Д. "Атмосферни пренапрежения в електрическа подстанция 220 kV при пряко попадение на мълния върху въздушна електропроводна линия", 10-та Конференция на електротехнически факултет „БулЕФ 2018“.
4. Stanchev, D. "Limitation of lightning overvoltages in electrical substation 220 kV due to back flashover by installing surge arresters", 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BuleF), Varna, Bulgaria, 2019.  
Станчев, Д. "Ограничаване на атмосферни пренапрежения вследствие на обратен разряд в електрическа подстанция 220 kV чрез инсталиране на вентилни отводи", 11-та Конференция на електротехнически факултет „БулЕФ 2019“.
5. Vasileva M., Stanchev D., "Statistical analysis of energization and re-energization overvoltages in overhead transmission line 220 kV", 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), 12-14 November, Ruse, Bulgaria 2020. (in publication)  
Василева, М., Станчев, Д., "Статистически анализ пренапрежения при включване и повторно включване по линия 220 kV", 7-ма Международна Конференция за Енергийна Ефективност и Аграрно Инженерство, 12-14 Ноември, Русе, България, 2020. (предстои публикуване).

Investigation and analysis of overvoltages in electrical substations 220 kV  
ABSTRACT

Overvoltages are one of the most often reasons for faults in power system. In order to limit these phenomenon case studies and investigations are needed. Due to many specifics of the system model studies through software products are one of the most preferred methods for investigation in the power system. The aim of the dissertation is development of methodology for insulation coordination of electrical substations 220 kV through model studies. This methodology can increase and improve power system performance and the simulation results can be useful for power system studies, future applying of the methodology and student education.