

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ВАРНА

**Електротехнически факултет
Катедра “Електроенергетика“**

маг. инж. Пламен Антонов Станчев

АНАЛИЗ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА И СЕЛЕКТИВНОСТТА НА РЕЛЕЙНИТЕ ЗАЩИТИ В СЪВРЕМЕННИТЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен “ДОКТОР”

Област: 5. “Технически науки“
Професионално направление: 5.4 „Енергетика“
по докторска програма: Електроенергийни системи

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Медиха Енвер Мехмед-Хамза

Рецензенти:

1.
2.

Варна, 2022 г.

Дисертационният труд е обсъден на 02.11.2022 г. в катедра “Електроенергетика” на катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна № 753/12.10.2022 г. и насочен за защита.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Електроенергетика“ на Електротехнически Факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Пламен Антонов Станчев

Заглавие: *Анализ на чувствителността и селективността на релейните защиты в съвременните електрически мрежи средно напрежение*

Тираж: 10 броя

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ВАРНА

маг. инж. Пламен Антонов Станчев

**АНАЛИЗ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА И СЕЛЕКТИВНОСТТА
НА РЕЛЕЙНИТЕ ЗАЩИТИ В СЪВРЕМЕННИТЕ
ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Варна, 2022 г.

Дисертационният труд съдържа 203 страници, включително 92 фигури, 39 таблици, и 6 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 120 заглавия, от които 86 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои наГ. от.....Ч. В.....на открито заседание на жури, сформирано със заповед № / г. на Ректора на ТУ-Варна.

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 развитието на електроенергийните системи средно напрежение в съвременния свят се налагат множество фактори – икономически, екологични, социални и нови технологии. Налага се въвеждане на нови технологии за производство, пренос и разпределение на електрическата енергия и системи за управление на този процес. Всичко това води до промяна на организацията и разбиране на електроенергийните системи средно напрежение.

У нас електрическите мрежи средно напрежение обхващат най-голям брой потребители. Сигурността и стабилността на електрозахранването на потребителите зависи от тяхната надеждност. Повредите и изключванията могат да доведат до сериозни материални и икономически загуби от прекъсване на електрозахранването.

Работата на електрическите мрежи при нормални условия не зависи от начина на заземяване на звездния център, но при земни съединения режимът на заземяване до голяма степен определя изискванията към нивото на изолацията на самата мрежа и на елементите на уредбите, които са свързани електрически (галванично) с нея, степента на комутационните пренапрежения и начините им за ограничаване, големината на токовете при земни съединения, работата на релейните защиты, условията за безопасност, капиталните вложения за изграждане на мрежата и др.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Да се разработи методика за определяне на настройките на релейните защиты в електрически мрежи средно напрежение с отчитане ограничителните условия, осигуряващи селективността и чувствителността им.

За постигане на поставената цел се формулираха следните задачи за решаване:

1. *Моделиране на процесите в електрически мрежи 20 kV с цел изследване на поведението релейните защиты при всички видове симетрични и несиметрични повреди със следните възможности:*

- *Визуализация чрез светлинна сигнализация действието на отделните стъпала на защитите, АПВ, работата на релейна защита и моментното състояние на прекъсвача на защитаваното съоръжение;*

- *Визуализиране изменението на режимните параметри в моментни стойности при изключване на к.с. от релейната защита и действието на АПВ;*

- *Въвеждане и извеждане на отделните стъпала на защитата. Възможност за въвеждане и извеждане на АПВ, както и задаване на брой цикли.*

2. *Формиране математични описания на ЕЕС с цел настройка на релейните защиты в електрически мрежи средно напрежение.*

Поставят се следните изисквания към математичните описания на елементите на електрическата мрежа:

- *Да се формират във фазни координати с ефективните и моментните стойности на режимните параметри, с оглед възможност за моделиране на сложни видове повреди;*

- *Да позволяват описание на класическата топология на ЕЕС - синхронни агрегати, електропроводи, трансформатори и др., както и генераторни източници включващи се в електрически мрежи (фотоволтаични, ветроенергийни централи и др.).*

3. *Моделни изследвания при повреди в електрически мрежи средно напрежение. Изследванията да се направят за:*

- *Изолиран звезден център;*

- *Компенсирано заземяване – през дъгогасителен реактор;*

- *Комбинирано заземяване – при включване на активно съпротивление и при изключване на активно съпротивление;*

- *Заземяване през активно съпротивление от 20 Ω до 60 Ω при мрежи с голям капацитивен ток.*

4. *Да се изследват режимните параметри при къси и земни съединения в електрически мрежи средно напрежение. Да се разгледат:*

- *Пренапрежения в преходен режим на здравите фази;*

• *Пренапрежения в звездния център – при з.с. и при линейна несиметрия в нормален режим;*

• *Установени пренапрежения;*

• *Ток на з.с. в преходен режим – големина и продължителност на преходния процес;*

• *Влияние на преходното съпротивление в мястото на повредата;*

• *Изменението на режимните параметри и параметрите за настройката на земните защиты при увеличен дял на кабелната част в електрически мрежи 20 kV.*

5. *Да се изведат изчислителни зависимости относно ограничителните условия, при които се осигурява селективността и чувствителността на защитите.*

6. *Да се разработи методика и алгоритъм за изчисляване настройката на релейни защиты в електрически мрежи средно напрежение с отчитане на ограничителните условия, при които се осигурява селективността и чувствителността на защитите.*

ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обект на изследването са релейни защиты в съвременните електрически мрежи средно напрежение.

ПРЕДМЕТ И МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Експерименталните симулационни изследвания в дисертационния труд са проведени програмна среда MATLAB/Simulink за най-разпространените електрически мрежи, като е отчетен режима на работа на звездния център на захранващия силов трансформатор. Моделните изследвания са направени при земни съединения и междуфазни повреди в електрически мрежи средно напрежение с изолирана, компенсирана и комбинирано заземена неутрала.

МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

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

- теоретични изследвания, основани на математическо моделиране;
- експериментални изследвания с компютърни симулации;
- определени са граничните условия за селективност и чувствителност на най-често изгражданите релейните защиты. Граничните условия са определени за електромеханични и цифрови релейни защиты, както и за най-често използваните проводници и силови кабели в съвременните електрически мрежи средно напрежение.

НАУЧНА И ПРАКТИЧЕСКА НОВОСТ

1. Изведени са изчислителни зависимости за оценка на запаса по чувствителност и ограничителни условия при настройка на релейни защиты в електрически мрежи 20 kV – максимално токова защита, селективна и неселективна токова отсечка и земни защиты;

2. Изведени са условията, при които напреженията в звездния център са по-големи от нормираните при надлъжна несиметрия в електрически мрежи средно напрежение;

3. Усъвършенствана е методика за настройка на релейни защиты в електрически мрежи средно напрежение, отчитаща вида на защитата и спецификата на защитаващия извод. В методиката се определя коефициента на запас по чувствителността защитата;

4. В програмна среда MATLAB/Simulink са разработени симулационни модели на релейните защиты и автомат за повторно включване, използвани в електрически мрежи 20 kV. Симулационните модели на максимално токова защита, токова отсечка, токова отсечка с реле за време и земни защиты разширяват възможността за изследване и анализ действието на релейните защиты;

5. Създаден е програмен продукт в среда MATLAB за изчисляване на настройките на релейните защиты в електрически мрежи средно напрежение;

6. Систематизирана е информацията относно настройките на използваните релейни защиты в електрически мрежи средно напрежение приложима за отделите по релейна защита;

7. Обобщени са получените резултати за кратността на пренапреженията и тока в преходен режим при земни съединения чрез съпоставяне на начините на заземяване на звездния център в електрически мрежи 20 kV.

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, национални форуми с международно участие и издания:

- **Рецензирани международни конференции:**
 - International scientific conference UNITECH 2019, Gabrovo, Bulgaria;
 - International scientific conference UNITECH 2020, Gabrovo, Bulgaria;
- **Рецензирани национални конференции с международно участие:**
 - 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria - реферирана в SCOPUS.
- **Рецензирани научни издания в страната:**
 - Известия на Съюза на учените – Варна 2020.
 - Годишник на Техническия университет във Варна, 2020.

СТРУКТУРА И ОБЕМ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Дисертационният труд съдържа 203 страници, включително 92 фигури, 39 таблици, и 6 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 120 заглавия, от които 86 на латиница. Основният текст е изложен на 137 страници и се състои от увод, четири глави и заключение на получените резултати.

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

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Селективност и чувствителност на релейните защиты в съвременните електрически мрежи средно напрежение – състояние и проблеми

В глава 1 са представени изискванията към релейните защиты в електрическите мрежи средно напрежение. Представени са предимствата и недостатъците на различните режими на заземяване на звездния център на силовия трансформатор в електрическите мрежи средно напрежение. Разгледани са най-често изгражданите релейни защиты при междуфазни и еднофазни повреди. Обърнато е внимание на проблемите при определяне на селективността и чувствителността им. Посочена е необходимостта от изчислителен инструментариум за моделиране на електрическите мрежи и релейните защиты за анализа на действието им при различните видове повреди. Формирани са математичните описания на елементите на електрическата мрежа. Формулирани са целта и задачите на дисертацията.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ПЪРВА ГЛАВА

1. Повредите към земя в електрически мрежи средно напрежение имат най-голям дял. Режимът на заземяване на звездния център на електрическата мрежа средно напрежение е определящ за използваните земни защиты, за тяхната чувствителност и селективност.

2. Тенденцията в методите на заземяване на звездния център с увеличаващия се дял на силови кабели е използване на активно съпротивление. У нас се прилагат всички начини за заземяване на звездния център на захранващия силов трансформатор.

3. В електрически мрежи с изолиран и компенсирани звезден център трудно се изграждат селективни и чувствителни земни защиты.

4. Големината на преходното съпротивление в мястото на повредата при з.с. е определящо за правилното заработване на земните защиты.

5. В разпределителните дружества много често земните защиты се настройват по общо дефинирани стойности спрямо капацитивния ток, което води до уеднаквявайки настройките на защитите и се намалява чувствителността им.

6. Максималният работен ток на електропроводите средно напрежение зависи от много фактори: като моментната им топология, от товара на потребителите, наличието на големи единични товари. Това създава затруднения при изчисляване настройката по ток на МТЗ.

7. За изследване измененията на режимните параметри при между фазни и еднофазни повреди с подходящ програмен продукт. С цел определяне настройките на РЗ е необходимо предварително проучване на факторите, влияещи върху настройката на релейните защиты - параметри и топология на мрежата, режима на работа на звездния център, избор на момент на възникване на повредата, изменението на преходно съпротивление в мястото на повредата и др.

8. Необходимост от разработване на симулационни модели на РЗ, с цел да се изследва действието на РЗ.

На база на тези основни изводи се конкретизираха следните цел и задачи на дисертационния труд.

ГЛАВА 2. Разработване на симулационни модели на релейни защиты и електрически мрежи средно напрежение за изследване на режимните параметри и действието на релейните защиты при повреди

В настоящата глава са решени първа и втора от поставените задачи, дефинирани в края на първа глава.

Разработени са симулационни модели за най-често използваните релейни защиты и автоматика в електрически мрежи средно напрежение в програмната среда MATLAB/Simulink, като максималнотокова защита, токова отсечка, стъпална токова защита и земна защита. Представен е и модел на защитните функции изпълнявани от цифровите релейни защиты.

Симулационните модели на РЗ дават възможности за:

- Въвеждане/извеждане на функционалните възможности на защитите;
- Въвеждане/извеждане на АПВ;
- Задаване на брой цикли на АПВ.

Симулационните модели на РЗ позволяват въвеждане на входните параметри за настройка на РЗ и АПВ:

- Ток на заработване на РЗ;
- Време на заработване на РЗ;
- Време на настройка на трифазно АПВ;
- Брой цикли на АПВ.

Симулационни модели на РЗ и АПВ

За симулиране действието на всеки вид РЗ е използвана моделна схема на електрическа мрежа средно напрежение 20 kV. Моделите са изградени от следните блокове:

- захранваща система 110 kV (S) – симулиращ обобщена система;
- силов трансформатор 110/20 kV (PT) с изведен звезден център позволяващ симулиране на различните режими на работа на неутралата. В дисертационния труд моделите са представени при заземен звезден център на средно напрежение през активно съпротивление 40 Ω ;
- модел на електропровод (W1, W2, W3) - изграден с проводници AC-70 представен с три последователно свързани п-образни заместващи схеми за симулиране на повреди по дължина на електропровода;
- блок симулиращ електрически товар (Load);
- блок за симулиране различни видове к.с. (3-Phase Fault), позволяващ присъединяване в различни възли на електрическата мрежа;
- симулационни модели на РЗ с и без АПВ – Разработени са симулационни модели на най-често използваните РЗ, като:
 - максимално токова защита;
 - токова отсечка;
 - токова отсечка с реле за време;
 - тристъпална земна защита;
 - симулационен модел на ЦРЗ включващ МТЗ с ускорение преди и след АПВ, ТО, тристъпална ЗЗ и АПВ.

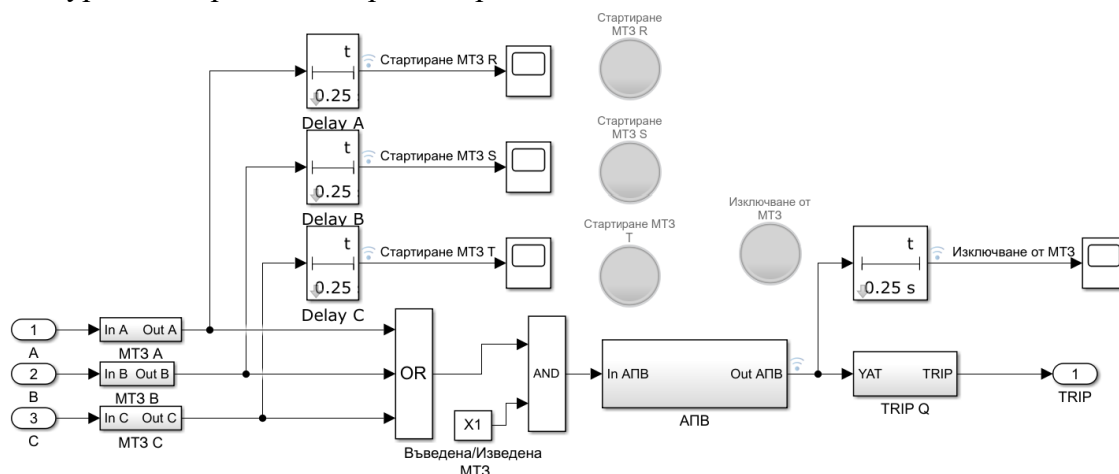
Разработените симулационни модели позволяват моделиране всички видове повреди в електрическите мрежи 20 kV. За целите на анализирани действията на РЗ симулационните модели дават възможност за:

- задаване номиналните токове на измервателните токови трансформатори;
- въвеждане/извеждане на РЗ;
- задаване тока на зареждане и времето на закъснение на съответната РЗ;
- въвеждане/извеждане действието на АПВ, броя на циклите на АПВ и време на настройка.

В симулационните модели специално внимание се обръща на светлинната сигнализация при зареждането на защитите, автоматичното повторно включване и състоянието на прекъсвача (включен/изключен).

Симулационен модел на МТЗ

На Фигура 2-2 е представена реализираната логика за МТЗ и АПВ.



Фигура 2-2 Блок на модел МТЗ с АПВ

Симулационния модел на МТЗ освен горе описаните функционални възможности дава възможност за:

- Въвеждане/извеждане на ускорение на МТЗ;
- Ускорение на МТЗ преди или след АПВ.

Входните параметри необходими за настройка на МТЗ и АПВ са:

- Ток на зареждане на МТЗ – задава се в диапазона $(0,2 \div 40)I_n$;
- Време на зареждане на МТЗ – задава се в диапазона $0 \div 10$ s;
- Време на настройка на АПВ – задава се в s.

Предимствата на разработения симулационния модел на МТЗ и АПВ в електрическа мрежа 20 kV са:

- дава възможност да се анализира действието на защитата и АПВ при симулация на различни повреди в електрическата мрежа;
- визуализация на изменението на режимните параметри при повреди;
- визуализация на стартиране и зареждането на МТЗ и АПВ;
- визуализация за състоянието на прекъсвача (включен/изключен).

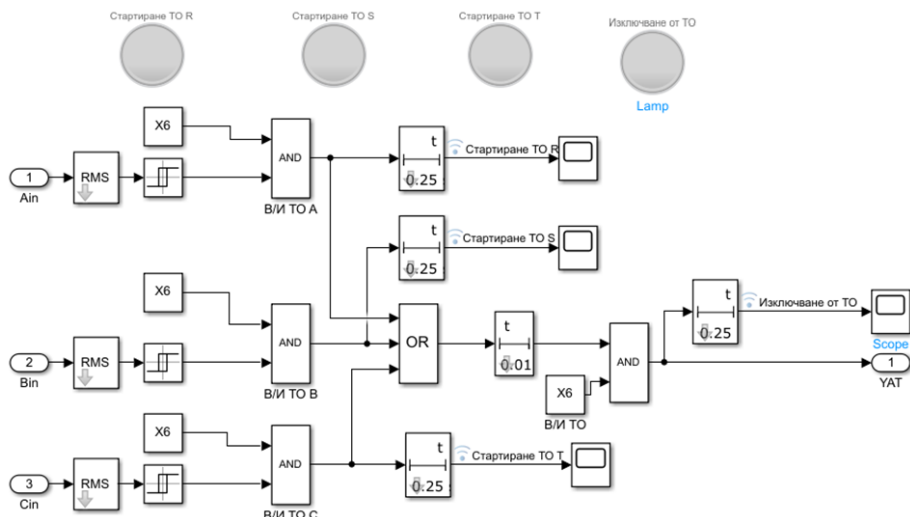
Симулационен модел на ТО

На Фигура 2-12 е представена реализираната логика за ТО.

Симулационния модел на ТО дава възможност за въвеждане/извеждане на АПВ със задаване брой цикли на АПВ, независимо, че при експлоатацията ѝ често не се използва.

Входните параметри предвидени за настройка на ТО и АПВ са:

- Ток на зареждане на ТО – задава се в диапазона $(0,2 \div 40)I_n$;
- Време на зареждане на ТО – задава се в диапазона $0 \div 10$ s с цел въвеждане собственото време на РЗ;
- Брой цикли и време на настройка на АПВ – задава се в s.



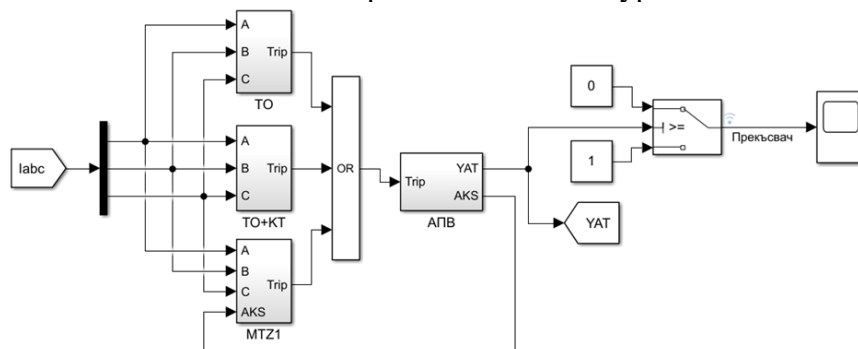
Фигура 2-12 Блок схема на модел ТО

Предимствата на разработения симулационен модел на ТО в електрическа мрежа 20 kV са:

- възможност да се разглежда поведението на защитата при симулация на различни повреди в електрическата мрежа;
- визуализация на изменението на режимните параметри при различните видове повреди;
- визуализация на зареждането на ТО;
- визуализация за състоянието на прекъсвача (включен/изключен).

Симулационен модел на стъпална токова защита

В електрически мрежи средно напрежение се използва стъпална токова защита включваща МТЗ, ТО и СТЗ. Блок схемата на СТЗ е представена на Фигура 2-16.



Фигура 2-16 Блок схема на СТЗ с реле за време

Симулационния модел на стъпална токова защита (СТЗ) с реле за време дава допълнителна възможност за:

- Въвеждане/извеждане на отделните стъпала на РЗ;
- Въвеждане на ускорение на МТЗ преди или след АПВ.

Входните параметри за настройка на отделните стъпала на РЗ и АПВ са:

- Ток на зареждане на МТЗ – задава се в диапазона $(0,2 \div 40)I_n$;
- Време на зареждане на МТЗ – задава се в диапазона $0 \div 10$ s;
- Ток на зареждане на ТО – задава се в диапазона $(0,2 \div 40)I_n$;
- Време на зареждане на ТО – задава се в диапазона $0 \div 10$ s с цел въвеждане собственото време;
- Ток на зареждане на СТЗ – задава се в диапазона $(0,2 \div 40)I_n$;
- Време на зареждане на СТЗ – задава се в диапазона $0 \div 10$ s;
- Време на настройка и брой цикли на АПВ – задава се в s.

Предимствата на разработения симулационния модел на СТЗ и АПВ в електрическа мрежа 20 kV са:

- дава възможност да се разглежда поведението на РЗ и АПВ при симулация на различни повреди в електрическата мрежа;
- визуализация на изменението на режимните параметри при повреди;
- визуализация за състоянието на прекъсвача (включен/изключен).

Симуляционен модел на 33

Блок схема на тристъпална 33 е представен на Фигура 2-20.

Възможностите на симуляционния модел на 33 са:

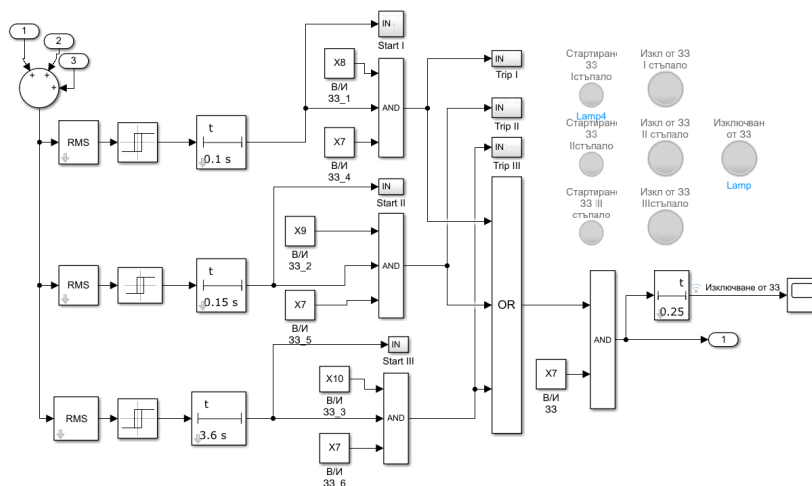
- Въвеждане/извеждане на отделните стъпала на 33;
- Въвеждане/извеждане на АПВ;
- Задаване на брой цикли на АПВ.

Входните параметри за настройка на 33 и АПВ са:

- Ток на заработване на всяко стъпало от 33 – задава се в диапазона $(0,02 \div 20)I_{0n}$;
- Време на заработване на всяко стъпало от 33 – задава се в диапазона $0 \div 10$ s предвидено с цел въвеждане собственото време на защитата;
- Време на настройка на АПВ - задава се в s.

Предимствата на разработения симуляционния модел на 33 и АПВ в електрическа мрежа 20 kV са:

- дава възможност да се разглежда и анализира действието на 33 и АПВ при симулация на различни повреди в електрическата мрежа при различните режими на работа на звездния център;
- визуализация на изменението на режимните параметри при повреди;
- визуализация на заработването на 33 и АПВ;
- визуализация за състоянието на прекъсвача (включен/изключен).



Фигура 2-20 Блок схема на тристъпална 33

Симуляционен модел на защитните функции изпълнявани от цифровите РЗ

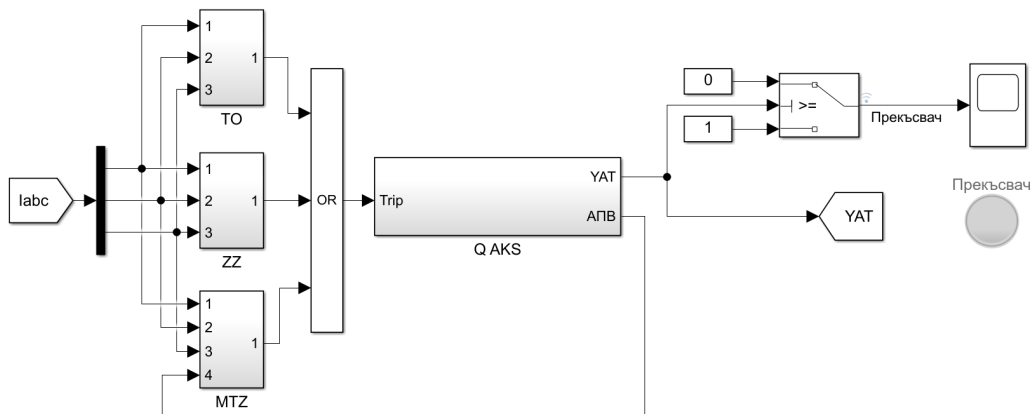
Разработения симуляционен модел на ЦРЗ включващ следните защитни функции: МТЗ с ускорение преди и след АПВ, ТО, тристъпална 33 и АПВ е обозначен с Блок RP-AKS Фигура 2-27.

Симуляционния модел на цифровата РЗ дава възможност за:

- Въвеждане/извеждане на функционалните възможности на защитата;
- Въвежда/извеждане на ускорение преди и след АПВ;
- Въвеждане/извеждане на АПВ;
- Задаване на брой цикли на АПВ.

Предимствата на разработения симуляционния модел на цифровата РЗ и АПВ в електрическа мрежа 20 kV са:

- възможност да се анализират действието и поведението на защитата и АПВ при симулация на различни видове повреди в електрическата мрежа;
- визуализация на изменението на режимните параметри при повреди;
- визуализация на стартирането и заработването на отделните защитни функции на РЗ, както и АПВ при различни видове повреди;
- визуализация за състоянието на прекъсвача (включен/изключен).



Фигура 2-27 Блок схема на цифрова РЗ и АПВ

Изводи

1. Разработените симулационни модели на релейни защиты в електрически мрежи средно напрежение дават възможност за изследване на поведението защитите при всички видове симетрични и несиметрични повреди.

2. Създадени са модели на РЗ с блокове позволяващи въвеждане на параметрите за настройка. Разработените модели на релейни защиты и АПВ са на най-често въвежданите функции в ЦРЗ с удобно въвеждане на параметрите за настройка чрез създадените блокове;

3. Създадените функционални блокове на РЗ позволяват:

- Визуализация чрез светлинна сигнализация действието на отделните стъпала на защитите, АПВ, работата на релейна защита и моментното състояние на прекъсвача на защитаваното съоръжение;

- Визуализиране изменението на режимните параметри в моментни стойности при изключване на к.с. от релейната защита и действието на АПВ;

- Въвеждане и извеждане на отделните стъпала на защитата. Възможност за въвеждане и извеждане на АПВ, както и задаване на брой цикли;

4. Разработените модели дават възможност при въвеждане на данни за конкретна електрическа мрежа и релейна защита да се извърши проверка за настройката на РЗ и нейното поведение при различни повреди.

5. Моделите на РЗ могат да бъдат използвани за обучение на студенти и повишаване на квалификацията на специалисти в практиката.

ГЛАВА 3. Вариантни моделни изследвания при повреди в електрически мрежи средно напрежение

В настоящата глава са решени трета и четвърта от поставените задачи, дефинирани в края на първа глава.

Направени моделни изследвания при изолирана, компенсирана, комбинирана с включване и изключване на активното съпротивление и при заземена през активно съпротивление електрическа мрежа. При моделните изследванията са разгледани различни видове повреди, при следните условия: з.с. са в началото на ВЕП през преходно съпротивление $0,01 \Omega$; з.с. възникващо при максимална стойност на фазното напрежение; изследвано е изменението на режимните параметри при различни стойности на преходното съпротивление; влиянието на въведена надлъжна несиметрия при мрежи с компенсирана и комбинирано заземена неутрала; изследвано е влиянието на преходното съпротивление при различни стойности на активното съпротивление свързано в неутралата за електрически мрежи със заземен звезден център през активно съпротивление.

Моделните изследвания са направени в програмна среда MATLAB/Simulink. Разгледани са електрически мрежи 20 kV с различна сумарна дължина, изградени от въздушни електропроводи.

За оценка на изолационното натоварване на съоръженията са изчислени кратностите на пренапреженията на неповредените фази ($K_{пр,ф}$) и в неутралата ($K_{пр,неут}$) за преходния режим по (3-1) и (3-2):

$$(3-1) \quad I_{p.u} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\max}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 24000}{\sqrt{3}} = 19600 \text{ V}$$

$$(3-2) \quad K_{np,\phi} = \frac{u_{\max}}{19600} \text{ p.u}$$

$$K_{np,неут} = \frac{u_{\max,неутрала}}{19600}, \text{ p.u}$$

където

U_{\max}, V е максимално работно напрежение на електрическата мрежа $20 \text{ kV}_{\text{eff}}$, u_{\max}, V , $u_{\max,неутрала}, V$ са максимални моментни стойности на напреженията в неповредените фази и звездния център в преходния режим при з.с.

За оценка големината на тока на з.с. в преходния режим е въведен коефициент (3-3) отчитащ кратността на тока на з.с. спрямо нормираната допустима стойност от 10 A в нормативните документи при избор на режим на заземяване на звездния център.

$$(3-3) \quad K_{I_{зс}} = \frac{i_{\max}}{10 \cdot \sqrt{2}}$$

където i_{\max} максималната моментна стойност на тока на з.с. в преходния режим.

Моделни изследвания при земни съединения в електрически мрежи с изолирана неутрала.

Изследванията за изменението на режимните параметри при земни съединения в разглежданите електрически мрежи с изолирана неутрала са направени при следните изходните условия:

- з.с в началото на ВЕП;
- метално з.с. ($R_d=0,01 \Omega$);
- з.с. възникващо при максимална стойност на фазното напрежение.

Получените резултати са обработени и анализирани относно максималната стойност на кратността на пренапреженията в здравите фази ($K_{np,\phi,max}$) и в неутралата ($K_{np,неут,max}$), кратността на тока на з.с. ($K_{I_{зс}}$), ефективната установена стойност на напрежението в неутралата ($U_{неут}$) и ефективната установена стойност на тока на з.с. ($I_{зс,уст}$).

В Таблица 3-1 са представени обобщените резултати за изследваните електрически мрежи.

Таблица 3-1 Обобщени резултати за ЕМ при изолирана неутрала

$K_{np,\phi,max}$	$K_{I_{зс}}$	$K_{np,неут,max}$	$u_{неут,max}$	$U_{неут}$	$I_{зс,уст}$
-	-	-	kV	kV	A
1,857÷2,039	5,220÷7,957	1,197÷1,290	23,463÷25,280	12,083÷12,093	5,344÷8,088

Направени са изследвания за изменението на напрежението в звездния център (напрежението при несиметрия) при въведена несиметрия в разглежданите мрежи (надлъжна несиметрия). Изходните условия, при които са направени изследванията са:

- прекъсване на фазов проводник с 2 %, 4 %, 8 % и 12 % от цялата дължина на мрежата;
- прекъсването е в нормален режим на работа, т.е в електрическата мрежа няма з.с.

Допустимата стойност на напрежението на несиметрия от изискванията на нормативната уредба е $90,93 \text{ V}$.

В Таблица 3-2 и Таблица 3-3 са представени получените резултати за изследваните електрически мрежи.

Таблица 3-2 Резултати за ЕМ с $L=100 \text{ km}$

Несиметрия в %	$u_{неут,max}$	$U_{неут}$
	V	V
2%	207,74	94,82
4%	474,72	192,29
8%	1027,50	385,04
12%	1592,50	576,37

Таблица 3-3 Резултати за ЕМ с $L=150 \text{ km}$

Несиметрия в %	$u_{неут,max}$	$U_{неут}$
	V	V
2%	226,12	95,70
4%	497,68	192,28
8%	1053,80	383,46
12%	1620,50	573,03

Моделни изследвания при земни съединения в електрически мрежи с компенсирана неутрала.

Моделните изследвания са направени при точна, под и над компенсация до 20 %. Разгледани са четири електрически мрежи 20 kV изградени от въздушни електропроводи със сумарни дължини от 200 km, 250 km, 300 km и 350 km.

Изследванията са направени при следните изходни условия:

- з.с. в началото на ВЕП;
- метално з.с. ($R_d=0,01 \Omega$);
- з.с. възникващо при максимална стойност на фазното напрежение;
- з.с. през преходно съпротивление до 30Ω ;
- мрежата е без несиметрия;
- мрежата е с въведена надлъжна несиметрия 2 %, 4 %, 8 % и 12 %;

За всяка една от разгледаните електрически мрежи са изследвани изменението на режимните параметри и са пресметнати:

- $K_{пр,ф,мах}$ - кратност на пренапреженията в неповредените фази;
- $K_{пр,неут,мах}$ - кратност на пренапреженията в неутралата;
- $K_{Iзс}$ - кратност на тока на з.с.;
- $K_{IРЕАКТОР}$ - кратност на тока през дъгогасителния реактор;
- $U_{неут}$ - ефективната установена стойност на напрежението в звездния център;
- $I_{неут,мах}$ – моментната стойност на напрежението в звездния център;

В Таблица 3-4 са представени обобщените резултати за изследваните въздушни електрически мрежи със сумарни дължини от 200 km, 250 km, 300 km и 350 km.

Таблица 3-4. Обобщени резултати за ВЕМ със сумарни дължини от 200 km, 250 km, 300 km и 350 km с компенсирана неутрала

		$K_{пр,ф,мах}$	$K_{Iзс}$	$K_{IРЕАКТОР}$	$K_{пр,неут,мах}$	$I_{неут,мах}$ kV	$U_{неут}$ kV
		-	-	-	-		
подкомпенсация	20%	2÷2,2	7,3÷14	0,9÷1,5	1,3÷1,4	24,7÷27,7	12,07÷12,08
	15%	2÷2,2	7,3÷14	0,9÷1,6	1,3÷1,4	24,7÷27,7	12,07
	10%	2÷2,2	7,3÷14	0,96÷1,7	1,3÷1,4	24,7÷27,7	12,07
	5%	2÷2,2	7,3÷14	1÷1,8	1,3÷1,4	24,7÷27,7	12,06÷12,07
точна	0%	2÷2,2	7,3÷14	1÷1,9	1,3÷1,4	24,7÷27,7	12,06
надкомпенсация	5%	2÷2,2	7,3÷14	1,1÷1,9	1,3÷1,4	24,7÷27,7	12,06
	10%	2÷2,2	7,3÷14	1,2÷2	1,3÷1,4	24,7÷27,7	12,06
	15%	2÷2,2	7,3÷14	1,2÷2	1,3÷1,4	24,7÷27,7	12,05÷12,06
	20%	2÷2,2	7,3÷14	1,3÷2	1,3÷1,4	24,7÷27,6	12,05

Направено е изследвано за напрежението в звездния център (напрежението при несиметрия) при въведена несиметрия за електрически мрежи със сумарна дължина 200 km и 250 km (надлъжна несиметрия), чрез прекъсване на фазов проводник с 2 %, 4 %, 8 % и 12 % от цялата дължина на мрежата. Изходното условие на направените изследвания е:

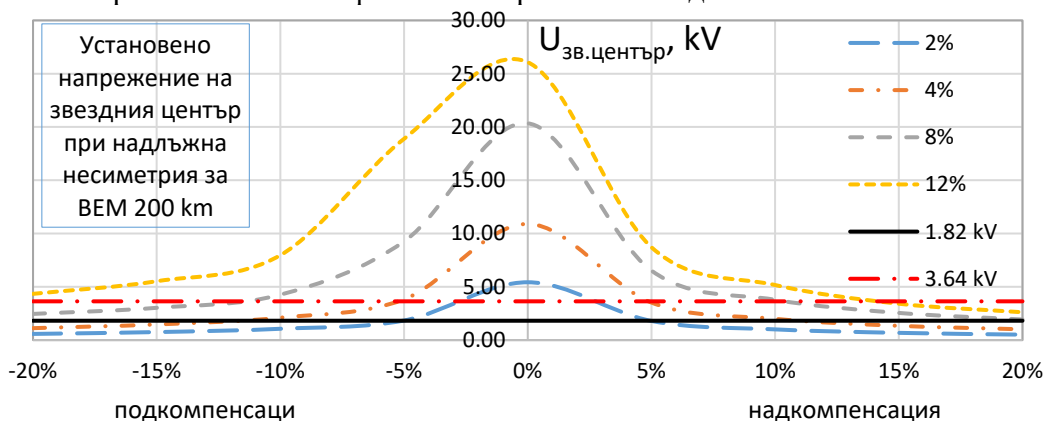
- прекъсване на фазов проводник с 2 %, 4 %, 8 % и 12 % от цялата дължина на мрежата, като прекъсването е в нормален режим на работа, т.е в електрическата мрежа няма з.с.

За разгледаните мрежи в Таблица 3-7 са представени обобщените резултати относно кратността на пренапреженията, кратността на тока на з.с. и максималната стойност на напрежението в неутралата.

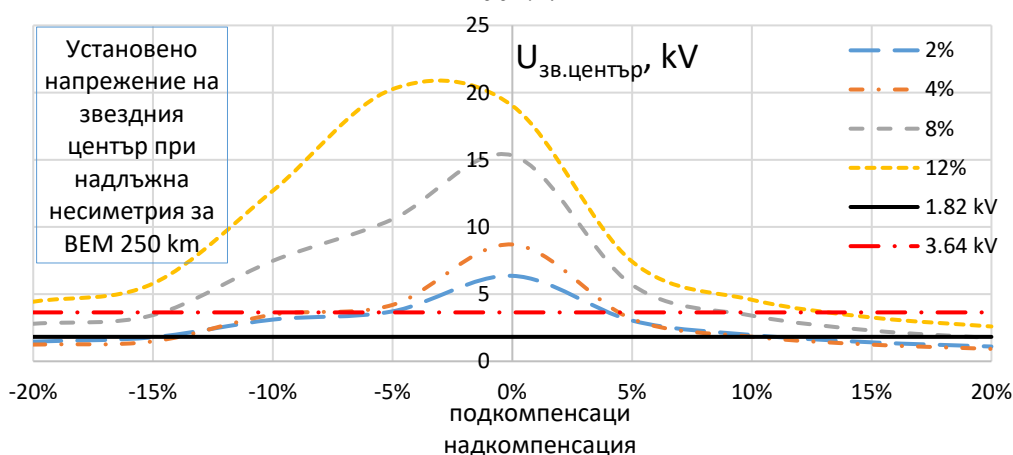
Таблица 3-7 Кратността на пренапреженията, кратността на тока на з.с. и максималната стойност на напрежението в неутралата

$K_{пр,ф}$	$K_{Iзс}$	$K_{пр,неут,мах}$	$I_{неут,мах}$ kV
2÷2,2	7,2÷14	1,26÷1,42	24,7÷27,7

На Фигура 3-7 и Фигура 3-8 са представени стойностите на установените напрежения в звездния център в нормален режим на работа и при надлъжна несиметрия, като те са съпоставени с нормираните допустимите стойности от 15 % от фазното напрежение за продължителна работа и 30 % от фазното напрежение за един час.



Фигура 3-7 Установено напрежение на звездния център при надлъжна несиметрия за ВЕМ 200 km



Фигура 3-8 Установено напрежение на звездния център при надлъжна несиметрия за ВЕМ 250 km

Допустимата стойност на напрежението за продължителна работа изчислено при $21\text{kV}/\sqrt{3}$ е 1,82 kV показана с черна линия, а за един час 3,64 kV с червена линия.

Моделни изследвания за изменението на режимните параметри при земни съединения в електрически мрежи с комбинирано заземяване.

Обикновено под комбинирано заземяване се разбира нормално мрежата да работи с компенсирана неутрала, а при повреда със закъснение да се включва активно съпротивление увеличавайки чувствителността на релейните защиты. През последните години в част от страната се преминава към вариант на комбинирано заземяване като нормално са включени активното съпротивление и дъгогасителния реактор и със закъснение се изключва активното съпротивление. Това обуславя провеждането на моделни изследвания на двата вида комбинирано заземяване на звездния център.

Направено е изследване за две смесени електрически мрежи, изградени с въздушни и кабелни електропроводи с обща дължина на мрежата 200 km. Едната мрежа е с 10 % кабелна част, а втората е с 20 %.

Исходните условия за проведените изследвания са:

- з.с. в началото на ВЕП;
- метално з.с. ($R_d=0,01 \Omega$);
- з.с. възникващо при максимална стойност на фазното напрежение;
- мрежата е без несиметрия.

Моделни изследвания при земни съединения в електрически мрежи с комбинирано заземяване при включване на активното съпротивление.

В Таблица 3-9 са представени резултатите за смесена електрическа мрежа с дължина $L = 200 \text{ km}$ и 20 % кабелна част на мрежата.

Таблица 3-9 СЕМ с $L=200 \text{ km}$, 20 % кабелна част

		$K_{пр,ф,мах}$	$K_{IЗс}$	$K_{IPEAKTOP}$	$K_{пр,неут,мах}$	$u_{неут,мах, \text{kV}}$	$U_{неут, \text{kV}}$
подкомпенсация	20%	2,388	62,215	15,427	1,377	26996	11598
	15%	2,390	62,697	14,867	1,382	27083	11642
	10%	2,391	63,145	14,346	1,386	27163	11682
	5%	2,393	63,562	13,860	1,390	27237	11718
точна	0%	2,394	64,026	13,316	1,394	27320	11759
надкомпенсация	5%	2,396	64,524	12,734	1,398	27408	11801
	10%	2,398	64,980	12,199	1,403	27489	11839
	15%	2,399	65,283	11,844	1,405	27543	11864
	20%	2,401	65,839	11,191	1,410	27641	11908

Обобщените резултати при изследвания за изменението на режимните параметри на изследваните мрежи при з.с. през преходно съпротивление до 30Ω относно влиянието на преходното съпротивление в мястото на повредата са представени в Таблица 3-10.

Таблица 3-10 Влиянието на преходното съпротивление в мястото на повредата

R_d, Ω	$K_{пр,ф}$	$K_{пр,неут}$	$u_{неут,мах, \text{kV}}$
0,01	2,23 ÷ 2,39	1,39 ÷ 1,40	27,2 ÷ 27,5
10	1,93 ÷ 1,97	0,99 ÷ 1,13	19,3 ÷ 22,3
20	1,69 ÷ 1,78	0,81 ÷ 0,98	15,9 ÷ 19,1
30	1,54 ÷ 1,65	0,79 ÷ 0,85	15,5 ÷ 16,8

Моделни изследвания при земни съединения в електрически мрежи с комбинирано заземяване при изключване на активното съпротивление.

В Таблица 3-13 са представени обобщените резултати относно кратността на пренапреженията на неповредените фази, кратността на пренапрежението и максималната стойност на пренапрежението в звездния център на силовия трансформатор на страна средно напрежение при метално з.с. за изследваните мрежи.

Таблица 3-13 Кратност на пренапреженията на неповредените фази, кратност на пренапрежението и максималната стойност на пренапрежението в звездния център

$K_{пр,ф,мах}$	$K_{пр,неут,мах}$	$u_{неут,мах, \text{kV}}$
1,97 ÷ 2,17	0,82 ÷ 0,86	16,1 ÷ 16,9

Моделни изследвания при земни съединения в електрически мрежи заземени през активно съпротивление.

Моделните изследвания за изменението на режимните параметри при земни съединения в разглежданите електрически мрежи заземени през активно съпротивление са представени при следните изходните условия:

- з.с. възниква в момент на максимална стойност на напрежението;
- з.с. в началото и по дължината на въздушен извод средно напрежение;
- з.с. при изменение на преходното съпротивление в мястото на повреда със стойност $0,001 \Omega$, 20Ω , 60Ω и 100Ω ;
- з.с. при активно съпротивление в неутралата със стойност 20Ω , 40Ω и 60Ω .

Изследвани са електрически мрежи с ниво на напрежение 20 kV . Разгледани са две мрежи с различен дял от 60 % и 80 % кабелни електропроводи от общата дължина на мрежата.

Изследвани са изменението на режимните параметри при изменение на големината на активното съпротивление в неутралата и преходното съпротивление в мястото на повредата при з.с. Общата дължина на електрическата мрежа е 130 km, а кабелните електропроводи са изменящи се. Неутралата на силовия трансформатор е заземена през активно съпротивление 20 Ω , 40 Ω и 60 Ω .

Кратността на пренапреженията е изчислена спрямо максималното работно напрежение по (3-1) и (3-2).

За електрическа мрежа с 60 % кабелни електропроводи от общата дължина на електрическата мрежа са представени резултатите в Таблица 3-14 при метално з.с. в началото на извод изграден с проводник АС-70 и активно съпротивление в звездния център 20 Ω , 40 Ω и 60 Ω . Представени са резултати за максималната моментна стойност на напрежението в неповредените фази в преходен режим ($u_{\max\phi}$), кратността на пренапреженията в преходен режим на неповредените фази ($K_{\text{пр}}$), максималната моментна стойност на напрежението в неутралата ($u_{\max\text{неутр}}$) и кратността на пренапрежението в неутралата в преходен режим ($K_{\text{пр,неутр}}$).

Таблица 3-14 Кратности на пренапреженията в преходен режим за АС-70

$R_{\text{прех}}, \Omega$	R_n, Ω	$u_{\max\phi}, \text{kV}$	$K_{\text{пр}}$	$u_{\max\text{неутр}}, \text{kV}$	$K_{\text{пр,неутр}}$
0,001	20	43,74	2,23	13,31	0,68
	40	44,47	2,27	17,53	0,89
	60	44,94	2,29	19,51	1,00

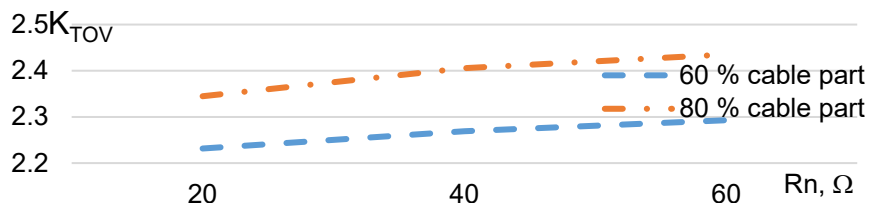
В Таблица 3-15 са представени получените резултати при з.с. в края на въздушен извод с проводници АС-70 и дължина 10 km. Преходно съпротивление в мястото на повреда се изменя от 0,001 Ω до 100 Ω и различни стойности на активното съпротивление в звездния център.

Таблица 3-15 Кратности на пренапреженията в преходен режим при з.с. в края на АС - 70

$R_{\text{прех}}, \Omega$	R_n, Ω	$u_{\max\phi}, \text{kV}$	$K_{\text{пр}}$	$u_{\max\text{неутр}}, \text{kV}$	$K_{\text{пр,неутр}}$
0,001	20	32,86	1,68	9,63	0,49
	40	35,31	1,80	13,35	0,68
	60	36,69	1,87	15,37	0,78
20	20	26,40	1,35	5,81	0,30
	40	28,32	1,44	8,78	0,45
	60	29,50	1,50	10,58	0,54
60	20	22,37	1,14	3,22	0,16
	40	23,92	1,22	5,10	0,26
	60	24,89	1,27	6,29	0,32
100	20	20,81	1,06	2,23	0,11
	40	21,99	1,12	3,57	0,18
	60	22,71	1,16	4,42	0,23

За изследваните мрежи при описаните изходни условия за изменението на режимните параметри интерес представлява изменението на кратността на пренапреженията на неповредените фази и големината на тока на з.с при различни стойности на активното съпротивление в звездния център.

На Фигура 3-13 са съпоставени кратностите на пренапреженията на неповредените фази в преходен режим при метално з.с. в началото на електропровод при различен дял от 60 % и 80 % кабелна част от общата дължина на мрежата за изследваните мрежи и различни стойности на активното съпротивление на звездния център.



Фигура 3-13 Кратности на пренапреженията на неповредените фази в преходен режим

Моделни изследвания при междуфазни повреди в електрически мрежи средно напрежение.

Разгледана е електрическа мрежа 20 kV, изградена от въздушни и кабелни електропроводи. Въздушните електропроводи са с най-често използваните у нас проводници АС-50, АС-70, АС-95 и сумарни дължини до 40 km. За кабелните електропроводи са изследвани САХЕКТ-120, САХЕКТ-185 с дължини до 10 km, които съществуват в нашата ЕЕС. Захранващият силов трансформатор е с мощност 25 MVA.

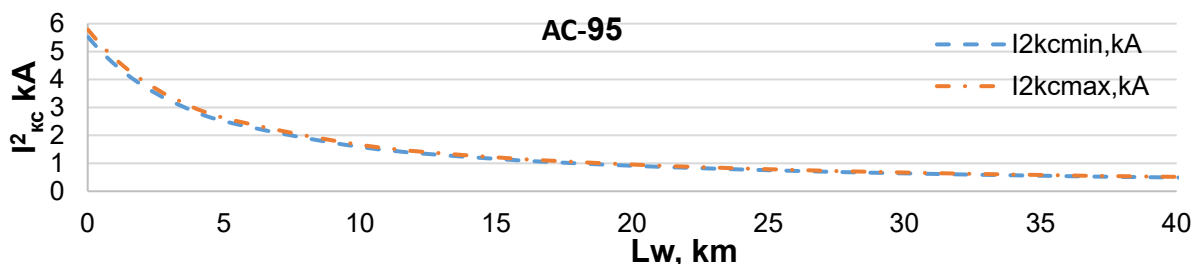
Направени са изследвания относно изменението на токовете при метално трифазно и метално двуфазно к.с в зависимост от дължината и типа на електропровода.

Моделните изследвания за изменението на режимните параметри при междуфазни къси съединения в разглежданите електрически мрежи са представени при следните изходните условия:

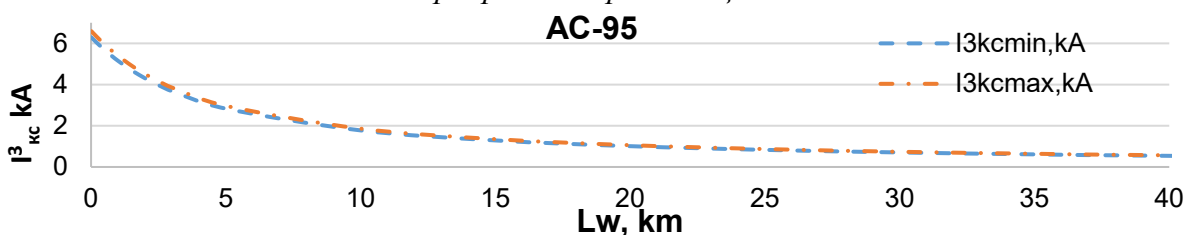
- к.с. възниква в момент на максимална стойност на напрежението;
- к.с. в началото и по дължината на въздушен и кабелен извод средно напрежение;
- к.с. в минимален и максимален режим на захранващия източник.

На Фигура 3-20 и Фигура 3-21 са представени получените резултати за изменението на токовете на метално трифазно и двуфазно к.с. в минимален и максимален режим при захранващ трансформатор с $S_n=25$ MVA, за въздушен електропровод изграден с проводници АС-95.

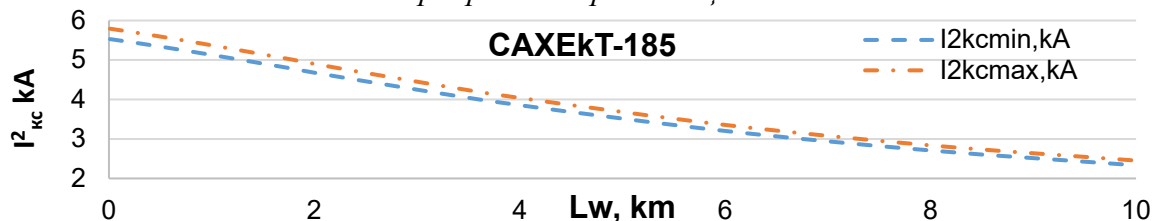
На Фигура 3-24 и Фигура 3-25 са представени получените резултати за изменението на токовете на метално двуфазно и трифазно к.с. в минимален и максимален режим при захранващ трансформатор с $S_n=25$ MVA за кабелни електропроводи изградени с САХЕКТ- 185.



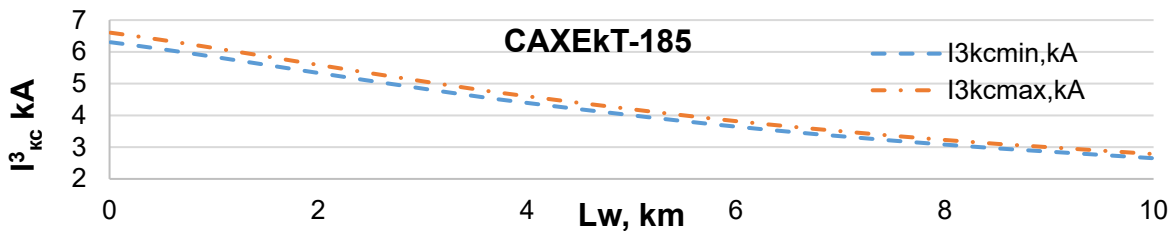
Фигура 3-20 Изменение на токовете на двуфазно к.с. в минимален и максимален режим по електропровод с проводници АС-95



Фигура 3-21 Изменение на токовете на трифазно к.с. в минимален и максимален режим по електропровод с проводници АС-95



Фигура 3-24 Изменение на токовете на двуфазно к.с. в минимален и максимален режим по електропровод с кабел САХЕКТ-185



Фигура 3-25 Изменение на токовете на трифазно к.с. в минимален и максимален режим по електропровод с кабел САХЕКТ-185

Изводи

1. Направени са моделни изследвания за ЕМ средно напрежение относно изменението на режимните параметри при земни съединения в зависимост от третирането на звездния център.

- За електрически мрежи с изолирана неутрала;

За изследваните електрически мрежи с изолирана неутрала пренапреженията в здравите фази в преходен режим се изменят от 1,9 р.и. до 2,04 р.и. Кратността на пренапрежението в неутралата в преходен режим достига максимални стойности от 1,2 р.и. до 1,3 р.и. Напрежението в неутралата при въведената несиметрия от 2 % до 12 % превишава допустимата стойност на напрежението на несиметрия е 90,93 V. В преходния режим максималната моментна стойност на тока на з.с. превишава установената моментна стойност на тока на з.с. от 5,2 до 7,9 пъти.

- За електрически мрежи с компенсирана неутрала. При метално з.с. в изследваните компенсирани електрически мрежи кратността на пренапреженията на здравите фази в преходния процес се изменя от 2 р.и. до 2,2 р.и. Компенсацията на електрическата мрежа – точна, под и надкомпенсация до 20 % практически не влияе на кратността на пренапреженията. Напрежението на звездния център в нормален режим съществено се изменя при въведената надлъжна несиметрия – прекъсване на фазов проводник с дължина от 2 %, 4 %, 8 % и 12 % от сумарната дължина на мрежата. При прекъсване на фазов проводник с дължина 2%L_Σ нормативното изискване за напрежението спрямо земя на звездния център за продължително време не се изпълнява при точна компенсация и подкомпенсация 5 %. При прекъсване на 4 % изискването се изпълнява само за под и надкомпенсация 15 % и 20 %. При прекъсване на фазов проводник с дължина 8 % и 12 % от общата дължина на мрежата изискването за напрежението спрямо земя на звездния център за продължително време не се изпълнява. В тези случаи не се изпълнява и изискването стойностите на напрежението да не превишават допустимите за един час с изключение на 20 % подкомпенсация и 10 %, 15 % и 20 % надкомпенсация при прекъсване на електропровод с дължина 8%L_Σ. А при прекъсване на електропровод с дължина 12%L_Σ изискването е изпълнено само за режим с надкомпенсация 15 % и 20 %. Получените резултати относно кратността на тока на з.с. и продължителността на преходния процес могат да бъдат използвани при определяне настройките на земните защиты. Напрежението на звездния център в нормален режим съществено зависи от степента на компенсация и наличието на несиметрия. Надлъжна несиметрия разгледана с прекъсване на фазов проводник трябва да се отчита при експлоатацията на електрическата мрежа поради високите стойности на установените напрежения в звездния център, превишаващи нормативните изисквания.

- За електрически мрежи с комбинирано заземена неутрала през дъгогасителен реактор и изключване на активно съпротивление кратността на пренапреженията на неповредените фази намалява, като се изменя от 1,97 р.и. до 2,17 р.и. При режим на заземяване с реактор и включване на активно съпротивление, кратността на пренапреженията на здравите фази се изменя от 2,2 р.и. до 2,4 р.и. намалява и кратността на пренапреженията в звездния център. Режимът на работа на звездния център с първоначално включени активно съпротивление и дъгогасителен реактор е по-благоприятен за работата на съоръженията относно кратността на пренапреженията на неповредените фази в сравнение с режимът при комбинирано заземяване на звездния център с първоначално включен само дъгогасителен реактор. При режим на работа с първоначално включени активно съпротивление и дъгогасителен реактор стойностите на кратността на пренапреженията в звездния център са по-ниски в сравнение с

режимът при комбинирано заземяване на звездния център с първоначално включен само дъгогасителен реактор. При земни съединения през преходно съпротивление кратностите на пренапреженията в неповредените фази и в звездния център намаляват.

- За електрически мрежи със заземена неутрала през активно съпротивление. Кратностите на пренапреженията в мрежи със заземен през активно съпротивление звезден център се изменят от 1,80 р.и. до 1,70 р.и при метално к.с. в началото на въздушен електропровод. С увеличаване на активното съпротивление в неутралата при метално к.с. в началото на въздушен електропровод установените стойности на тока на з.с. намаляват, докато тока на з.с. в преходен режим нараства. Стойността на активното съпротивление в неутралата оказва влияние както на големината на тока на з.с., така и на кратността на пренапреженията. При избор на стойност на активното съпротивление е необходимо да се отчетат тези фактори. Земните защиты, които заработват с установената стойност на тока на повредата ще имат по-голям коефициент на чувствителност при по големи стойности на тока на з.с. Избора на заземяването на неутралата през активно съпротивление оказва влияние, както на големината на тока на з.с., така и на кратността на пренапреженията.

2. Направени са моделни изследвания за ЕМ средно напрежение относно изменението на режимните параметри при междуфазни повреди в електрически мрежи средно напрежение.

- За електрическа мрежа 20 kV, изградена от въздушни и кабелни електропроводи. Въздушните електропроводи са с използваните у нас проводници АС-50, АС-70 и АС-95 и сумарни дължини до 40 km. За кабелните електропроводи са изследвани САХЕкТ-120 и САХЕкТ-185 с дължини до 10 km, които съществуват в нашата ЕЕС;

- Направени са изследвания относно изменението на токовете при метално трифазно и двуфазно к.с. в зависимост от дължината и типа на електропровода. За изследваните мрежи зоната на ТО в минимален режим за електропровод изграден от проводник АС-50, АС-70, АС-95 и дължина 40 km при коефициент на сигурност изменящ се от 1,1 до 1,4 и силов трансформатор с номинална мощност 25 MVA зоната на защитавания участък се изменя от 58 % до 75 %. За максимален режим защитавания участък е от 68 % до 86 %. За електропроводи изградени от кабели САХЕкТ-120 дължината на защитавания участък в минимален режим в зависимост от коефициента на сигурност се изменя от 28 % до 60 %, а в максимален режим от 39 % до 65 %. При електропроводи изградени от кабели САХЕкТ-185 дължината на защитавания участък в минимален режим в зависимост от коефициента на сигурност е съответно от 39 % до 65 %, а в максимален режим от 58 % до 88 %.

ГЛАВА 4. Извеждане на изчислителни зависимости относно ограничителните условия осигуряващи селективни и чувствителни РЗ в електрически мрежи средно напрежение. Методика и алгоритъм на програма за изчисляване настройката на релейни защиты в електрически мрежи средно напрежение

В настоящата глава са решени пета и шеста от поставените задачи, дефинирани в края на първа глава. Изведени са изчислителни зависимости относно ограничителните условия осигуряващи селективни и чувствителни РЗ в електрически мрежи средно напрежение. Представена е методика за изчисляване настройката на релейните защиты в електрически мрежи средно напрежение с отчитане на коефициента на запас по чувствителност, при който се осигурява чувствителността на защитите приложими за нуждите на Електроразпределителните дружества в Р. България.

Ограничителни условия при настройка на релейните защиты осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност

В зависимост от вида на електрическата мрежа, както и от нейното непрестанно развитие се изграждат различни РЗ. Интерес представляват ограничителните условия, при които РЗ ще изпълняват изискванията за селективност и чувствителност.

Изчислителни зависимости относно ограничителните условия при настройка на земните защиты осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност.

Изчислителни зависимости относно коефициента на запас по чувствителност при земни съединения в електрически мрежи.

От (4-4) за запаса по чувствителност на защитата се получава:

$$(4-5) \quad K_{зан} = \frac{I_{з.с.}}{K \cdot I_W} \geq 1$$

От (4-5) можем да изведем максималните стойности за К при $K_{уд}=5$ и $K_C=1,2$. Стойностите за К и $I_{C_{собр}}$ за най-често използваните проводници и кабели са показани стойностите в Таблица 4-1.

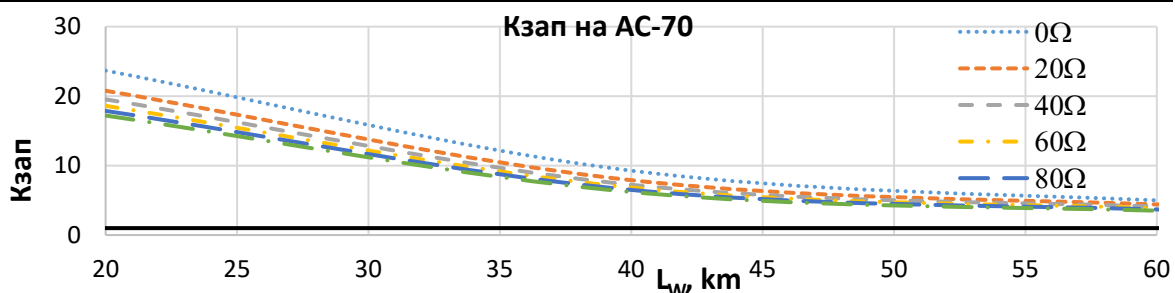
Таблица 4-1 Стойности за C_0 , $I_{C_{собр}}$ и К за най-често срещаните проводници на въздушни и кабелни мрежи СрН

	AC-50	AC-70	AC-95	САХЕКТ-120	САХЕКТ-185	Усреднени стойности от	
						ВЕП	КЕП
$C_0, \mu F$	0,0047	0,00474	0,0048	0,23	0,27	0,053	0,185
$I_{C_{собр}}$	0,054	0,054	0,055	2,627	3,084	0,061	2,12
К	0,483	0,487	0,493	23,642	27,753	0,545	19,04

В Таблица 4-2 и Фигура 4-1 е показано изменението на $K_{зан}$ за проводник AC-70, в зависимост от дължината на електропроводите захранвани от силов трансформатор с номинална мощност 25 MVA и отчитане на преходното съпротивление. Разгледани са електропроводи със сумарна дължина до 60 km.

Таблица 4-2 $K_{зан}$ за проводник AC-70 при изменение на преходното съпротивление и дължина на електропроводите захранвани от силов трансформатор с мощност 25 MVA.

$R_{пр}, \Omega$ L_W, km	0	20	40	60	80	100
20	23,67	20,77	19,53	18,60	17,87	17,20
40	9,27	7,90	7,24	6,83	6,50	6,20
60	5,00	4,41	4,11	3,89	3,69	3,51



Фигура 4-1 $K_{зан}$ за проводник AC-70 в зависимост от преходното съпротивление и дължина на електропроводите захранвани от силов трансформатор с мощност 25 MVA.

Ограничителни условия осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност на релейните защиты при земни съединения в електрически мрежи.

У нас електрически мрежи средно напрежение работещи с изолирана неутрала се срещат все по-рядко, обусловено от изискването тока на з.с. да е по-малък от 10 А. Втора причина за това са трудностите за осигуряване на селективното им действие. При тези мрежи, земните съединения се сигнализират от земната контрола и се локализируют ръчно.

Полагайки с $U_\phi = \frac{21}{\sqrt{3}} kV$ в (4-6) $I_{C_{собр}} = 3 \cdot \omega \cdot U_\phi \cdot C_0 A/km$ от (4-7) се получава:

$$(4-8) \quad I_{зз} \leq \frac{I_{зс}}{1,5} = \frac{10}{1,5} \Rightarrow I_{зз} \leq 6,7 A$$

Ограничителното условие относно стойността на $I_{зз}$, при които защитата ще бъде чувствителна. Приемайки $I_{C_{собр}} = 0,0545 A/km$ и замествайки (4-8) в (4-6) и изразявайки дължината на извода:

$$(4-9) \quad k_C \cdot k_{уд} \cdot I_{C_{собр}} \cdot l_W \leq 6,7 A$$

От (4-9) можем да изведем ограничителното условие относно дължината на въздушен извод за да се изпълни условието за чувствителност на токовата земна защита в електрически мрежи средно напрежение с изолирана неутрала.

$$(4-10) \quad l_w \leq \frac{6,7}{k_c \cdot k_{y\phi} \cdot I_{C_{cob}}}$$

$$l_w \leq \frac{6,7}{k_c \cdot k_{y\phi} \cdot 0,0545}$$

В Таблица 4-5 са показани максималните дължини на въздушен извод, при която се изпълнява изискването за чувствителност на токовата земна защита, в зависимост от стойността на използваните коефициенти за сигурност и ударен коефициент.

От това, че в нормативните наредби имаме ограничително условие $I_{3c} \leq 10A$, може да изведем и сумарната дължина на въздушната мрежа при, която тока на з.с. ще изпълнява условието при $I_{C_{cob}} = 0,0545 \frac{A}{km}$:

$$(4-11) \quad I_C = 3 \cdot \omega \cdot U_\phi \cdot C_0 \cdot l_\Sigma \Rightarrow 10 \leq I_{C_{cob}} \cdot l_\Sigma$$

$$l_\Sigma = \frac{10}{0,0545} = 183,5 \text{ km}$$

Таблица 4-5 Максимални дължини на въздушен извод, изпълняващи изискването за чувствителност на токовата земна защита, в зависимост от стойността на използваните коефициенти за сигурност и ударен коефициент

K_c=1,1				
K_{уд}	2	3	4	5
l_w, km	55,9	37,3	27,9	22,4
K_c=1,2				
l_w, km	51,2	34,1	25,6	20,5

Изчислителни зависимости относно ограничителните условия при настройка на релейните защиты при междуфазни повреди.

В електрически мрежи 20 kV най-често изгражданата защита от междуфазни к.с. е максимално токова защита, селективна и неселективна токова отсечка.

Изчислителни зависимости относно ограничителните условия при настройка на МТЗ.

Изчислителни зависимости относно коефициента на запас по чувствителност при настройка на максималнотокова защита.

Максималния работен ток се определя значително сложно, той зависи от моментната топология на ЕМ, товара на потребителите, големи единични двигателни мощности и др. Това налага да се търси друг подход за изчисляване настройката на МТЗ.

Препоръчва се настройката на МТЗ по ток да е спрямо най-малкия от допустимите токове на съоръженията, монтирани в изводните килии или на проводниците на въздушната линия и жилата на силовия кабел или по номинален първичен ток на токовите измервателни трансформатори.

При изчисляване настройката на МТЗ спрямо максималния работен ток по (4-12) и след заместване във (1-10) се получава:

$$(4-15) \quad \frac{I_{k_{cmin,кр}}^{(2)}}{I_{раб\max}} \geq \frac{K_c \cdot K_{cn}}{K_{ep}} \cdot 1,5$$

$$(4-16) \quad K_{MTЗ} = \frac{K_c \cdot K_{cn}}{K_{ep}} \cdot 1,5$$

Ако в (4-15) се замести (4-16) може да се изведе условието за запас по чувствителност на максималнотокова защита:

$$(4-17) \quad K_{\text{занМТЗ}} = \frac{I_{\text{кс min, кр}}^{(2)}}{K_{\text{МТЗ}} \cdot I_{\text{раб max}}} \geq 1$$

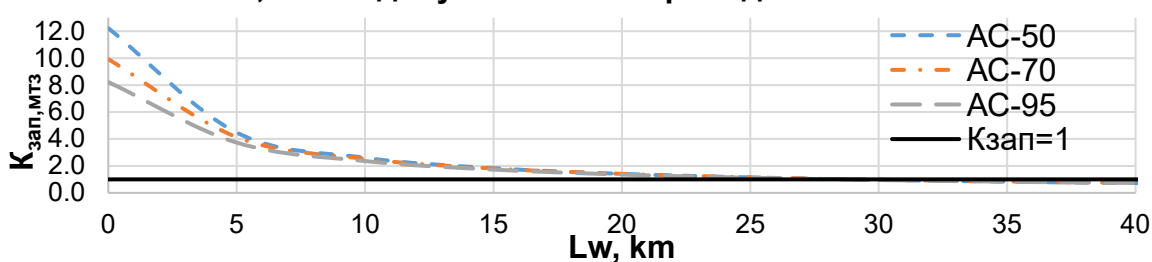
$$I_{\text{min чувст}} = K_{\text{МТЗ}} \cdot I_{\text{раб max}}$$

$$(4-18) \quad K_{\text{занМТЗ}} = \frac{I_{\text{кс min, кр}}^{(2)}}{I_{\text{min чувст}}} \geq 1$$

С изследване на $K_{\text{занМТЗ}}$ може да се направи оценка на ограничителните условия, при които се осигурява необходимата чувствителност на защитата.

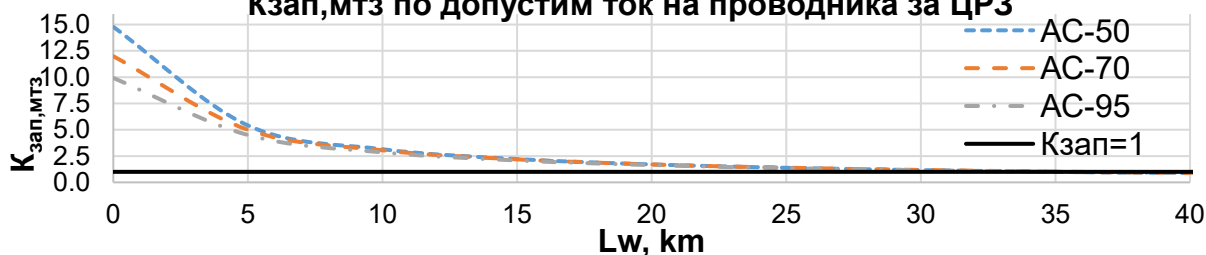
Получените резултати за въведения коефициент $K_{\text{занМТЗ}}$ на ВЕП и КЕП при изчисляване настройката по ток с допустимия ток на проводниците за ЕМРЗ и ЦРЗ по дължина на електропроводите са представени на Фигура 4-2, Фигура 4-3, Фигура 4-4 и Фигура 4-5.

Кзап,мтз по допустим ток на проводника за ЕМРЗ



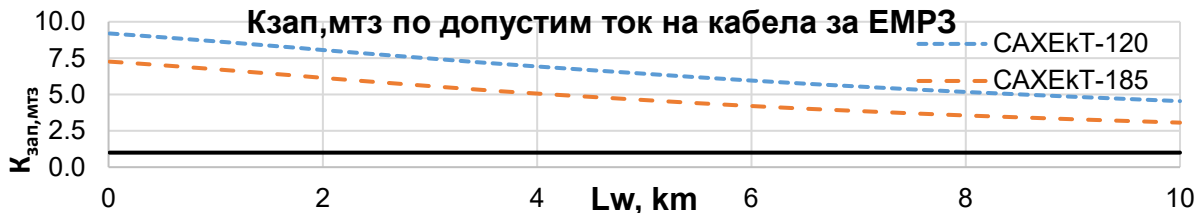
Фигура 4-2 Изменение на $K_{\text{занМТЗ}}$ за МТЗ с ЕМРЗ на ВЕП по допустим ток на проводниците

Кзап,мтз по допустим ток на проводника за ЦРЗ



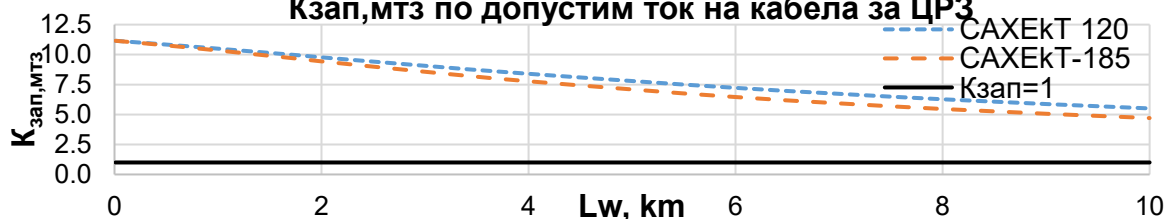
Фигура 4-3 Изменение на $K_{\text{занМТЗ}}$ за МТЗ с ЦРЗ на ВЕП по допустим ток на проводниците

Кзап,мтз по допустим ток на кабела за ЕМРЗ



Фигура 4-4 Изменение на $K_{\text{занМТЗ}}$ за МТЗ с ЕМРЗ на КЕП по допустим ток на проводниците

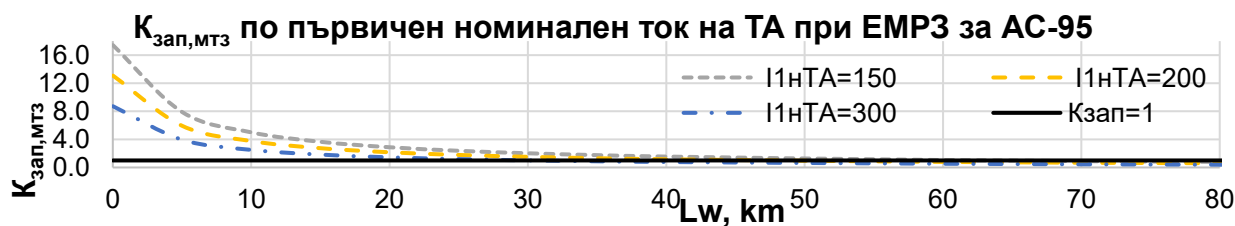
Кзап,мтз по допустим ток на кабела за ЦРЗ



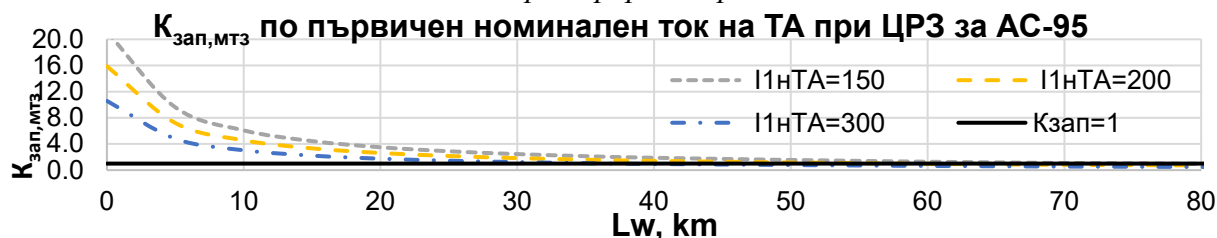
Фигура 4-5 Изменение на $K_{\text{занМТЗ}}$ за МТЗ с ЦРЗ на КЕП по допустим ток на проводниците

На Фигура 4-6, Фигура 4-7, Фигура 4-8 и Фигура 4-9 са представени получените резултати за $K_{\text{занМТЗ}}$ при използване на номинален първичен ток на измервателния токов трансформатор за настройката по ток на ЕМРЗ и ЦРЗ за ВЕЛ изградени с проводници АС- 95 и КЕП с САХЕКТ-185. Резултатите са получени при захранващ силов трансформатор с мощност 25 MVA с данни представени в Приложение 3.

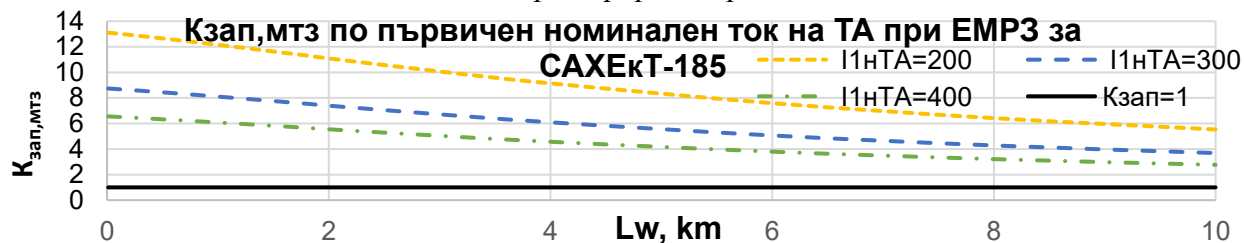
Изследванията са направени при електропроводи с по-голяма сумарна дължина, с цел да се достигне до $K_{зап,МТЗ} \leq 1$.



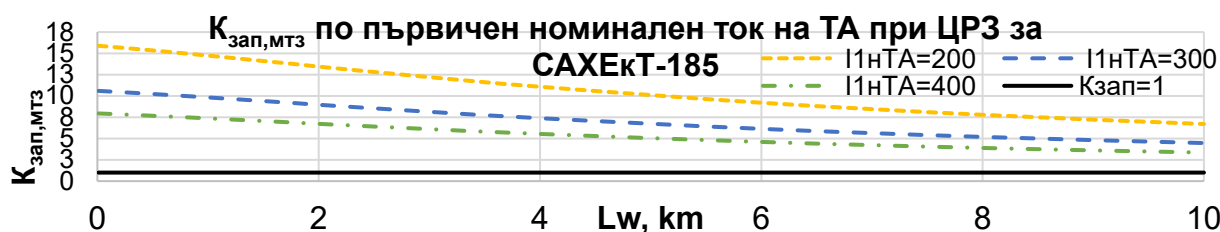
Фигура 4-6 $K_{зап,МТЗ}$ на EMP3 и AC-95 при номинален първичен ток на измервателния токов трансформатор



Фигура 4-7 $K_{зап,МТЗ}$ на ЦРЗ и AC-95 при номинален първичен ток на измервателния токов трансформатор



Фигура 4-8 $K_{зап,МТЗ}$ на EMP3 и САХЕКТ-185 при номинален първичен ток на измервателния токов трансформатор



Фигура 4-9 $K_{зап,МТЗ}$ на ЦРЗ и САХЕКТ-185 при номинален първичен ток на измервателния токов трансформатор

Ограничителни условия осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност на релейните защиты при настройка на МТЗ спрямо максималния работен ток на извод.

Интерес представлява да се изведат стойности за максималния работен ток на изводите, при които МТЗ ще изпълнява изискванията за чувствителност. За да се изведат тези стойности е необходимо да се знае големината на тока на двуфазно к.с. в края на електропровода.

Когато настройката по ток се определя от максималния работен ток, то ограничителното условие за големината му ще е:

$$(4-19) \quad I_{раб\ max} \leq \frac{I_{кс\ min,кр}^{(2)}}{K_{МТЗ}}$$

$$K_{МТЗ} = \frac{K_c \cdot K_{сн}}{K_{вр}} \cdot 1,5$$

Ограничителни условия осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност на релейните защиты при настройка на МТЗ спрямо допустим ток на проводниците и жилата на кабелите на МТЗ.

При настройка на МТЗ по ток изчислен спрямо допустимия ток на проводниците и използване стойностите на $K_{занМТЗ} = 2,1176$ за $I_{минчувст}$ се получават стойности, които са представени в Таблица 4-8.

Граничното условие за минималната стойност на тока при двуфазно к.с. в края на извода, при която МТЗ ще изпълнява изискванията за селективност и чувствителност е:

$$(4-20) \quad I_{кc, min, кр}^{(2)} \geq K_{МТЗ} \cdot I_{дон}$$

В Таблица 4-10 са представени обобщените резултати за максималната дължина на електропроводите при използване на допустимия ток на проводниците за настройка на МТЗ с осигурен запас по чувствителност при силови трансформатори с данни представени в Приложение 3.

Таблица 4-8 Стойности на $I_{минчувст}$ по допустим ток на проводник

Проводник	$I_{дон}, A$	$I_{мин чувств}, A$	
		ЕМРЗ	ЦРЗ
АС-50	215	455	373
АС-70	265	561	460
АС-95	320	678	556
САХЕКТ-120	285	604	495
САХЕКТ-185	361	764	627

Таблица 4-10 Максимална дължина на електропроводите при използване на допустимия ток на проводниците за настройка на МТЗ с осигурен запас по чувствителност

$I_{дон}, A$		СТ 25 MVA		СТ 40 MVA	
		ЕМРЗ	ЦРЗ	ЕМРЗ	ЦРЗ
АС-50	215	до 29,2 km	до 35,2 km	до 28 km	до 34 km
АС-70	265	до 28,7 km	до 35,7 km	до 28 km	до 34 km
АС-95	320	до 28,5 km	до 35,4 km	до 28 km	до 34 km

Ограничителни условия осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност на релейните защиты при настройка на МТЗ спрямо номиналния първичен ток на токовете измервателни трансформатори.

В Таблица 4-12 са представени резултатите за изчисленият първичен ток на заработване на максималнотокова защита и минималния ток при междуфазна повреда в края на извода при използване на номинален първичен ток на токовете измервателни трансформатори, за да се изпълни изискването за чувствителност при използване на ЕМРЗ и ЦРЗ за битови потребители.

Таблица 4-12 Първичен ток на заработване на МТЗ и минимален ток при междуфазна повреда в края на извода по номинален първичен ток на измервателните трансформатори

$I_{н,ТА}, A$	ЕМРЗ		ЦРЗ	
	I_{33}, A	$I_{кc, min}^{(2)}, A$	I_{33}, A	$I_{кc, min}^{(2)}, A$
100	141	212	116	174
150	212	318	174	261
200	282	424	232	347
300	424	635	347	521
400	565	847	463	695

В Таблица 4-14 са представени обобщените резултати: максималната дължина на електропроводите защитавани с ЦРЗ при захранващ силов трансформатор с мощност 25 MVA и 40 MVA и данни представени в Приложение 3, при използване на номинален първичен ток на измервателните токови трансформатори за настройка на МТЗ с осигурен запас по чувствителност.

Таблица 4-14 Максимална дължина на електропроводите защитавани с ЦРЗ с осигурен запас по чувствителност по номинален ток на токовете трансформатори

I _{н,ТА} , А	СТ 25 MVA			СТ 40 MVA		
	L _{max} , km			L _{max} , km		
	AC-50	AC-70	AC-95	AC-50	AC-70	AC-95
100	75 km	>80 km	-	76 km	>80 km	-
150	до 51 km	до 64 km	77 km	до 52 km	до 62 km	76 km
200	до 37,5 km	до 50 km	до 58 km	до 38 km	до 47 km	до 56,5 km
300	-	до 31,5 km	до 37,5 km	-	до 31 km	до 36,5 km
400	-	-	до 27,5 km	-	-	до 27 km

Изчислителни зависимости относно ограничителните условия при настройка на селективна токова отсечка.

Изчислителни зависимости относно коефициента на запас по чувствителност при настройка на селективната токова отсечка.

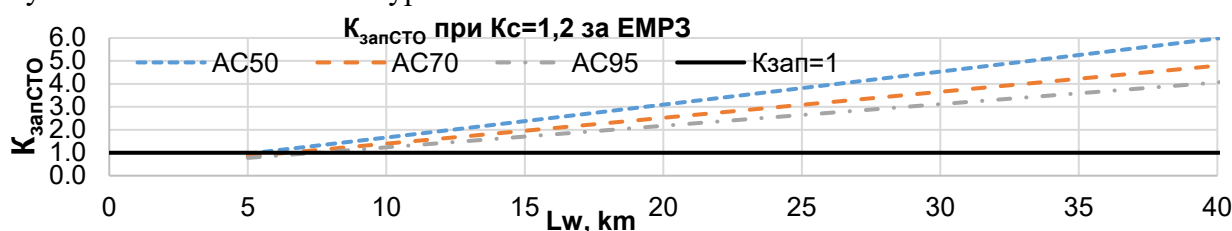
Настройката по ток на СТО за изводите се изчислява спрямо тока на трифазно к.с. в края на извода или на шините на възловата станция в максимален режим.

След заместване на $I_{зз}$ от (4-21) в (1-11) се получава

$$(4-22) \quad \frac{I_{к\text{с min нач}}^{(2)}}{K_c \cdot I_{к\text{с max кр}}^{(3)}} \geq 2$$

$$K_{\text{зап СТО}} = \frac{I_{к\text{с min нач}}^{(2)}}{2 \cdot K_c \cdot I_{к\text{с max кр}}^{(3)}} \geq 1$$

Изследвания за приложението на коефициента на запас по чувствителност на СТО $K_{\text{зап СТО}}$ са направени за електропроводи от електрическа мрежа 20 kV, захранени със силов трансформатор с мощност 25 MVA и данни представени в Приложение 3. Част от получените резултати са показани на Фигура 4-10.



Фигура 4-10 $K_{\text{зап СТО}}$ за EMP3 на въздушен електропровод при $K_c=1,2$

Ограничителни условия осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност на релейните защиты при настройка на СТО спрямо тока на трифазно к.с. в края на извода в максимален режим.

Ограничителното условие ще е за големината на тока на трифазно к.с. в края на извода в максимален режим, при който се гарантира чувствителността на защитата изчислен по:

$$(4-23) \quad I_{к\text{с max кр}}^{(3)} \leq \frac{I_{к\text{с min нач}}^{(2)}}{2 \cdot K_c}$$

В Таблица 4-15 са обобщени ограничителните условия за големина на тока на трифазно к.с. в края на извода в максимален режим за силовия трансформатор с данни представени в Приложение 3.

Таблица 4-15 Минимална стойност на тока на трифазно к.с. в края на извода в максимален режим с гарантирана чувствителност

		EMP3		ЦРЗ K _c =1,1
		K _c =1,2	K _c =1,4	
25 MVA	$I_{к\text{с max кр}}^{(3)}, A \leq$	2300	1972	2510
40MVA	$I_{к\text{с max кр}}^{(3)}, A \leq$	3800	3258	4146

Изчислителни зависимости относно ограничителните условия при настройка на неселективна токова отсечка.

НСТО се отстроява от максималния ток на к.с. на шини ниско напрежение на електрически най-близкия трансформатор с най-голяма мощност в извода. Токът на заработване на защитата се определя по:

$$(4-24) \quad I_{ззНСТО} = K_c \cdot I_{кc \max НН}^{(3)}$$

където

$K_c = 1, 2$ - коефициент на сигурност за ЕМРЗ, за ЦРЗ $K_c = 1, 1$;

$I_{кc \max НН}^{(3)}$ е токът на страна СрН при трифазно к.с. на шини НН на посочения трансформатор при максимален режим.

НСТО се проверява за сумата от ударните намагнитващи токове на всички мрежови трансформатори 20/0,4 кV, захранвани от съответния извод. Токът на заработване трябва да бъде по-голям от петкратния сумарен номинален ток на всички трансформатори в трансформаторните постове и/или заводски подстанции, захранвани от съответния извод 20 кV.

Изчислителни зависимости относно коефициента на запас по чувствителност при настройка на неселективната токова отсечка.

След заместване на $I_{зз}$ от (4-24) в (1-12) за $K_{ззНСТО}$ се получава:

$$(4-26) \quad K_{ззНСТО} = \frac{I_{кc \min нащ}^{(2)}}{2 \cdot K_c \cdot I_{кc \max НН}^{(3)}} \geq 1$$

Ограничителни условия осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност на релейните защиты при настройка на НСТО спрямо сумата от намагнитващите токове.

От (1-12) и (4-26) за ограничителното условие на НСТО се получава:

$$(4-27) \quad \Sigma I_n \leq \frac{I_{кc \min нащ}^{(2)}}{5 \cdot 2 \cdot K_c}$$

Методика и алгоритъм на програма за изчисляване настройката на релейни защиты в електрически мрежи средно напрежение с отчитане на ограничителните условия, при които се осигурява селективността и чувствителността на защитите

Земна защита в електрически мрежи средно напрежение със заземен звезден център през активно съпротивление и с комбинирано заземяване.

Изчисляване настройка по ток на първо стъпало

За изводи средно напрежение

1. Определяне токът на заработване на ЗЗ при изводи средно напрежение се определя от собствения капацитивен ток на защитавания електропровод, като се отстроява от максималната амплитуда на капацитивния ток в преходния режим при з.с. и се определя по:

$$I_{зз(Icm)} = K_c \cdot K_{y\delta} \cdot I_{c,сoб}, \text{ A}.$$

2. Определяне на вторичния ток на заработване по: $I_{зп(Icm)} = \frac{I_{зз(Icm)}}{K_{TA}}, \text{ A}.$

3. Определяне времето на заработване на първо стъпало при настройка по ток с използване на ударен коефициент $K_{y\delta} = 4 \div 5$ се изчислява по $t_{зз(Icm)} = t_{cоб(Icm)} \approx 0 \text{ s}$. Времето на заработване на първо стъпало при настройка по ток с използване на ударен коефициент $K_{y\delta} = 2 \div 2,5$ се изчислява по $t_{зз(Icm)} = 0,15 \text{ s}$.

4. Чувствителността на защитата се проверява с коефициент на чувствителност изчислен по $K_{ч(Icm)} = \frac{I_{зс \min, кр}}{I_{зз(Icm)}} \geq 1,5$.

При настройка на първо стъпало на защитата с $K_{y\delta} = 4 \div 5$ и изчислен коефициент на чувствителност по-малък от 1,5 (което може да се получи при електропроводи с голям собствен капацитивен ток) се въвежда закъснение $t_{зз(Icm)} = 0,15 \text{ s}$ и токът на заработване на

първо стъпало се изчислява с $K_{y\partial} = 2 \div 2,5$. Първо стъпало на земната защита действа непосредно.

За изводи захранващи възлови станции

1. При изводи захранващи възлови станции първичния ток на заработване се изчислява чрез сумарния капацитивен ток на изводите захранвани от възловата станция и собствения капацитивен ток на захранващия извод $I_{33(Icm)} = K_c \cdot K_{y\partial} \cdot I_{\Sigma c}$, А.

2. Вторичния ток на заработване се изчислява по $I_{3p(Icm)} = \frac{I_{33(Icm)}}{K_{TA}}$, А.

3. За повишаване селективността на защитата времето на заработване на първо стъпало на ЗЗ се съгласува с времето на заработване на земните защиты на изходящите изводи средно напрежение от възловата станция по $t_{33(Icm)} = t_{33(изв)} + \Delta t$, s. При използване на електромеханични защиты времето на закъснението се настройва в интервала $\Delta t = 0,4 \div 0,5$ s, а при използване на цифрови релейни защиты $\Delta t = 0,3$ s.

4. Чувствителността на защитата се проверява с коефициент на чувствителност изчислен по $K_{\chi(Icm)} = \frac{I_{3c \min, кр}}{I_{33(Icm)}} \geq 1,5$.

Настройка на второ стъпало

Настройката по ток на II стъпало на ЗЗ се определя с цел осигуряване на достатъчна чувствителност при з.с. през преходно съпротивление 100Ω в края на извода с най-голямо съпротивление.

За изводи средно напрежение

1. Токът на заработване при изводи захранващи трансформаторни постове се изчислява по $I_{33(IIcm)} = \frac{I_{3c100\Omega}}{K_{\chi}}$, А.

2. Вторичния ток на заработване на ЗЗ се изчислява по $I_{3p(IIcm)} = \frac{I_{33(IIcm)}}{K_{TA}}$, А.

3. Време на заработване на защитата се приема равно на собственото закъснение на защитата или приблизително равно на $t_{33(IIcm)} = t_{cob(IIcm)} \approx 0$ s.

4. За проверка на чувствителността на защитата се използва коефициент на чувствителност изчислен по $K_{\chi(IIcm)} = \frac{I_{3c \min, кр}}{I_{33(IIcm)}} \geq 2,5$.

За изводи захранващи възлови станции

1. Първичен ток на заработване на изводи захранващи възлови станции се съгласуват по ток на заработване на ЗЗ на изводите средно напрежение изходящи от възловата станция с коефициент на сигурност равен на 1,1 и се определя по $I_{33(IIcm)} = K_c \cdot I_{33,извод}$, А.

2. Вторичния ток на заработване на защитата се изчислява по $I_{3p(IIcm)} = \frac{I_{33(IIcm)}}{K_{TA}}$, А.

3. Времето на заработване на второ стъпало се съгласува с времето на заработване на земните защиты на изходящите изводи средно напрежение от възловата станция по $t_{33(IIcm)} = t_{33(изв)} + \Delta t$, s, където $\Delta t = 0,3$ s.

4. Чувствителността на защитата се проверява с коефициент на чувствителност изчислен по $K_{\chi(IIcm)} = \frac{I_{3c \min, кр}}{I_{33(IIcm)}} \geq 2,5$.

Настройка на трето стъпало

При използване на трисъпални ЗЗ трето стъпало на защитата действа на сигнал. Изключването на извода се извършва ръчно от оперативния персонал. В някои случаи се настройва с ток на заработване 10 А и време закъснение 3,6 s.

Изчисляване на запаса по чувствителност на земни защити

1. Коефициента на запас по чувствителност на първо стъпало се определя по

$$K_{зап33Icm} = \frac{I_{зс\min,кр}}{K_{з3Icm} \cdot L_{изв}} \geq 1.$$

2. Коефициента Запасът по чувствителност на второ стъпало на ЗЗ се определя по

$$K_{зап33Icm} = \frac{I_{зс\метало}}{1,7 \cdot I_{зс100\Omega}} \geq 1.$$

Максималните дължини за ВЕП и КЕП, при които се изпълнява условието за чувствителност на ЗЗ при различни стойности за ударен коефициент и коефициент на сигурност изчислени по (4 9) с $I_{с,собр}$ по [66] са показани Таблица 4 20.

Таблица 4-20 Максимална дължина на ВЕП И КЕП, изпълняваща изискването за чувствителност на ЗЗ, в зависимост от стойността на използваните коефициенти за сигурност и ударен коефициент

		K_C=1,1				
	$I_{с,собр}, A$	K_{уд}	2	3	4	5
Въздушен електропровод	0,06	l_w, km	50,8	33,8	25,4	20,3
Кабелен електропровод	2,1		1,5	1,0	0,7	0,6
		K_C=1,2				
Въздушен електропровод	0,06	l_w, km	46,5	31,0	23,3	18,6
Кабелен електропровод	2,1		1,3	0,9	0,7	0,5

Максималнотокова защита в електрически мрежи средно напрежение

Методиката за настройка на максималнотокова защита в електрически мрежи средно напрежение разглежда определянето на ток на зареждане, време на зареждане и коефициент на чувствителност на защитата.

За изводи средно напрежение, захранващи трансформаторни постове/потребители с голяма мощност

1. Първичния ток на зареждане на МТЗ се изчислява спрямо най-малкия ток изчислен

$$\text{ток по } I_{зз} = \frac{K_c \cdot K_{cn} \cdot I_{раб\max}}{K_{вр}}, A, \quad I_{зз} = \frac{K_c \cdot K_{cn} \cdot I_{доп}}{K_{вр}}, A \quad \text{и} \quad I_{зз} = \frac{K_c \cdot K_{cn} \cdot I_{нТА}}{K_{вр}}, A$$

където

$I_{раб\max}$ А – максималния работен ток на товара в А;

$I_{доп}$ А – най-малкият допустим ток на съоръженията в А;

$I_{нТА}$ А – номиналният първичен ток на токовете измервателни трансформатори;

$K_C = 1,2$ – коефициент на сигурност за ЕМРЗ, $K_C = 1,1$ – за ЦРЗ;

$K_{вр} = 0,85$ – коефициентът на връщане за ЕМРЗ, $K_{вр} = 0,95$ – за ЦРЗ;

$K_{СП} = 1 \div 5$ – коефициент на самопускане на електрическите двигатели.

2. Вторичния ток на зареждане се изчислява по $I_{зрМТЗ} = \frac{K_{сх} \cdot I_{ззМТЗ}}{K_{ТА}}, A.$

3. Време на зареждане на защитата се изчислява със степен на селективност по $t_{ззМТЗ} = t_{ззМТЗизв} + \Delta t, s.$ Времето на зареждане на МТЗ на изводи захранващи трансформаторни постове е за ЕМРЗ: $t_{ззМТЗ} = 0,4 \div 0,5 s,$ за ЦРЗ: $t_{ззМТЗ} = 0,3 s.$

4. Чувствителността на МТЗ се проверява с коефициент на чувствителност и се изчислява

$$\text{по } K_{чМТЗ} = \frac{I_{кс\min,кр}^{(2)}}{I_{ззМТЗ}} \geq 1,5.$$

За изводи захранващи възлови станции

1. Токът на зареждане за изводи захранващи възлови станции първичния ток на зареждане на МТЗ се определя спрямо най-малкия допустим ток на съоръженията, монтирани в съответната килия, а също и на проводниците на въздушната линия и жилата на

силовия кабел по $I_{33} = \frac{K_c \cdot K_{cn} \cdot I_{доп}}{K_{ер}}$, А и $I_{33} = \frac{K_c \cdot K_{cn} \cdot I_{нТА}}{K_{ер}}$, А. Проверка се извършва на изчисления ток на заработване спрямо общия максималния работен ток на изводите захранвани от възловата станция изчислен по $I_{33} = \frac{K_c \cdot K_{cn} \cdot I_{\Sigma раб max}}{K_{ер}}$, А.

2. Вторичния ток на заработване се изчислява по $I_{зрМТЗ} = \frac{K_{сх} \cdot I_{ззМТЗ}}{K_{ТА}}$, А.

3. Времето на заработване на защитата се определя по $t_{ззМТЗ} = t_{max МТЗизв} + \Delta t$, S, Δt – степен на селективност, $\Delta t = 0,3 \div 0,5$. За ЕМРЗ - $\Delta t = 0,5$, а за ЦРЗ - $\Delta t = 0,3$, $t_{max МТЗизв}$ – е най-голямото време на заработване на МТЗ на изводите средно напрежение, изходящи от възловата станция.

4. Чувствителността на защитата се проверява чрез коефициент на чувствителност изчислен по $K_{чМТЗ} = \frac{I_{кc min кр}^{(2)}}{I_{ззМТЗ}} \geq 1,5$.

Изчисляване на запаса по чувствителност на МТЗ ($K_{запМТЗ}$)

1. Коефициента на запас се получава по $K_{запМТЗ} = \frac{I_{кc min кр}^{(2)}}{K_{МТЗ} \cdot I_{мин}} \geq 1$

където

$$K_{МТЗ} = \frac{K_c \cdot K_{СП} \cdot K_{ч}}{K_{ВР}}, \quad I_{мин. чувствителност} = K_{МТЗ} \cdot I_{мин} \text{ А} \rightarrow K_{запМТЗ} = \frac{I_{кc min кр}^{(2)}}{I_{мин. чувствителност}} \geq 1$$

За изводи захранващи изводи с битови потребители стойностите на $I_{мин чувст}$ са представени в Таблица 4-21.

Таблица 4-21 Стойности на $I_{мин чувст}$ по допустим ток на проводниците и първичен ток на токовете измервателните трансформатори с осигурен запас по чувствителност за битови потребители

Проводник	$I_{доп}, А$	$I_{мин чувст} = K_{МТЗ} \cdot I_{доп}, А$		$I_{нТА}, А$	$I_{мин чувст} = K_{МТЗ} \cdot I_{нТА}, А$	
		ЕМРЗ	ЦРЗ		ЕМРЗ	ЦРЗ
				100	211,8	173,7
АС-50	215	455	373	150	317,6	260,6
АС-70	265	561	460	200	423,5	347,4
АС-95	320	678	556	250	529,4	434,3
САХЕКТ-120	285	604	495	300	635,3	521,1
САХЕКТ-185	361	764	627	400	847,0	694,8

Стойностите за минимален ток на междуфазно к.с. в края на извода и първичен ток на заработване изчислен при допустим ток на проводника и номинален първичен ток на измервателните токови трансформатори са представени в Таблица 4-22.

Таблица 4-22 Първичен ток на заработване на МТЗ и минимален ток при междуфазна повреда в края на извода по допустим ток на проводниците и номинален първичен ток на измервателните трансформатори

$I_{доп}, А$	ЕМРЗ		ЦРЗ		$I_{нТА}, А$	ЕМРЗ		ЦРЗ		
	$I_{зз}, А$	$I_{кc, min}^{(2)}, А$	$I_{зз}, А$	$I_{кc, min}^{(2)}, А$		$I_{зз}, А$	$I_{кc, min}^{(2)}, А$	$I_{зз}, А$	$I_{кc, min}^{(2)}, А$	
АС-50	215	303	454	249	374	100	141	212	116	174
АС-70	265	374	560	307	461	150	212	318	174	261
АС-95	320	451	675	371	557	200	282	424	232	347
САХЕКТ-120	285	402	601	330	496	300	424	635	347	521
САХЕКТ-185	361	510	762	418	628	400	565	847	463	695

Селективна токова отсечка на изводи средно напрежение

За изводи средно напрежение

1. Първичния ток на заработване на СТЗ се изчислява по $I_{33CTO} = K_c \cdot I_{kc \max \kappa p}^{(3)}$, А.

2. Вторичния ток на заработване се изчислява по $I_{3pCTO} = \frac{I_{33CTO}}{K_{TA}}$, А.

3. Времето на заработване на защитата е собственото време на защитата, приема се приблизително равно на $t_{33CTO} = 0$ s.

4. Чувствителността на защитата се проверява с коефициент на чувствителност с отчитане на минималната стойност на тока при двуфазно к.с. $I_{kc \min \text{нач}}^{(2)}$ на шини средно напрежение на съответната подстанция при минимален режим на захранване се изчислява по $K_{чCTO} = \frac{I_{kc \min \text{нач}}^{(2)}}{I_{33CTO}} \geq 2$. В случаите, когато коефициента на чувствителност на отговаря на

условието се построяват кривите на $I_{33CTO} = f(L_W)$, $I_{kc \max}^{(3)} = f(L_W)$ и $I_{kc \min}^{(2)} = f(L_W)$. Пресечната точка на кривите проектирана върху оста L_W показва зоната на токовата отсечка в максимален и минимален режим. СТО се приема за ефективна, ако $L_{зайц} \geq 15 \div 20\% \cdot L_W$, L_W - е дължината на извода.

За изводи захранващи възлови станции

1. При изводи захранващи възлови станции се прилага $I_{33CTO} = K_c \cdot I_{kc \max \kappa p}^{(3)}$, А, като се отчита на тока на трифазно к.с. $I_{kc \max \text{вс}}^{(3)}$ на шините на възловата станция. Ако не се осигурява необходимия коефициент на чувствителност при такава настройка по ток на извода се използва $I_{33CTO} = K_c \cdot I_{33HCTO}$, А.

2. Вторичния ток на заработване се изчислява по $I_{3pCTO} = \frac{I_{33CTO}}{K_{TA}}$, А.

3. Настройката за време на заработване на защитата се задава по $t_{33CTO} = t_{33 \max} + \Delta t$ или $t_{33CTO} = t_{собр} \approx 0$ s.

4. Чувствителността на защитата се проверява с коефициент на чувствителност изчислен по $K_{чCTO} = \frac{I_{kc \min \text{нач}}^{(2)}}{I_{33CTO}} \geq 2$.

Изчисляване на запаса по чувствителност на СТО - $K_{занCTO}$

1. Коефициента на запас по чувствителност на СТО се изчислява по $K_{занCTO} = \frac{I_{kc \min \text{нач}}^{(2)}}{2 \cdot K_c \cdot I_{kc \max \kappa p}^{(3)}} \geq 1$. Като се отчита тока на двуфазно к.с. $I_{kc \min \text{нач}}^{(2)}$ в началото на извода в минимален режим и тока на трифазно к.с. $I_{kc \max \kappa p}^{(3)}$ в края на извода в максимален режим.

В Таблица 4-23 са представени минималните стойности на тока на трифазно к.с. в края на извода в максимален режим за най-често използваните силови трансформатори с гарантирана чувствителност.

Таблица 4-23 Минимална стойност на тока на трифазно к.с. в края на извода в максимален режим с гарантирана чувствителност

		ЕМРЗ		ЦРЗ К _c =1,1
		К _c =1,2	К _c =1,4	
25 MVA	$I_{kc \max \kappa p}^{(3)}, A \leq$	2300	1972	2510
40MVA	$I_{kc \max \kappa p}^{(3)}, A \leq$	3800	3258	4146

Неселективна токова отсечка на изводи средно напрежение

1. Токът на заработване на НСТО се отстроява от максималния ток на к.с на шини ниско напрежение на електрически най-близкия силов трансформатор с най-голяма мощност, изчислява се по $I_{33HCTO} = K_c \cdot I_{kc \max \text{HH}}^{(3)}$. Извършва се проверка за отстрояване от ударните намагнитващи токове на всички мрежови трансформатори средно напрежение/0,4 kV, които

се запазват от съответния извод. Токът на заработване на НСТО трябва да е по-голям от $I_{ззНСТО} = K_c \cdot 5 \cdot \Sigma I_n$. При необходимост се прави проверка за отстройване на тока на заработване на НСТО от: тока на самопускане на двигателите или тока на включване на студен резерв.

2. Вторичния ток на заработване на НСТО се изчислява по $I_{зпНСТО} = \frac{I_{ззНСТО}}{K_{ТА}}$, А.

3. Времето на заработване на защитата е собственото ѝ време на закъснение и се приема равно на $t_{ззНСТО} = t_{cob} \approx 0$ s.

4. Проверката на чувствителността на защитата се извършва чрез коефициент на чувствителност по $K_{чНСТО} = \frac{I_{кc \min нач}^{(2)}}{I_{ззНСТО}} \geq 2$.

Изчисляване на запаса по чувствителност на НСТО

Коефициента на запас на НСТО се изчислява по $K_{занНСТО} = \frac{I_{кc \min нач}^{(2)}}{2 \cdot K_c \cdot I_{кc \max НН}^{(3)}} \geq 1$.

В Таблица 4-24 са представени стойностите на $K_{занНСТО}$ при захранващ силов трансформатор с мощност 25 MVA и различни мощности на захранваните трансформатори с данни представени в Приложение 3.

Таблица 4-24 $K_{занНСТО}$ при захранващ силов трансформатор с мощност 25 MVA

$S_{н}, \text{kVA}$		250	320	400	560	630	1000	1600
$K_{занНСТО}$	ЕМРЗ	13,38	10,46	8,37	5,98	5,31	5,02	3,14
	ЦРЗ	14,59	11,41	9,13	6,52	5,80	5,48	3,42

Стойностите за тока на заработване на НСТО при ЕМРЗ и ЦРЗ са представени в Таблица 4-25.

Таблица 4-25 Ток на заработване на НСТО при ЕМРЗ и ЦРЗ

$S_{н}, \text{kVA}$		250	320	400	560	630	1000	1600
$I_{кc \max НН}^{(3)}, \text{A}$		172	220	2775	385	433	458	733
$I_{ззНСТО}, \text{A}$	ЕМРЗ	206	264	330	462	520	550	880
	ЦРЗ	189	242	303	424	476	504	806

Алгоритъм на програма за изчисляване настройката на релейни защиты в електрически мрежи средно напрежение

От изводите и направените анализи на резултатите, при направените изследвания в трета глава и представената методика е създаден алгоритъм на програмен модул за настройка на релейните защиты в електрически мрежи средно напрежение отговаряйки на нормативните изисквания.

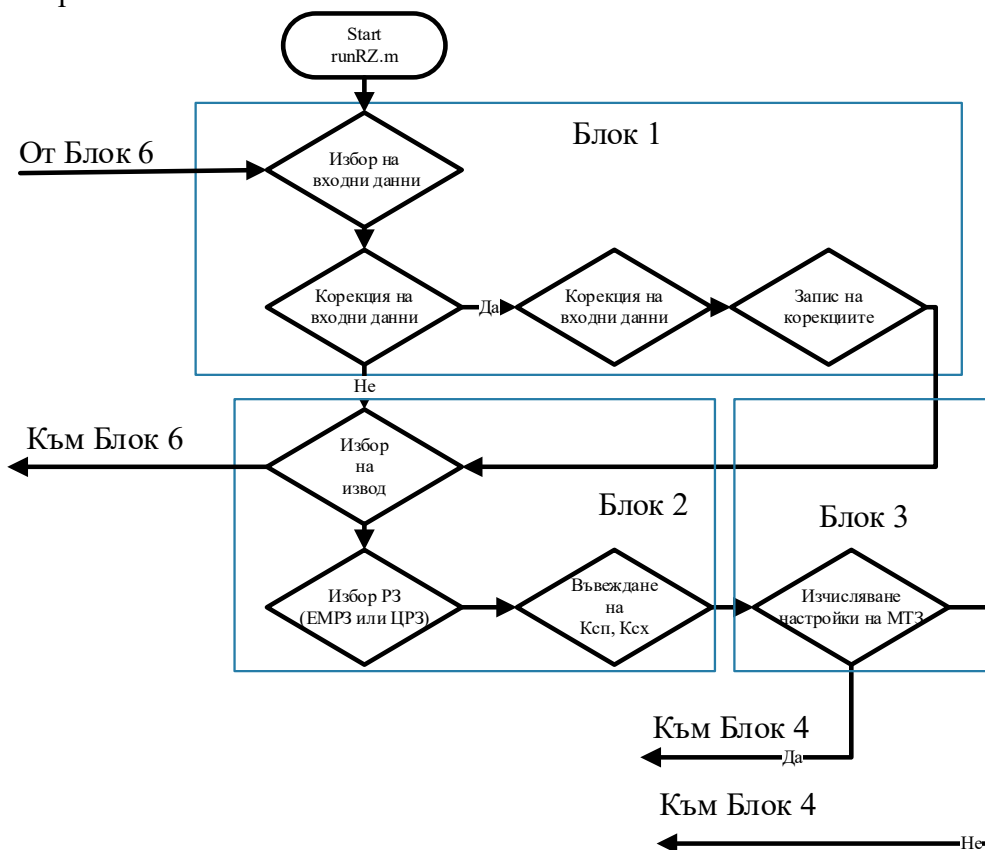
Разработения модул изчислява настройките на най-често прилаганите релейни защиты, разработен на базата на методиката описана в четвърта глава. Разработения модул е описан за електрическа мрежа със заземен през активно съпротивление звезден център.

На Фигура 4-16 и Фигура 4-17 в структурен вид е показана блок-схемата на алгоритъма на модула за изчисляване настройките на релейни защиты.

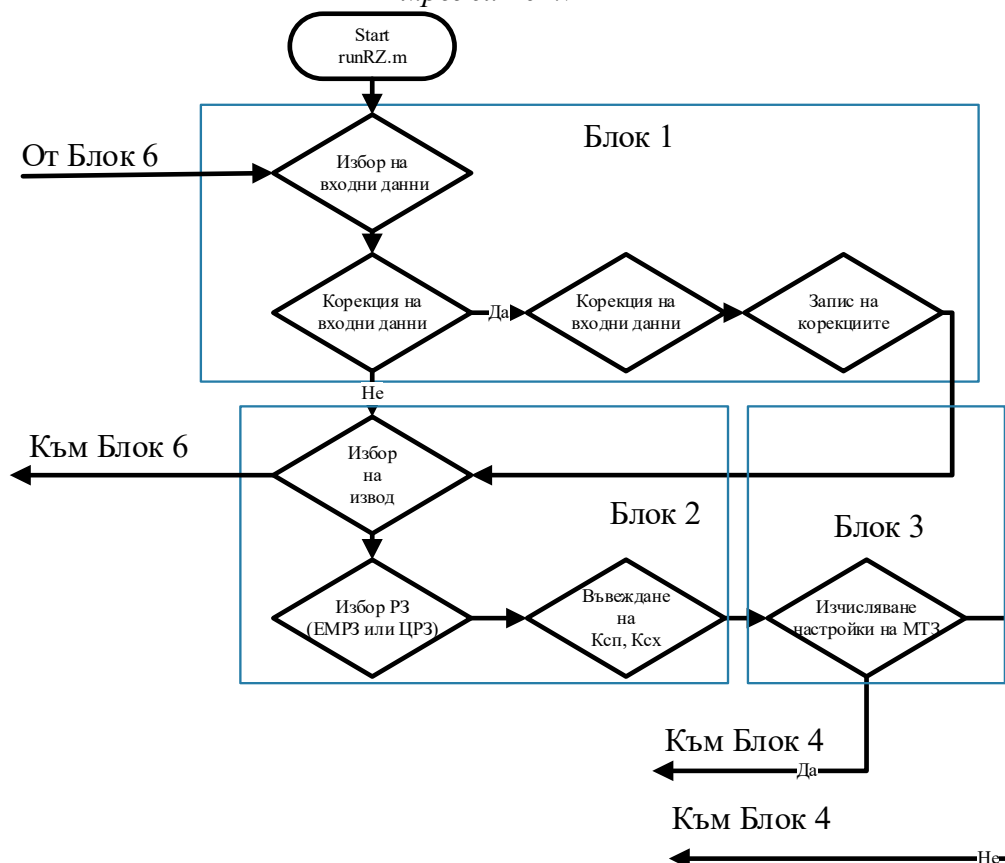
В Блок 1 има възможност за въвеждане, преглед и корекция на файл с данни тип *.mat. Информация е представена за всички изводи на електрическата мрежа – за електропроводите (въздушен, кабелен и смесен, допустим ток на проводника), инсталираната мощност на товарите и максимален работен ток, собствения капацитет и капацитивен ток на изводите, ток на земно съединение през преходно съпротивление равно на 100 Ω , номинален първичен и вторичен ток на измервателни токови трансформатори и имената на изводите. За всеки извод се въвежда следната информация: номерата на възлите и дължините на участъците от електропровода, изчислените токове на късо съединение в минимален и максимален режим за всеки извод. Чрез меню се прави избор на извода, на който ще се изчисляват настройките на РЗ.

В Блок 2 се извършва избор извод, за който ще се изчисляват настройките на съответните защиты. В този блок се извършва избор на вида на защитата (електромеханична или цифрова релейна защита). С направата на избора автоматично се въвеждат коефициентите на

сигурност и връщане за съответния вид защита. Операторът има възможност да избере коефициента на самопускане и схемата на свързване на измервателните токови трансформатори.



Фигура 4-16 Блок-схема на алгоритъм за настройка на релейни защиты в електрически мрежи 20 kV



Фигура 4-17 Блок-схема на алгоритъм за настройка на релейни защиты в електрически мрежи 20 kV

В разработения модул е предвидена възможност оператора да има избор на отделните защитни функции, за които ще се изчисляват настройките на релейната защита. В Блок 3 се избира изчисляване настройките на МТЗ и въвеждане от оператор времето на заработване на предходната защита с цел селективност. Въвежда се степента на селективност на МТЗ, като избора е ограничен в границите $t = 0,3 \div 0,5$ s.

За МТЗ се изчисляват:

- $I_{зз,МТЗ}$, А - първичен ток на заработване на МТЗ;
- $I_{зр,МТЗ}$, А - вторичен ток на заработване на МТЗ;
- $t_{зз,МТЗ}$, s - времето на заработване на МТЗ;
- $K_{ч,МТЗ}$ - коефициента на чувствителност на МТЗ;
- $K_{зан,МТЗ}$ - коефициента на запас на МТЗ.

Блок 4 е за изчисляване настройката на селективна токова отсечка. С избора за изчисляване настройките на СТО се извършва проверка чувствителността на защитата, при не удовлетворяващи условия се определя защитната зона на електропровода да по-голяма от 15 %. Изчертават се зависимостите $I_{кс\min}^2 = f(L_W)$, $I_{кс\max}^3 = f(L_W)$ и $I_{ззСТО} = f(L_W)$.

За СТО се изчисляват:

- $I_{зз,СТО}$, А - първичен ток на заработване на СТО;
- $I_{зр,СТО}$, А - вторичен ток на заработване на СТО;
- $K_{ч,СТО}$ - коефициента на чувствителност на СТО;
- $K_{зан,СТО}$ - коефициента на запас на СТО.
- $L_{защ,СТО} \geq (15 \div 20) \cdot L_W, \%$ - защитната зона на СТО от дължината на електропровода.

Блок 5 е предвиден за изчисляване настройката на земна защита. Предвидена е възможност за избор за изчисляване на ЗЗ, както и броя на стъпалата ѝ.

С избора за изчисляване настройките на ЗЗ се преминава в избор за изчисляване на първо стъпало на ЗЗ. Оператора въвежда стойността на ударния коефициент за защиты със закъснение или без закъснение. На база направения избор се извършва проверка чувствителността на защитата, при не удовлетворяващи условия се изчисляват настройки за защита със закъснение, като се въвежда $k_{y\phi} = 2,25$ и $t_{ззlcm} = 0,15$ s.

За ЗЗ I стъпало се изчисляват:

- $I_{зз,ЗЗ Icm}$, А - първичен ток на заработване на ЗЗ I стъпало;
- $I_{зр,ЗЗ Icm}$, А - вторичен ток на заработване на ЗЗ I стъпало;
- $t_{зз,Icm}$, s - времето на заработване на ЗЗ I стъпало;
- $K_{ч,ЗЗ Icm}$ - коефициента на чувствителност на ЗЗ I стъпало;
- $K_{зан,ЗЗ Icm}$ - коефициента на запас на ЗЗ I стъпало.

След изчисляване настройките на ЗЗ първо стъпало на ЗЗ се преминава към избор за изчисляване на ЗЗ второ стъпало. Оператора последователно въвежда стойностите на време закъснението на предходната ЗЗ и степента на селективност на ЗЗ второ стъпало. Настройката на защита се проверява с коефициент на чувствителност.

За ЗЗ II стъпало се изчисляват:

- $I_{зз,ЗЗ IIcm}$, А - първичен ток на заработване на ЗЗ II стъпало;
- $I_{зр,ЗЗ IIcm}$, А - вторичен ток на заработване на ЗЗ II стъпало;
- $t_{зз,IIcm}$, s - времето на заработване на ЗЗ II стъпало;
- $K_{ч,ЗЗ IIcm}$ - коефициента на чувствителност на ЗЗ II стъпало;
- $K_{зан,ЗЗ IIcm}$ - коефициента на запас на ЗЗ I стъпало.

При избор за изчисляване настройките на ЗЗ трето стъпало се задават следните настройки:

- $I_{33,33 IIIcm} = 10, A$ - първичен ток на заработване на ЗЗ III стъпало;
- $t_{33,IIIcm} = 3,6 s$ - времето на заработване на ЗЗ III стъпало.

Изчислява се $I_{зр,33 IIIcm}, A$ - вторичен ток на заработване на ЗЗ III стъпало.

В Блок 6 обобщените резултати за настройките на отделните защитни функции се записват във файл *.xlsx на отделни страници.

Със завършване на изчислението настройките на защитните функции на релейната защита има възможност за зареждане на данни за друг извод на електрическата мрежа. След изчисляване на избраните изводи от данните за електрическата мрежа е възможен избор за зареждане данни на нова мрежа. При отказ се излиза от програмата.

Разработения модул осигурява възможност базата данни за електрическата мрежа да се допълва и осъвременява, да се конфигурират нови топологии на електропроводите с цел проверка настройките на релейните защиты.

Изводи

1. Изведени са изчислителни зависимости за ограничителните условия осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност при настройка на:

- максималнотокова защита;
- селективна токова отсечка;
- неселективна токова отсечка
- земна защита (за три стъпална земна защита).

2. Изведени са изчислителни зависимости за определяне на коефициента на запас по чувствителност на МТЗ, СТО, НСТО и ЗЗ (за три стъпална земна защита изградени най-често в електрически мрежи 20kV).

3. Направена е оценка спрямо коефициента на запас по чувствителност на МТЗ, СТО, НСТО и ЗЗ в цифрови релейни защиты и конвенционалните електромеханични защиты.

4. При изследване на ограничителните условия осигуряващи селективност и чувствителност на МТЗ са определени тока на заработване, минималната стойност на тока на двуфазно к.с. при настройка спрямо допустимия ток на проводниците, както и при използване на номиналния първичен ток на токовия трансформатор. Определени са максималните дължини на електропроводите, при които защитата ще бъде чувствителна, като се използва за настройка по ток номиналния първичен ток на токовете трансформатори.

5. За селективна токова отсечка са изследвани ограничителните условия относно минималната стойност на тока на трифазно късо съединение в края на извода при максимален режим на работа на захранващия трансформатор.

6. За неселективна токова отсечка с отчитане на изведените изчислителни зависимости за ограничителните условия осигуряващи селективност и чувствителност са определени тока на заработване на при различни мощности на мрежовите силови трансформатори и сумата на намагнитващите токове.

7. За земни защиты изградени с електромеханични и цифрови релейни защиты са изследвани ограничителните условия за максималните дължини на електропроводите и токът на заработване, при които ще са удовлетворени изискванията за чувствителност.

8. Разработена е методика за изчисляване на настройката на релейните защиты в електрически мрежи средно напрежение с отчитане на всички изисквания на нормативните наредби при комбинирано и през активно съпротивление заземен звезден център на силовия трансформатор.

9. Предложената методика за изчисляване настройките на съвременните релейни защиты отчита топологията на електрическата мрежа средно напрежение, вида на електропроводите и сеченията им, монтираните токови измервателни трансформатори, както и коефициента на запас.

Заклучение

Разработените в дисертационния труд симулационни модели и направените моделни изследвания на режимните параметри в софтуерна среда позволяват да бъдат приложени за:

- Изследване на поведението защитите при всички видове симетрични и несиметрични повреди;
 - Моделите на РЗ с блокове позволяват въвеждане на параметрите за настройка. Това дава възможност при въвеждане на данни за конкретна електрическа мрежа и релейна защита да се извърши проверка за настройката на РЗ и нейното поведение при различни повреди;
 - Моделите на РЗ могат да бъдат използвани за повишаване на квалификацията на специалисти в практиката и обучение на студенти;
 - Визуализация чрез светлинна сигнализация действието на отделните стъпала на защитите, АПВ, работата на релейна защита и моментното състояние на прекъсвача на защитаваното съоръжение;
 - Визуализиране изменението на режимните параметри в моментни стойности при изключване на к.с. от релейната защита и действието на АПВ;
 - Въвеждане и извеждане на отделните стъпала на защитата. Възможност за въвеждане и извеждане на АПВ, както и задаване на брой цикли;
- Разгледано е изменението на режимните параметри при земни съединения в зависимост от третирането на звездния център чрез моделни изследвания за:
 - За електрически мрежи с изолирана неутрала;
 - За електрически мрежи с компенсирана неутрала;
 - За електрически мрежи с комбинирано заземена неутрала през дъгогасителен реактор с включване и изключване на активно съпротивление при повреда;
 - За електрически мрежи със заземена неутрала през активно съпротивление при повреда;
- Изведени са изчислителни зависимости за ограничителните условия осигуряващи изискванията за селективност и чувствителност, както и за определяне на коефициента на запас по чувствителност на най-често изгражданите релейни защити в електрическите мрежи средно напрежение при настройка на:
 - максималнотокова защита;
 - селективна токова отсечка;
 - неселективна токова отсечка
 - земна защита (за три стъпална земна защита).
- При изследване на ограничителните условия осигуряващи селективност и чувствителност на МТЗ са определени тока на зареждане, минималната стойност на тока на двуфазно к.с. при настройка спрямо допустимия ток на проводниците, както и при използване на номиналния първичен ток на токовия трансформатор. Определени са максималните дължини на електропроводите, при които защитата ще бъде чувствителна, като се използва за настройка по ток номиналния първичен ток на токовите трансформатори.
- За селективна токова отсечка са изследвани ограничителните условия относно минималната стойност на тока на трифазно късо съединение в края на извода при максимален режим на работа на хранящия трансформатор. При неселективна токова отсечка с отчитане на изведените изчислителни зависимости за ограничителните условия осигуряващи селективност и чувствителност са определени тока на зареждане на при различни мощности на мрежовите силови трансформатори и сумата на намагнитващите токове.
- За земни защити изградени с електромеханични и цифрови релейни защити са изследвани ограничителните условия за максималните дължини на електропроводите и токът на зареждане, при които ще са удовлетворени изискванията за чувствителност.
- Разработена е методика за изчисляване на настройката на релейните защити в електрически мрежи средно напрежение с отчитане на всички изисквания на нормативните наредби при комбинирано и през активно съпротивление заземен звезден център на силовия трансформатор. Методиката отчита топологията на електрическата

мрежа средно напрежение, вида на електропроводите и сеченията им, монтираните токови измервателни трансформатори, както и коефициента на запас.

Научно-приложни и приложни приноси

Научен принос:

- Изведени са изчислителни зависимости за оценка на запаса по чувствителност и ограничителни условия при настройка на релейни защиты в електрически мрежи 20 kV – максимално токова защита, селективна и неселективна токова отсечка и земни защиты;

Научно-приложни приноси:

- Изведени са условията, при които напреженията в звездния център са по-големи от нормираните при надлъжна несиметрия в електрически мрежи средно напрежение;
- Усъвършенствана е методика за настройка на релейни защиты в електрически мрежи средно напрежение, отчитаща вида на защитата и спецификата на защитавания извод. В методиката се определя коефициента на запас по чувствителността защитата;

Приложни приноси:

- В програмна среда MATLAB/Simulink са разработени симулационни модели на релейните защиты и автомат за повторно включване, използвани в електрически мрежи 20 kV. Симулационните модели на максимално токова защита, токова отсечка, токова отсечка с реле за време и земни защиты разширяват възможността за изследване и анализ действието на релейните защиты;
- Създаден е програмен продукт в среда MATLAB за изчисляване на настройките на релейните защиты в електрически мрежи средно напрежение;
- Систематизирана е информацията относно настройките на използваните релейни защиты в електрически мрежи средно напрежение приложима за отделите по релейна защита;
- Обобщени са получените резултати за кратността на пренапреженията и тока в преходен режим при земни съединения чрез съпоставяне на начините на заземяване на звездния център в електрически мрежи 20 kV.

Бъдещи изследвания по тематиката на дисертационния труд

На базата на разработената методика и алгоритъм за изчисляване настройките на релейните защиты и изведените изчислителни зависимости на ограничителните условия осигуряващи селективни и чувствителни РЗ в електрически мрежи 20 kV, бъдещите изследвания могат да бъдат обобщени по следния начин:

Оценяване развитието на електрическите мрежи 20 kV в зависимост от увеличаване дял на кабелните линии, увеличаване на тяхната единична дължина и монтираните реактори за компенсация на реактивната енергия. Оптимизация на методиката за изчисляване настройките на релейните защиты в електрически мрежи 20 kV включващи присъединени възобновяеми енергийни източници.

Списък с публикации по темата на дисертационния труд

1. **Медиха Мехмед-Хамза, Пламен Станчев.** Research and analysis of earth faults in medium voltage power networks with earthed neutral at different capacitive current,. International scientific conference UNITECH 2019, SELECTED PAPERS, November 2019, Gabrovo, pp. I-40- I-43, ISSN 206-378X
2. **Пламен Станчев.** Earthing of the neutral on power transformer in medium voltage networks, „Заземяване на звездните центрове на силови трансформатори в електрически мрежи средно напрежение“. Union of Scientists Varna, pp. 79 - 87, ISSN 1310-5833
3. **Plamen Stanchev.** Investigation of the Overvoltages in Electrical Power Lines with a Grounded through a Resistance Neutral, TU-Varna, Annual Journal, Vol: № 4(1), Published 2020, pp. 73 - 78, DOI:10.29114/ajtuv.vol4.iss1.174, ISSN 2603-316X
4. **Медиха Мехмед-Хамза, Пламен Станчев.** Determination of reserve by sensitivity and boundary conditions when using unselective instantaneous overcurrent relay protection in medium voltage electrical grids. International scientific conference, UNITECH 2020, SELECTED PAPERS, November 2020, Gabrovo, pp. 24 - 28, ISSN 2603-378X
5. **Mediha MEHMED-HAMZA, Plamen Stanchev.** Coordination of the Time Overcurrent Relay Protection Settings in Medium Voltage Electric Power Grids, 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), pp.1-4, ISBN 978-172810362-4, doi 10.1109/EEAE49144.2020.9279011
6. **Mediha MEHMED-HAMZA, Plamen Stanchev.** Sensitivity and Selectivity of Time Overcurrent Relay Protection in Medium Voltage Power Lines, 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), pp.1-4, ISBN 978-172810362-4, doi 10.1109/EEAE49144.2020.9278986

Analysis of selectivity and sensitivity of relay protections in contemporary medium voltage electrical networks

by

Plamen A. Stanchev

ABSTRACT

The human impacts on the environment significantly increase with the development of the industry. This leads to increased demands on medium voltage power systems. The new technologies for the production, transmission and distribution of electrical energy are presented, as well as the systems for control and protecting this process. This leads to a change in organization and requirements, as well as an understanding of electrical power systems.

The simulation models developed in the dissertation work and the model studies of the mode parameters in a software environment allow them to be applied for:

- Investigation of the behavior of protections in all types of symmetrical and asymmetrical faults;
 - The models of the relay protection (RP) with blocks allow the input of the setting parameters. This makes it possible, when entering data for a specific electrical network and relay protection, to check the setting of the RP and its behavior in the event of various failures;
 - Visualization by means of light signaling of the action of the individual stages of protection, auto reclose, the operation of relay protection and the current status of the circuit breaker of the protected equipment;
 - Visualization of the change of mode parameters in instantaneous values when switching off the short circuit from relay protection and auto reclose action;
 - Setting of the stage of the protection, auto reclose, as well as setting the number of cycles;
- The change of the mode parameters for ground fault depending on the treatment of the neutral was examined through model studies: for electrical grids with isolated neutral; for electrical grids with compensated neutral; for electrical grids with a combined earthed neutral through an arc extinguishing reactor with switching on and off of active resistance in case of failure; for electrical grids with grounded neutral through active resistance in case of failure.
- Computational dependencies have been derived for the limiting conditions ensuring the requirements for selectivity and sensitivity, as well as for determining the basic factor in sensitivity of the most commonly built relay protections in medium voltage electrical networks when setting: overcurrent relay protection; earth relay protection (for three-stage earth protection).
- When studying the limiting conditions ensuring selectivity and sensitivity of overcurrent protection, the pickup current, the minimum value of the current of phase-to-phase short circuit were determined. The maximum lengths of power lines at which the protection will be sensitive are determined, using the rated primary current of the current transformers for current setting.
- For a selective current section, the limiting conditions regarding the minimum value of the three-phase short-circuit current at the terminal end at the maximum mode of operation of the supply transformer have been studied. In the case of a non-selective current segment, taking into account the derived calculation dependencies for the limiting conditions ensuring selectivity and sensitivity, the operating current of the mains power transformers at different capacities and the total of the magnetizing currents were determined.
- For ground protections built with electromechanical and digital relay protections, the limiting conditions for the maximum lengths of power lines and operating current, which will satisfy the sensitivity requirements, have been studied.
 - A methodology has been developed for calculating the setting of the relay protections in medium voltage electrical networks, taking into account all the requirements of the normative regulations in the case of a combined and through active resistance grounded neutral of the power transformer. The methodology takes into account the topology of the medium voltage electrical grid, the type of power lines and their sections, the installed current measuring transformers, as well as the reserve factor.