



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Инженерно-педагогически факултет - Сливен

**Катедра „Електротехника, автоматика и
информационни технологии“**

маг. инж. Ивелина Христова Методиева

**ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ В
ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИТЕ СИСТЕМИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2 „Електротехника, електроника и
автоматика”

Научна специалност: „Електрически мрежи и системи”

**Научни ръководители: доц. д-р инж. Стоян Христов Божков
доц. д.м.н. Петьо Савов Келеведжиев**

**СЛИВЕН
2021 г.**

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от разширен катедрен съвет на катедра „Електротехника, автоматика и информационни технологии“ към Инженерно-педагогически факултет - Сливен на ТУ - София на редовно заседание, проведено на 08.01.2021 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 13.05.2021 г. от 13:00 часа в зала 1207 на Технически университет – Сливен на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-122 / 14.12.2020 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Диляна Николаева Господинова – ТУ – София, „ЕФ“ – председател
2. проф. д-р инж. Красимир Великов Мартев - РУ „Ангел Кънчев“ – гр. Русе.
3. проф. д-р инж. Иван Борисов Евстатиев - РУ „Ангел Кънчев“ – гр. Русе.
4. доц. д-р инж. Ивайло Стефанов Стоянов - РУ „Ангел Кънчев“ – гр. Русе.
5. доц. д-р инж. Орлин Любомиров Петров - РУ „Ангел Кънчев“ – гр. Русе.

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Красимир Великов Мартев - РУ „Ангел Кънчев“ – гр. Русе.
2. доц. д-р инж. Диляна Николаева Господинова – ТУ – София, „ЕФ“ – председател

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на ИПФ-Сливен, ТУ-София, бул.“Бургаско шосе“ №59, Сливен.

Дисертантът е докторант в самостоятелна форма на обучение към катедра „Електротехника, автоматика и информационни технологии“ на ИПФ-Сливен. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като преобладаващата част от резултатите са публикувани.

Автор: маг. инж. Ивелина Христова Методиева

Заглавие: Електромагнитна съвместимост в електроснабдителните системи

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Стандартите определят като електромагнитна съвместимост (ЕМС) способността на всяко устройство, апаратура или система да работи нормално в реални условия, изложено на смущения от собствената си електромагнитна среда и да не създава такива към другите технически средства [Директива 2004/108/EC], [NACE RP-01-77-95], [Directive 89/336/EEC], [ANSI/IEEE 80]. Наличието на електрическа връзка между всички електроенергийни системи е причината те взаимно да си влияят.

Всяко електромагнитно явление, което може да влоши работата на устройство или оборудване се нарича електромагнитно смущение. Електромагнитната съвместимост е проблем, създаден с развитието на технологиите, който се задълбочава все повече с усъвършенстването им.

В началото на технологичният напредък влияние оказват смущения с т.нар. естествен характер, но по – съществени са смущенията, резултат от човешката дейност.

Осигуряването на нормалното функциониране на електроенергийните обекти, без да причиняват вредни електромагнитни взаимодействия върху останалите технически средства и човека, е необходимо условие за устойчивото развитие на икономиката.

За ограничаване смущенията върху работата на техническите устройства е необходимо преди всичко да се открият източниците и анализират начините на проникване на смущенията.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Въз основа на направения литературен обзор и прегледаните научни разработки в тази област могат да се оформят целта, нерешените проблеми и задачите на изследването:

ОБЕКТЪТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО са въздушни и кабелни линии за пренос и разпределение на електрическа енергия.

ЦЕЛ НА ДИСЕРТАЦИЯТА: Основната цел на дисертационния труд е да се разработят симулационни модели на електропроводи, високо напрежение и кабелни линии, средно напрежение и да се анализира влиянието на генерираните електромагнитни полета и смущения.

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

- да се създаде симулационен модел за анализ на електромагнитните полета около електропровод високо напрежение;
- да се моделират симулираните полета от електропроводи с различно номинално напрежение;
- да се направи експериментално сравнение на работата на създадения модел с резултати от измервания на съществуващи електропроводи;
- да се анализират нивата на генерираните електромагнитни полета около кабелна линия средно напрежение и извърши числено моделиране;
- да се изследва качеството на напрежението, доставено от децентрализиран фотоволтаичен източник, електроснабдяващ промишлено предприятие.

Научна новост

Новост в представените изследвания са:

Предложен е модел и методика за определяне влиянието на интензитета и магнитната индукция на въздушна линия 110kV и 400kV, основан на динамичен анализ на моментното токово и температурно състояние на преносната линия.

Практическа приложимост

- Изследвани са ефектите от висши хармоници в електроснабдителните системи;
- Създаден е модул в MATLAB/Simulink среда на температурен модел на въздушна линия;
- Разработен е симулационен модел за определяне влиянието на интензитета и магнитната индукция на въздушна линия високо напрежение. Моделът е приложим както при „статичен“, така и при „динамичен“ мониторинг;
- Получените резултати от реализираните симулации и изследвания могат да се използват при проектиране и експлоатация на въздушни линии с номинално напрежение 110 kV и 400 kV;
- Разработен е модел на невронна мрежа за изследване нивата на интензитета на магнитното поле около кабелна линия 20kV с отчитане взаимното разположение между проводниците;

- Предложена е методика за вариантно изследване на магнитните полета около кабелна линия, средно напрежение;
- С използване на съвременни софтуерни средства е реализиран модел на температурното поле около кабелна линия 20kV;
- При присъединяване на децентрализирани фотоволтаични системи към съществуващите електрически мрежи, част от ЕЕС, е необходимо да се отчитат нивата на създалите се (следствие на преобразуващата апаратура DC/AC инвертори) висши хармоници.

Апробация

Дисертационният труд е докладван и обсъден на разширен катедрен съвет на катедра „Електротехника, автоматика и информационни технологии“ при ТУ – София, ИПФ – Сливен. Части от темата са докладвани на:

- Национална конференция с международно участие „Сливен 2020“, Сливен,
- Образователни технологии 2020, Каварна, 2020,
- XVII Национална младежка научно-практическа конференция 2020, София,
- International journal of engineering and science invention, 2021.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 6 бр. научни статии в България и чужбина, от които 3 бр. самостоятелни.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **124** страници, като включва увод, **4** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **180** литературни източници, като **148** са на латиница и **26** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва 62 фигури и 20 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1

1. СЪЩНОСТ И МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ

1.1. Същност на процеса електромагнитна съвместимост

Броят на заобикалящите ни електрически и електронни устройства се увеличава стремглаво през годините.

Мобилни апарати, телекомуникационни и WI-FI системи, електрически мрежи, компютри, медицинско оборудване всички тези устройства улесняват ежедневието ни, но всички те са източници на електромагнитни смущения. Съответно всички съоръженията трябва да бъдат проектирани спрямо съвременните технологически изисквания така че:

- смущаващите електромагнитни въздействия, които се генерират да не надвишават определено ниво на допустимост;
- да има устойчивост на електромагнитни въздействия, която допринася за безопасност на работа.

1.1.1 Механизми на проникване на електромагнитните смущения

Магнитното поле е трудно за екраниране и лесно може да проникне/премине в друга среда - сгради, съоръжения, апаратура, включително и човек, което означава, че винаги оказва влияние. Измерването и нормирането на нивата на магнитните полета е необходимо, за да се осигури санитарен минимум и безопасна работна среда. Ефектите от хроничното излагане на ЕМП са обект на интензивни изследвания. С развитието на технологиите и иновациите неминуемо се повишава и степента на излагане. Много от уредите, които се използват не представляват реална заплаха, но не така стоят нещата с високо волтовите инсталации, в т.ч. електропроводи за високо напрежение (ВН) и свръхвисоко напрежение (СВН).

Всяка държава определя свои собствени национални стандарти за излагане на ЕМП. Най-новите насоки за ограничаване на излагането на променящо се във времето електрическо, магнитно и електромагнитно поле от 1 Hz до 100 kHz посочват максималните стойности на електромагнитните полета (ЕМП), които са безопасни за хората, $E = 5 \text{ kV/m}$ и $B = 200 \text{ } \mu\text{T}$ [ICNIRP 2010].

Електромагнитните смущения в мрежата на електроснабдителната система, според начина им на проникване, се разглеждат в различни

категории: индуктивни (магнитни), капацитивни (електростатични) и галванични (проводими) връзки.

1.1.2.Източници на електромагнитни смущения

Електрическата енергия е неизменна част от съвременния начин на живот, а електропроводите за ВН и СВН (50Hz) са основните източници на нискофреотни електромагнитни полета в околната среда. Разпространяват се по цялото трасе, от подстанции, през електропроводите до крайния потребител и често биват предпоставка за повреди и аварии.

1.1.3.Оценка на магнитното поле от електропроводи с различно номинално напрежение

Магнитното поле е в пряка зависимост от геометричното разположение на проводниците на електропровода – хоризонтално или вертикално окачване на проводниците [Oua-2014]. Наблюденията показват, че проводници разположени хоризонтално, имат по – ниски нива на магнитното поле. При хоризонталната ориентация с отдалечаването от центъра (оста) на електропровода се наблюдава и понижаване на магнитното поле. А при вертикално разположение на проводниците се наблюдават по – високи нива на полетата.

1.2.ХАРМОНИЧНИ СМУЩЕНИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МРЕЖИ

В променливо токовите системи хармоничното смущение се изразява в отклонение синусоидалната форма на тока или напрежението и е резултат от работата на оборудване (товари) с нелинеен характер. Нелинейното оборудване е електронно оборудване, обикновено инвертори, които внасят несинусоидални токове, когато са захранени със синусоидално напрежение. В действителност значителна и непрекъсната нарастваща част от товарите са нелинейни, което обуславя несинусоидални токове.

Електрически величини като напрежение и ток, обикновено се дефинират като синусоидални, но при наличие на хармонични компоненти поради нелинейни елементи, трябва да бъдат предефинирани.

Общо хармонично изкривяване (THD), най-широко използваният индекс в стандартите, е нужен за определяне на отклонението на периодичната форма на вълната съдържаща хармоници от чистата синусоидална форма на вълната. Общото хармонично изкривяване на напрежението и токовата вълна съответно може да се изрази по следния начин:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (3)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (4)$$

1.2.1.Ефекти от висши хармоници в електроенергийната система

Ефектите от висшите хармоници в електроенергийната система се разглеждат в две различни категории: в разпределителната мрежа и в преносната мрежа.

Хармониците представляват нежелани ел. токове, които са със съставни кратни на базовите честоти. Проблемът в тях е, че могат да претоварят проводниците, като предизвикат силно отделяне на топлина, а в някои случаи и пожари. Един от основните ефекти на хармониците е увеличаването на тока в системата.

1.2.2.Ефекти на хармониците върху оборудването на електроенергийната система

Висшите хармоници на напрежението нарушават работата на елементите на ЕЕС, а тези на тока предизвикват допълнителни загуби на активна мощност и електрическа енергия. Най-осезаеми са загубите в трансформаторите, двигателите и генераторите, дължащо се на увеличеното съпротивление на намотките в следствие увеличаване на честотата.

1.2.3.Ефект на хармониците от фотоволтаични системи

Проблемите за устойчивост по напрежение на децентрализираните енергийни източници в разпределителните мрежи представлява интерес, особено ако техните инсталирани мощности са достатъчни да покриват по-голяма част или целия товар по време на минималната консумация в присъединения клон [Нед-2018]. Интерес представлява появата на нискочестотни колебания, висши хармоници в електрическите системи, които предизвикват в кондензаторните батерии резонансни явления, които водят до токово претоварване, а от там и до авариянето им. Влошава се нормалната работа на измервателните уреди и релейната защита. Висшите хармоници причиняват често повреди на полупроводниковите елементи поради големите производни на тока и напрежението (dI/dt и dU/dt), което предизвиква претоварването им. Тъй като навлизането на фотоволтаични (PV) системи в разпределителната мрежа се увеличава, необходимостта от

моделиране на хармоничното изкривяване на токовете и напреженията се превръща в актуален проблем. Интерфейсът на електрониката е от съществено значение за свързване на ВЕИ към мрежата. Модулите за преобразуване на енергия са устройства за „генериране“ на хармоници. Те оказват влияние върху качеството на захранването, надеждната работа на системното оборудване, както и продължителността на експлоатационния период на компонентите.

ИЗВОДИ КЪМ ПЪРВА ГЛАВА

- Анализирани са механизмите на проникване на електромагнитните смущения;
- Направен е преглед и анализ на източниците на електромагнитните смущения;
- За целите на безопасната и надеждна работа на електротехническите съоръжения е необходимо да се извърши прецизен анализ и оценка на нивата на електромагнитни полета, породени от кабелни линии и въздушни електропроводи;
- Изследвани са ефектите от висши хармоници в електроснабдителните системи.

ГЛАВА 2

2. МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАГНИТНАТА ИНДУКЦИЯ И ИНТЕНЗИТЕТА НА ВЪЗДУШНА ЛИНИЯ 110 kV И 400 kV ПРИ ДИНАМИЧЕН МОНИТОРИНГ

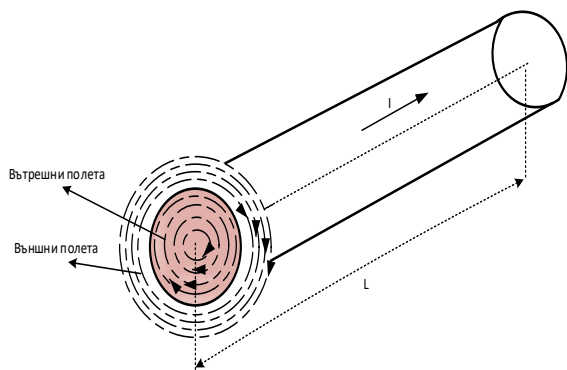
Действителната пропускателна способност на електропроводите зависи от загряването и респективно охлаждането на техните проводници. Ограничаваща функция тук може да е реално достигнатата температура на проводника и увеличаването на неговия провес, в следствие на температурно-линейно удължение на изграждащия материал [Нед-2005].

Един от приоритетите на енергийните дружества е разработването на системи за **оценка (рейтинг)** и наблюдение на въздушните електропроводи, основно чрез използване на система за динамичен рейтинг (DLR), в реално време. Чрез нея би било възможно да се използва по-ефективно пропускателната способност на електрическата мрежа и да се удължи експлоатационния ѝ период.

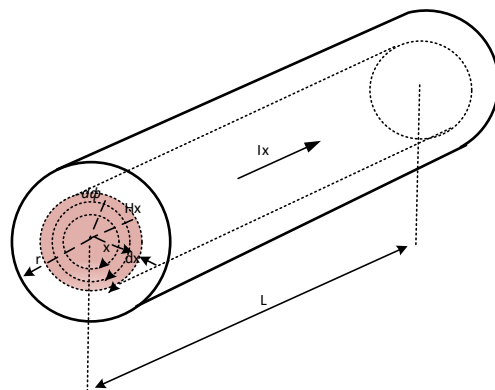
Интерес представлява да се изследват нивата на електромагнитната индукция около проводниците на електропровод именно чрез иновативния, в процес на изграждане за България, DLR мониторинг.

2.2. Индуктивност при безкрайно дълъг, кръгъл проводник.

Около безкрайно дълъг проводник с радиус r и работен ток I се създават външни и вътрешни магнитни линии с концентрична форма (фиг.2.1) и (фиг.2.2).



Фиг.2.1. Магнитни полета около кръгъл проводник



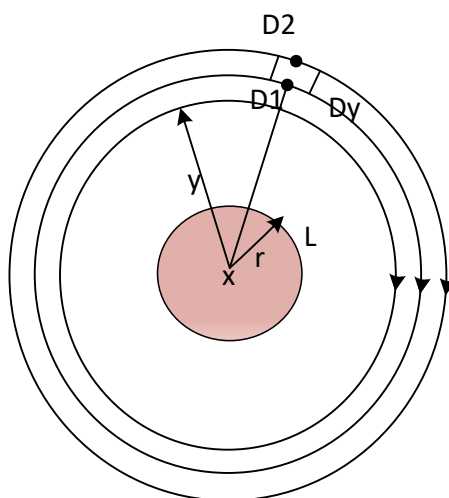
Фиг.2.2. Магнитна индукция във вътрешността на кръгъл проводник

Чрез използването на основни математически закони и зависимости се записва обобщеният израз на индукцията на проводник с дължина l (2.7).

$$L_{\text{вЪн.}} = \frac{\lambda_{\text{вЪт.}}}{I} = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad (\text{H/m}) \quad (2.7)$$

2.2.2. Вътрешна индукция

За изчисляването на вътрешната индукция се допуска наличието на максимален „skin“ ефект. Тогава, във всяка точка на вътрешния магнитен поток (фиг.2.3) с радиус y , интензитет H_y и плътност B_y се изчисляват с уравнения (2.8) и (2.9).



Фиг.2.3 Магнитни линии във вътрешността на кръгъл проводник.

$$H_y = \frac{I}{2\pi y} \text{ (A/m)} \quad (2.8)$$

$$B_y = \mu H_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{y} \text{ (T)} \quad (2.9)$$

Аналогично на еднопроводната линия, може да се опише и индукцията при трипроводна линия.

2.3. Топлинен баланс на проводник

Уравнението за топлинен баланс на кръгъл проводник съгласно IEEE – модела (2.31) има вида:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_s}{dt} = P_j + P_M + P_i + P_s - P_c - P_R - P_w \quad (2.31)$$

Където:

m - маса на проводника за единица дължина [kg/m];

c - специфичен топлинен капацитет [J/(kg.K)];

T_{av} - средна температура на проводника [°C];

P_j - токово нагряване [W/m];

P_M - магнитно нагряване [W/m];

P_i - нагряване от корона [W/m];

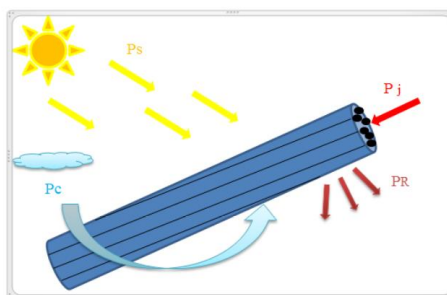
P_s - нагряване от слънцето [W/m];

P_c - охлаждане от конвекция [W/m];

P_R - охлаждане от излъчване [W/m];

P_w - охлаждане от изпарение [W/m].

Взаимодействието и влиянието между отделните параметри върху преносната линия е представено на фиг. 2.6.

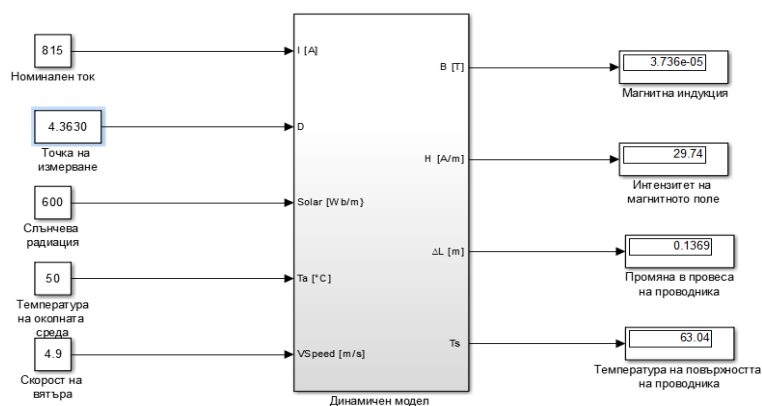


Фиг. 2.6. Взаимовръзка между отделните параметри върху преносната линия

Според [CIGRE-2002] средната температура на проводника (T_{av}) е равна на температурата на повърхността на проводника (T_s) описана с уравнение (2.33).

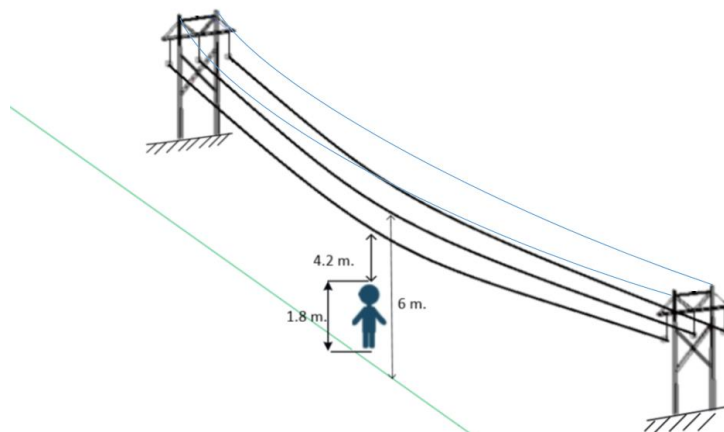
$$T_s = \int \frac{P_j + P_s - P_c - P_R}{m \cdot c} dt \quad (2.33)$$

Отчитайки слънчевото нагряване на проводника $P_s = \alpha_s \cdot S \cdot D$ (2.35), загубите в резултат на естествената конвекция $P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu$ (2.36), както и зависимостите: $H_y = \frac{I}{2\pi y}$ (A/m) (2.8), респективно $B_y = \mu H_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{y}$ (T) (2.9) е разработен модел, изготвен в MATLAB/Simulink среда. Общият вид на модела, който е представен на фиг.2.16, е.



Фиг. 2.16. Симулация при критични стойности на входящите величини

Извършен е анализ за определяне магнитната индукция и интензитета на полето на разстояние 1,8 m. от повърхността на земята, графично представено на фиг.2.9.



Фиг.2.9 Определяне провеса на електропровод с хоризонтално разположение на проводниците.

За целта като входящи величини са зададени физико-механичните показатели на проводник АСО – 400, както и обобщените параметри, представени в таблица 2.2.

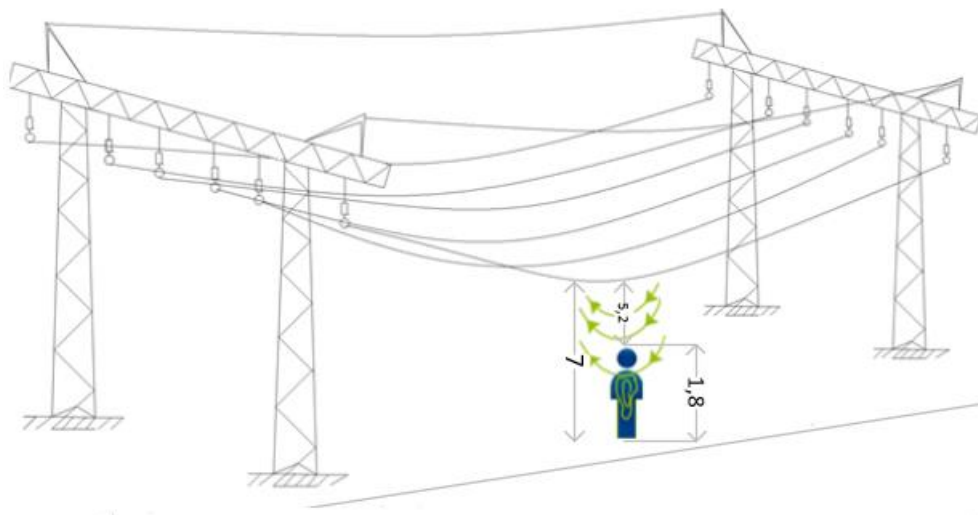
Температурен коефициент на линейно разширение α , [$1/^\circ\text{C}$]	Хоризонтално разстояние между стълбовете L, [m]	Точка на измерване (1.8 от земната повърхност) [m]	Слънчева радиация, [W/m^2]	Скорост на вятъра, [m/s]	Номинален ток, [A]
$19,8 \cdot 10^{-6}$	300	4,2	600	0	815

Таблица 2.2

Реализирано е динамично моделиране, извършено при различни стойности на работният ток.

Анализа на резултатите по отношение на влияние на интензитета на полето и магнитната индукция, създавани от разглежданата линия показва, че при теоретично претоварване на линията над допустимото токово натоварване интензитета на полето, респективно индукцията в анализирания точка (на височина 1,80 m.) и при увеличен провес остава в границите на пределно допустимите нормирани стойности, представени в глава 1.

Моделът е приложен за въздушна електропроводна линия 400kV, чийто геометрични параметри използвани при моделирането са показани на фиг. 2.18.



Фиг.2.18. Геометрични параметри на модела, използван при моделирането на електропровод 400kV.

Получените резултати, представени в таблица 2.9 показват, че електромагнитното поле създадено от електропровода, е в границите на определените санитарно-защитни зони в околността на линията, $E=5\text{kV}/\text{A}$ и $B=200\mu\text{T}$. При претоварване на линията с повече от 20%, т.е. с $I_{\text{НОМ}}=1300\text{A}$,

резултатите показват, че нивото на магнитната индукция е $B=61,90\mu T$ и остава в норми.

Анализите и изследванията, реализирани във втора глава, позволяват да се направят следните по-важни изводи:

- Създаден е модул в MATLAB/Simulink среда на температурен модел на въздушна линия.
- Разработен е симулационен модел за определяне влиянието на интензитета и магнитната индукция на въздушна линия високо напрежение. Моделът е приложим както при „статичен“, така и при „динамичен“ мониторинг.
- Анализа на резултатите показва, че в условията на динамичен мониторинг граничната стойност на интензитета в най-ниската точка от провисната крива на най-ниско разположения проводник не надхвърля пределно допустимите стойности.
- Резултатите от изследванията потвърждават, че електромагнитното поле, създавано от електропровод 110 kV, не оказва вредно въздействие върху хората и околната среда.
- Получените резултати от реализираните симулации и изследвания могат да се използват при проектиране и експлоатация на въздушни линии с номинално напрежение 110 kV и 400 kV.

ГЛАВА 3

3. АНАЛИЗ НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ ОКОЛО КАБЕЛНА ЛИНИЯ. ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ

Със засилената урбанизация на населените места, изграждането на все по-голям брой административни и промишлени сгради, пропорционално расте и се развива и електроразпределителната мрежа, а успоредно с това нараства площта на използваните кабелни линии за средно напрежение, свързващи отделните трафопостове и разпределителни уредби. Така за количествена оценка и анализ на „електромагнитното замърсяване“, електромагнитната съвместимост и условията за безотказна работа на съоръженията е необходимо внимателно да се анализират големините и разпределенията на магнитните полета, създадени от използваните силови кабелни линии.

За анализа на магнитни полета, при несложни форми на възбудителните токови контури се използват няколко основни уравнения. Записани в интегрален вид те биват:

$$\left| \begin{array}{l} \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i = \iint_{(s)} \vec{J} \cdot d\vec{s} \\ \iint_{(s)} \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0, \vec{B} = \mu \vec{H} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Уравненията за анализ на магнитно поле могат да се представят и в диференциален вид (3.3) при условие, че $\rho = 0$ и $\rho \vec{v} = 0$.

$$\left| \begin{array}{l} \text{rot} \vec{H} = \vec{J} \leftrightarrow \text{div} \vec{J} = 0, \text{div} \vec{B} = 0 \\ \vec{B} = \mu \vec{H}, \vec{J} = \gamma \vec{E} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

3.1. Числен анализ

За извършване на анализ на температурното и магнитно поле, около разглежданата кабелна линия е използван софтуерният пакет ELEK™ Cable HV.

Предмет на анализа е кабелна линия, изпълнена с кабел тип САХЕкТ 3х1х95mm², предназначен за пренасяне и разпределение на електрическата енергия за средно напрежение в градски и селищни електрически мрежи, подстанции, разпределителни уредби и електрически централи.

Проводниците на кабелната линия са положени директно в земята (вкопани), а конструктивните параметри са съгласно БДС 2581-86.

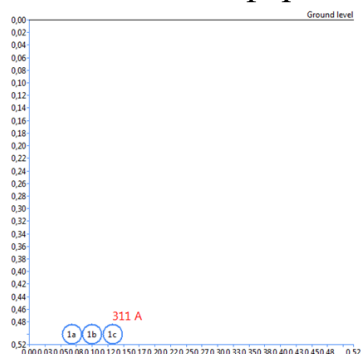
Разглежда се разположението на кабелите на трите фази както следва:

Фиг.3.1. Хоризонтално разположени, взаимно допиращи се, без разстояние между кабелите;

Фиг.3.5. Разположени по върховете на равностранен триъгълник, без разстояние между тях;

Фиг.3.8. Хоризонтално разположени, с разстояние между тях;

Фиг.3.11. Във формата на триъгълник, с разстояние между тях.



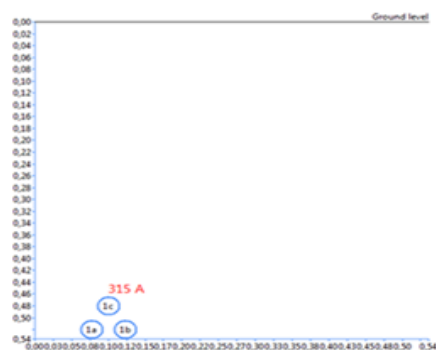
Фиг.3.1. Хоризонтално, взаимно допиращи се, без разстояние между тях.



Фиг.3.5. Взаимно допиращи се по върховете на равностранен триъгълник

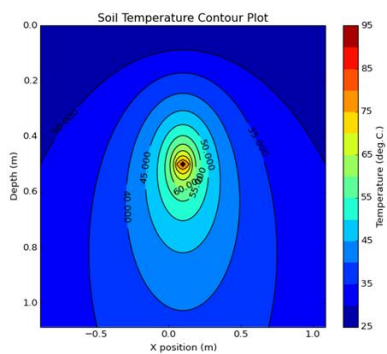


Фиг.3.8. Хоризонтално разположени, с разстояние между тях.

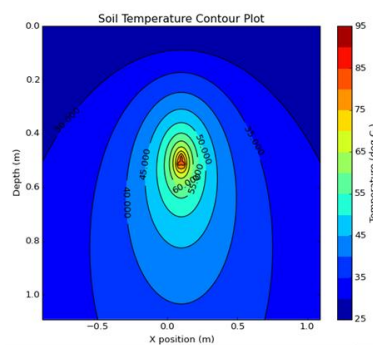


Фиг.3.11. Във формата на триъгълник, с разстояние между тях.

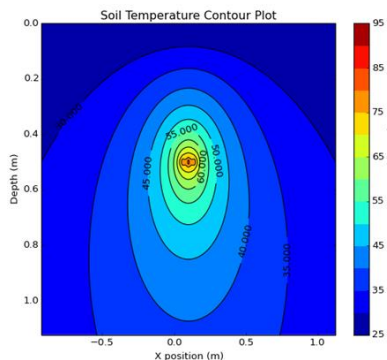
Анализа на температурата на различното разположение на кабелите е представено в графичен вид на фиг.3.2, фиг.3.6, фиг.3.9 и фиг.3.13.



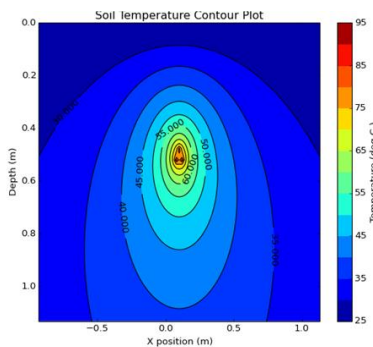
Фиг.3.2.



Фиг.3.6

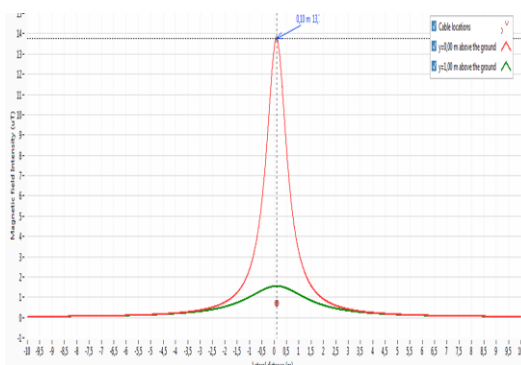


Фиг.3.9.

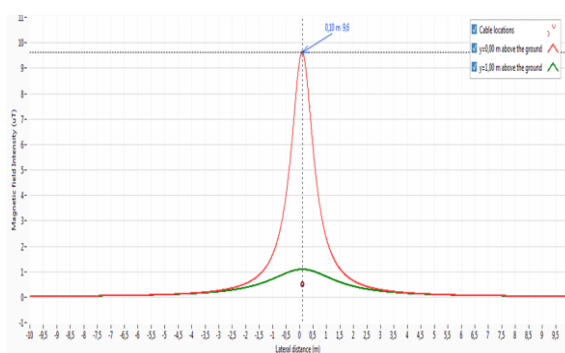


Фиг.3.13

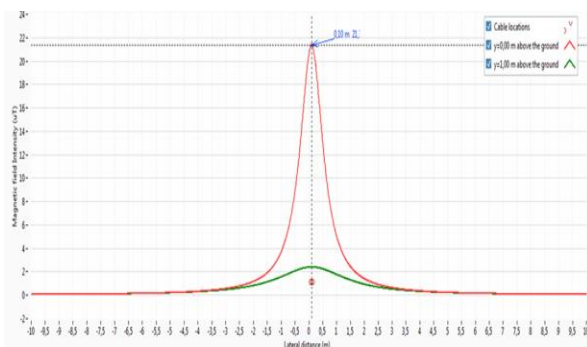
На фиг.3.3, фиг.3.7, фиг.3.10 и фиг.3.12. е показано разпределението на магнитното поле на кабелите на трифазна кабелна линия, 20kV.



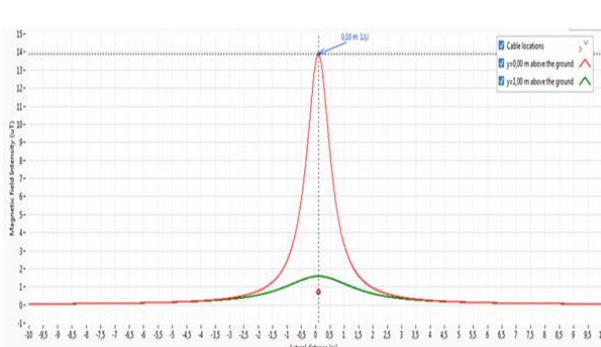
Фиг.3.3. Разпределение на магнитното поле на кабелна линия, 20kV с хоризонтално разположение на кабелите, без разстояние между тях



Фиг.3.7.Разпределение на магнитното поле на кабелна линия, 20kV, с триъгълно разположение на кабелите, без разстояние между тях



Фиг.3.10 Разпределение на магнитното поле на кабелна линия, 20kV с хоризонтално разположение на кабелите, с разстояние между тях



Фиг.3.12.Разпределение на магнитното поле на кабелна линия, 20kV, с триъгълно разположение на кабелите, с разстояние между тях

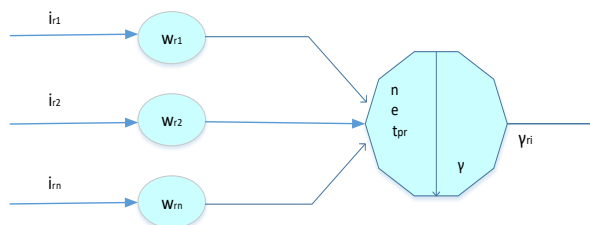
От направените изследвания се вижда, че нивото на магнитната индукция, респективно магнитното поле, е най-високо при третия начин на полагане – хоризонтално, с разстояние между кабелите $x=1/2 \cdot D_{\text{пр}}$. Най-ниски нива на индукция са съответно при полагане в триъгълник, без разстояние между кабелите. Това се дължи на по-добрия топлообмен между тях. При другите два начина на полагане (хоризонтално, без разстояние между проводниците и по върховете на равностраничен триъгълник, с разстояние помежду им) не се наблюдават съществени разлики. Получените резултати за стойностите на магнитната индукция са в близки граници.

3.4. Създаване на модел за симулация чрез невронна мрежа в Matlab среда

Изкуствените невронните мрежи (НМ) придобиват все по-нарастваща популярност в качеството на предмет на научни разработки. Успешно се справят с решаване на казуси при традиционно най-трудните изчислителни проблеми. Възможността за обработка на голям поток от данни, способността за адаптация и обучение [Gol-92] ги прави изключително подходящи за анализиране на електромагнитните полета около проводниците на различни захранващи линии, чийто динамични модели се характеризират с наличието на неопределености и неточности.

3.4.2. Математически облик на изкуствена невронна мрежа

На фиг.3.15 е показан модел на изкуствен неврон, който е в основата на всички модели на невронни мрежи.



3.15. Модел на изкуствен неврон

Където:

$i_{r1}, i_{r2}, i_{r3}, i_{rn}$ – входни сигнали

$w_{r1}, w_{r2}, w_{r3}, w_{rn}$ – тегла на връзките

net_{pr} – вход на мрежата

γ_{ri} – изходен сигнал

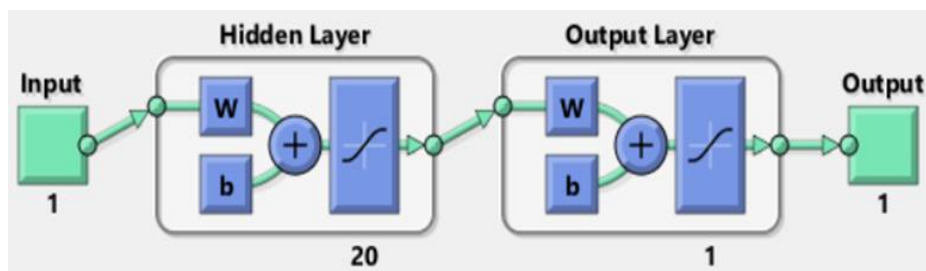
Активационната стойност при динамичния неврон има вида (3.3):

$$O_{pj}(t+1) = f\langle net_{pr}(t), O_{pr}(t) \rangle \quad (3.3)$$

За направеното изследване са използвани именно динамични неврони, изхождайки от факта, че задаваните входни данни са променящи се във времето.

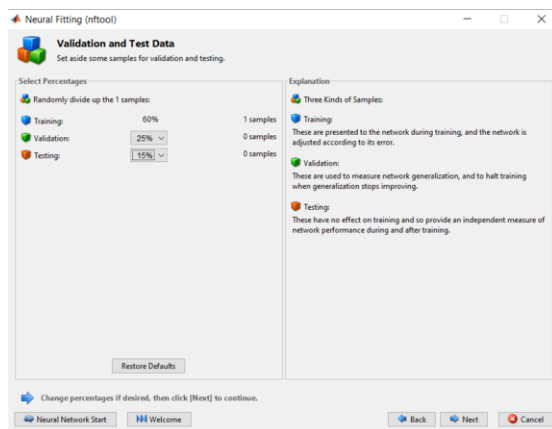
Невронните мрежи са реализирани чрез използване на toolbox/nntool в Matlab среда. Входно-изходните параметри на невронните мрежи са данни, получени от направените симулации в първата част на настоящата глава. Тези параметри служат като извадка за обучението на всяка една от мрежите. За прецизна работа, в процеса на обучение са зададени и уточнени всяко едно

от теглата. След реализиране на всяка една от мрежите поотделно е направено тестване със известни входно-изходни данни, които не са участвали в процеса на създаване и обучение на мрежата. Общият примерен вид на изградената невронна мрежата е показана на фиг.3.16. Всяка една от създадените мрежи съответства на един от четирите варианта на разположение на кабелите така, както са показани на фиг.3.1, фиг.3.5, фиг.3.8 и фиг.3.11.



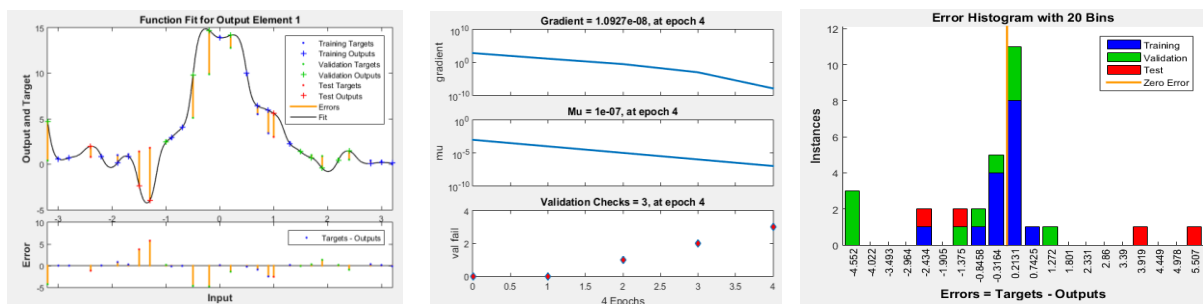
Фиг.3.16. Общ вид на създадената невронна мрежа

Направен е прецизен избор на процентното съотношение между командите „Training“, „Validation“ и „Testing“, фиг.3.17.



Фиг.3.17 Избор на процентното съотношение между „Training“, „Validation“ и „Testing“.

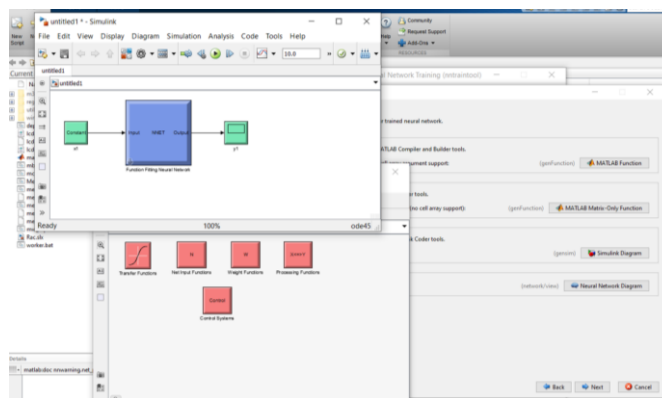
Графични резултати от различни етапи на направеното обучение на мрежата са показани на фиг.3.18.



Фиг.3.18. Етапи от обучение на невронните мрежи

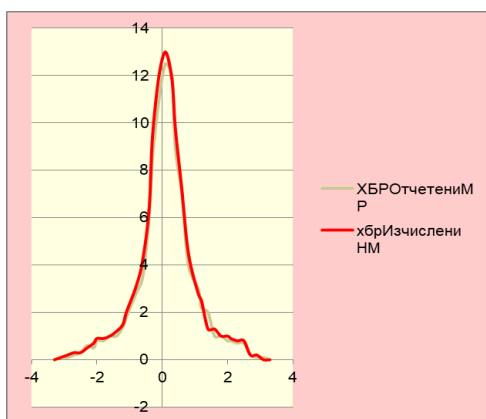
Обучението на мрежата финализира на етап, при който се определя минимума на функцията на грешката. Променяйки коефициентите на теглата след всяка следваща итерация се достига до стойност, клоняща към нула.

Последният етап при създаването на мрежата, с оглед нейната универсална приложимост при реализиране на симулации, е конвертиране и в Matlab/Simulink формат, представен на фиг.3.19.

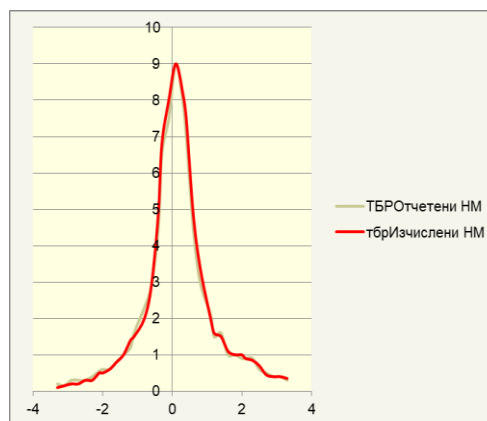


Фиг.3.19. Конвертиране в Matlab/Simulink формат.

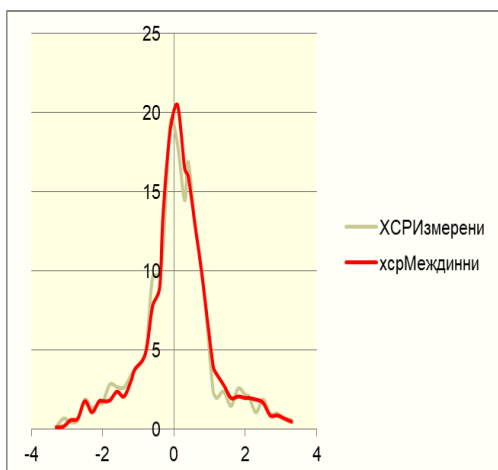
На фигури 3.20, 3.21, 3.22 и 3.23 е направена съпоставка между числените резултати, получени от моделите, и известни данни от аналогични сертифицирани софтуерни продукти. Резултатите, представени със син цвят са известни, еталонни данни, а тези, представени в червено – получени от численото моделиране.



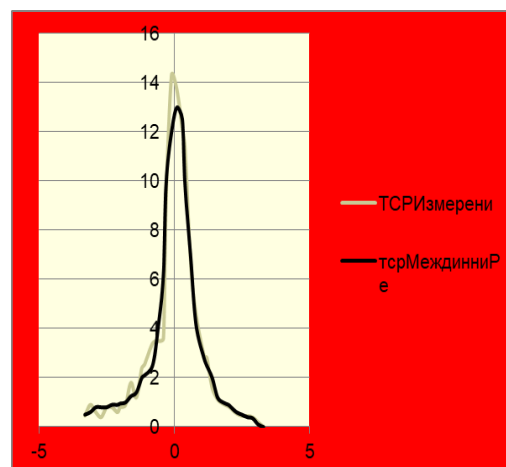
Фиг.3.20. Хоризонтално разположение на кабелите без, разстояние между тях



Фиг.3.21. Триъгълно разположение на кабелите без, разстояние между тях



Фиг.3.22. Хоризонтално разположение на кабелите, с разстояние между



Фиг.3.23. Триъгълно разположение на кабелите, с разстояние между тях

Реализираните изследвания и направен анализ показва, че максимална стойност на магнитното поле имаме непосредствено над оста на проводниците. Независимо, че имаме максимум, то неговата стойност е в рамките на пределно допустимата стойност.

3.6. Методика за вариантно изследване на магнитните полета около кабелна линия

Въз основа на проведения анализ и числени изследвания се предлага следната методика за анализ на магнитното поле около кабелна линия, средно напрежение, състояща се от следните основни етапи:

- Избор на сечение и тип кабелна линия, съобразно начина на полагане и средата на работа.
- Определяне номиналният ток на работа на избраният кабел.

- Извършване на прецизен избор измежду различни варианти за полагане на кабелните линии, в съответствие със зададените технически изисквания и локални инфраструктурни особености.
- При наличие на многовариантност на изследването е необходимо за всеки вариант извършване на индивидуален анализ.
- Изходния модел се преобразува в симулационен.
- Съставя се графичен/визуален модел с точно зададени координати.

ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА ТРЕТА

- Разработен е модел на невронна мрежа за изследване нивата на интензитета на магнитното поле около кабелна линия 20 kV, с отчитане взаимното разположение между проводниците.
- Извършена е съпоставка между числените резултати, получени от моделите с невронна мрежа и известни числени резултати, при което е получена разлика под 5%, което е предпоставка за точността за работа и приложението на моделите за извършване както за теоретични, така и за експериментални изследвания.
- Предложена е методика за вариантно изследване на магнитните полета около кабелна линия, средно напрежение.
- С предложената методика може да се изследват магнитни полета, възникващи около проводници при произволна комбинация на полагане.
- С използване на съвременни софтуерни средства е реализиран модел на температурното поле около кабелна линия 20 kV.
- За прецизна работа с реализираните модели и съставената методика е необходима точна оценка на влиянието на конфигурацията, в която се групират отделните фазови проводници от състава на кабелите.

ГЛАВА 4

4. ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ВИСШИ ХАРМОНИЦИ НА КАЧЕСТВОТО НА НАПРЕЖЕНИЕТО ПРИ ПРИСЪЕДИНЯВАНЕ НА ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ИЗТОЧНИЦИ.

Едно от основните изисквания към електроенергийната система (ЕЕС) е осигуряването на качествена електрическа енергия до крайните потребители. В България електрическата мрежа се захранва с променливо

напрежение, което в идеалния случай се характеризира със синусоидална форма на вълната. Факт е, че това не винаги е така.

4.2. Показатели на качеството на електрическата енергия

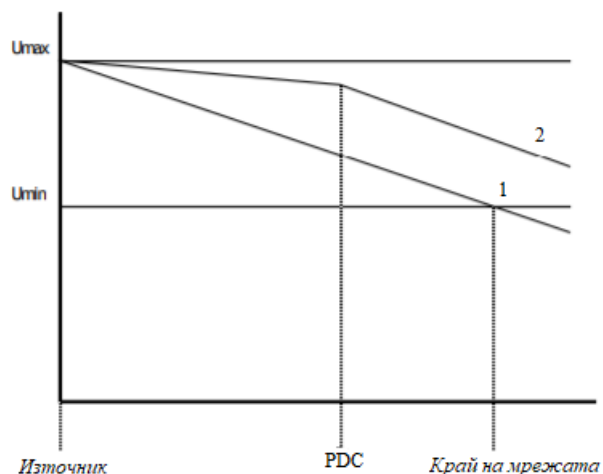
Стойностите и показателите на качеството на електрическата енергия са регламентирани в БДС EN 50160. Основните показатели, обект на контрол от страна на стандарта са:

- Честота на напрежението;
- Отклонения на напрежението;
- Бързи изменения на напрежението;
- Несиметрия на напрежението;
- Несинусоидалност на напрежението;
- Краткотрайно спадане на напрежението;
- Краткотрайни прекъсвания на напрежението;
- Колебание на напрежението;
- Продължителни прекъсвания на напрежението;
- Фликер;
- Висши хармоници.

4.4. Ефект на хармониците от фотоволтаични системи

Преобразуването на слънчевата енергия в електрическа от фотоволтаични системи се явява изключително евтин и бърз метод за получаване на електрическа енергия, чрез използване на възобновяем енергиен ресурс за много държави.

Характерните особености на фотоволтаичните системи са способността им да подобряват работата на електроенергийните системи чрез компенсиране пада на напрежение във възли от ЕЕС. Наличието на децентрализирано генериране в мрежата води до увеличаване на нивото на напрежение на мястото на присъединяване и по този начин променя профила на разпределение на това напрежение фиг. 4.2.



Фиг.4.2.Напрежението на мрежата без (1) и с (2) децентрализирано генериране

4.5. Анализ на качеството на напрежението на фотоволтаична централа, присъединена към електроснабдителна система на промишлено предприятие

4.5.1.Описание на обекта на изследване

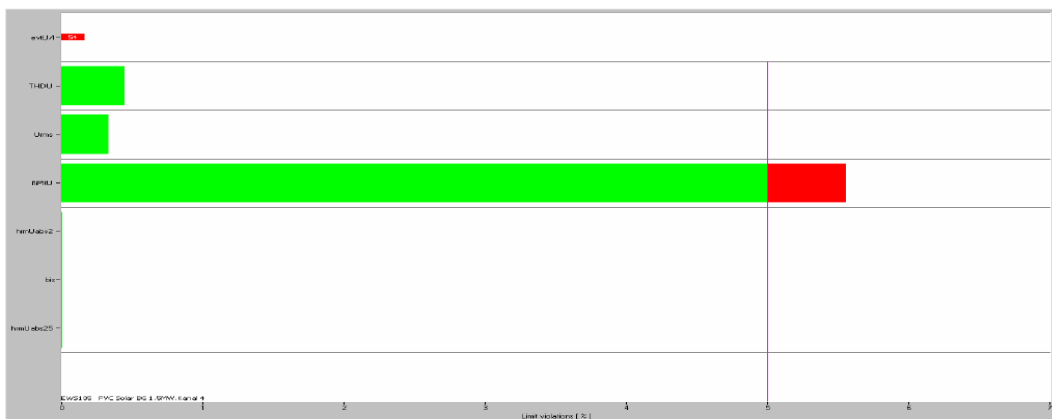
Въз основа на направеният анализ, в настоящата глава от дисертацията е реализирано изследване на качеството на напрежението, генерирано от фотоволтаична централа, която е присъединена към промишлено предприятие. Произвежданите мощности се използват за автономно захранване и собствени нужди на територията на обекта.

4.5.2. Измерване

Предмет на изследване е нивото на внесените в електрическата мрежа висши хармоници. За целта са направени измервания на клеморедната група за вторични вериги на електромера. Измервателният уред е инсталиран трифазно. Напрежението е индиректно изведено чрез (НТ 20000/ $\sqrt{3}$ /100 $\sqrt{3}$ /100/3V). За измерването на токовете са използвани амперклеци с обхват 1-10А (ТТ 40/5 А).

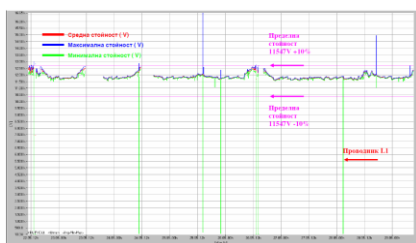
4.5.3. Получени резултати след извършени измерванията

Данните от измерванията са представени в графичен вид. На фиг.4.4 е представена статистическа извадка за стойностите на линейното напрежение между линии 1 и 3. По време на работа се установява наличие на хармоници извън пределно допустимите стойности съгласно БДС EN50160.

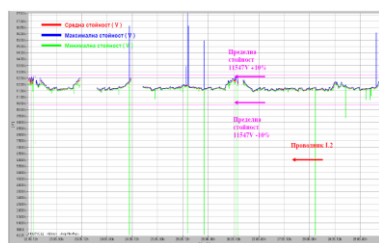


Фиг.4.4. Статистическа справка за линейното напрежение U_{L1-3} съгласно БДС EN 50160 .

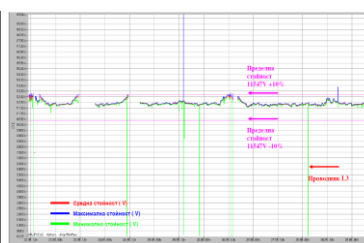
Вертикалната виолетова линия показва пределната стойност за измерваните величини според стандарта за качество на напрежението БДС EN50160 (95% от всички измерени стойности//величини трябва да са в рамките на толерансите). Измерваните величини, според БДС EN50160, са отразени върху лявата Y-ос като зелени полета. Ако по време на измерването са се нарушили пределно допустимите стойности, то измерваните величини, които са в толеранса, са представени също като зелени полета в проценти. Ако характеристиките на напрежението не отговарят на стандарта БДС EN50160, то зелените полета преминават в червени след допустимата стойност, която е означена с виолетова линия. От фиг.4.5 до фиг. 4.7 е представено пофазно реализирано измерване на стойностите на нивата на напрежение в трите изследвани фази. Анализът на стойностите за продължителен период от време показва преобладаващо изменение на напрежението извън пределно допустимата минимална стойност. Причина за спада на напрежението извън регламентираните стойности се дължи както на краткотрайни промени в метеорологичните условия, така и на частично кратковременно аварийно изключване на инверторните групи.



Фиг.4.5
Фазно напрежение U_{L1}



Фиг.4.6
Фазно напрежение U_{L2}



Фиг.4.7
Фазно напрежение U_{L3}

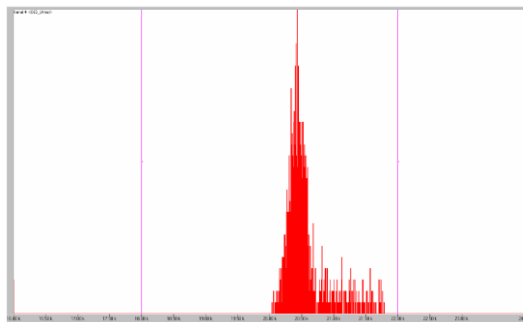
Изменението на линейното напрежение между линии 1 и 3 е показано на фигура 4.8. Анализът на изменението на напрежението във времето

показва относително стабилна работа на системата, като не се наблюдават съществени, екстремни изменения извън пределно допустимите стойности. Наблюдават се падове на напрежението извън пределно допустимите минимални стойности, както на фазните, така и на линейните напрежения.



Фиг.4.8

Линейно напрежение
 U_{L13}

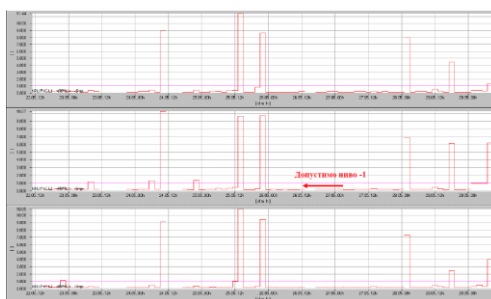


Фиг.4.9

Статистическо разпределение на
линейното напрежение

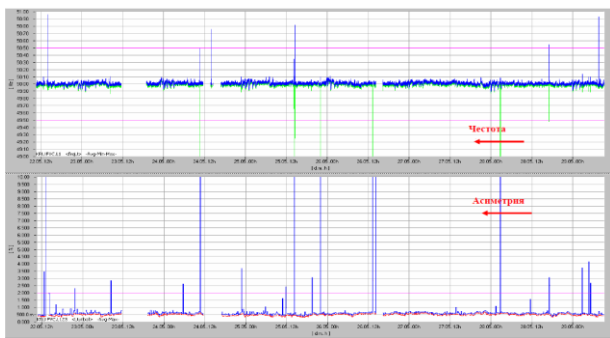
Извършена е статистическа обработка на резултатите от измерванията, която в графичен вид е представена на фиг. 4.9.

Кратковременните спадове на напрежението, представени графично от фиг. 4.5 до фиг. 4.7, пораждат наличието на фликер. Стойностите на фликера за трите фази са показани на фиг. 4.10.



Фиг. 4.10. Стойности на продължителния фликер (Пределна стойност 1 според БДСЕН50160)

Изменението на честота и симетрията на напрежението на изследваната заводска централа са показани на фиг. 4.11. Анализът на данните показва повишаване асиметрията на напрежението в зоните на рязко спадане на честотата.



Фиг.4.11.

Честота и асиметрия на
Напреженията

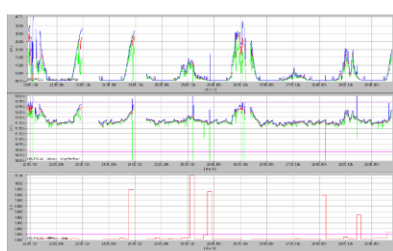


Фиг.4.12.

Общо съдържание на хармоници
Клирфактор/ THD на трите фази

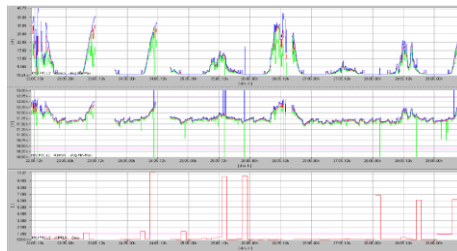
Общото съдържание на хармоници в напрежението THD , показано на фиг. 4.12, по време на работа е в нормални граници.

Връзките между фликер, ток и нива на напрежение по фази са представени от фиг. 4.13 до фиг. 4.15.



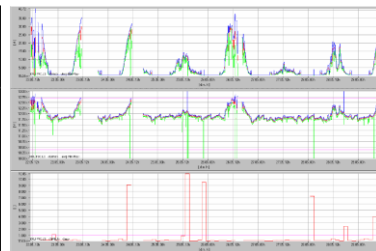
Фиг.4.13.

За фаза 1



Фиг.4.14.

За фаза 2



Фиг.4.15

За фаза 3

Резултатите от измерванията, показани на фиг. 4.13, 4.14 и 4.15 показват връзката между дълговременен фликер, ток и ниво на напрежение за фази 1, 2 и 3.

Направен е подробен преглед на кратковременните събития регистрирани в линейното напрежение **1-3**.

Според стандарт EN 50160 общото процентно съдържание на всеки един хармоник поотделно до 50-ти хармоник не бива да е повече от 8%.

При нормална работа на централа, базирайки се на резултатите получени от мрежовия анализатор се вижда, че нивото на хармониците в мрежата е в границата на пределно допустимите стойности.

ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА ЧЕТВЪРТА

- Реализираното изследване позволява да се направи анализ на качеството на напрежението в клон от електрическата мрежа с присъединен децентрализиран енергиен източник, захранващ промишлено предприятие.

- Общият коефициент на нелинейни изкривявания (THD или т.нар. клирфактор) на измереното посредством мрежов анализатор напрежение в по – голямата част от проведените изследвания не надвишава пределно допустимите стойности.

- При присъединяване на децентрализирани фотоволтаични системи към съществуващите електрически мрежи, част от ЕЕС, е необходимо да се отчитат нивата на създадите се (следствие на преобразуващата апаратура (DC/AC инвертори) висши хармоници.

Необходимо е да се въведе изискване за изключване на PV централите при условие, че работят в режим, надвишавайки допустимите нива на хармонични смущения.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Най-съществените научно-приложни и приложни приноси, постигнати в дисертационния труд са:

- Създадени са модели на кабелни и въздушни линии чрез използване на програмна среда Matlab/Simulink/NNTool и ELEK™. Чрез реализираните модели са проведени числени експерименти за определяне интензитета на магнитното поле около въздушни и кабелни линии с различно натоварване и различно номинално напрежение.
- Чрез прилагане на нови научни методи и способности са реализирани изследвания за определяне пределно допустимите стойности на интензитета на магнитните полета около кабелни и въздушни линии. Направените изследвания потвърждават получени, известни резултати и факти.
- Анализирани са нивата на генерираните електромагнитни полета около кабелна линия, средно напрежение и е извършено числено моделиране.
- Реализираните модели предоставят възможност за тяхното успешно приложение за извършване както на теоретични, така и на

експериментални изследвания. Същите биха могли да се използват при проектиране и изграждане на въздушни и кабелни линии.

- Разработена е методика за вариантно изследване на магнитните полета около кабелна линия, средно напрежение, при произволна комбинация на полагане на проводниците.
- Извършени са измервания и е направен анализ на качеството на електрическата енергия и са определени нивата на хармониците генерирани от вътрешнозаводска фотоволтаична централа, захранваща директно производствено предприятие.
- Направените измервания и последващ анализ на качеството на напрежението доставяно към обследваното производствено предприятие, не показват съществени отклонения от пределно допустимите нормени стойности съгласно БДС EN 50160.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Методиева И., Божков Ст., „Съвременни средства за мониторинг на въздушни линии и децентрализирани енергийни източници“, Известия на съюза на учените, том 34, (1), ISSN 1311-2864, Сливен, 2019; стр.7-13
2. Методиева И. „Преглед на източниците на хармонични смущения в електрическите мрежи“ 2020; Известия на съюза на учените, том 35, книга 1, ISSN 1311-2864, Сливен, 2020; стр.27-31
3. Методиева И. „Качество на електрическата енергия генерирана от фотоволтаична система“ 2020; Известия на съюза на учените, том 35, книга 1, ISSN 1311-2864, Сливен, 2020; стр.21-26
4. Ивелина Методиева, Стоян Божков „Използване на специализирани инженерни софтуерни продукти при дистанционно обучение на студенти по електротехника“; Известия на съюза на учените, том 35, книга 2, ISSN 2682-9827, Сливен, 2020; стр.76-79
5. Методиева И. „Симулационен анализ на електромагнитните полета генерирани от кабелна линия средно напрежение“ , Федерация на научно – техническите съюзи в България, ISSN: 1314-8931, София, 2020, стр.11-17
6. Metodieva I, Bozhkov St. “Neural networks use for analysis of magnetic fields around a medium voltage cable line” ,International Journal of Engineering and Science Invention, ISSN: 2319-6734, Volume 10, January 2021, p.40-43

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS

Ivelina Hristova Metodieva

The main objective of the dissertation is to develop simulation models of power lines, high voltage and cable lines, medium voltage and to analyze the impact on the generated electromagnetic fields and interference.

To achieve the objective are solved the main tasks:

In the first chapter the mechanisms of penetration of electromagnetic disturbances are considered and analyzed. The effects of high harmonics in power supply systems have been studied.

In the second chapter a module is created in MATLAB / Simulink environment of a temperature model of an air line. A simulation model has been developed to determine the influence of the intensity and magnetic induction of a high voltage overhead line. The model is applicable to both "static" and "dynamic" monitoring. In combination, through the interconnection between them, a simulation is made with the desired end result - the level of electromagnetic interference below the lowest point of the suspension of power lines with different rated voltages.

In the third chapter, using modern software, a model of the temperature field around a 20kV cable line is realized. A methodology for studying the magnetic fields arising around the cables at any combination of their laying is proposed. A model of a neural network has been developed to study the levels of the magnetic field intensity around a 20 kV cable line, taking into account the mutual location between the conductors.

In the fourth chapter is realized research, which allows to make an analysis of the quality of the voltage in a branch of the electric network with a connected decentralized energy source, supplying an industrial enterprise.