



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет Автоматика

Катедра Теоретична електротехника

маг. инж. Малина Колева Димитрова

**АНАЛИЗ НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО И ВЛИЯНИЕТО НА
ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ В БЛИЗОСТ ДО
ЕЛЕКТРОПРЕНОСНИ СЪОРЪЖЕНИЯ В УРБАНИЗИРАНА
СРЕДА**

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: Теоретична електротехника

Научен ръководител: доц. д-р Илона Ячева

СОФИЯ, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Теоретична електротехника“ към Факултет Автоматика на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 04.06.2019 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 03.10.2019 г. от 15,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-74 / 14.06.2019г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р инж. Валери Марков Младенов
2. Доц. д-р инж. Илона Илиева Ячева
3. Проф. д-р инж. Галина Петкова Чернева
4. Проф. д-р инж. Румена Димитрова Станчева
5. Проф. д-р инж. Никола Петров Михайлов

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Валери Марков Младенов
2. Проф. д-р инж. Румена Димитрова Станчева

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Автоматика на ТУ-София, блок №2, кабинет № 2350.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Теоретична електротехника“ на факултет Автоматика. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Малина Димитрова

Заглавие: Анализ на разпределението и влиянието на електромагнитно поле в близост до електропреносни съоръжения в урбанизирана среда

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

С развитието на техническия напредък и навлизането на огромен брой нови технологии, свързани с получаване, преобразуване и предаване на електромагнитна енергия, естествената природната среда се променя и деформира съществено, като нивата на “електромагнитно замърсяване” в урбанизирана среда надвишават десетки и стотици пъти естествения геомагнитен фон на Земята. Така, въпросите за степента на електромагнитно замърсяване, вредата от наличието му и възможностите за ограничаване на породените от него негативните ефекти, стават все повече и все по-актуални.

Основен дял в електромагнитното замърсяване имат нискочестотните полета, с промишлена честота 50-60Hz, създавани от енергопреносните линии. Повсеместното им разпространение определя значимостта на темата, а от там и огромният интерес към нея. Редица изследвания показват негативното влияние на тези полета върху мозъчната и сърдечната дейност на хората, нормалните стадии на растеж на растенията и жизнения цикъл на животните, като опасното въздействие е свързано със способността на електромагнитното поле да променя биологичните характеристики и нормалното съзряване на клетките на живите организми.

Мотивация за изследванията в настоящата работа е необходимостта от реалистичен анализ и преценка на рисковите въздействия на електрическото и магнитното поле върху различни обекти в областта, разположена в близост до енергопреносни линии.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основната цел на дисертационния труд е на базата на прецизно числено моделиране на електромагнитното поле в близост до електропровод високо напрежение, с отчитане на реалната 3-мерна геометрия на линията, включваща наличие на провес и допълнителни биологични обекти в областта, да се направи оценка на разпределението на полето и влиянието му, с оглед на възможните негативни въздействия върху околната среда.

Основни задачи, които трябва да бъдат решени при работата по темата на дисертационния труд:

1. Да се формулира математически модел за анализ на електрическо поле, създадено от електропровод, при наличие на допълнителни обекти в изследваната област, със свойства съответстващи на живата природа и на негова база да се изгради 3-мерен симулационен, параметричен модел по метод с крайни елементи, позволяващ анализ на полето при промяна на геометрични и режимни параметри на линията и включване на допълнителни обекти с различни свойства.

2. На базата на „числени експерименти” да се направят изследвания за разпределението на електрическото поле в близост до електропровод 400kV при различни стойности на геометрични параметри на линията (дължина на участъка между две окачвания, височина на окачването и височина на провеса), като се анализира полето по протежение на зони на наблюдение, представляващи повърхности или линии, на височина съответстваща на височина на човек или органи на човешко тяло.

3. Да се направи проверка за достоверността на компютърния модел посредством сравнителен анализ на данни за разпределението на електрическото поле, получени при численото моделиране, с публикувани в литературата експериментални данни и данни от моделиране.

4. Да се моделира разпределението на електрическо поле в околността на електропровод 400kV по протежение на наблюдателна повърхност, за различни конфигурации на изследваната област: без допълнителни обекти; при наличие на човек точно под и на разстояние от оста на линията; при присъствие на човек и друг обект на различни отстояния от линията.

5. Да се формулира математически модел за анализ на магнитно поле, създадено от електропровод и на негова база да се изгради симулационен параметричен модел за определяне на разпределението на полето по метод с крайни елементи, който отчита дефазирването на 120° на трифазните токове и има възможност за промяна на геометрично разположение на проводниците на линията и разстоянията между тях.

Методи за изследване: Изследванията на електромагнитното поле се осъществяват посредством числени експерименти, с формулираните математически и изградени по метод с крайни елементи, 2-мерни и 3-мерни симулационни модели на времезависимо електрическо и квазистационарно магнитно поле в околността на електропровод. Моделите са параметризирани и позволяват изследване на полето при различни стойности на параметри, определящи геометрични размери, режим на работа и свойства на допълнителни обекти в областта.

Научна новост

Новост в представените изследвания са:

— 3-мерно моделиране, което позволява отчитане на реалната геометрия на линията, включваща провес и моделирането на допълнителни обекти в областта, които поради проводящите си свойства (съответстващи на живата природа) деформират разпределението на полето;

— Предложеният подход за подобряване на точността на моделиране, основан на вторичен анализ на електрическото поле в област около човека, със значително по-малки размери от тези на линията, при

който за гранични условия се използват стойности на полето, получени при анализа на цялата област.

Практическа приложимост

Доброто познаване и реалната оценка на нивото на електромагнитното поле, генерирано около електропреносните линии, позволява да се прогнозираат евентуалните негативни ефекти и да се потърсят възможности за контрола и неутрализирането на отрицателните последици, както за живите организми, така и за техническото оборудване.

Апробация

Резултатите от изследванията в дисертационния труд са докладвани на български и международни конференции:

- 10-th, 11-th и 12-th Summer School “Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering”, Созопол, 2014г., София 2016г. и София 2018г;
- Международна научна конференция „Автоматика”, Созопол 2017;
- XIX International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, July 16 – 19, 2017, Ilmenau, Germany.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 5 статии, от които 1 е самостоятелна.

Публикациите са в издания, както следва: 3 в Сборник доклади от 10-th, 11-th и 12-th Summer School “Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering”, 1 в Годишник на ТУ-София и 1 в списание COMPEL (реферирано в Scopus, с импакт фактор).

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 127 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 127 литературни източници, като 96 са на латиница и 15 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 53 фигури и 6 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Влияние на електромагнитно поле върху здравето на хората и състоянието на живата природа

Основна съставна част на тъканите в живата природа са течни, проводящи субстанции: протоплазмата в клетките, междуклетъчните течности, лимфата и кръвта. Същевременно част от тъканите имат силно изразени изолационни свойства (например клетъчните мембрани). Това означава, че взаимодействието на живите организми с външно електромагнитно поле е взаимодействие на електромагнитно поле с проводящи и заредени тела, като възбуденото в клетките електрическо поле поражда и възможност за протичане на токове. Влиянието на ЕМП се проявява на различни нива - субклетъчно, клетъчно, ниво-органи и цялостен организъм. При това колкото по-сложен е организъмът, толкова по-висока е и неговата чувствителност към наличието на електромагнитно поле.

Най-често, изкуствено създадените в резултат от човешка дейност, електромагнитни полета не предизвикват никакви особени усещания и могат да останат незабелязани при липса на измервателна апаратура. За съжаление обаче, тяхното влияние върху хората, растителния и животинския свят е значително и то в негативен аспект.

Обхватът на негативните реакции на организма и заболяванията при хората е много широк, но като най-уязвими за вредното влияние на ЕМП се определят нервната, имунната, ендокринната и половата система. Изкуствените ЕМП водят до десинхронизация на функционалните процеси в човешкото тяло, особено когато честотата на полето е близка или съвпада с честотата на биоелектричната активност на определени човешки органи (мозък, сърце и др.). ЕМП имат и доказано мутагенно действие (повреждане на структурата на генома). Налице са много изследвания, доказващи тясна връзка между най-актуалните за съвременното общество сърдечно-съдови и ракови заболявания и „електромагнитното замърсяване”.

Механизмът на опасно въздействие на техногенните електромагнитни полета върху растенията и животните е аналогичен на този при хората, т.е той предизвиква промени в биологичните характеристики и процесите на формиране и растеж на клетките на живата тъкан и разстройва и десинхронизира работата на централната нервна система.

Електропреносните линии – един от най-важните източници на електромагнитно замърсяване в урбанизираните територии

Електропреносните линии са един от най-значимите източници на допълнителни електромагнитни полета, създавани от човешката дейност. В околността на тези линии се възбуждат и разпространяват електромагнитни полета с промишлена честота (50-60Hz), които са много силен фактор,

влиещ върху състоянието на всички биологични обекти, които попадат в тяхната зона на влияние.

Здравето на човек се засяга при относително дълъг престой в областта на електропроводите. Краткосрочната експозиция (минути) може да доведе до отрицателна реакция само при свръхчувствителни хора или хора с определени видове алергии. При продължителна експозиция (месеци, години) на хората в електромагнитното поле на електропроводи, могат да се развият заболявания на сърдечно-съдовата, нервната и ендокринната системи, а сред дългосрочните ефекти се нареждат и онкологични заболявания.

Санитарни норми и санитарно - защитни зони в околността на електропроводи

За да се намалят рисковите въздействия на електрическото и магнитното поле, се определят стандарти за допустимите нива на стойностите на електрическото поле и стойностите на магнитното поле. Допустимите нива са определени съответно като гранични стойности за случай на краткосрочно въздействие и гранични стойности за случай дългосрочно въздействие. В много страни от ЕС, както и у нас границите при дългосрочно въздействие са съответно 100 μT за магнитни полета и 5kV/m за електрически полета.

С цел защита на общественото здраве от електромагнитното поле създавано от електропроводи, се определят санитарно-защитни зони в околността на линията, като ширината им се определя в зависимост големината на напрежението. В Таблица 1.4 са указани границите на санитарно защитни зона в околността на електропроводи.

Таблица 1.4

Напрежение на линията	10kV	35kV	110kV	330kV÷500kV	750kV	1150kV
Размер на санитарно-защитната зона	10m	15m	20m	30m	40m	55m

При проектирането на линии с напрежение 750 kV и 1150 kV се налагат допълнителни изисквания относно разстоянието от оста на линията до границите на населени пунктове. Минималното разстояние е 250 m за линия с напрежение 750kV и 300m за линия с напрежение 1150kV.

Анализ на използваните методи, подходи и проблеми при изследване на електромагнитно поле в околността на електропровод

Анализът на публикуваните по темата разработки показва нарастване, както на броя изследвания, така и на техния обхват. Темата представлява интерес за изследователи от различни сфери: физици, електроинженери,

биолози, медици, т.е. тя е интердисциплинарна и предполага съвместна работа на различни специалисти.

Обект на изследване от една страна е нивото на интензивност и разпределението на електромагнитното поле и от друга, процесите на взаимодействие на полето с обектите на въздействие – хора, растения, животни, при това методите на изследване се отличават с голямо разнообразие.

Експерименталните изследвания дават възможност за оценка на разпределението на полето в околността на електропроводи с различни класове на напрежение, като получените резултати зависят и от конкретните особености в конструкцията и размерите на изследваните линии, както до известна степен и от терена, през който минава линията.

Методите за изследване посредством моделиране на разпределението на полето, използват различни подходи, но анализът се осъществява при стилизирано моделиране на областта и евентуални идеализации на конструкцията и размерите на линията. Прилаганите методи и подходи се разделят на две основни групи:

- *Аналитични подходи:* Най-често аналитичните подходи, прилагани при моделиране на електромагнитно поле, възбудено от електропроводи, са базирани на използване на основни закони и принципи, като закона Био-Савар, закона на Гаус, метод на огледални образи, принцип на суперпозицията и др. При такъв тип подходи се включват много идеализации, които не позволяват да се изследва реалната среда, както по отношение на свойства (разглежда се разпространение на полето в еднородна въздушна среда) така и на геометрията на линията. Анализираното поле се разглежда като плоско-паралелно, създадено от прави, успоредни на земята проводници. Освен това използването на такъв тип подходи не позволява да се вземе предвид наличието на други материални обекти в изследваните области, които могат да променят съществено разпределението на полето в областта.

- *Числени методи:* Основната част от публикуваните изследвания, в които електрическото или магнитното поле се моделира с помощта на числени методи, използват метода с крайни елементи (МКЕ). Най-често обаче, въпреки значително по-широките възможности на метода спрямо аналитичните подходи, полето отново се анализира като двумерно, в равнина перпендикулярна на проводниците, при което моделирането не съответства на реалната ситуация, тъй като не се отчита наличието на провес на проводниците и не се предвижда наличие на допълнителни обекти.

Проблеми при изследване на полето на базата на моделиране

Моделирането на електромагнитното поле дава възможност на базата на числени експерименти (за различни параметри на изследваната система) да се осъществят по-голям брой и по-разнообразни изследвания в сравнение

с експерименталните такива. Въпреки, че в тази насока се работи повече от 30 години, при моделирането на електромагнитното поле в близост до енергопреносни линии има проблеми и въпроси, които чакат решение, като основните са следните:

- Полето в областта около електропровода се разпространява в реална среда, съдържаща освен въздух много и различни по свойства обекти. Пренебрегването на този факт води до некоректно моделиране, особено що се отнася до електрическото поле;
- Разглеждането на геометрията на линията, като съставена от прави, безкрайно дълги, успоредни на земята проводници не позволява да се отчете наличието на реално съществуващия провес, чието влияние върху разпределението на полето в много случаи е съществено;
- Разпределението на полето се моделира в голяма област, като размерите на линията между два съседни опорни стълба, многократно надвишават размерите на елементите на линията и на допълнителните обекти (например човешка фигура). Тези диспропорции намаляват възможностите за прецизно моделиране с числени методи, които използват дискретизация на областта при анализ на разпределението на полето.

Изводи от литературния обзор

- Темата за „Анализ на разпределението и влиянието на електромагнитно поле в близост до електропреносни съоръжения в урбанизирана среда” е актуална и изисква прецизно моделиране на електромагнитното поле в близост до електропровода.
- С цел намаляване на рисковите въздействия са определени стандарти за пределно допустими нива на електромагнитни полета в населени територии и хигиенно - защитни зони около излъчващи обекти. Въпреки принципното спазване на предписанията и ограниченията, възникват непредвидени или не достатъчно добре изследвани ситуации, в които хора, растения и животни, както и апаратура се оказват под влияние на полета, значително надвишаващи определените норми. Тези ситуации не могат да се изследват експериментално, но могат да се моделират.
- Създаденото в близост до електропровод електромагнитно поле е с промишлена честота, което позволява поотделно анализиране на двете му компоненти: времезависимо електрическо и квазистационарно магнитно поле.
- При анализ на електрическото поле е необходимо полето да се моделира като 3-мерно, поради необходимостта от отчитане на следните факти:
 - Наличието на обекти от живата природа – хора животни, растения, деформира разпределението на полето, тъй като те са проводящи тела;

- Наличието на провес намалява значително разстоянието между земната повърхност и проводниците на линията в определени участъци и моделирането на полето като двумерно, плоскопаралелно, възбудено от прави, успоредни на земята проводници не е коректно.
- Областта на значимо влияние на магнитното поле (за разлика от тази на електрическото) не е с постоянни размери. Тя се определя от предаваната по линията мощност, т.е. от големината на тока в проводниците.
- Наличието на хора и други допълнителни, живи обекти в областта, не деформира разпределението на магнитното поле, поради факта, че по магнитни свойства те не се отличават въздуха. Освен това поради ниската честота (50Hz), проникването на магнитното поле в живите тъкани, не поражда негативния термичен ефект на индуктираните при високи честоти токове.

В резултат от анализа на проблема и изводите от публикуваните по темата разработки, бяха формулирани основната цел на дисертационния труд и задачите за осъществяването и.

Основната цел на дисертационния труд е на базата на прецизно числено моделиране на електромагнитното поле в близост до електропровод високо напрежение, с отчитане на реалната 3-мерна геометрия на линията, включваща наличие на провес и допълнителни биологични обекти в областта, да се направи оценка на разпределението на полето и влиянието му с оглед на възможните негативни въздействия върху околната среда.

Основни задачи, които трябва да бъдат решени при работата по темата на дисертационния труд:

1. Да се формулира математически модел за анализ на електрическо поле, създадено от електропровод, при наличие на допълнителни обекти в изследваната област, със свойства съответстващи на живата природа и на негова база да се изгради 3-мерен симулационен, параметричен модел по метод с крайни елементи, позволяващ анализ на полето при промяна на геометрични и режимни параметри на линията и включване на допълнителни обекти с различни свойства.
2. На базата на „числени експерименти” да се направят изследвания за разпределението на електрическото поле в близост до електропровод 400kV при различни стойности на геометрични параметри на линията (дължина на участъка между две окачвания, височина на окачването и височина на провеса), като се анализира полето по протежение на зони на наблюдение, представляващи повърхности или линии, на височина съответстваща на височина на човек или органи на човешко тяло.
3. Да се направи проверка за достоверността на компютърния модел посредством сравнителен анализ на данни за разпределението на

електрическото поле, получени при численото моделиране, с публикувани в литературата експериментални данни и данни от моделиране.

4. Да се моделира разпределението на електрическо поле в околността на електропровод 400kV по протежение на наблюдателна повърхност, за различни конфигурации на изследваната област: без допълнителни обекти; при наличие на човек точно под и на разстояние от оста на линията; при присъствие на човек и друг обект на различни отстояния от линията.

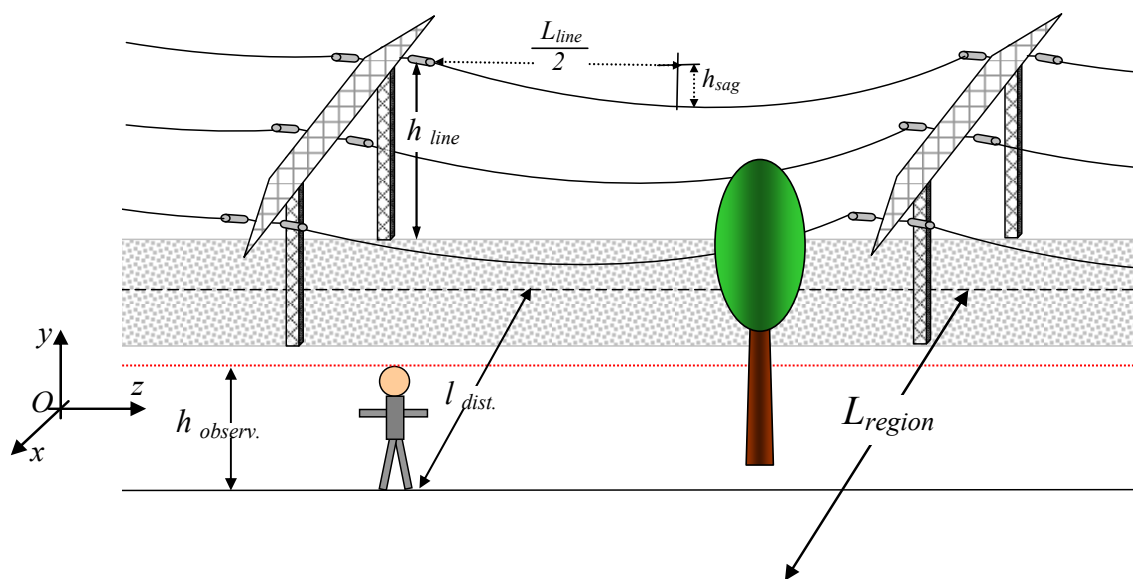
5. Да се формулира математически модел за анализ на магнитно поле, създадено от електропровод и на негова база да се изгради симулационен параметричен модел за определяне на разпределението на полето по метод с крайни елементи, който отчита дефазирването на 120° на трифазните токове и има възможност за промяна на геометрично разположение на проводниците на линията и разстоянията между тях.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ В ОКОЛНОСТТА НА ЕЛЕКТРОПРОВОД

2.1 Обект на изследване и особености на електромагнитното поле в околността на електропровод

Обект на изследване в настоящата работа е електромагнитното поле в близост до електропровод (Фиг.2.1), чието разпределение се моделира и анализира, като се отчита реалната геометрия на трифазната енергопреносна линия и възможността в областта да има допълнителни обекти (например хора, животни, дървета).

Изследванията са свързани с анализ на разпределението на полето, като за целта се то се моделира в областта на участък от линия с: височина h_{line} , дължина L_{line} , ширина $2L_{region}$, провес дефиниран с h_{sag} , допълнителен обект на разстояние l_{dist} .



Фиг.2.1. Принципна схема на моделираната област

Специално внимание при моделирането се отделя на зоната на наблюдение, която представлява линия или повърхност, на височина h_{observ} , по протежение на която се следи картината на полето, в зависимост от параметрите на моделирането. При анализа, като параметри се разглеждат геометричните размери, определящи конфигурацията на линията и допълнителните обекти, източниците на полето (ток в проводниците и напрежение на линията), както и материалните свойства на средата.

Важно условие за адекватното и прецизно моделиране на полето в близост до електропроводи е необходимостта от оценяване и отчитане на специфичните му особености и начина на взаимодействие с обектите от живата природа, намиращи се в тази околност.

Особености, свързани с характеристиките на пренасяната по електропровода електроенергия

- Електромагнитното поле в околността на електропровод е с ниска честота (50-60Hz), което позволява поотделно анализиране на двете му компоненти: времезависимо електрическо поле и квазистационарно магнитно поле;
- Ширина на зоната на значимо влияние:
 - за електрическото поле е постоянна и се определя от напрежението на линията.
 - за магнитното поле се променя в зависимост от графика (часово и сезонно) на предаваната по линията мощност, т.е от големината на тока .

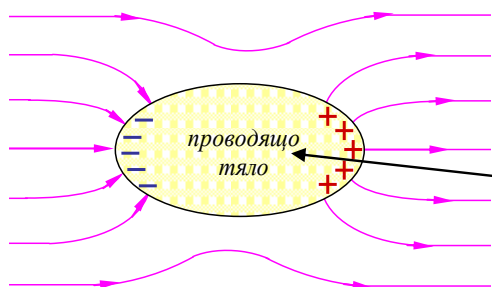
Особености, свързани с геометричната конфигурация на енергопреносната линия

Особеност в геометрията на линията е наличието на провес. Височината h_{line} на проводниците е максимална в точката на окачване и намалява с отдалечаване от опорните стълбове до средата на линията с големината на провеса h_{sag} . В много случаи височината на провеса е твърде голяма (10 и повече метра), което променя значително разстоянието до обектите, а от там променя и картината на полето.

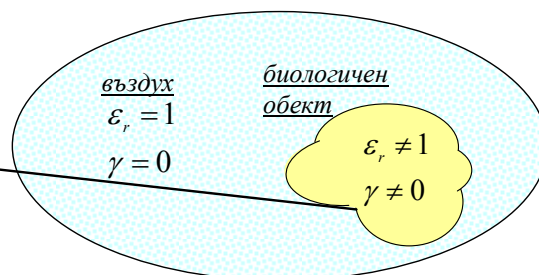
Особености, свързани с начина на взаимодействие на биологичните обекти с електрическото и магнитното поле, създадено от електропровода

- Специфична особеност на влиянието на електромагнитното поле върху биологичните обекти, е че двете му отделни компоненти електрическо и магнитно поле въздействат по различен на живата тъкан, чиито свойства зависят и се променят и с промяна на честотата на полето;
- Въздействието на електрическото поле върху биологичен обект (Фиг.2.3) по същество е въздействие на електрическо поле върху внесено в него проводящо тяло (голяма част от тъканите на биологичните обекти са проводящи субстанции). В зависимост от степента на проводимост на отделните части на тялото, полето прониква слабо или въобще не

прониква в него, повърхността на тялото се явява екипотенциална (Фиг.2.2), а структурата на електрическото поле се деформира силно;

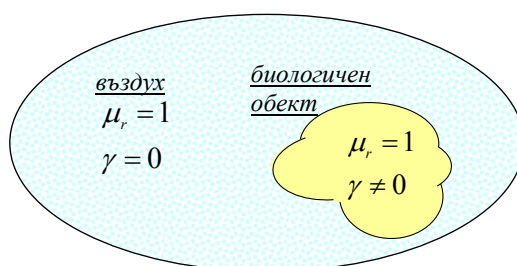


Фиг.2.2 Проводящо тяло внесено в електрическо поле



Фиг.2.3 Свойства на средата, в която се разпространява електрическото поле

- Магнитната проницаемост на биологичните обекти е аналогична на тази на въздуха (Фиг.2.4) и магнитното поле не се деформира от наличието им.



Фиг.2.4 Свойства на средата, в която се разпространява магнитното поле

- При въздействие на магнитното поле с промишлена честота върху биологичен обект, в в проводящите тъкани на тялото се индуцират токове, които зависят както от проводимостите на отделните му части, така и от интензитета на полето. Поради ниската честота обаче, въпреки наличието на тези токове, не се проявява опасният при високи честоти, термичен ефект, който уврежда живата тъкан.

2.2 Математическа формулировка на задачата за анализ на електромагнитното поле в околността на електропровод

Цел на моделирането на електромагнитното поле в дадена област е възможността за използване на модела за определяне на векторите на полето (интензитет \mathbf{E} и индукция \mathbf{D} на електрическото, като и интензитет \mathbf{H} и индукция \mathbf{B} на магнитното поле) във всяка нейна точка, при зададени геометрични параметри на областта и свойства на средата и геометрични параметри и разпределение на източника. Така моделът може да се използва за изследване на процесите в областта на базата на „числени експерименти”.

Базова за описанието на процесите и явленията, протичащи в областта в околностите на електропровод, в която се разпространява възбуденото от него електромагнитно поле, е системата уравнения на Максвел. Уравненията (2.1) представят системата на Максвел, записана съответно в интегрален и в диференциален вид.

Уравнения на Максвел в интегрален вид

Уравнения на Максвел в диференциален вид

$$\left| \begin{array}{l} \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = i(t) = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \\ \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \\ \oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oiint_S \mu \vec{H} \cdot d\vec{S} = 0 \\ \oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q(t) = \iiint_V \rho dV \end{array} \right| \begin{array}{l} \text{rot } \vec{H} = \vec{J} = \gamma \vec{E} + \rho \vec{v} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div } \vec{B} = 0 \\ \text{div } \vec{D} = \rho(t) \end{array} \quad (2.1)$$

Специфичните особености при разпространението на ЕМП в дадена област са в тясна зависимост от свойствата и характеристики на средата, в която се разпространяват. В математическото описание на процесите, тази зависимост се отчита посредством включването на уравнения за материалните връзки (2.2), където както следва участват,:

ε - диелектрична проницаемост на средата;

μ - магнитна проницаемост на средата;

γ - специфична проводимост на средата;

\vec{J} - плътност на тока в проводяща среда.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu \vec{H}; \quad \vec{J} = \gamma \vec{E} \quad (2.2)$$

Освен уравнения (2.1) и (2.2) при анализа на електромагнитните процеси се използват и скаларен електрически потенциал V и магнитен вектор потенциал \vec{A}_μ , дефинирани посредством зависимостите:

$$\vec{E} = -\text{grad}V \quad (2.3)$$

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}_\mu \quad (2.11)$$

Синусоидалното изменение на източниците на полето, с ъглова честота ω , позволява използването на комплексни величини в математическата формулировка на задачата. При определянето на основните уравнения в математическата формулировка се отчитат на особеностите на двете компоненти на полето и се въвежда оператора на Хамилтон:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{x}^0 + \frac{\partial}{\partial y} \vec{y}^0 + \frac{\partial}{\partial z} \vec{z}^0, \quad (2.6)$$

2.3 Математическа формулировка на модел на електрическото поле в околността на електропровод.

Основно уравнение при моделирането на времезависимото електрическо поле, разпространяващо се в среда с допълнителни обекти с различна проводимост и диелектрична проникваемост е уравнението:

$$\nabla \cdot \left(\left(\varepsilon - \frac{j\gamma}{\omega} \right) \nabla \dot{V} \right) = 0 \quad (2.9)$$

Така при анализа на полето се определя комплексната стойност \dot{V} на електрическия потенциал и на негова база разпределението на интензитета и индукцията на електрическото поле в областа.

При моделирането се приема, че в изследваната зона в близост до линията няма други източници на електрическо поле. Следователно може да се приеме гранично условие за нулев потенциал за земната повърхност ($y = 0$), както и за достатъчно отдалечените от електропровода гранични повърхности, ($y = 2h_{line}$ и $x = \pm L_{region}$). Повърхностите, определящи границите на разглежданата секция на електропровода ($z = 0$; $z = L_{line}$), се разглеждат като повърхности на симетрия на полето и за тях са наложени естествени гранични условия от типа $\frac{\partial \dot{V}}{\partial n} = 0$.

Специален аспект на работата е изследването на електрическото поле в присъствието на човек близо до линията. Човекът, както и други биологични обекти, се разглеждат като проводящи тела. Човешката фигура е представена с две хомогенни части от различни свойства - "глава" и "тяло". Такова разглеждане е допустимо и не води до съществена промяна в картината на полето, поради относително малките размери на човешкото тяло спрямо анализираната област и фактът, че електрическите свойства в различните части на човешкото тяло не се отличават рязко по стойност. Въведените при моделирането свойства (за честота 50 Hz) са както следва:

- "Глава": свойства, съответни на мозъчната тъкан - диелектрична проникваемост $\varepsilon_r = 1,21 \cdot 10^7$ и специфична проводимост $\gamma = 0,7$ S/m;
- "Тяло": свойства, на мускулната тъкан - $\varepsilon_r = 1,77 \cdot 10^7$ и $\gamma = 0,1$ S/m;
- „Разположено в близост до линията дърво“: хомогенен обект със свойства: $\varepsilon_r = 1,11 \cdot 10^7$ и $\gamma = 0,03$ S/m.

2.4 Математическа формулировка на модел на магнитното поле

Основно уравнение при моделирането на квазистационарното магнитно поле е уравнението относно комплексния магнитен вектор потенциал \vec{A}_μ :

$$\nabla^2 \vec{\dot{A}}_\mu - j\omega\gamma\mu \vec{\dot{A}}_\mu = -\mu \vec{\dot{J}}_e \quad (2.15)$$

При моделирането се отчита, че магнитното поле се разпространява в среда, в която наличните в областта биологични обекти имат свойства, идентични на въздух по отношение на магнитна проницаемост. Липсата на магнитни свойства означава, че наличието им не променя разпределението на полето. Също така, за стойностите на магнитното поле, значение има преди всичко големината на тока и взаимното разположение на проводниците, а не дистанцията до съответната точка, т.е. наличието или отсъствието на проводещо също не е определящо при анализа. Тези обстоятелства позволяват магнитното поле да се моделира като плоско-паралелно, без да е необходимо да се разглежда наличието на проводещи и наличие на допълнителни биологични обекти, като при това могат да се получат достатъчно достоверни резултати.

При такава постановка на задачата, разпределението на, плоскопаралелното магнитно поле, в област с магнитна проницаемост μ , проводимост γ , ъглова честота ω , при използване на комплексно представяне на векторите и потенциалите на полето, се описва с уравнението:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} - j\omega\gamma\mu \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_z, \quad (2.16)$$

където \dot{A}_z и \dot{J}_z са комплексите на вектор-потенциала и плътността на тока в линията, които имат ненулева компонента само по оста z .

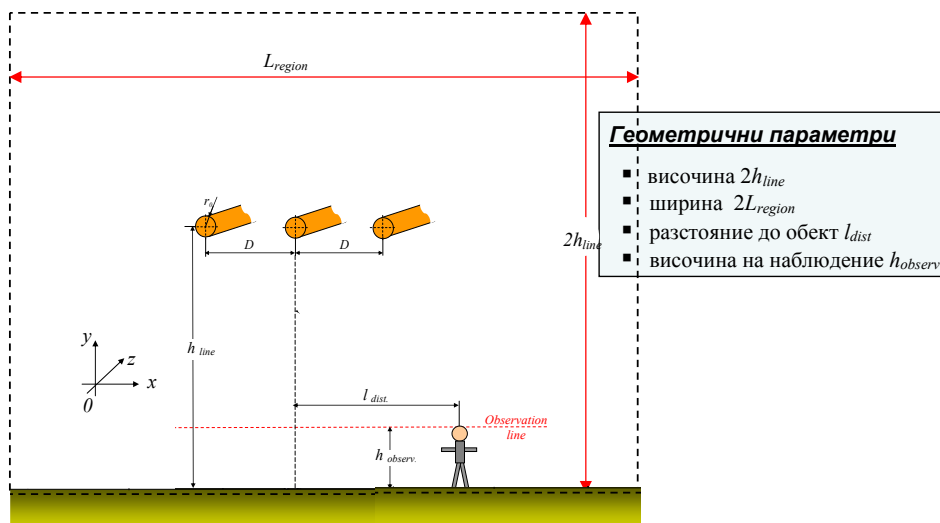
Граничните условия се определят при условие, че в изследваната зона няма други източници на магнитно поле. Следователно за земната повърхност, както и за достатъчно отдалечени от електропровода повърхности, може да се приеме условие за нулев потенциал $\dot{A}_z = 0$.

2.5. Компютърно моделиране на електромагнитното поле в околността на електропровод.

За числено моделиране на разпределението на електромагнитното поле и провеждане на числени експерименти, са изградени симулационни компютърни модели, на базата на метод с крайни елементи. В зависимост от размерността на анализираната област те са 2-мерни и 3-мерни, като се използват възможностите на софтуерните пакети QuickField и COMSOL Multiphysics, съответно за 2-мерен и 3-мерен анализ.

Важна стъпка в изграждането на моделите е дефинирането на параметрите на модела. Геометричните параметри определят размерите и разположението на изследваната област и включените в нея елементи. На фиг.2.8 и фиг.2.9 са показани областите, в които се моделира полето: при 2-мерен анализ на плоско-паралелно поле в равнина, перпендикулярна на

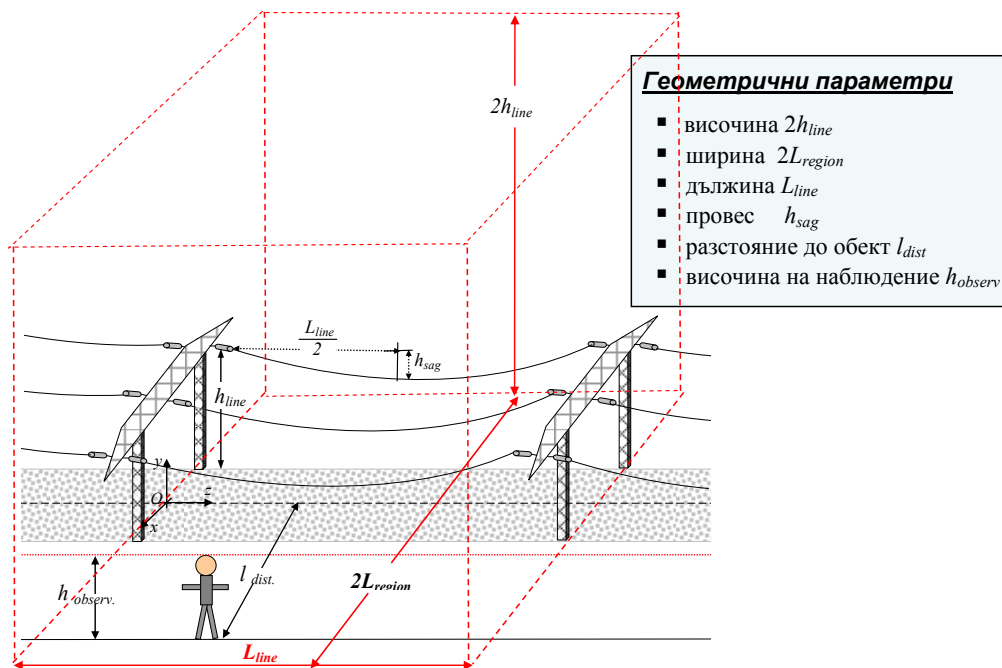
проводниците (фиг.2.8) и при 3-мерен анализ по протежение на електропровода, в областта между опорните стълбове (фиг.2.9).



Фиг.2.8 Схема на областта и геометричните параметри на модела, при 2D моделиране (в равнина xOy) на електрическото и магнитното поле.

Специално внимание се отделя на зоната на наблюдение (линия или повърхност, по която се следи разпределението на полето). Височината на тази зона съответства на височина на човешко тяло или негови органи и се задава като параметър на моделирането – h_{observ} .

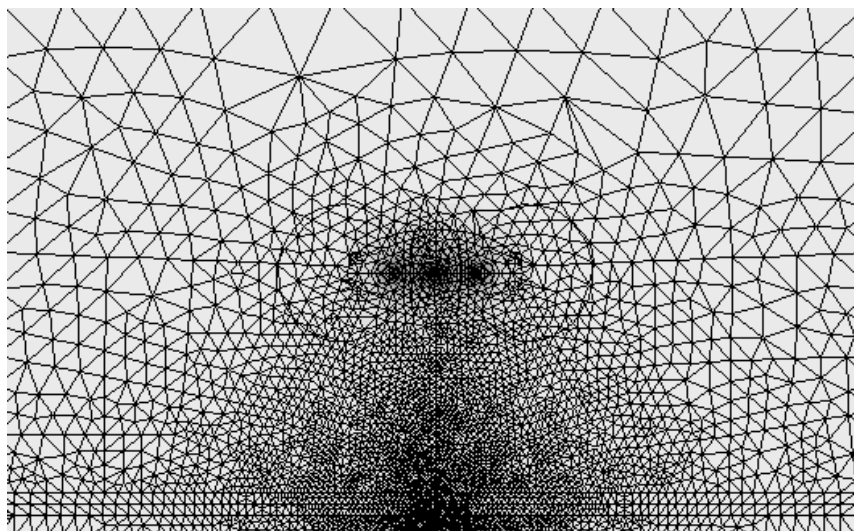
Параметрите, определящи свойствата на средата се задават за всеки обект от областта и могат да се променят. При моделиране на магнитното поле се задават магнитната проницаемост μ и специфичната проводимост γ . При моделиране на електрическото поле, параметри свързани със свойствата на средата са диелектрична проницаемост ϵ и специфичната проводимост γ .



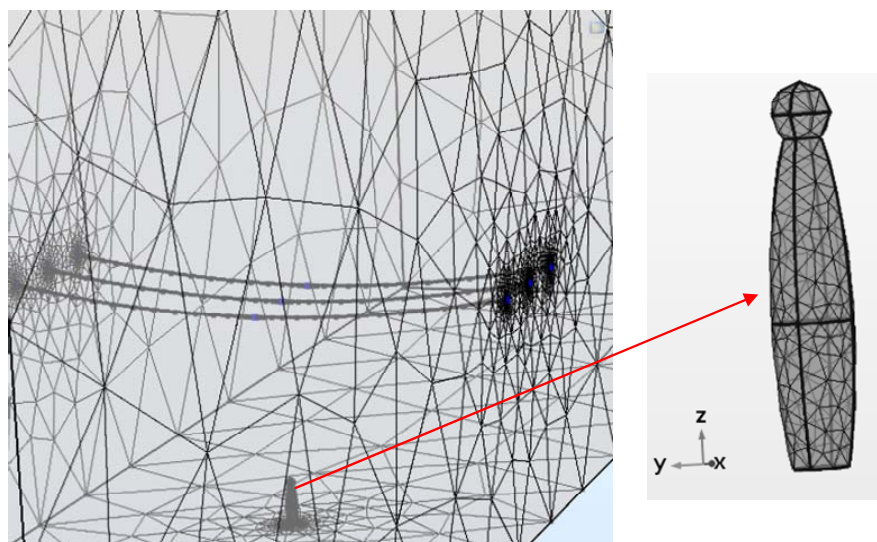
Фиг.2.9 Схема на областта и геометричните параметри на модела, при 3D моделиране на електрическото и магнитното поле.

Режимните параметри определят източника на полето и се задават в зависимост от вида на анализирания полет: за времезависимото електрическо поле са стойността на напрежението U и ъгълът на дефазироване α , а за магнитното поле са стойността на тока в проводника I и ъгълът на дефазироване α .

Прецизността при моделирането зависи от избора на мрежа от крайни елементи. В редица случаи е удачно да се увеличи допълнително гъстотата на мрежата в зоните представляващи особен интерес. Илюстрация на използваната при 2D моделиране мрежа, с допълнително сгъстяване в областта на наблюдение е показана на фиг. 2.11.



Фиг. 2.11. Мрежа от крайни елементи използвана при анализа на полето при 2D моделиране при отсъствие на допълнителни обекти в областта



Фиг. 2.12. Част от мрежата от 3D крайни елементи използвана при анализа на полето в областта и мрежата в стилизирана човешка фигура

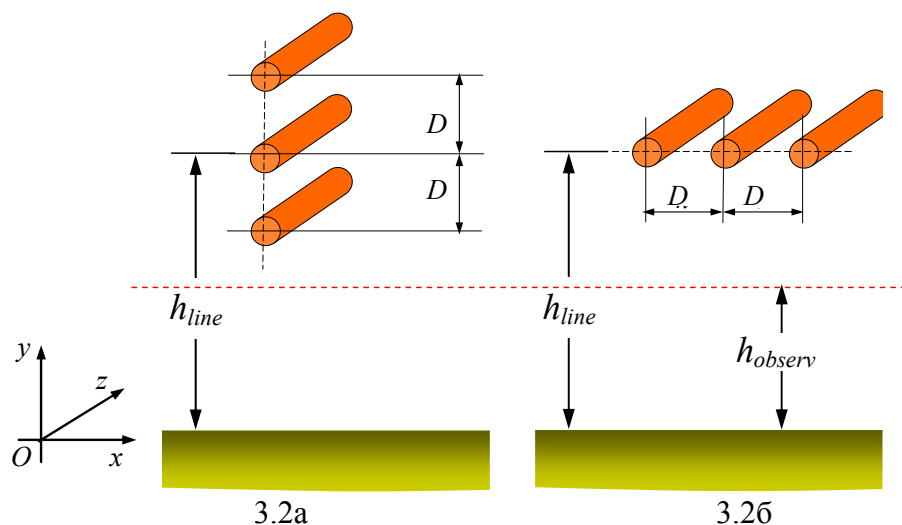
Фиг. 2.12 илюстрира част от мрежата при 3-мерен анализ на полето, с включена човешка фигура. Показан е вариант на стилизирана, геометрия на човешката фигура (само глава и тяло), която се използва при анализ на полето в цялата област.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНОТО ПОЛЕ В БЛИЗОСТ ДО ЕЛЕКТРОПРОВОД ПРИ ОТСЪСТВИЕ НА ДОПЪЛНИТЕЛНИ ОБЕКТИ

Анализът на електромагнитното поле в близост до електропровода, когато областта не включва наличие на допълнителни обекти се осъществява на базата на 2-мерно моделиране, на плоскопаралелно поле в равнината xOy (фиг.3.2) перпендикулярна на проводниците, като наличието на провес се отчита посредством намаляване на височината на линията. Тогава, изменящите се само по осите x и y магнитно и електрическо поле зависят единствено от големината на източника, отстоянието на линията от земята и разстоянията между проводниците.

3.2. 2D моделиране на магнитно поле в околността на електропровод

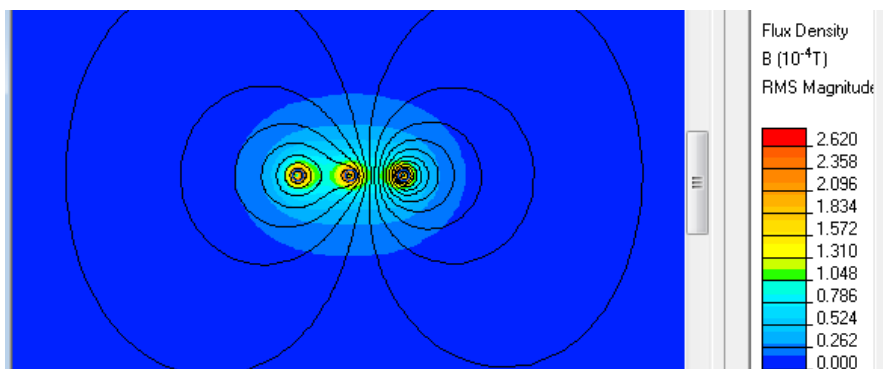
Моделирането на магнитното поле е осъществено за двата варианта на разположение на проводниците, показани на фиг.3.2а и фиг.3.2б. Трифазният електропровод се състои от три проводника, отстоящи един от друг на разстояние D , с големина I на дефазирани на 120° и променящи се с честота 50Hz токове в проводниците, при височина на линията h_{line} и височина на линията на наблюдение h_{observ} .



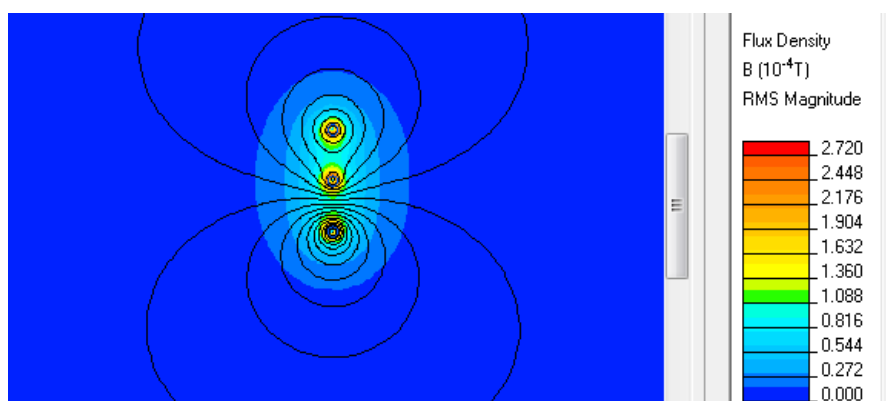
Фиг.3.2 Моделиране на полето като плоскопаралелно, при отсъствие на допълнителни обекти: 3.2а при хоризонтално и 3.2б при вертикално разположение на проводниците

За да се оцени степента на влияние на отделните параметри на двумерния модел, изследването е проведено за различни техни стойности: $D=2m \div 6m$; $I = 300A \div 1000A$; $h_{line}=12m \div 20m$. Като резултат са определяни стойностите на полето в точки с предварително зададени координати и разпределението на магнитната индукция по протежение на линии на наблюдение за три различни височини $h_{observ}=\{1m, 1.5m, 2m\}$.

Разпределението на магнитното поле при зададени параметри $D= 5m$, ток $I= 500A$ и $h_{line}=17 m$ е показано съответно на Фиг.3.4 и Фиг.3.5, съответно при хоризонтално и вертикално разположение на проводниците.

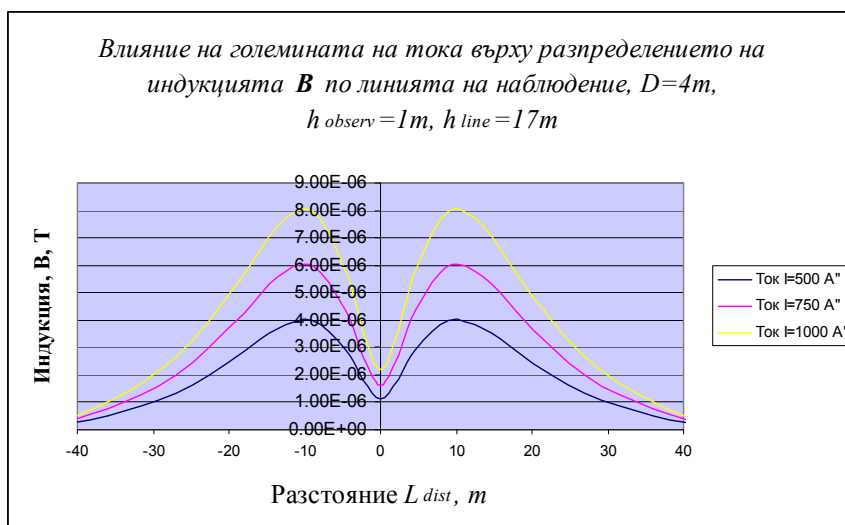


Фиг.3. 4. Разпределение на магнитното поле при хоризонтално разположение на проводниците



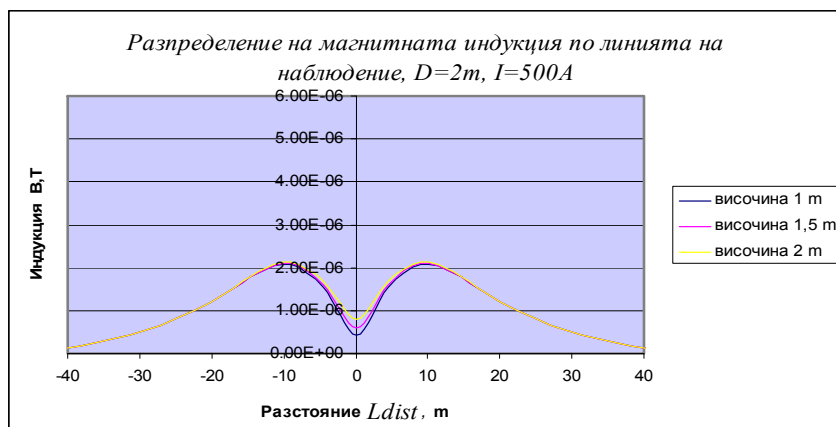
Фиг. 3.5. Разпределение на магнитното поле при вертикално разположение на проводниците

Влиянието на големината на тока върху разпределението на магнитната индукция, по линията на наблюдение е илюстрирано на Фиг.3.10. Изследването е осъществено при следните стойности на параметрите: $D=4m$; $h_{observ}=1m$; $h_{line}=17m$; $I=\{500A, 750A, 1000A\}$. Налице е значително влияние на големината на тока, като стойностите на полето нарастват с нарастване на неговата големина. Въпреки това, обаче магнитната индукция не надвишава допустимата норма.

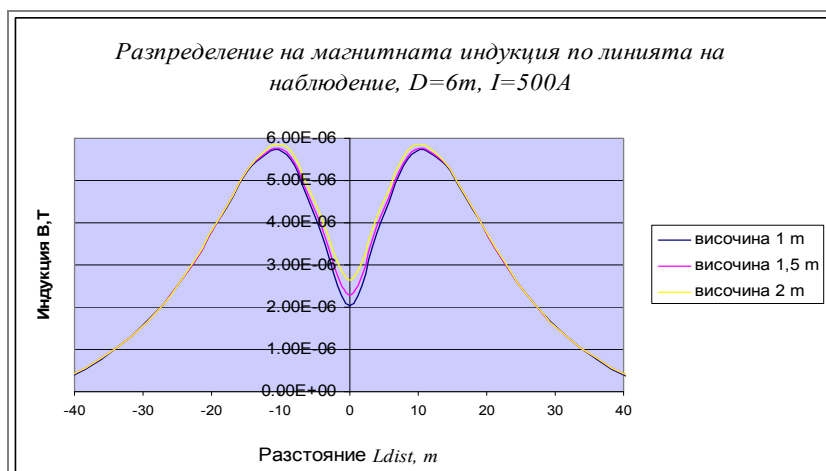


Фиг. 3.10 Разпределение на магнитното поле по линия на наблюдение на височина $h_{observ}=1m$ за различни стойности на тока в линията

Влиянието, което оказва разстоянието D между проводниците, на големината на магнитната индукция е анализирано на базата на числени експерименти, при височина на линията $h_{line}=17m$, ток в проводниците $I=500A$, за три стойности на $D=\{2m, 4m, 6m\}$, при три височини на линията на наблюдение $h_{observ}=\{1m, 1.5m, 2m\}$. Изследването показва, че при нарастване на разстоянието между проводниците е налице увеличение на стойностите на полето по линията на наблюдение - факт потвърден и в публикации на други автори. Получените резултати за разпределението на магнитната индукция по трите линии на наблюдение с различна височина са представени съответно на Фиг.3.11а за $D=2m$ и на Фиг.3.11в за $D=6m$.

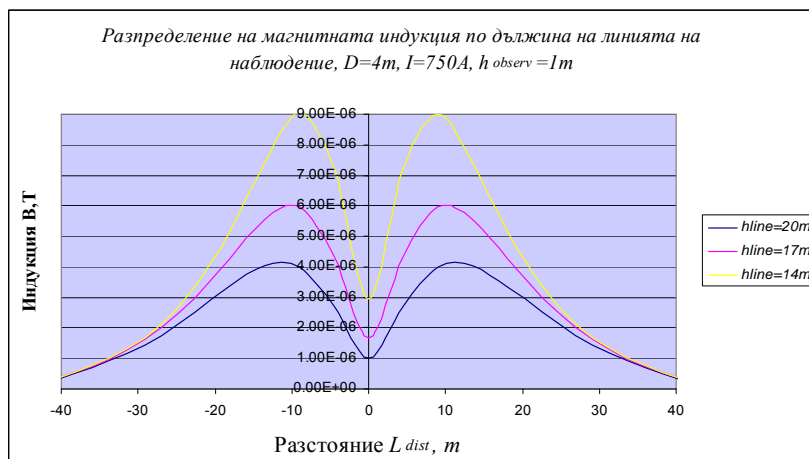


Фиг.3.11а



Фиг.3.11в

Фигура 3.12 представя изследване на магнитното поле по линията на наблюдение за различна височина на проводниците: $h_{line}=\{14m, 17m, 20m\}$. Изследването е на базата на числени експерименти при следните стойности на останалите параметри на модела: $D=4m$; $I=750A$; $h_{observ}=1m$. Такъв тип изследване може да се разглежда и като анализ на влиянието на провес, при 2-мерно моделиране на полето като по-малката височина на проводника съответства на по-голям провес. С намаляване на разстоянието между проводниците и земята, стойността на индукцията се увеличава, но отново не достига пределно допустимата норма от $25\mu T$.



Фиг.3.12

Изводи от изследването на магнитното поле

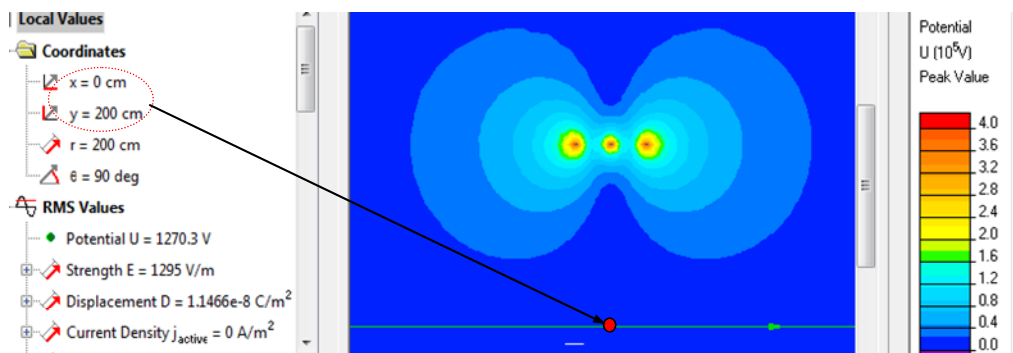
- Главен фактор, определящ стойностите на магнитното поле в близост до линията е големината на тока в проводниците, а не ширината на наблюдаваната зона. От геометричните параметри от значение е разстоянието между земята и проводниците, както и разстоянието между самите проводници. Стойностите на магнитната индукция не превишават допустимите норми, дори в случаите на максимално натоварване на линията.
- Изследванията могат да послужат не само за анализ на полето, но и за решаване на обратна задача за определяне на предавана по линията мощност на базата на измерено в отдалечена точка на наблюдение магнитно поле.

3.3. 2D моделиране на електрическо поле в околността на електропровод

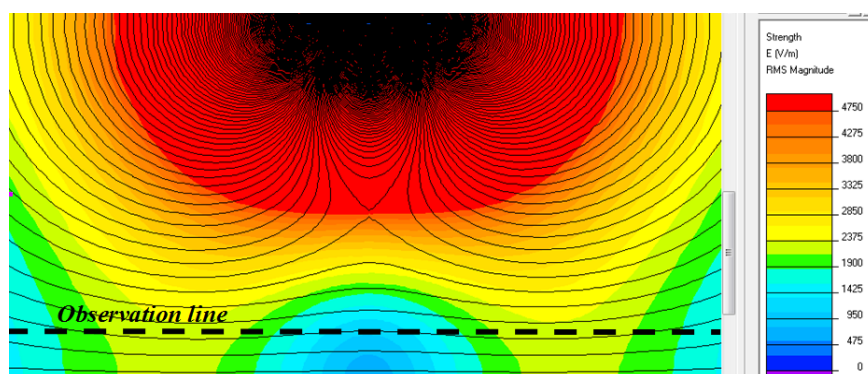
Време независимото електрическо поле, при липса на допълнителни обекти в околността на електропровод, е моделирано като двумерно, за конфигурация с хоризонтално разположение на проводниците.

Влиянието на провес се симулира с избора на по-малка стойност за височината на проводниците. Така изследването се провежда на базата на моделиране на електрическо поле, възбудено от трифазна линия, с напрежение 400kV, честота 50Hz и с височина $h_{line} = 10m$ и разстояние между проводниците $D = 3m$. При моделирането се анализира зона с ширина 40m в близост до електропровода, като разпределението на полето се определя по линия на наблюдение на височина $h_{observ} = 2m$ от земята.

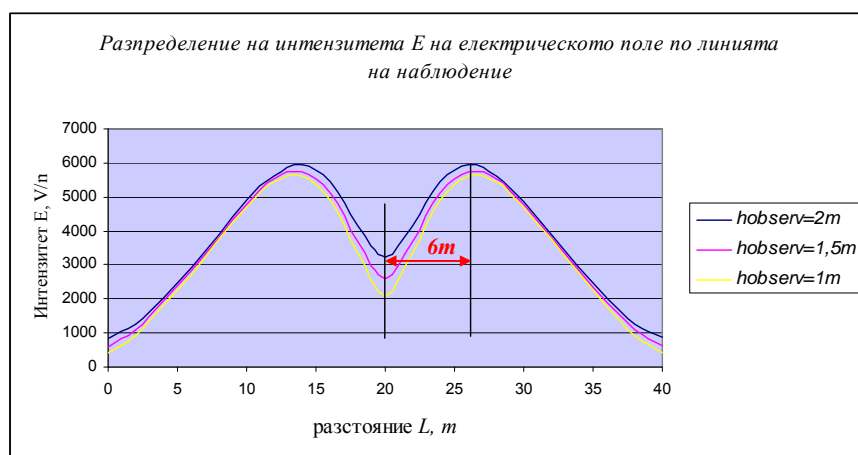
Фиг. 3.15 илюстрира моделиране на разпределението на електрическия потенциал и възможността за определяне на характеристиките и векторите на полето в произволна точка от изследваната област. Картина на разпределението на електрическия интензитет в изследваната област е представена на Фиг.3.16, а моделиране на полето по линия на наблюдение за три височини $h_{observ} = \{1m, 1.5m, 2m\}$ е показано на Фиг.3.17.



Фиг. 3.15 Разпределение на електрическия потенциал в изследваната област и определяне стойностите на полето в точка със зададени координати ($x=0m$, $y=2m$)



Фиг.3.16 Разпределение на електрическия интензитет в изследваната област



Фиг.3.17 Разпределение на електрическия интензитет E за $h_{observ}=\{1m, 1.5m, 2m\}$

Изводи от изследването на електрическото поле

- Анализирано е разпределението на електрическото поле в близост до електропровод, при липса на други обекти в областта на изследване. Изследването показва, че стойностите на полето в близост до оста на линията са много близки и леко надвишават допустимата норма от $5000V/m$.
- Поради това, че биологичните тъкани имат проводящи свойства, наличието на хора, животни или високи дървета, може да деформира полето и това може да доведе до значително надвишаване на допустимата норма.

3.4. Резултати от работата по трета глава

1. На базата на 2-мерен симулационен модел са проведени числени експерименти за моделиране на магнитното поле в близост до електропровод, при отсъствие на други обекти. Определяна е картина на разпределение на полето в зона с ширина 40m, като е отделено специално внимание на полевите характеристики в зоната на наблюдение и тяхната зависимост от зададените параметри.

2. На базата на изградения 2-мерен симулационен модел са проведени числени експерименти и е анализирано разпределението на електрическото поле за област, в която няма включени други обекти. Получена е цялостна картина на разпределение на електрическото поле, като е отделено внимание на разпределението и стойностите на полето по протежение на линия на наблюдение, съответстваща на човешки ръст или важни човешки органи.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКО ПОЛЕ В БЛИЗОСТ ДО ЕЛЕКТРОПРОВОД ПРИ НАЛИЧИЕ ПРОВЕС И ДОПЪЛНИТЕЛНИ ОБЕКТИ

4.2. 3D моделиране на електрическо поле в околността на електропровод

Основна цел на изследването е тримерно моделиране на разпределението на електрическото поле в околността на електропровод, с отчитане наличието на провес и анализ на разпределението му на различни разстояния от линията както и промяната в това разпределение от наличието на хора и други проводящи обекти в областта.

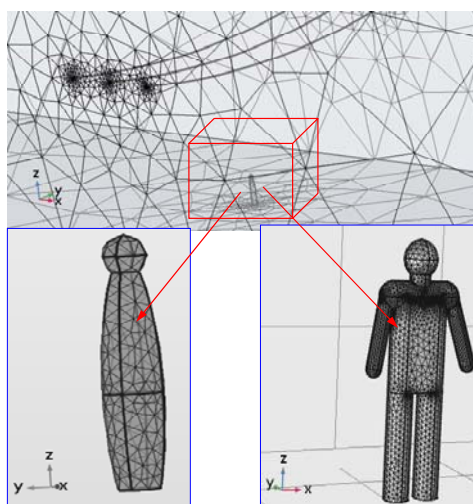
Моделирането се осъществява при различни стойности на параметрите на модела: $D = \{3\text{m}, 4.8\text{m}, 5.5\text{m}, 10\text{m}\}$; $h_{line} = \{15\text{ м}, 20\text{ м}, 24\text{ м}\}$; $L_{line} = \{150\text{m}, 300\text{m}, 320\text{m}\}$; $h_{sag} = \{3\text{m}, 7,5\text{m}, 12\text{m}\}$; $h_{observ} = \{1\text{m}, 1.8\text{m}, 2\text{m}\}$. Разглеждането на различни варианти позволява да се направи обстоен анализ на разпределението на полето за различни размери на областта, както и да се осъществи сравнение на получените резултати с изчислени и експериментални данни от литературата, като се сравняват варианти за идентични параметри на линията, при една и съща височина на зоната на наблюдение.

Особеност на изследването е въвеждането на нов подход при моделирането в област близка до човешкото тяло. Непропорционално големите разлики в размерите на човешкото тяло и линията водят до диспропорции при мрежата от крайни елементи и като резултат до известна неточност в определяне на полето в и около по- малките обекти. Поради това полето около човешката фигура се анализира в две стъпки:

1. Анализ на полето в цялата област с използване на стилизиран, опростен модел на човек (Фиг.4.3а), състоящо се само от глава и тяло;

2. Анализ на полето в сравнително малка област, при по-детайлно моделиране на човешкото тяло (Фиг.4.3б) с възможности за движение на

крайниците и заемане на различна поза. При това за гранични условия се използват стойности на полето, получени при анализа на цялата област.



4.3a)

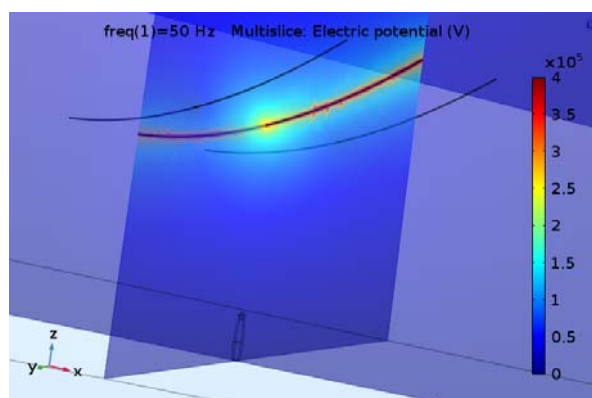
4.3б)

Фиг.4.3 Моделиране на стилизирана (4.3а) и по-реалистична (4.3б) човешка фигура

4.3. Резултати от 3D моделиране на електрическо поле в околността на електропровод

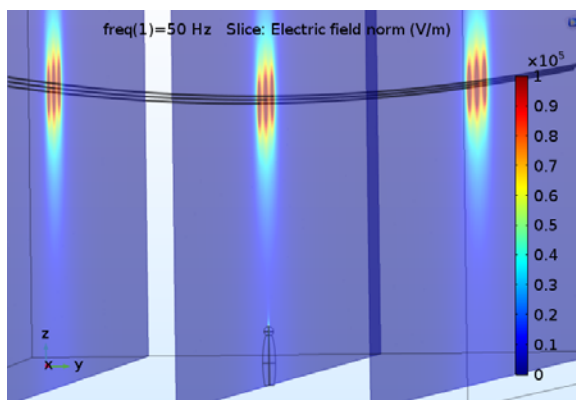
Представеното изследване е осъществено при следните стойности на параметрите, определящи съответната конфигурация на областта: $D=3\text{m}$, $h_{\text{line}}=15\text{m}$, $h_{\text{sag}}=3\text{m}$, $L_{\text{line}}=150\text{m}$.

На Фиг. 4.4 е показано разпределението на електрическия потенциал, като са визуализирани 2 плоскости, минаващи съответно по дължината на средния проводник и през човешката фигура. електрическото поле в равнина, перпендикулярна на проводниците.

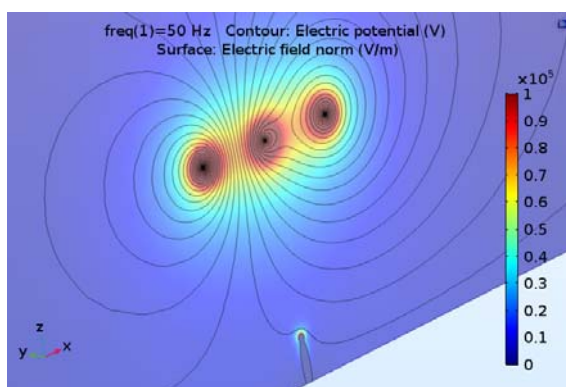


Фиг. 4.4 Разпределението на потенциала в изследваната област

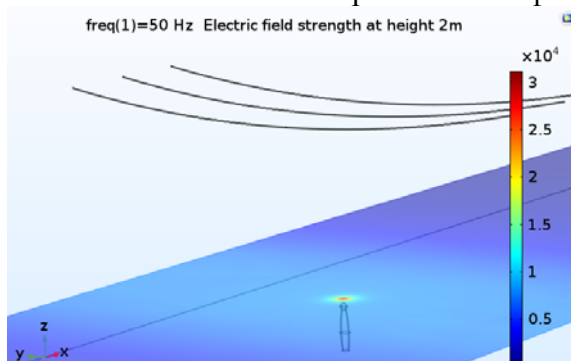
Резултати, илюстриращи моделиране на електрическото поле в областта, в която е включена и човешка фигура са представени на фиг.4.6 и Фиг.4.7. На Фиг.4.6 е показана цялата област, при наличие на човек под линията и са фиксирани три перпендикулярни на линията равнини. Фиг.4.7 и Фиг.4.8 илюстрират необходимостта от допълнителен анализ на полето в областта около човешката фигура. Вижда се увеличението на интензитета на електрическото поле в зоната около главата.



Фиг. 4.6 Картина на разпределение на електрическото поле в областта, включваща и човешка фигура за три фиксирани равнини, перпендикулярни на проводниците.



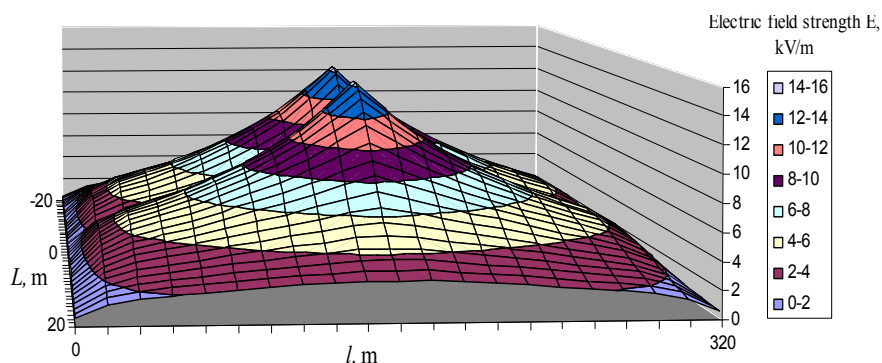
Фиг. 4.7 Картина на разпределение на електрическото поле в плоскост, перпендикулярна на линията и която минава през човешка фигура.



Фиг. 4.8 Електрическо поле в плоскост на височина 2м от земята.

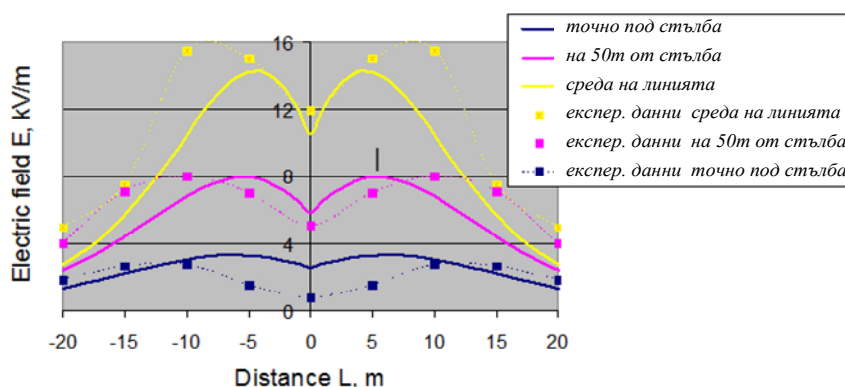
4.4 Сравнение на резултатите от моделирането с данни за полето, получени при експериментални и теоретични изследвания:

За да се потвърди достоверността на резултатите, получени при моделирането са направени допълнителни изследвания, при които се сравняват налични от литературата експериментални и симулационни данни с такива, получени при моделирането. На Фиг.4.10 е представено изследване на разпределението на електрическото поле на височина 1.80 от земята за параметри на линията: $D=5,5\text{m}$, $h_{line}=24\text{m}$, $h_{sag}=11.5\text{m}$, $L_{line}=320\text{m}$. Избраната височина от 1,80 m отговаря на височината на данните от експерименталните изследвания. Резултатите показват, че поради наличието на силно изразен провес, в голяма част от областта интензитетът на електрическото поле неколkokратно превишава максимално допустимата норма.



Фиг. 4.10 Разпределение на интензитета на електрическото поле под електропровода в равнина на височина $h_{observ}=1.8$ m от земята, с площ 40m x 320m

Резултати, илюстриращи сравнение на получените при моделирането данни с публикувани експериментални данни за електропровод 400kV “Родопи” са представени на Фиг.4.11. Сравнението показва близки резултати, както по отношение на стойности, така и при разпределението на полето. Максималните стойности на полето са отместени встрани от оста на линията. Най-ниски са стойностите в близост до стълба, нарастват с отдалечаване от него и достигат максимум в средата на линията, под максималния провес, като стойностите на полето надвишават значително допустимата норма от 5kV/m и са неколkokратно по-големи от тези под стълба



Фиг.4.11 Сравнение на експериментални данни и резултати, получени при моделирането.

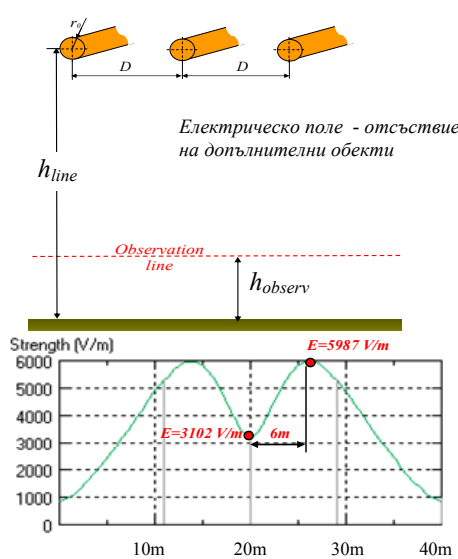
4.5 Моделиране на електрическото поле за различни варианти на разположение на допълнителни обекти в близост до електропровода

Промяната в разпределението на електрическото поле, когато в близост до линията има допълнителни обекти е изследвана на базата на числени експерименти за няколко възможни конфигурации на изследваната област:

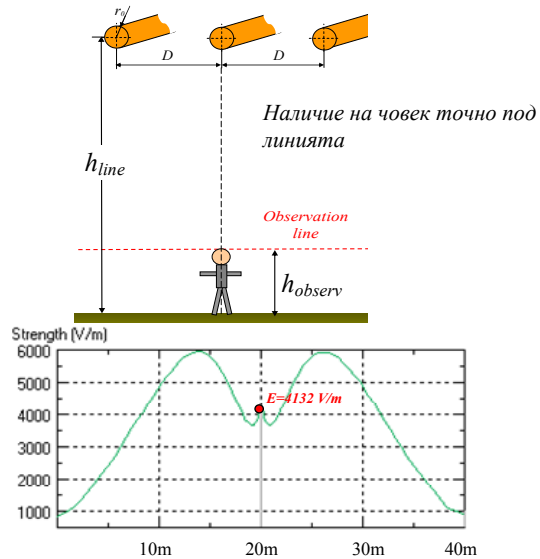
- Линия без допълнителни обекти в близката околност;
- Наличие на човек точно под електропровода;
- Наличие на човек на определено разстояние от линията;
- Наличие на човек и дърво на различни разстояния от линията.

Във всяка от изследваните ситуации се анализира зона с ширина 40 m и се определя електрическият интензитет по линия на наблюдение на височина 2m от земята. Получените резултати са илюстрирани на Фиг.4.13÷Фиг.4.16.Получените при това изследване резултати показват, че наличието

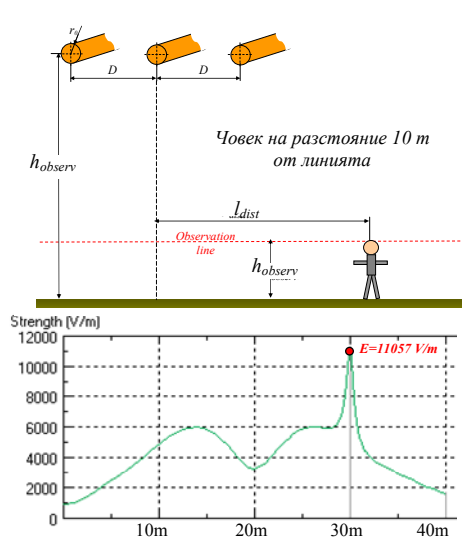
на човешкото тяло или други биологични обекти променя съществено разпределението на полето, като стойността на електрическия интензитет около човека нараства значително. Проявява се и екраниращ ефект в областта зад дървото.



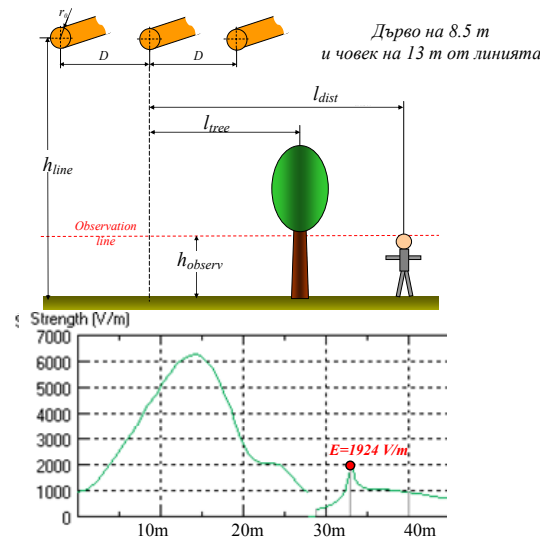
Фиг.4.13 Линия без допълнителни обекти



Фиг.4.14 Човек точно под електропровода



Фиг.4.15 Човек на 10m от оста на линията



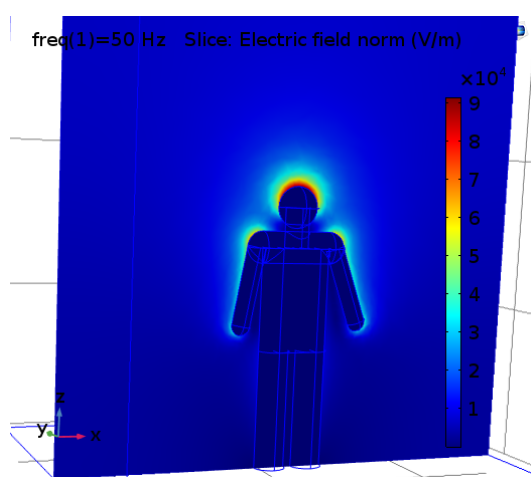
Фиг.4.16 Човек на 13m и дърво на 8.5m

4.6 Изследване разпределението на електрическото поле в близост до човешката фигура

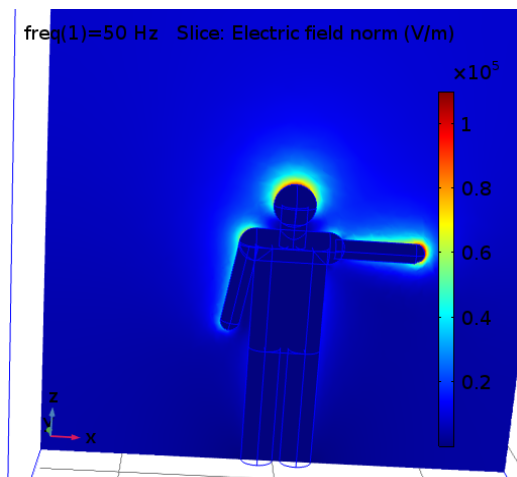
Целта на изследването е по-прецизното определяне на полето в близост до човешкото тяло, намиращо се под въздействието на електрическото поле на електропровода. Полето се моделира допълнително в значително по-малка област, като по границите и се задават стойностите на потенциала, получени при в цялата област. При това вторично моделиране човешката фигура се моделира по-прецизно и може да заема различни пози, като движи ръцете си.

Резултати за разпределението на интензитета на електрическото поле около човек, под линия 400 kV, при различни позиции на ръцете са представени на Фиг. 4.17, Фиг.4.18 и Фиг.4.19. Еквипотенциални линии на полето около човешка фигура са представени на Фиг. 4.20.

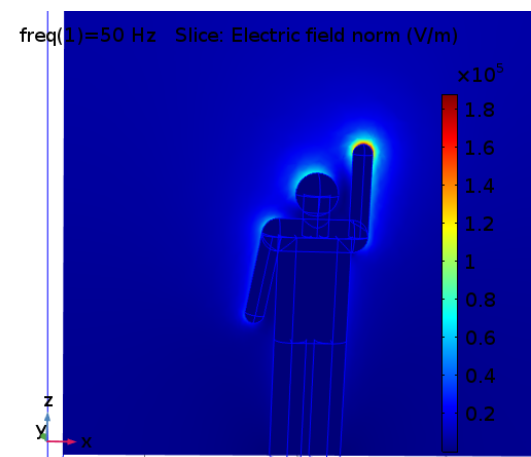
Изследването показва, че стойността на интензитета, в непосредствена близост до човешкото тяло, достига стойности, десетки пъти по-големи от пределно допустимите. Това се отнася за особено за зоните около главата и раменете, където има жизнено важни органи на човешкото тяло. Тези резултати показват, че в определени ситуации, зависещи от позицията и позата на човека, стойностите на полето надвишават многократно допустимите и могат да представляват реална опасност.



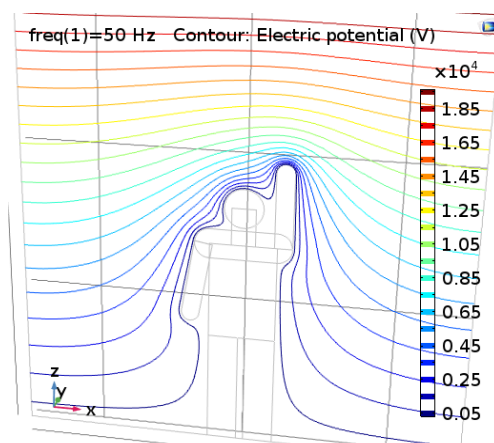
Фиг. 4.17.



Фиг.4.18



Фиг. 4.19



Фиг. 4.20.

Изводи от изследването чрез 3D моделиране на електрическото поле

- Използването на 3D моделиране с отчитане на наличието на провес и допълнителни обекти позволява по-достоверно определяне на разпределението на електрическото поле в областта около електропровода;
- Влиянието на провеса е значително и не бива да се пренебрегва, тъй като е причина за увеличаване на интензитета на полето и превишаване на допустимите норми.;

- Наличието на човешкото тяло или други биологични обекти променя съществено разпределението на полето, като стойността на електрическия интензитет около човека нараства значително, превишава допустимите норми и може да представлява опасност при определени позиции на човека.

4.7 Резултати от работата по четвърта глава:

Моделирано е разпределението на електрическо поле по наблюдателна повърхност, на височината на човешко тяло, като са изследвани различни конфигурации на областта: без допълнителни обекти; с човешко присъствие точно под линията; с човек на определено разстояние от оста на линията; с присъствие на човек и дърво на различни разстояния.

Направен е сравнителен анализ на данни, получени при численото моделиране с публикувани експериментални данни и данни от моделиране, Сравнението е направено за идентична конфигурация на линиите.

Предложен е подход за подобряване на точността на моделиране в област около човека, който е приложен за моделиране на електрическото поле при провеждане на „числени експерименти“ за различни пози на човешко тяло.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси:

1. Формулиран е математически модел за анализ на времезависимо електрическо поле, създадено от електропровод, при наличие на допълнителни обекти със свойства съответстващи на живата природа и на негова база, по метод с крайни елементи е разработен 3-мерен, параметричен симулационен модел на разпределението на полето, с възможности за промяна на геометрични и режимни параметри, който отчита реалната конфигурация на линията с провес и спецификата на околната среда, включваща обекти с различни свойства.

2. Предложен е подход за подобряване на точността на моделиране, на базата на вторичен анализ на електрическото поле, в област около човека със значително по-малки размери от тези на линията, при който за гранични условия се използват стойности на полето, получени при анализа на цялата област. Предложеният подход е приложен за моделиране на електрическото поле при провеждане на „числени експерименти“ за различни пози на човешко тяло.

3. Формулиран е математически модел за анализ на магнитно поле създадено от електропровод и на негова база е изграден симулационен модел на основата на метод с крайни елементи. С помощта на модела са проведени „числени експерименти“ за определяне на магнитното поле, за различни стойности на дефазираните на 120° трифазни токове, като са изследвани и

различни варианти на геометрично разположение на проводниците на линията и разстоянията между тях.

Приложни приноси:

4. На базата на серия “числени експерименти”, с помощта на симулационния модел е моделирано електрическо поле, създадено от електропровод, като разпределението му е анализирано по зададени повърхности и линии на наблюдение при различни стойности на параметрите на линията (дължина на участъка, височина на окачването, височина на провеса и разстояния между проводниците). Направен е сравнителен анализ на резултати, получени при численото моделиране с експериментални данни и данни от моделиране, публикувани в литературата, като разпределението на полето е определяно за едни и същи по размер и височина зони на наблюдение и идентична геометрична конфигурация на линиите.

5. Моделирано е разпределението на времезависимото електрическо поле по наблюдателна повърхност, на височината на човешко тяло, в околността на електропровод 400 kV, като са изследвани различни конфигурации на областта: без допълнителни обекти; с човешко присъствие точно под линията; с човек на определено разстояние от оста на линията; с присъствие на човек и дърво на различни разстояния.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. I. Iatcheva, **M. Dimitrova**, „*Electromagnetic Field Modelling in Vicinity of a Power Line*”, 10-th Summer School “Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering”, 2014, Sofia, Bulgaria, ISSN:1313-9487
2. I. Iatcheva, **M. Dimitrova**, “*Study of the electric field impact of the environment in vicinity of a power lines*” , 11-th Summer School “Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering”, pp.215-222, 2016, Sofia, Bulgaria, ISSN:1313-9487
3. И. Ячева, **М. Димитрова**, Н Петкова, „*3D моделиране на разпределението на електромагнитно поле в близост до електропровод 400 kV*”, Годишник на ТУ-София, том 67-2, 2017, стр.381-388, ISSN 1311-0829
4. **M. Dimitrova**, “*Comparative Study of Electric Field Distribution in the Vicinity of Power Line, Based on Numerical Modeling and Experimental Data*”, 12-th Summer School “Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering”, pp. 115-121, 2018, Sofia, Bulgaria, ISSN:1313-9487
5. Iatcheva, I., **Dimitrova, M.**, Petkova, N., “*3D modelling of electric field in vicinity of 400 kV power line*”, COMPEL, 37 (4), 2018, pp. 1545-1555, ISSN 0332-1649, DOI: 10.1108/COMPEL-08-2017-0366, Scopus, **IF 0.487**

SUMMARY

of the PhD Thesis ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION AND IMPACT OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE VICINITY OF POWER LINES IN URBAN AREAS

by Malina Koleva Dimitrova, M.Sc., Eng.

The aim of the work is 3D modeling of electromagnetic field distribution in the vicinity of power line in order to determine the field impact on the environment. The real 3D geometry of the three-phase line has been considered including sag presence and possible presence of human or other living nature objects, which can significantly disturb the field distribution. The time depending electric field and quasi-stationary magnetic field have been modeled and investigated by means of numerical experiments, carried out using 2D and 3D simulation models created on the bases of finite element method and software packages QuickField and COMSOL Multiphysics. The simulation models were validated on the basis of comparison with computed and experimental data presented in the literature. 3D map of electric field in the line vicinity and the electric field strength distribution along the observation lines and surface are determined for several region configurations: without additional objects; human presence just under the line; human at a certain distance from the line; presence of human and a tree.

Special attention in the modeling has been paid to the field determination around the human body and an approach has been proposed for its more accurate and precise determination.