

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ
ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ В ВИСОКОВОЛЬТНИХ
КОНСТРУКЦІЯХ І АПАРАТАХ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу,
групи ДЕ-ЕБ23мг-1
Спеціальності : 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(код і найменування спеціальності)

_____	/	<u>Костянтин БЄЛЯЄВ</u>
(підпис)		(ім'я та прізвище)
Керівник _____	/	<u>Ганна МОСІЄНКО</u>
(підпис)		(ім'я та прізвище)
Рецензент _____	/	<u>Олег ПОДОЛЯК</u>
(підпис)		(ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____	/	<u>Артем ЧЕРНЮК</u>
(підпис)		(ім'я та прізвище)
Нормоконтроль _____	/	<u>Юлія ОЛІЙНИК</u>
(підпис)		(ім'я та прізвище)
Секретар ЕК _____	/	<u>Ігор КИРИСОВ</u>
(підпис)		(ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувача вищої освіти Костянтина БСЛЯЄВА

1. Тема «Забезпечення енергетичної безпеки за рахунок оптимізації електричних полів в високовольтних конструкціях і апаратах»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Рівень напруги, умови експлуатації, характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

Вступ. Перелік умовних позначень. 1. ОСОБЛИВОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ Й ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ В ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОНСТРУКЦІЯХ І АПАРАТАХ 4. РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНОСТ І ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ 330 кВ. Висновки. Список посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024р.

Керівник

(підпис)

Ганна МОСІЄНКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Костянтин БЄЛЯЄВ

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК**виконання кваліфікаційної дипломної роботи**

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Аналіз літератури	02.10–08.10	
2	Особливості забезпечення енергетичної безпеки	09.10–15.10	
3	Оптимізація електричних полів в високовольтних конструкціях і апаратах	16.10–22.10	
4	Розрахунок напруженості і електричного поля повітряної лінії електропередачі 330 кВ	23.10–29.10	
5	Аналіз результатів, формування висновків	30.10–05.11	

Студент (ка)

(підпис)

Костянтин БЄЛЯЄВ

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

Юлія ОЛІЙНИК

РЕФЕРАТ

Енергетична безпека є ключовим елементом національної безпеки кожної країни. У сучасних умовах, зі зростанням попиту на електроенергію та збільшенням кількості високовольтних конструкцій і апаратів, питання оптимізації їх електричних полів стає особливо важливим. Ефективна оптимізація електричних полів сприяє не лише підвищенню ефективності роботи енергосистем, але й забезпечує їх надійність і стійкість до зовнішніх впливів. Водночас це дозволяє знизити втрати енергії та покращити екологічні характеристики.

Метою даного дослідження є розробка та впровадження нових методів оптимізації електричних полів у високовольтних конструкціях і апаратах для забезпечення більшої енергетичної безпеки.

Об'єкт дослідження – електричні поля в високовольтних конструкціях і апаратах.

Предмет дослідження – енергетична безпека електроенергетичного об'єкта.

Ключові слова: високовольтні конструкції, високовольтні апарати, енергетична безпека, електричні поля, оптимізація, енергосистема.

ABSTRACT

Energy security is a key element of national security of every country. In modern conditions, with the growing demand for electricity and the increase in the number of high-voltage structures and devices, the issue of optimizing their electric fields becomes especially important. Effective optimization of electric fields contributes not only to increasing the efficiency of power systems, but also ensures their reliability and resistance to external influences. At the same time, it allows you to reduce energy losses and improve environmental performance.

The purpose of this study is to develop and implement new methods for optimizing electric fields in high-voltage structures and devices to ensure greater energy security.

The object of the study is electric fields in high-voltage structures and devices.

The subject of the study is the energy security of an electric power facility.

Keywords: high-voltage structures, high-voltage devices, energy security, electric fields, optimization, power system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ	11
1.1 Термін «енергетична безпека»	11
1.2 Модель ієрархічної структури енергетичної безпеки	15
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	24
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ Й ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИЛ	26
2.1. Основні рівняння магнітного поля	26
2.2. Математичне формулювання завдання розрахунків магнітного поля методом кінцевих елементів	28
2.3. Розрахунки електромагнітних сил і електромагнітного моменту через натяги в магнітнім полі	31
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2	37
РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ В ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОНСТРУКЦІЯХ І АПАРАТАХ	39
3.1. Гранічно допустимі рівні напруженості електричного поля	39
3.2. Електричне поле повітряних ліній електропередач	40
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	48
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНОСТ І ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ 330 кВ	49
4.1. Розрахунок напруженості електричного поля під крайньою лівою фазою повітряної лінії електропередачі 330 кВ	49
4.2. Аналіз перспективних методів і підходів до оптимізації електричних полів	56

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	62
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	63
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	66

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВН – висока напруга

ЕММ – електромагнітний момент

ЕМП – електромагнітні поля

ЕМС – електромагнітні сили

КЛ – кабельні лінії

ЛЕП – лінії електропередач

ММ – математичні моделі

МГЕ – метод граничних елементів

МКЕ – метод кінцевих елементів

МКР – метод кінцевих різниць

ПЕР – паливно–енергетичні ресурси

СНАУ – система нелінійних алгебраїчних рівнянь

СЛАУ – система лінійних алгебраїчних рівнянь

FEMM – Finite Element Method Magnetism

ВЕУ – вітроелектростанція

ВТ – вітротурбіна

ДГ – дизель генератор

ПДЕ – поновлювальні джерела енергії

СЕП – система електропостачання

ФЕУ – фотовольтанична електрична станція

ШПТ – шина постійного струму

ВСТУП

Енергетична безпека є ключовим елементом національної безпеки кожної країни. У сучасних умовах, зі зростанням попиту на електроенергію та збільшенням кількості високовольтних конструкцій і апаратів, питання оптимізації їх електричних полів стає особливо важливим. Ефективна оптимізація електричних полів сприяє не лише підвищенню ефективності роботи енергосистем, але й забезпечує їх надійність і стійкість до зовнішніх впливів. Водночас це дозволяє знизити втрати енергії та покращити екологічні характеристики.

Для оптимізації електричних полів у високовольтних конструкціях і апаратах застосовуються різноманітні підходи, визнані науковою спільнотою. Основними серед них є:

1. **Методи чисельного моделювання.** Застосування комп'ютерних програм для моделювання електричних полів забезпечує високоточний аналіз і розгляд різних конструктивних варіантів. Найбільш поширеними є методи кінцевих елементів (МКЕ) та граничних елементів (МГЕ).
2. **Оптимізаційні алгоритми.** Використання алгоритмів, таких як генетичний пошук, метод рою часток (PSO), симуляційне відпалювання та інші евристичні методи, допомагає знаходити оптимальні параметри для мінімізації втрат енергії та підвищення ефективності.
3. **Інноваційні матеріали.** Застосування новітніх матеріалів, зокрема суперпровідників і наноматеріалів, значно покращує характеристики електричних полів і знижує енергетичні втрати.
4. **Контроль і моніторинг.** Сучасні системи моніторингу дозволяють у реальному часі відслідковувати стан високовольтних апаратів, вчасно вносити корективи та підтримувати оптимальні режими роботи.
5. **Оптимізація конструкцій.** Зміна геометрії високовольтних апаратів, форми електродів, відстаней між елементами та інших параметрів дозволяє досягти значного покращення характеристик електричних полів.

Кожен із цих методів має свої переваги та обмеження, тому для досягнення максимального ефекту часто використовують їх у комплексі.

Метою даного дослідження є розробка та впровадження нових методів оптимізації електричних полів у високовольтних конструкціях і апаратах для забезпечення більшої енергетичної безпеки. Це передбачає:

- Аналіз існуючих методів і підходів до оптимізації електричних полів.
- Розробку нових математичних моделей і алгоритмів для їх оптимізації.
- Проведення експериментальних досліджень для підтвердження ефективності запропонованих методів.
- Впровадження розробок у реальні високовольтні конструкції та апарати.

У зв'язку з цим **темою** цієї магістерської роботи є ШЛЯХИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ В ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОНСТРУКЦІЯХ І АПАРАТАХ.

Об'єкт дослідження – електричні поля в високовольтних конструкціях і апаратах.

Предмет дослідження – енергетична безпека електроенергетичного об'єкта.

РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ

1.1 Термін «енергетична безпека»

Термін «енергетична безпека» з'явився в період нафтових криз 1973–1974 років, коли ембарго, запроваджене країнами ОПЕК на поставки нафти окремим державам, створило загрозу їхній економічній стабільності. Події соціально-політичних криз 2011–2013 років (арабсько-ізраїльський конфлікт, повстання в африканських країнах), а також нові глобальні процеси перерозподілу паливно-енергетичних ресурсів у світовій енергосистемі актуалізували потребу у постійному моніторингу стану енергетичної безпеки на рівні держав, регіонів і підприємств.

З моменту здобуття незалежності Україна стикається з викликом високої енергозалежності, що робить енергетичну безпеку фундаментальною складовою економічної та національної безпеки. Для економічної науки й більшості промислових галузей проблема формування принципів енергетичної безпеки залишається відносно новою. З урахуванням недавнього становлення економічної системи України та специфіки її енергетичного сектору, формування енергетичної безпеки має не лише інноваційний, а й унікальний характер.

Огляд досліджень та публікацій:

Проблематика економічної та енергетичної безпеки висвітлена у працях як зарубіжних, так і вітчизняних науковців, серед яких: Д. Ламбер, П. Кінг, Р. Нолан, Л. Абалкін, О. Алімов, В. Бараннік, О. Білоус, В. Бушуєв, З. Варналій, М. Воропай, В. Гейць, С. Глазьев, Я. Жаліло, М. Земляний, Б. Кваснюк, М. Кулик, П. Леоненко, Є. Лисицин, Ю. Лисенко, Д. Лук'яненко, А. Мастепанов, В. Микитенко, І. Недін, Є. Олейніков, Б. Піріашвілі, С. Панченко, Р. Подолець, В. Саприкін, Є. Сухін, О. Суходоля, А. Шевцов, А. Шидловський та інші.

Сьогодні поняття «безпека» трактується як «стан захищеності ключових інтересів особистості, суспільства та держави від можливих загроз». Одночасно існує визначення, що «національна безпека – це сукупність взаємозв'язків і відносин, які забезпечують такий стан особи, соціальних груп, суспільства, держави й народу, за якого гарантується стабільне існування, задоволення життєвих потреб, здатність до саморозвитку, прогресу і протидії зовнішнім та внутрішнім загрозам».

Згідно зі статтею 17 Конституції України, національна безпека визначається як одна з найважливіших функцій держави та відповідальність народу. У широкому значенні безпека охоплює «захищеність потреб у природних, фізіологічних, соціально-економічних, інформаційних, технологічних, моральних та інших ресурсах, необхідних для життєдіяльності та розвитку населення».

Пріоритетом у забезпеченні національної безпеки є моніторинг і аналіз рівня загроз національним інтересам шляхом використання багатовимірних і системних методів. Також важливе прогнозування можливих сценаріїв розвитку ситуацій для своєчасного реагування. Проте відсутність єдиного інформаційного простору, затримки в доступі до даних та їх неповнота ускладнюють ідентифікацію загроз. Серед усіх складових безпеки економічна безпека виступає її основою.

Економічна безпека характеризує стабільність економіки й гарантує захист інтересів суспільства, держави та особистості, зберігаючи соціальну орієнтованість політики навіть за несприятливих умов. Відповідно до чинної системи обліку, економічна безпека включає такі складові: макроекономічна, фінансова, зовнішньоекономічна, інвестиційна, науково-технологічна, енергетична, виробнича, демографічна, соціальна та продовольча безпека.

Науковці визначають економічну безпеку як «стан економіки та інститутів влади, що забезпечує захист національних інтересів, соціальну орієнтацію політики та оборонний потенціал, навіть за несприятливих умов». У сучасній економічній теорії сформувався окремий напрямок досліджень

економічної безпеки, що базується на взаємозалежності між економічною безпекою держави, окремих підприємств та їх галузевих об'єднань.

Економічна безпека залежить від внеску її різних аспектів: соціального, екологічного, військового, енергетичного, інформаційного тощо. При цьому формуються нові рівні ієрархії економічної безпеки: глобальна, міжнародна, національна, регіональна та безпека окремих підприємств (рис. 1.1.) [11].

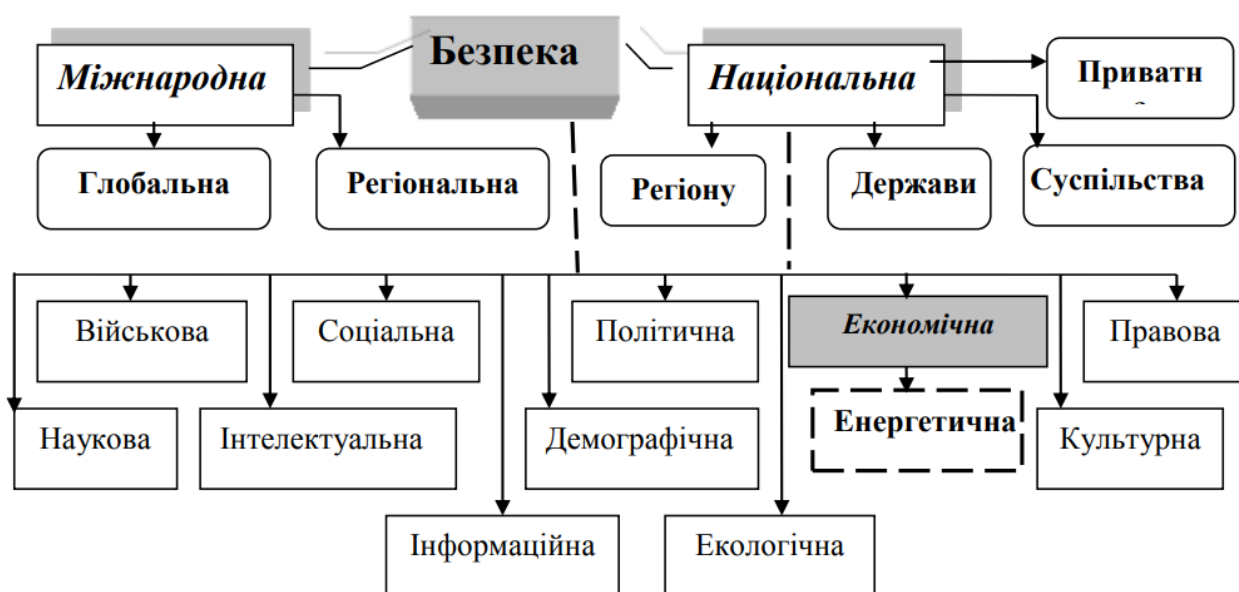


Рисунок 1.1. – Енергетична безпека як сфера у системі безпеки країни, території чи регіону

Сьогодні, не зважаючи на характер виробництва, критичним фактором для соціально–економічного розвитку виступають паливно–енергетичні ресурси. Зважаючи на значну залежність від імпорту природного газу, нафти, нафтопродуктів, ядерного палива і стабільне зростання цін на них, економічна безпека визначається енергетичною безпекою держави. Термін «енергетична безпека» широко використовується фахівцями у сфері енергетики і енергоменеджменту, дослідниками в нормативних документах і наукових публікаціях.

А. К. Шидловський і М. П. Кавалко визначають дану категорію, як одну із найважливіших складових економічної безпеки проявляється, по–перше, як

стан забезпечення держави паливно–енергетичними ресурсами, що гарантують її повноцінну життєдіяльність або як стан безпеки енергетичного комплексу та здатність енергетики забезпечити нормальне функціонування економіки, енергетичну незалежність країни. Політична і енергетична незалежність є взаємообумовленими.

На сайті Світової енергетичної ради поняття енергетичної безпеки ототожнюється з впевненістю у наявності енергії в тій кількості та якості, які вимагаються за даних економічних умов. Згідно інформації сайту Міжнародного енергетичного агентства: «енергетична безпека – безперервна фізична доступність за ціною, яка є прийнятною з точки зору дотримання екології».

Єдиний підхід до визначення поняття "енергетична безпека" у нормативно-законодавчих актах відсутній. Згідно з Енергетичною стратегією України до 2030 року, енергетична безпека є невід’ємною складовою економічної та національної безпеки, а також необхідною умовою існування й розвитку держави. Сучасне розуміння гарантування енергетичної безпеки передбачає технічно надійне, стабільне, економічно ефективне та екологічно прийнятне забезпечення економіки й соціальної сфери енергоресурсами, а також створення умов для реалізації політики захисту національних інтересів у сфері енергетики. Це відображає ресурсно-орієнтований підхід до визначення.

Існуючі трактування терміну "енергетична безпека" спираються на різні аспекти, що ускладнює аналіз цього поняття з економічної точки зору.

Українські науковці розглядають енергетичну безпеку як забезпечення економічного суверенітету держави у постачанні паливно-енергетичними ресурсами (ПЕР). Основні загрози включають:

- можливість гострої нестачі ПЕР;
- нераціональне використання енергоносіїв;
- залежність споживання від імпорту ПЕР;
- негативні наслідки роздержавлення та приватизації об’єктів

паливно-енергетичного комплексу.

Серед ключових факторів енергетичної безпеки виділяють забезпечення нафтою, газом та іншими ресурсами власного видобутку, а також високу енерговитратність виробничих процесів.

Роль держави в цьому контексті полягає у забезпеченні енергетичних потреб населення. Енергетична безпека визначається як здатність державних органів гарантувати кінцевим споживачам необхідний обсяг і якість енергії за звичайних умов, а також у разі надзвичайних ситуацій внутрішнього чи зовнішнього характеру. Це включає забезпечення мінімального покриття найважливіших потреб країни, її регіонів, міст, селищ і об'єктів у паливно-енергетичних ресурсах.

1.2 Модель ієрархічної структури енергетичної безпеки

Згідно з Методикою розрахунку рівня економічної безпеки України, енергетична безпека визначається як стан економіки, який забезпечує захист національних інтересів у сфері енергетики від існуючих і потенційних загроз внутрішнього та зовнішнього характеру. Цей стан дозволяє задовольняти актуальні потреби в паливно-енергетичних ресурсах для забезпечення життєдіяльності населення та стабільного функціонування національної економіки як у звичайному, так і в надзвичайному або воєнному режимах.

Водночас поняття «енергетична безпека» є багатовимірним і включає взаємопов'язані явища та процеси не лише в економічній, але й у енергетичній системі, а також у суспільстві загалом.

Оскільки енергетична безпека входить до складу економічної безпеки, яка охоплює глобальний (міжнародний), національний, регіональний і локальний рівні, то її структура також має чотирирівневу ієрархію (рис. 1.2).

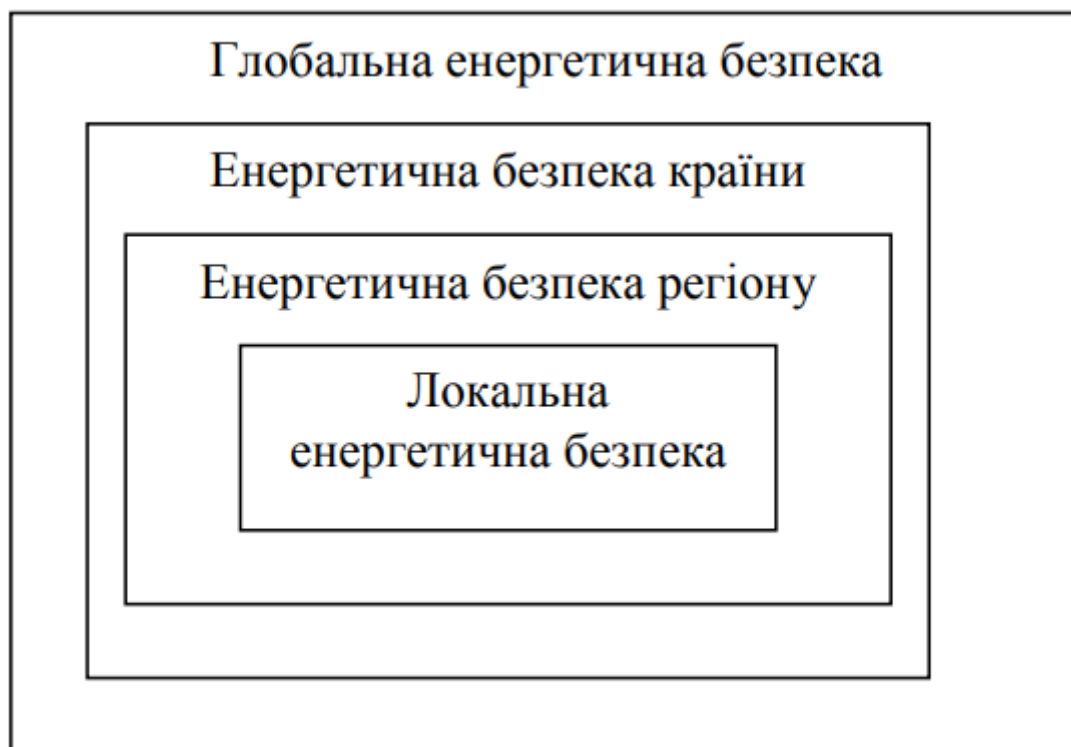


Рисунок 1.2 – Модель ієрархічної структури енергетичної безпеки

Особливістю зазначеної моделі є внутрішні взаємозв'язки та функціональні залежності, що забезпечують взаємодію рівнів енергетичної безпеки. Кожен попередній рівень виступає підсистемою для наступного, тоді як наступний рівень є зовнішнім середовищем для попереднього. У свою чергу, для базового рівня внутрішнім середовищем виступають фактори та умови, що визначаються особливостями функціонування та організації суб'єкта.

На кожному рівні системи, окрім елементів, виділяються також їх складові — компоненти, які мають специфічні властивості та забезпечують функціональну взаємодію між елементами різних рівнів.

Суб'єктами енергетичної безпеки є інституційні та організаційні структури, створені в межах конкретного рівня, з метою протидії внутрішнім і зовнішнім загрозам (табл. 1.1). Їхня діяльність спрямована на усунення загроз для задоволення потреб і захисту інтересів, використовуючи методи, форми та механізми взаємодії елементів різних рівнів у процесі реалізації енергетичної політики.

Протилежним поняттям до енергетичної безпеки є енергетична небезпека. Вона виникає внаслідок таких чинників, як гострий дефіцит паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), неефективне використання енергоносіїв, надмірна залежність від імпорту ПЕР, а також нерозумне роздержавлення та приватизація енергетичної інфраструктури.

Зважаючи на взаємозв'язок між енергетичною безпекою та небезпекою, які мають спільні чинники, забезпечення енергетичної безпеки й усунення небезпеки реалізуються через єдиний механізм.

Таблиця 1.1. – Основні елементи енергетичної безпеки

ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА			
Рівень	Види	Суб'єкти	Об'єкти
I	Глобальна енергетична безпека	Міжнародні організації, установи, об'єднання країн та їх союзи	Забезпечення паливно-енергетичними ресурсами;
II	Енергетична безпека країни	Інституційні та організаційні структури держави у сфері забезпечення енергетичної безпеки, представництва наглядових структур міжнародних організацій	Транспортування та розподіл ПЕР;
III	Енергетична безпека регіону	Інституційні та організаційні структури органів місцевого самоврядування, об'єднання суб'єктів господарювання, громадські організації тощо	Ефективність споживання ПЕР;
IV	Енергетична безпека суб'єкта (локальна енергетична безпека)	Суб'єкти господарювання різних форм власності та їх структурні підрозділи, об'єднання громадян, неприбуткові установи та організації і їх структурні підрозділи, окремі домогосподарства тощо	Непродуктивні витрати ПЕР; Дезорганізація та диспропорції енергетичної системи тощо

Згідно визначення енергетичної небезпеки об'єктами впливу суб'єктів виступають загрози або виклики, які можна згрупувати за наступними напрямками: 1) неефективність використання ПЕР; 2) незадоволення гострої потреби в ПЕР суб'єктів економіки; 3) втрати ПЕР в процесі транспортування та розподілу; 4) структурні деформації та дезорганізація функціонування енергетичної системи. Отже, до основних програм в процесі забезпечення енергетичної безпеки слід віднести: 1) енергоефективність споживання; 2) енергозбереження; 3) енергозабезпеченість; 4) енергопостачання і розподіл; 5)

державне регулювання в енергетичній сфері.

Оскільки енергетична безпека є складовою економічної, то в її структурі можна визначити ряд сфер, що визначатимуть потребу, ефективність забезпечення, постачання та споживання паливно–енергетичних ресурсів (рис. 3.3). Тому система показників будується шляхом їх групування за основними підсистемами (рівнями) напрямками та сферами енергетичної безпеки.

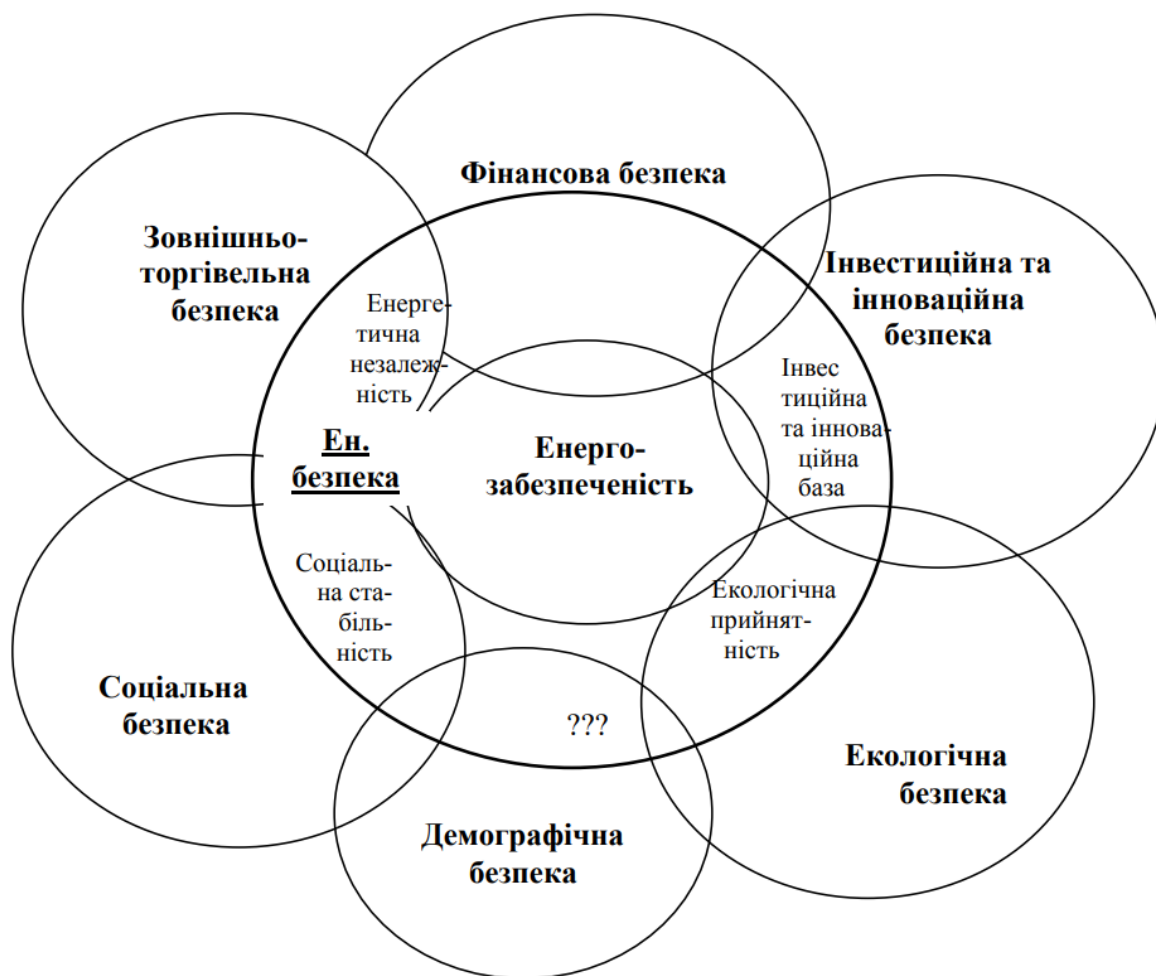


Рисунок 1.3 – Енергетична безпека в системі економічної безпеки
(концептуальне зображення)

Запропонована модель передбачає кілька припущень:

1. Не враховуються взаємозв'язки та взаємовплив окремих сфер.
2. Не розглядаються напрями впливу (формування загроз чи підвищення рівня безпеки).

3. Загрози енергетичної безпеки характеризуються лише на національному та регіональному рівнях.

Концепція моделі базується на ресурсному підході до визначення енергетичної безпеки, яка зводиться до забезпечення паливно-енергетичними ресурсами. Однак, з урахуванням зростання інтенсивності розвитку окремих сфер, є можливість зменшити існуючі обмеження при формуванні ресурсної бази. Наприклад, удосконалення механізмів розрахунків за імпорт паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), збільшення фінансування структурної перебудови економіки тощо можуть справляти як позитивний, так і негативний вплив, який ця модель не враховує.

Окрім того, модель не відображає таких важливих аспектів, як ефективність використання ПЕР у виробництві, їх транспортування, розподіл, а також можливості заміщення традиційних джерел енергії альтернативними. Хоча в межах однієї моделі неможливо відобразити вплив усіх факторів на формування енергетичної безпеки на різних рівнях, можна врахувати напрямки впливу та взаємозв'язок окремих сфер (рис. 1.4).

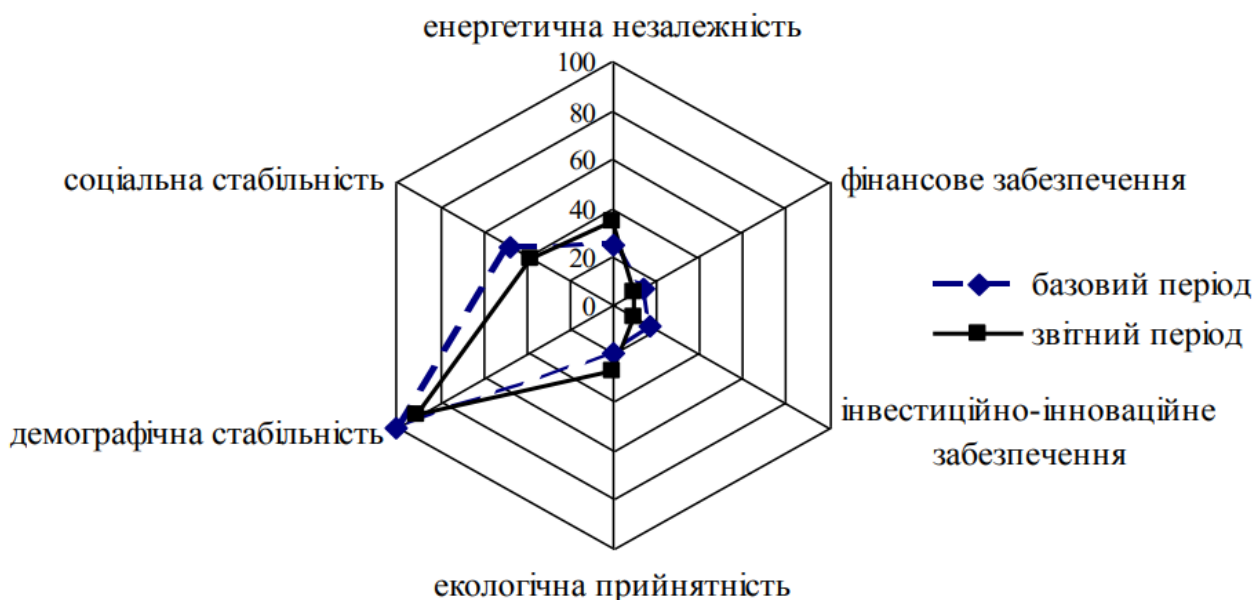


Рисунок 1.4 – Енергетична безпека в системі економічної безпеки
(удосконалене концептуальне зображення)

У моделі формування енергетичної безпеки країни взаємовплив окремих

сфер враховується шляхом побудови променевої діаграми, в якій сусідніми осями виступають критерії, що характеризують окремі сфери економічної безпеки, пов'язані функціональною взаємодією та взаємовизначеністю. Усі критерії відображаються векторами з початком у точці відліку осей координат і з довжиною, співрозмірною з величиною відповідного критерію. Вектор з початком в точці завершення вектору критерію базового періоду та кінцем у точці завершення вектору звітного періоду, при спрямуванні його до нульової позначки, характеризує генерування загроз енергетичної небезпеки процесами, що відбуваються у відповідній сфері. Різниця площ фігур, утворених кінцями векторів відповідних критеріїв і відображатиме відносний вимір загроз енергетичної безпеки.

Сьогодні гарантування енергетичної безпеки – це досягнення стану технічно надійного, стабільного, економічно ефективного та екологічно прийняттого забезпечення енергетичними ресурсами економіки і соціальної сфери країни, а також створення умов для формування і реалізації політики захисту національних інтересів у сфері енергетики.

Враховуючи вище зазначене, під енергетичною безпекою слід розуміти стан енергетичної системи, для якого характерні енергоефективність споживання, енергоощадність і енергозабезпеченість економіки та ефективність енергопостачання й розподілу паливно–енергетичних ресурсів.

Запропоноване визначення категорії «енергетична безпека» містить об'єднання сукупності окремих елементів–суб'єктів, функціональну взаємодію між ними та її результати, що характерне для короткого означення ресурсного підходу трактування енергетичної безпеки.

Використовуючи діалектичний метод пізнання та системно–структурний підхід сформулюємо розгорнуте та повне тлумачення змісту енергетичної безпеки на основі короткого.

Енергетичною безпекою є економічна незалежність у забезпеченні паливно–енергетичними ресурсами за умови ефективної взаємодії всіх підсистем, елементів та компонентів в межах певного механізму щодо усунення

внутрішніх та зовнішніх загроз в енергетичній сфері.

Енергетична безпека: структура та механізми забезпечення

Енергетична безпека – це інтегрована система глобальної, національної, регіональної та локальної безпеки, яка формується шляхом нейтралізації або усунення загроз у сфері забезпечення паливно-енергетичними ресурсами (ПЕР), необхідних для соціально-економічного розвитку.

Основні чинники енергетичної безпеки:

1. Рівень забезпеченості власними паливно-енергетичними ресурсами.
2. Висока енерговитратність виробництва.

Механізм забезпечення енергетичної безпеки

Механізм забезпечення енергетичної безпеки включає:

- Інституціональні та організаційні структури, що здійснюють моніторинг і управління ризиками.
- Процедури, форми, методи та важелі, спрямовані на вирішення суперечностей і послаблення або усунення внутрішніх і зовнішніх загроз в енергетичній сфері.

Основні передумови формування механізму:

- Розробка енергетичної стратегії та тактичних заходів її реалізації в державних програмах.
- Визначення системи ключових показників, що відображають стан енергетичної сфери.
- Систематичне відстеження зовнішніх та внутрішніх загроз.

Ретроспективний аналіз загроз

Загрози енергетичній безпеці України вперше було ідентифіковано ще в 90-х роках XX століття. На початку XXI століття вони отримали систематизацію за групами, представленими у таблиці 1.2.

Загрози енергетичній безпеці:

1. Залежність від імпорту паливно-енергетичних ресурсів.
2. Недостатній рівень енергоефективності.

3. Непродумана приватизація та роздержавлення об'єктів енергетичної інфраструктури.

4. Неефективне використання енергетичних ресурсів.

Розуміння загроз і механізмів їх подолання є основою для формування ефективної політики у сфері енергетичної безпеки, що забезпечує стійкий розвиток держави

Таблиця 1.2. – Класифікація загроз енергетичної безпеки

Загрози для енергетичної безпеки країни	
Забезпечення ПЕР	1) залежність від імпорту природного газу на 72%; 2) залежність від імпорту нафти на 87%; 3) залежність від імпорту коксівного вугілля на 47%; 4) значне зношення виробничих потужностей; 5) відсутність комплектуючих виробів, запасних частин, матеріалів тощо; 6) залежність від імпорту ядерного палива з Росії; 7) фізичний і моральний знос виробничих потужностей нафто- і газопереробної промисловості; 8) недозавантаженість нафтопереробних потужностей (завантаженість на 20%); 9) відсутність власного ядерного циклу виробництва палива для АЕС; 10) незадовільний стан освоєння власних енергетичних ресурсів; 11) повільне впровадження альтернативних видів енергії та палива; 12) незадовільний стан розрахунків за імпорт ПЕР;
Споживання ПЕР	13) неефективне використання у побутовій сфері; 14) відсутність побутових лічильників газу, води і тепла;
Постачання ПЕР	15) значне зношення виробничих потужностей з передачі енергоносіїв і транспортування ПЕР; 16) погіршення умов функціонування АЕС через вироблення власного ресурсу; 17) зростання чисельності комерційних посередників між виробниками і споживачами ПЕР;
Використання ПЕР	18) неощадливе споживання ПЕР (питомі витрати на одиницю ВВП в 6 разів перевищували рівень розвинутих країн); 19) перевитрати через недозавантаження і зношення потужностей;
Державне регулювання	20) відсутність ефективних структурних реформ у вугільній промисловості; відсутність науково-обґрунтованої програми виходу з енергетичної кризи і подолання енергетичної небезпеки; 21) послаблення державного регулювання енергетичної сфери тощо.

Окремі автори загрози енергетичній безпеці визначають як «події короткочасного або довготривалого характеру, які можуть дестабілізувати

роботу енергокомплексу, обмежити або порушити енергозабезпечення, призвести до аварій та інших негативних наслідків для енергетики, економіки та суспільства».

Зважаючи, що термін «енергетичний комплекс» та «енергетика» вжито для окреслення сукупності підприємств, що забезпечують виробництво і постачання теплоносіїв та електроенергії, то у вказаному визначенні доцільно використовувати поняття «енергетичної системи» або паливно–енергетичного комплексу, що є значно ширшими і можуть характеризувати не тільки національний, але глобальний, регіональний та локальний рівень.

За такого визначення їх умовно поділяють на групи: економічні, соціально– політичні, зовнішньоекономічні та зовнішньополітичні, техногенні, природні, а також загрози, пов'язані з недосконалістю управління. Всі перераховані групи загроз характерні не тільки для енергокомплексу України, але і загалом світової, національної, регіональної та енергетичної безпеки окремого суб'єкта.

Вивчення та аналіз загроз енергетичної безпеки потребує формування якісного і повноцінного інформаційного забезпечення прийняття управлінських рішень в енергетичному секторі економіки. У світі спостерігається зростання обсягів інформації, яку запитують у респондентів щодо відновлюваних та невідновних енергетичних ресурсів, показників енергетичної ефективності, викидів парникових газів, використання потенціалу енергозбереження та альтернативної енергетики.

Оцінювання енергетичної безпеки потребує систематизації та формування відповідного інформаційного забезпечення. Під інформаційним забезпеченням розуміють сукупність законодавчих, нормативних положень та статистичних відомостей про обсяги, джерела, форму існування інформації щодо формування запасів та використання паливно–енергетичних ресурсів.

Інформаційне забезпечення дослідження енергетичної безпеки включає:

- 1) законодавчо–нормативну базу щодо виробництва, розподілу і використання ПЕР (Конституція України, Господарський кодекс України,

Кодекс України про надра, Гірничий кодекс України, документи Енергетичної хартії, міжнародних конференцій з питань розвитку світової енергетичної системи, Законів України «Про електроенергетику», «Про енергозбереження», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про альтернативні джерела енергії», постанови і розпорядження КМУ, укази Президента України тощо);

2) статистичну базу (дані Державної служби статистики, підприємств і організацій, Міністерства енергетики та вугільної політики, Міністерства економічного розвитку та торгівлі, Державної і регіональних митниць, дані міжнародних організацій, дані національних організацій тощо).

Отже, в структурі інформаційного забезпечення чітко прослідковуються чотири рівні енергетичної безпеки, що дозволяє за рахунок систематизації інформації з різних джерел забезпечити комплексний підхід при побудові системи показників, з метою забезпечення порівнюваності та відносної оцінки енергетичної безпеки підприємства, регіону, країни за допомогою часткових та загальних показників.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Підводячи підсумки, можна зробити вивід про те, що у сучасних працях вітчизняних і зарубіжних науковців знайшли відображення ресурсний, концептуальний, інституціональний, факторний та індикативний підходи до тлумачення змісту терміну «енергетична безпека». Тому дослідження інформаційних джерел відображає різноманітність підходів до тлумачення даної категорії. Більшість вчених використовують ресурсний підхід, який є найбільш поширеним і, справді, створює основу формування енергетичної безпеки, хоча не є вичерпним. Забезпеченість ПЕР пов'язана тісно із ефективністю їх використання, транспортування та експортом і імпортом, останні є чи не визначальними компонентами. При цьому, важливою складовою виступають приховані або невикористаний потенціал

альтернативних енергетичних джерел та енергозбереження.

У процесі дослідження формування енергетичної безпеки необхідно розглядати наступні рівні: глобальний, національний, регіональний та локальний (рівень окремого економічного суб'єкта). При цьому, слід досліджувати два окремих аспекти: стан забезпечення паливно–енергетичними ресурсами та ефективності (ресурсний) і стан безпеки паливно–енергетичного комплексу (інституціональний). На забезпечення паливно–енергетичними ресурсами потреб економіки і соціальної сфери суттєво впливає ефективність їх використання та втрати в процесі транспортування і розподілу.

У межах вказаних аспектів можна виділити наступні чинники, які визначають рівень енергетичної безпеки:

- 1) формування ресурсної бази для видобування паливно–енергетичних ресурсів;
- 2) диверсифікація джерел імпорту ПЕР;
- 3) участь країни у перерозподілі потоків ПЕР;
- 4) реалізація потенціалу енерго– та ресурсозбереження;
- 5) ефективність використання ПЕР;
- 6) державне регулювання;
- 7) зменшення втрат ПЕР в процесі постачання та використання для мінімізації негативного впливу на довкілля;
- 8) формування оптимальної структури споживання ПЕР і використання альтернативних джерел енергії.

Система показників енергетичної безпеки повинна забезпечувати кількісну, порівняльну та відносну оцінку її стану та змін під впливом дії окремих факторів, які впливають на забезпечення національних інтересів у енергетичній сфері. Їх змістовна конкретизація передбачає наявність методики оцінки рівня енергетичної безпеки та аналізу впливу тенденцій зміни загроз.

В рамках данної роботи досліджуються особливості забезпечення енергетичної безпеки систем розподілу електроенергії, за рахунок оптимізації електромагнітної напруженості в електричних мережах.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ Й ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИЛ

2.1. Основні рівняння магнітного поля

Математичною моделлю стаціонарного магнітного поля нелінійної магнітної системи, заданого відомим розподілом у декартовій системі координат (x, y, z) об'ємних плотностей струмів $\bar{\Delta} = f_{\Delta}(x, y, z)$, є система рівнянь, у яку входять [42, 43]:

- перше рівняння Максвелла

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{\Delta}, \quad (2.1)$$

де $\bar{H}$ - вектор напруженості магнітного поля,

- рівняння безперервності магнітного поля

$$\text{div} \bar{B} = 0, \quad (2.2)$$

де $\bar{B}$ - вектор магнітної індукції,

- рівняння зв'язку між векторами індукції й напруженості магнітного поля (у вигляді характеристик намагнічування середовища)

$$\bar{B} = \mu \bar{H}, \quad (2.3)$$

де $\mu = \mu_0 \mu_r = f_{\mu}(B, x, y, z)$ – магнітна проникність у середовищах нелінійної магнітної системи.

Для тангенціальних H_{τ} і нормальних B_n складових на границі роздїгнула середовищ a і b рівняння граничних умов можна записати у вигляді:

$$H_{\tau a} = H_{\tau b}; \quad B_{na} = B_{nb}. \quad (2.4)$$

Для граничних умов на границі області поля нелінійної системи:

$$H_n = B_n = 0, \quad (2.5)$$

якщо за межами області поля є середовище з $\mu = 0$, і

$$H_{\tau} = B_{\tau} = 0, \quad (2.6)$$

якщо за межами області поля є середовище с. $\mu = \infty$

Існуючі аналітичні методи не можуть забезпечити розв'язок системи рівнянь (2.1) ÷ (2.6). У магнітній системі електромеханічних пристроїв це пов'язане з їхньою складною тривимірною геометрією, різноманіттям границь роздягнула середовищ із різними магнітними властивостями, нелінійністю характеристик намагнічування феромагнітних матеріалів. Для одержання можливості аналітичного розв'язку ухвалюється ряд допущень, що спрощують:

- зубчасті поверхні магнітних сердечників замінюються гладкими;
- основне поле й поля розсіювання насиченої машини розглядаються незалежно;
- магнітне поле насиченої машини представляється у вигляді суми двох незалежні полів, по поздовжній і поперечної осям;
- коефіцієнти поля, знайдені в лінійнім наближенні, використовуються при розрахунках насиченої машини;
- насичення магнітного ланцюга машини враховується коефіцієнтом насичення і т.д.

Розроблені на основі цих допущень спрощені математичні моделі ЕМП мають невисоку точність і їх застосування обмежується попередніми проектними розрахунками.

З ростом електромагнітних навантажень застосування зазначених допущень приводить до помітних помилок на стадії проектування ЕМП. Можливість підвищення ступені вірогідності математичних моделей ЕМП, насамперед, пов'язана із глибоким аналізом магнітного поля у феромагнітних середовищах на основі застосування сучасних чисельних методів розв'язку нелінійних крайових завдань. Такі дослідження дозволяють не тільки по-новому побудувати математичні моделі ЕМП, але й урахувати особливості електромагнітних процесів, що виникають в ЕМП із високими електромагнітними навантаженнями й нетиповими для електричних машин загальнопромислового застосування конфігураціями й співвідношеннями геометричних розмірів. Сучасний рівень розвитку методів розв'язку крайових завдань математичної фізики й можливості обчислювальної техніки дозволяють

суттєво уточнити й доповнити математичні моделі ЕМП. На основі розподілу магнітного поля в ЕМП можна визначити такі величини, як електромагнітні сили (ЕМС) і електромагнітні моменти (ЕММ) і т.д.

2.2. Математичне формулювання завдання розрахунків магнітного поля методом кінцевих елементів

У загальній постановці завдання розрахунків двовимірного стаціонарного магнітного поля з обліком нелінійних магнітних властивостей середовища зводиться до розв'язку нелінійного диференціального рівняння в частинних похідних [43, 44, 45]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\Delta, \quad (2.7)$$

де A_z – складова векторного магнітного потенціалу по осі z ,

$\nu = 1/\mu$ – величина, зворотна магнітної проникності середовища.

Серед чисельних методів розв'язку рівняння (2.7) найбільше поширення одержали метод кінцевих різниць (МКР) [45, 46] і метод кінцевих елементів (МКЕ) [43, 44, 47, 48]. Головною гідністю МКЕ, у порівнянні із МКР, є можливість довільного вибору розташування розрахункових крапок і кінцевих елементів, що дозволяє з більш високою точністю описувати складну геометрію електричної машини.

Сутність МКЕ полягає в заміні крайового завдання варіаційної, розбивці розрахункової області на подобласти (елементи) і розв'язку варіаційного завдання усередині кожного елемента.

Заміна крайового завдання (2.7) варіаційної зводиться до мінімізації нелінійного енергетичного функціонала:

$$F = \int_{\Omega} \left(\int_0^{B_x} \nu \cdot B_x \cdot dB_x + \int_0^{B_y} \nu \cdot B_y \cdot dB_y \right) \cdot d\Omega - \int_S A_z \cdot \Delta \cdot d\Omega, \quad (2.8)$$

де Ω – область розрахунків магнітного поля.

Розрахункові рівняння МКЕ виходять у результаті мінімізації функціонала (2.8) в області Ω , яка попередньо розділена на довільне число, наприклад, трикутних елементів, причому число цих елементів, що мають загальну вершину в одній крапці, їх розміри й розташування ніяк не обмежуються. Ці елементи покривають усю область розрахунків магнітного поля й не перетинаються один з одним.

Векторний магнітний потенціал A_z усередині довільного трикутника m з вершинами i, j, k , що мають координати (x_i, y_i) , (x_j, y_j) , (x_k, y_k) відповідно, визначається значеннями A_z у вершинах трикутника, і є, приміром, лінійною базисною функцією координат:

$$A_z = \left[\begin{aligned} &(a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y) \cdot A_{zi} + (a_j + b_j \cdot x + c_j \cdot y) \cdot A_{zj} \\ &+ (a_k + b_k \cdot x + c_k \cdot y) \cdot A_{zk} \end{aligned} \right] / (2 \cdot S_{\Delta}), \quad (2.9)$$

де A_{zi} , A_{zj} , A_{zk} – значення векторного магнітного потенціалу у вершинах трикутника,

$a_i = x_j \cdot y_k - x_k \cdot y_j$, $b_i = y_j - y_k$, $c_i = x_k - x_j$, $a_j = x_k \cdot y_i - x_i \cdot y_k$, $b_j = y_k - y_i$, $c_j = x_i - x_k$, $a_k = x_i \cdot y_j - x_j \cdot y_i$, $b_k = y_i - y_j$, $c_k = x_j - x_i$ – коефіцієнти базисної функції,

$$S_{\Delta} = \frac{(x_i \cdot b_i + x_j \cdot b_j + x_k \cdot b_k)}{2} - \text{площа трикутника } m.$$

Використовуючи відоме співвідношення $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$ й (2.9), можна визначити складові вектора магнітної індукції по осях координат і його модуль у трикутнику:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\partial A_z}{\partial y} = (c_i \cdot A_{zi} + c_j \cdot A_{zj} + c_k \cdot A_{zk}) / (2 \cdot S_{\Delta}), \\ B_y &= -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -(b_i \cdot A_{zi} + b_j \cdot A_{zj} + b_k \cdot A_{zk}) / (2 \cdot S_{\Delta}), \\ |B| &= \sqrt{B_x^2 + B_y^2}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

З (2.10) випливає, що усередині трикутника B_x й B_y ухвалюються

постійними величинами, а тому що у феромагнітній середовищі $\nu = f(|B|)$, те усередині трикутника $\nu = \text{const}$.

Якщо в області Ω задане n вершин r трикутників і F^m являє собою внесок трикутника m в загальний функціонал (1.8), то мінімум цього функціонала знаходять, вирішуючи систему рівнянь

$$\frac{\partial F^m}{\partial A_{zp}} = 0, \quad (2.11)$$

де $p = 1, 2, \dots, n$; $m = 1, 2, \dots, r$.

Диференціювання по A_{zp} дасть результат, відмінний від нуля тільки в тому випадку, якщо p є однієї з вершин трикутника m й, отже, для кожного трикутника з вершинами i, j, k можна записати, використовуючи (1.8), (1.9) і (2.10), три вираження:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^m}{\partial A_{zi}} &= \frac{\nu}{4 \cdot S_{\Delta}} \cdot \left[(c_i^2 + b_i^2) \cdot A_{zi} + (c_i \cdot c_j + b_i \cdot b_j) \cdot A_{zj} + \right. \\ &\quad \left. (c_i \cdot c_k + b_i \cdot b_k) \cdot A_{zk} \right] - \Delta \frac{S_{\Delta}}{3}, \\ \frac{\partial F^m}{\partial A_{zj}} &= \frac{\nu}{4 \cdot S_{\Delta}} \cdot \left[(c_i \cdot c_j + b_i \cdot b_j) \cdot A_{zi} + (c_j^2 + b_j^2) \cdot A_{zj} + \right. \\ &\quad \left. (c_j \cdot c_k + b_j \cdot b_k) \cdot A_{zk} \right] - \Delta \frac{S_{\Delta}}{3}, \\ \frac{\partial F^m}{\partial A_{zk}} &= \frac{\nu}{4 \cdot S_{\Delta}} \cdot \left[(c_i \cdot c_k + b_i \cdot b_k) \cdot A_{zi} + (c_j \cdot c_k + b_j \cdot b_k) \cdot A_{zj} + \right. \\ &\quad \left. (c_k^2 + b_k^2) \cdot A_{zk} \right] - \Delta \frac{S_{\Delta}}{3}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

На основі виражень (2.12), записаних для кожного трикутника області Ω , утворюється система нелінійних алгебраїчних рівнянь (СНАУ) (1.11), розв'язок якої дає значення A_z у вершинах трикутників. Ці значення A_z забезпечують мінімум функціоналу (2.8) і, отже, є розв'язком рівняння (2.7).

Важливим етапом при розв'язку завдань чисельного розрахунків магнітного поля МКЕ є розв'язок СНАУ (2.11). Одним з методів розв'язку СНАУ, що забезпечують швидку збіжність при вдалому виборі початкового наближення, є метод Ньютона.

Запишемо систему (1.11) у вигляді:

$$F_k(A_{z1}, A_{z2}, \dots, A_{zn}) = 0, \quad (2.13)$$

де $k = 1, 2, \dots, n$ – число рівнянь системи.

По методу Ньютона розв'язок системи (1.13) досягається послідовним уточненням значень змінних. На кожній ітерації вирішується система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАУ) виду:

$$J^t \cdot \Delta A_{zk}^t = -F_k \cdot (A_{z1}, A_{z2}, \dots, A_{zn}), \quad (2.14)$$

де t – номер ітерації,

J^t – матриця Якоби, побудована на ітерації t ,

$F_k \cdot (A_{z1}, A_{z2}, \dots, A_{zn})$ – вектор нев'язань системи (1.13) в ітерації t й визначається вектор виправлень до потенціалів ΔA_{zk}^t .

Уточнені значення змінних в $(t + 1)$ ітерації визначаються як:

$$A_{zk}^{t+1} = A_{zk}^t + \Delta A_{zk}^t. \quad (2.15)$$

За критерій збіжності й закінчення розрахунків ухвалюється максимальна величина абсолютного нев'язання ($F_{\max}$), певна із усіх нев'язань системи рівнянь (1.14). Якщо $F_{\max} \leq \varepsilon$ (ε – точність розв'язку крайового завдання), то збіжність досягнута й завдання вважається вирішеною.

2.3. Розрахунки електромагнітних сил і електромагнітного моменту через натяги в магнітнім полі

Основним завданням електромагнітного розрахунків будь-якої електричної машини є визначення ЕМС (ЕММ), прикладених до її частини, що переміщається. Для розрахунків ЕМС теорія електромагнетизму пропонує три методи [42]:

- по зміні енергії $\Delta W_{\text{ЭН}}$ або коенергии $\Delta W_{\text{КЭН}}$ магнітного поля при нескінченно малім переміщенні виділеного обсягу на відстань $\bar{\Delta}q = \pi_q \Delta q$ у напрямку одиничного вектора π_q по координаті q , де $q \in x, y, z$;
- через тензор натягу T_n в магнітнім полі;

- через об'ємну $\bar{f}$ й поверхневу $\bar{f}_s$ щільність ЕМС у магнітнім полі.

Фундаментальним методом розрахунків ЕМС, з якого випливають інші методи, є енергетичний, ідея якого полягає в застосуванні закону збереження енергії до електромеханічного перетворення, яке відбувається при нескінченно малій зміні координати q , що характеризує положення виділеної частини системи в обсязі V стосовно іншої її частини. Переміщенню зазнає виділена частина системи V , для якої необхідно визначити діючі на неї ЕМС або ЕММ, поєднувані поняттям узагальненої ЕМС D_q .

Узагальнена ЕМС D_q , що діє на нелінійну магнітну систему цілком (або на її виділену частину), може бути визначена з рівняння електромеханічного перетворення енергії для лінійної моделі цієї системи:

$$\Delta W_{\hat{Y}} = \sum_{k=1}^N i_k d\Psi_k = \Delta W + D_q \Delta q, \quad (2.16)$$

де ΔW_E – електрична енергія, що зробила в контури системи відкерованих джерел енергії, що підтримують у цих контурах сталість струму i_k або потокозчеплення Ψ_k при переміщенні на нескінченно малу відстань Δq ,

ΔW – збільшення енергії магнітного поля лінійної моделі нелінійної системи при переміщенні на Δq ,

$D_q \Delta q$ – механічна робота, чинена узагальненою ЕМС D_q при зміні на Δq координати q нелінійної системи, що характеризує положення, або її частини,

N – кількість збудливих контурів нелінійної системи.

Якщо магнітне поле розраховується чисельно, то розрахунки сил і моменту через зміну енергії або коенергии приводить до того, що їх збільшення по (2.16) визначається у вигляді малої різниці двох більших величин. При цьому одержати досить точний результат досить важко. У цьому випадку ЕМС і ЕММ переважно визначати або через натяги в магнітнім полі, або через об'ємну й поверхневу щільність електромагнітних сил [42]. Найбільш

прийнятним по точності й досить простим у реалізації є розрахунки ЕМС і ЕММ через натяги в магнітнім полі.

Коротко розглянемо математичне формулювання методу натягів [42]. ЕМС, що діє на виділену частину обсягу V , охоплену поверхнею S , може бути знайдена підсумовуванням елементарних сил $d\bar{F} = \bar{T}_n dS$, прикладених до елементів dS поверхні S :

$$\bar{F} = \int_S \bar{T}_n dS, \quad (2.17)$$

де $\bar{T}_n$ – сила натягу, що діє ззовні на одиницю поверхні, зовнішня нормаль до якої спрямована по $\bar{n}$:

$$\bar{T}_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{F}}{\Delta S}. \quad (2.18)$$

Вектор натягу (2.18) у двовірній постановці завдання може бути виражений через компоненти T_{nx}, T_{ny} по осях обраної системи координат:

$$\bar{T}_n = \bar{q}_x T_{nx} + \bar{q}_y T_{ny}, \quad (2.19)$$

де $\bar{q}_x, \bar{q}_y$ – одиничні орти.

Значення й напрямки вектора натягу $\bar{T}_n$ в даній крапці області поля залежать від орієнтації майданчика dS , на який він діє.

Вираження для складових вектора $\bar{T}_n$ в (2.19) визначаються в такий спосіб:

$$\begin{aligned} T_{nx} &= T_{xx} \cos(\bar{n}, \bar{q}_x) + T_{xy} \cos(\bar{n}, \bar{q}_y), \\ T_{ny} &= T_{yx} \cos(\bar{n}, \bar{q}_x) + T_{yy} \cos(\bar{n}, \bar{q}_y), \end{aligned} \quad (2.20)$$

де T_{xx}, T_{yx} – компоненти вектора $\bar{T}_x$ по осях координат x, y , що діє на майданчик ΔS_x , зовнішня нормаль до якої спрямована по $\bar{q}_x$;

T_{xy}, T_{yy} – компоненти вектора $\bar{T}_y$ по осях координат x, y , що діє на майданчик ΔS_y , зовнішня нормаль до якої спрямована по $\bar{q}_y$.

Компоненти вектора натягу в (2.20) визначаються як:

$$T_{ik} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} (B_i B_k - 0,5 B^2 \chi_{ik}), \quad (2.21)$$

де $\chi_{ik} = 1$ при $i = k$; $\chi_{ik} = 0$ при $i \neq k$; $i, k \in x, y$.

Величини в (2.21) визначаються по (2.10) з розрахунку магнітного поля в досліджуваній області й повністю характеризують собою систему натягів у даній крапці області поля. Результати розрахунків по (2.20) і (2.21) дозволяють визначити складові ЕМС по осях координат:

$$F_X = \oint_S T_{nx} dS, \quad (2.22)$$

$$F_Y = \oint_S T_{ny} dS. \quad (2.23)$$

ЕММ через натяги визначається як:

$$M = \oint_S [\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{T}_n] dS, \quad (2.24)$$

де $\mathbf{r}_1$ – радіус-вектор, що зв'язує початок системи координат з елементом dS поверхні S .

Точність розрахунків ЕМС (ЕММ) методом натягів суттєво залежить від просторового положення поверхні інтегрування S й ступені дискретизації розрахункової області [42]. З метою усунення впливу зазначених факторів на результати розрахунків ЕМС (ЕММ) запропонована модифікація методу натягів, названа в англійській літературі методом “eggshell”, ідея якого полягає в побудові сімейства концентричних еквівалентних поверхонь для оцінки ЕМС (ЕММ) через тензор натягів з наступним його усередненням. Метод знайшов застосування як для розрахунків ЕММ в обертових ЕМП.

Поверхневий інтеграл (2.24) замінюється лінійним інтегралом уздовж повітряного зазору. Якщо контур інтегрування являє собою окружність радіусом r , $dS = r d\varphi$ у полярній системі координат (r, φ) , то (2.24) з обліком (2.21) запишеться у вигляді:

$$M = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_r B_\varphi d\varphi, \quad (2.25)$$

де B_r, B_φ – компоненти вектора магнітної індукції.

Радіус контуру інтегрування може бути обраний довільно в діапазоні між зовнішнім радіусом ротора r_R й внутрішнім радіусом розточення статора r_S , тобто в межах робочого повітряного зазору. Для одержання більш об'єктивного результату необхідно провести інтегрування вираження (2.25) по всій площі повітряного зазору електричної машини. У цьому випадку вираження (2.25) перетвориться до виду:

$$M(r_S - r_R) = \int_{r_R}^{r_S} M dr = \frac{1}{\mu_0} \int_{r_R}^{r_S} \left\{ \int_0^{2\pi} r^2 B_r B_\varphi d\varphi \right\} dr = \frac{1}{\mu_0 S_\delta} \int r B_r B_\varphi dS, \quad (2.26)$$

де S_δ – площа повітряного зазору.

Тоді ЕММ із обліком (2.26):

$$M = \frac{1}{\mu_0 (r_S - r_R) S_\delta} \int r B_r B_\varphi dS, \quad (2.27)$$

Головною гідністю розглянутого методу розрахунків ЕММ є його «нечутливість» до ступеня дискретизації області робочого повітряного зазору електричної машини.

Покажемо це на прикладі визначення статичного ЕММ ВРД зі співвідношенням чисел полюсів статора до ротора 8/6. Магнітне поле розрахуємо для трьох варіантів розбивки робочого повітряного зазору на кінцеві елементи: а – крок розбивки 0,075; б – крок розбивки 0,05; в – крок розбивки 0,025, що орієнтовно відповідає 2, 3 і 6 шарам трикутних елементів в області повітряного зазору (рис. 2.1).

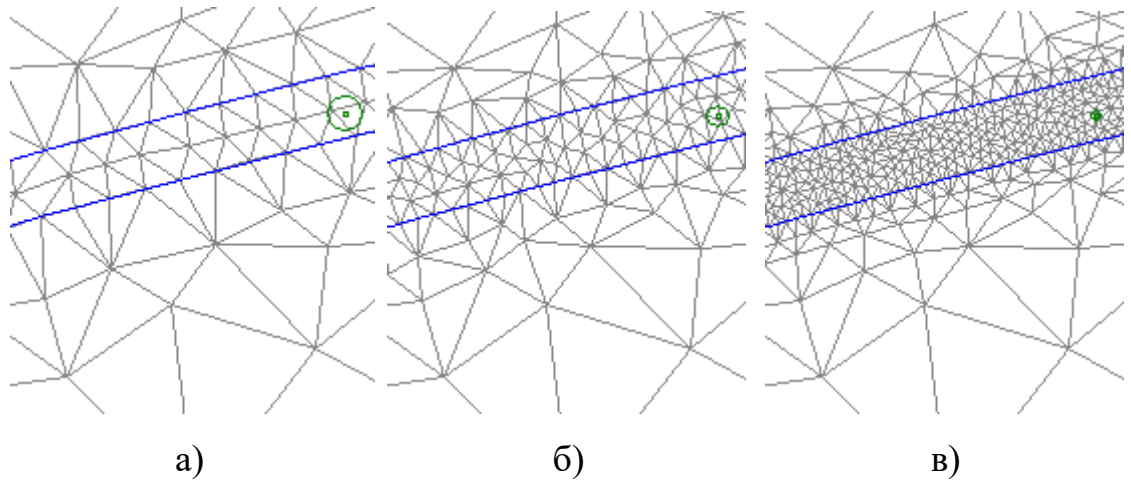


Рис. 2.1. Варіанти розбивки повітряного зазору на кінцеві елементи

Результати розрахунків статичного ЕММ у функції кутового положення ротора $M = f(\Theta)$ для зазначених на рис. 2.1 варіантів розбивки наведені на рис. 2.2. Дані рис. 2.2 переконливо демонструють інваріантність методу “eggshell” до ступеня дискретизації повітряного зазору ВРД.

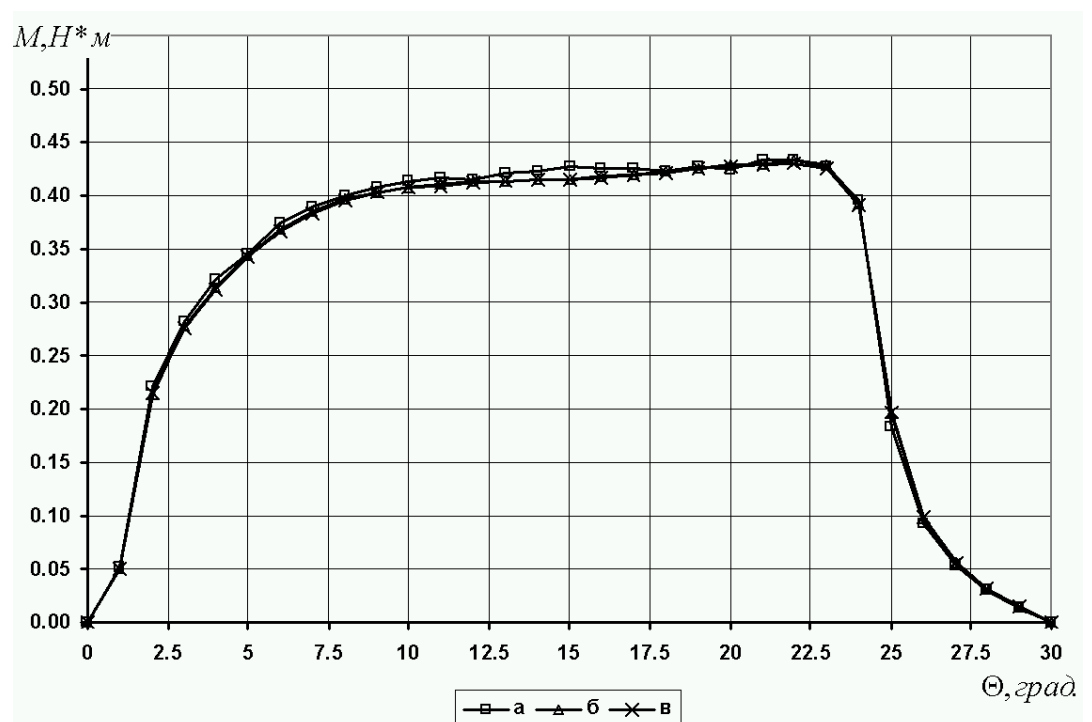


Рис. 2.2. Залежності $M = f(\Theta)$ для різних варіантів дискретизації повітряного зазору

На рис. 2.3 представлені залежності $M = f(\Theta)$, отримані методом натягів у традиційній постановці завдання [42] для тих же варіантів розбивки, що й для методу “eggshell”. Крім того, рис. 2.3 доповнений варіантом г) із ще більш дрібним кроком розбивки 0,01 у повітряному зазорі. Поверхня інтегрування, відповідно до рекомендацій [42], для всіх варіантів дискретизації проходила на мінімально можливій видаленні від зубців ротора ВРД. На рис. 2.3 для зіставлення двох модифікацій методу натягів наведені результати розрахунків кривій $M = f(\Theta)$, отримані методом “eggshell” (залежність д).

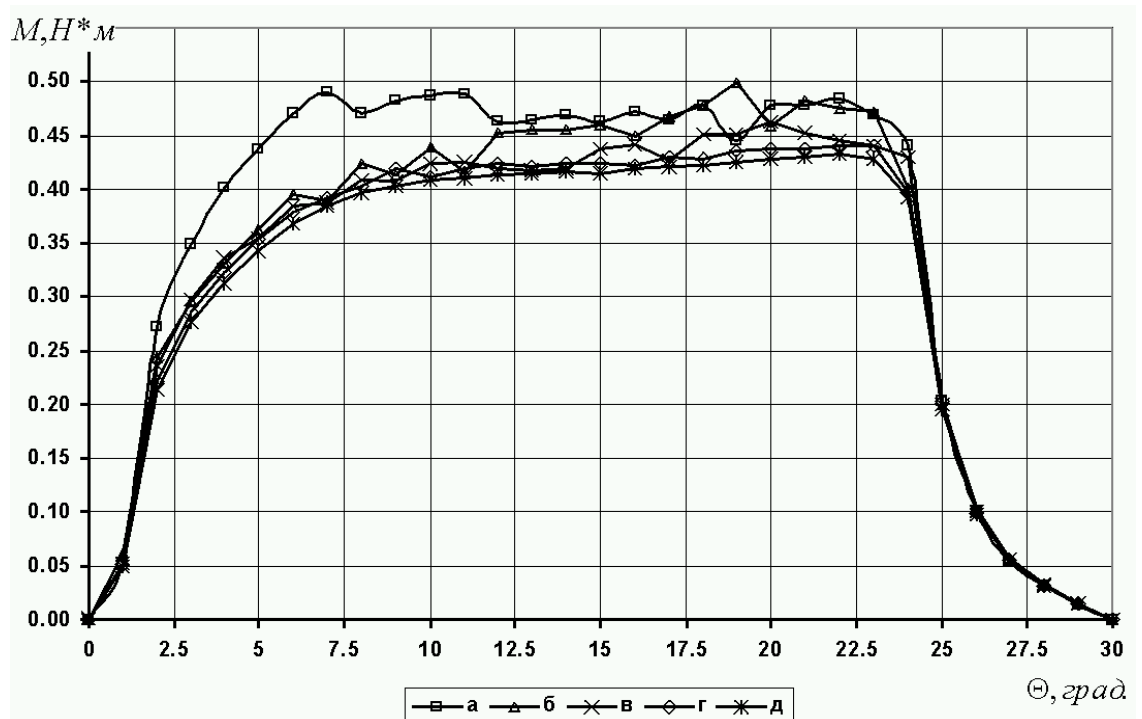


Рис. 2.3. Порівняння результатів розрахунків ЕММ методом “eggshell” і через натяги в постановці [42]

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

Результати, представлені на рис. 2.3, підтверджують вивід про істотний вплив ступеня дискретизації розрахункової області на величину й характер зміни ЕММ. З наведених на рис. 2.3 залежностей також випливає, що лише для сітки в повітряному зазорі із кроком розбивки 0,01 спостерігається певний збіг

результатів розрахунків ЕММ методом натягів у традиційній постановці й методом «eggshell». При збільшенні кроку розбивки не тільки знижується точність розрахунків ЕММ, але й змінюється якісний характер залежності $M = f(\Theta)$.

Застосування методу “eggshell” дозволяє на порядок скоротити час розрахунків залежностей ЕММ у функції кута повороту ротора $M = f(\Theta)$ для різних варіантів комбінації геометричних розмірів і струмів в обмотках ВРД за рахунок зменшення загального числа вузлів сітки кінцевих елементів. Недоліком методу “eggshell” є неможливість визначення ЕМС і ЕММ, прикладених до частини нелінійного магнітного тіла (наприклад, сили й момент, що діють на один із зубців ротора електричної машини). Його застосування може бути рекомендоване лише в тих випадках, коли необхідно розрахувати ЕМС і ЕММ, що діють на нелінійне магнітне тіло, оточене з усіх боків середовищем з магнітною проникністю μ_0 .

РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ В ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОНСТРУКЦІЯХ І АПАРАТАХ

3.1. Гранично допустимі рівні напруженості електричного поля

Повітряні лінії електропередачі створюють електричне поле в навколишньому середовищі, яке може мати шкідливий вплив на людину, залежно від рівня напруженості цього поля. Згідно з державними санітарними нормами і правилами захисту населення від електромагнітних випромінювань, встановлені наступні гранично допустимі рівні напруженості електричного поля:

- всередині житлових будинків: 0,5 кВ/м;
- на території житлової забудови: 1 кВ/м;
- у населеній місцевості, поза зоною житлової забудови, а також на території городів і садів: 5 кВ/м;
- на ділянках, де повітряні лінії перетинаються з автомобільними шляхами I–IV категорій: 10 кВ/м;
- у ненаселеній місцевості: 15 кВ/м;
- у важкодоступних місцях та на ділянках, що спеціально відгороджені для обмеження доступу населення: 20 кВ/м.

Зазначені гранично допустимі рівні електричного поля встановлюються для умов, коли відсутня вплив людини. Напруженість електричного поля вимірюється на висоті 1,8 м від рівня землі або від підлоги в приміщеннях. Для захисту населення від впливу електричного поля вводяться санітарно-захисні зони. Такою зоною вважається територія, де напруженість електричного поля перевищує 1 кВ/м.

Санітарно-захисні зони для повітряних ліній електропередачі визначаються як земельні ділянки, межі яких регламентуються на певній відстані від проекції крайніх фазних проводів на землю, в напрямку, перпендикулярному до лінії. Встановлені такі відстані для різних напруг:

- 20 м для ліній напругою 330 кВ;
- 30 м для ліній напругою 500 кВ;
- 40 м для ліній напругою 750 кВ.

3.2. Електричне поле повітряних ліній електропередач

У точній постановці задачі з розрахунку електричного поля в прогоні повітряної лінії необхідно враховувати тривимірну геометрію. Це обумовлено впливом опор, відтяжок, провисанням проводів лінії та нерівностями рельєфу місцевості, через яку проходить лінія. Проте, якщо мета полягає в визначенні максимальних значень напруженості поля поблизу землі в прогоні лінії, то розрахунок можна спростити, прийнявши такі припущення.

По-перше, через провисання проводів напруженість поля біля земної поверхні буде максимальною в середині прогону, де відстань між проводами і землею найменша. По-друге, в середині прогону проводи розташовані майже паралельно до земної поверхні. По-третє, на відстані від опор можна знехтувати їхнім впливом. По-четверте, лінії електропередач зазвичай прокладаються в рівнинних місцевостях, тому нерівності рельєфу можна не брати до уваги.

Зважаючи на ці фактори, задачу розрахунку електричного поля можна спростити до задачі для системи заряджених осей, розташованих близько до провідної поверхні. Така задача є пласкопаралельною, оскільки в будь-якій площині, що перпендикулярна проводам і поверхні землі, розподіл поля залишатиметься однаковим.

Поле нескінченної рівномірно зарядженої осі описується співвідношеннями (3.1) і (3.2)

$$E(r) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 r}, \quad (3.1)$$

$$\varphi(r) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{r}\right) + C, \quad (3.2)$$

де r – відстань від розрахункової точки до осі; τ – лінійна щільність заряду осі; ϵ_r – відносна діелектрична проникність (дорівнює одиниці для повітряних ліній); $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична константа. Вектор напруженості електричного поля E направлений радіально по осі; потенціал φ визначається з точністю до константи C . При обчисленні поля зарядженої осі, вважають, що $\varphi = 0$ при $r \rightarrow \infty$; тоді в (3.1) $C = 0$.

Для розрахунку поля заданої системи нерухомих зарядів, використовується принцип суперпозиції: потенціал поля в будь-якій точці дорівнює сумі потенціалів, створених зарядами системи, а вектор напруженості поля дорівнює векторній сумі векторів напруженості від зарядів. В загальному вигляді для системи з n заряджених осей, з зарядами τ_i , ($i = 1, 2, \dots, n$) поле в довільній точці визначається співвідношеннями

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{r_i}\right), \quad (3.3)$$

$$E_x = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 r_i} \cos(\hat{x}, \vec{r}_i), \quad (3.4)$$

$$E_y = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 r_i} \cos(\hat{y}, \vec{r}_i). \quad (3.5)$$

Тут r_i – відстань між розрахунковою точкою та i – віссю; $\cos(x, r_i)$, $\cos(x, r_1)$ – косинуси кутів між вектором r_i та відповідними координатними осями; E_x , E_y – проекції вектора E на координатні осі.

Оскільки відстані між проводами повітряних ліній значно більше їх радіусів, то зміщенням електричних осей проводів можна знехтувати і вважати, що заряди проводів зосереджені на їх геометричних осях. Поверхню землі в задачах електростатики можна вважати ідеально провідною. Тому зображення заряджених осей τ , в землі будуть мати заряди $\tau_1 = -\tau$. Таким чином будемо

мати систему еквівалентних зарядів, яка складається з пар заряджених осей 1 – 1', 2 – 2' і 3 – 3' (рисунок 3.1)

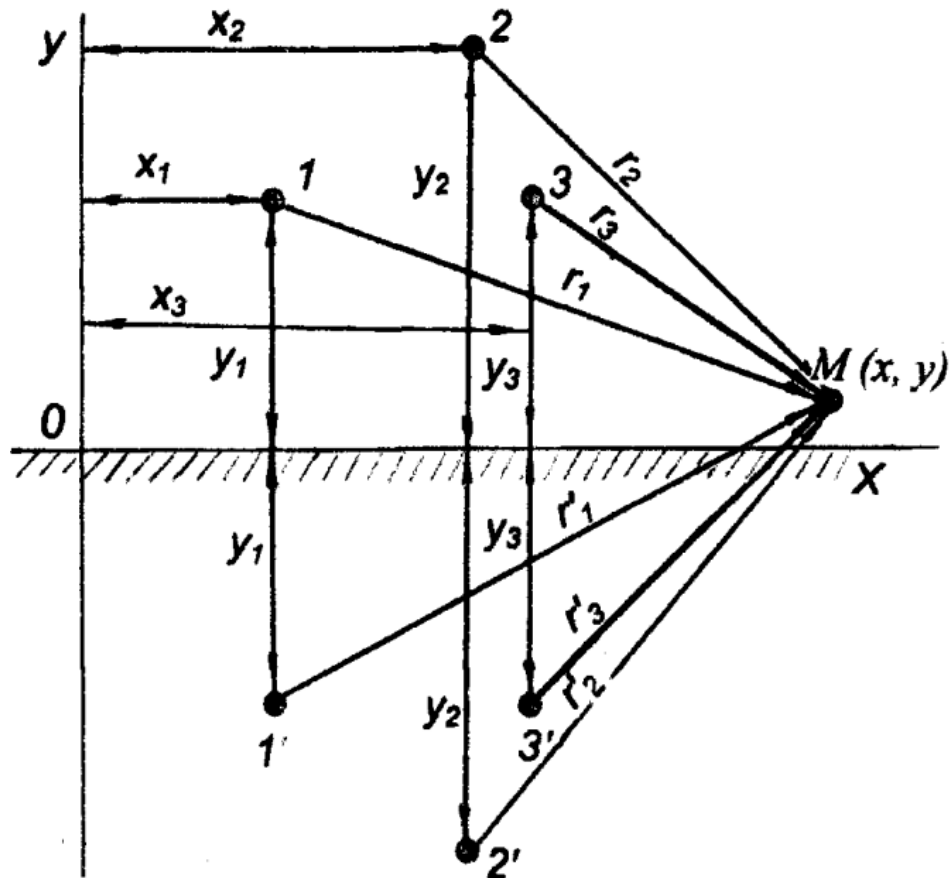


Рисунок 3.1 – До розрахунку електричного поля трифазної лінії електропередачі

Такий вибір відповідає вимозі нейтральності системи зарядів, яка використовується при розрахунку плоскопаралельного поля повітряної лінії

$$\sum_{i=1}^n \tau_i = 0$$

У трифазній лінії електропередачі напруги U_1 , U_2 і U_3 в усіх трьох фазах змінюються у часі і з кутовою частотою ω .

$$U_1 = U_m \sin(\omega t); U_2 = U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); U_3 = U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (3.6)$$

де U_m – амплітуда напруги. Це ускладнює розрахунок електричного поля, оскільки картина поля в різні моменти часу є різною. Тому розрахунок поля

виконують для різних моментів часу.

В довільній точці М (рисунок 3.1), що має геометричні координати (х,у), напруженість електричного поля становить:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}, \quad (3.7)$$

де

$$E_x = \sum_{i=1}^3 E_{xi}, \quad (3.8)$$

$$E_y = \sum_{i=1}^3 E_{yi}. \quad (3.9)$$

В свою чергу проекції вектора напруженості на координатні осі визначаються з виразів (3.4) і (3.5):

$$\begin{aligned} E_{xi} &= \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0 r_i} \cos(\hat{x}, \hat{r}_i) + \frac{\tau'_i}{2\pi\epsilon_0 r'_i} \cos(\hat{x}, \hat{r}'_i) = \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0 r_i} \cos(\hat{x}, \hat{r}_i) - \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0 r'_i} \cos(\hat{x}, \hat{r}'_i) = \\ &= \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{\cos(\hat{x}, \hat{r}_i)}{r_i} - \frac{\cos(\hat{x}, \hat{r}'_i)}{r'_i} \right) = \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x - x_i}{r_i^2} - \frac{x - x_i}{(r'_i)^2} \right), \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} E_{yi} &= \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0 r_i} \cos(\hat{y}, \hat{r}_i) + \frac{\tau'_i}{2\pi\epsilon_0 r'_i} \cos(\hat{y}, \hat{r}'_i) = \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0 r_i} \cos(\hat{y}, \hat{r}_i) - \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0 r'_i} \cos(\hat{y}, \hat{r}'_i) = \\ &= \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{\cos(\hat{y}, \hat{r}_i)}{r_i} - \frac{\cos(\hat{y}, \hat{r}'_i)}{r'_i} \right) = \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{y - y_i}{r_i^2} - \frac{y + y_i}{(r'_i)^2} \right), \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad (3.12)$$

$$r'_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2}. \quad (3.13)$$

Тут τ_i – заряд на одиницю довжини проводу відповідного проводу лінії; x_1, y_1, r_1, r'_1 – відстані, показані на рисунку 3.1.

Потенціал U_m в довільній точці М визначається за формулою:

$$U_M = \sum_{i=1}^3 \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{r'_{ji}}{r_{ji}} \right). \quad (3.14)$$

Щоб визначити три невідомі величин τ_1 ; τ_2 , τ_3 , необхідно скласти та вирішити систему з трьох рівнянь, що випливають з (3.14), розміщуючи для цього точку М послідовно на поверхні кожного з трьох проводів (оскільки потенціали проводів відомі). Нехтуючи радіусом проводу r_0 порівняно з відстанями між проводами, одержимо систему рівнянь в матричній формі (3.15), яку прийнято називати першою групою формул Максвелла [45]:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

де потенціальні коефіцієнти визначають за формулами (3.16) і (3.17).

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2y_i}{r_0}\right) \text{ при } i = j, \quad (3.16)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r'_{ji}}{r_{ji}}\right) \text{ при } i \neq j, \quad (3.17)$$

В виразах (3.14) і (3.17) r_{ij} , r'_{ij} – відстані r_1 , r_1' за умови, що точка М знаходиться на осі проводу під номером j .

Вирішивши систему рівнянь (3.15), обчислимо величини τ_1 , τ_2 , τ_3 , і зможемо знайти напруженість електричного поля в довільній точці за формулами (3.7) – (3.13).

Для розв'язання першої групи формул Максвелла (3.15) згідно з правилом Крамера запишемо систему з трьома невідомими в матричній формі

$$a \cdot r = u$$

де a – основна матриця системи, r – матриця–стовпець невідомих, u – матриця–стовпець вільних членів:

$$a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad r = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}.$$

Тоді, згідно з правилом Крамера, невідомі τ_1 , τ_2 і τ_3 обчислюються за такими формулами

$$\tau_1 = \frac{\det a_1}{\det a} \quad (3.18)$$

$$\tau_2 = \frac{\det a_2}{\det a} \quad (3.19)$$

$$\tau_3 = \frac{\det a_3}{\det a} \quad (3.20)$$

В рівняннях (3.18) – (3.20) матриці a_1 , a_2 і a_3 отримують з a заміною i -го стовпця ($i = 1, 2, 3$) стовпцем вільних членів u :

$$a_1 = \begin{bmatrix} U_1 & a_{12} & a_{13} \\ U_2 & a_{22} & a_{23} \\ U_3 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, a_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & U_1 & a_{13} \\ a_{21} & U_2 & a_{23} \\ a_{31} & U_3 & a_{33} \end{bmatrix}, a_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & U_1 \\ a_{21} & a_{22} & U_2 \\ a_{31} & a_{32} & U_3 \end{bmatrix}$$

Тоді детермінанти в рівняннях (3.18)–(3.20) обчислюються за формулами (3.21) – (3.24):

$$\det a = a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} + a_{12}a_{31}a_{23} + a_{21}a_{13}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31} \quad (3.21)$$

$$\det a_1 = a_{12}a_{23}U_3 - a_{12}a_{33}U_2 - a_{13}a_{22}U_3 + a_{13}a_{32}U_2 + a_{22}a_{33}U_1 - a_{23}a_{32}U_1 \quad (3.22)$$

$$\det a_2 = a_{11}a_{33}U_2 - a_{11}a_{23}U_3 + a_{21}a_{13}U_3 - a_{21}a_{33}U_1 - a_{13}a_{31}U_2 + a_{31}a_{23}U_1 \quad (3.23)$$

$$\det a_3 = a_{11}a_{22}U_3 - a_{11}a_{32}U_2 - a_{12}a_{21}U_3 + a_{12}a_{31}U_2 + a_{21}a_{32}U_1 - a_{22}a_{31}U_1 \quad (3.24)$$

На лініях електропередачі надвисокої напруги застосовується конструкція фази з розщепленням. Під розщепленою конструкцією фази розуміється кількість проводів у фазі, їх перетин та взаємне розташування. Лінії надвисокої напруги будуються з певною кількістю проводів, які розташовані по вершинам правильного багатокутника. Так, для ліній напругою:

- 330 кВ — два проводи,
- 500 кВ — три проводи,
- 750 кВ — чотири-п'ять проводів.

Радіус окружності, описаної по вершинам цього багатокутника, називається радіусом розщеплення (R), а відстань між осями проводів — кроком розщеплення (a). Ці величини взаємопов'язані певним співвідношенням.

$$R = \frac{a}{2 \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (3.25)$$

Розщеплені проводи з електричної точки зору еквівалентні одиночному

проводу, але більшого перетину, ніж кожен з окремих складових:

$$r_{\Sigma} = \sqrt[n]{nr_0 R^{n-1}} = R \sqrt[n]{\frac{nr_0}{R}} \quad (3.26)$$

Саме значення r_2 , розраховане за формулою (3.26) необхідно підставляти в (3.16) замість r_0 у випадку розщепленої фази.

Оскільки згідно з [41] за гранично допустимі рівні прийняті максимальні діючі значення напруженості електричного поля, то розрахунок поля доцільно виконати в комплексних діючих значеннях, задавши потенціали проводів в експоненціальній формі (3.27):

$$\dot{U}_1 = \frac{U}{\sqrt{3}} e^{j0}; \dot{U}_2 = \frac{U}{\sqrt{3}} e^{-j2\pi/3}; \dot{U}_3 = \frac{U}{\sqrt{3}} e^{+j2\pi/3} \quad (3.27)$$

де U – лінійна діюча напруга лінії, кВ.

Тоді ми вилучаємо час t з розрахунку, а сам розрахунок поля можна так само виконувати за формулами (3.8) – (3.13), але замість формули (3.7) використати формулу (3.28):

$$E_{\max} = |\dot{E}| = \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{E})^2 + (\operatorname{Im} \dot{E})^2} = \sqrt{\dot{E}_x^2 + \dot{E}_y^2} \quad (3.28)$$

Грозозахисні троси впливають на розподілення електричного поля. Для оцінки цього впливу вони мають бути враховані в розрахунку. В роботі можна вважати, що грозозахисні троси знаходяться під нульовим потенціалом, а їх радіус можна прийняти рівним r_{Σ} . При врахуванні грозозахисних тросів в розрахунку зміниться система рівнянь (3.15), і для опор, зображених на рисунках 3.2 і 3.3. прийме вид (3.29)

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Оскільки в роботі необхідно обчислити максимальну напруженість поля в середині прогону, то фактично довжина гірлянд ізоляторів не представляє інтересу для розрахунку. Натомість необхідно знати відстань між проводами

лінії та землею в середині прогону, там де ця відстань найменша. Ці дані наведено в таблиці 3.1.

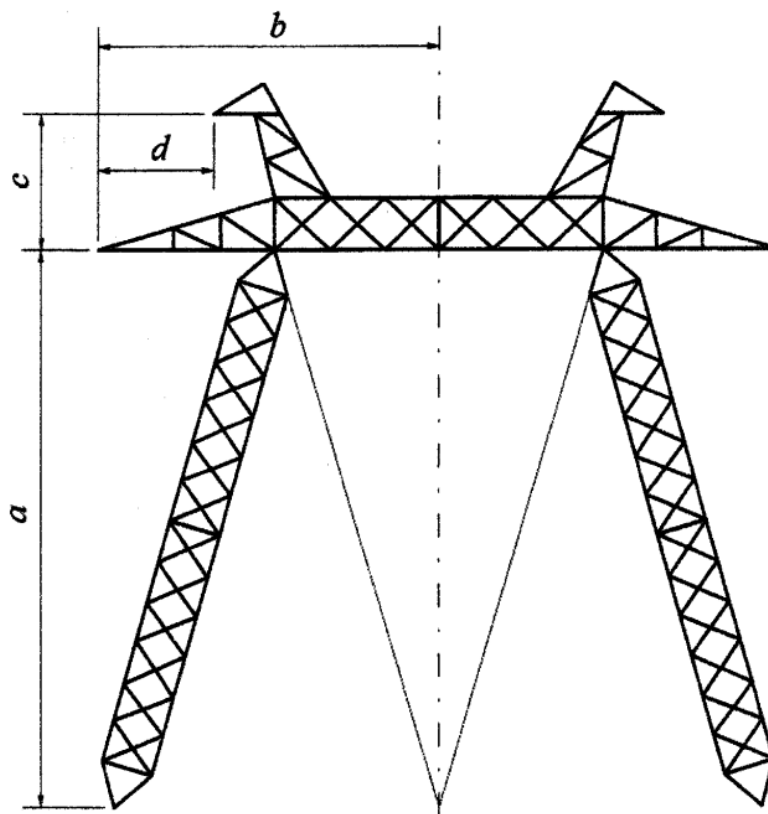


Рисунок 3.2 – Сталева опора повітряної лінії електропередачі

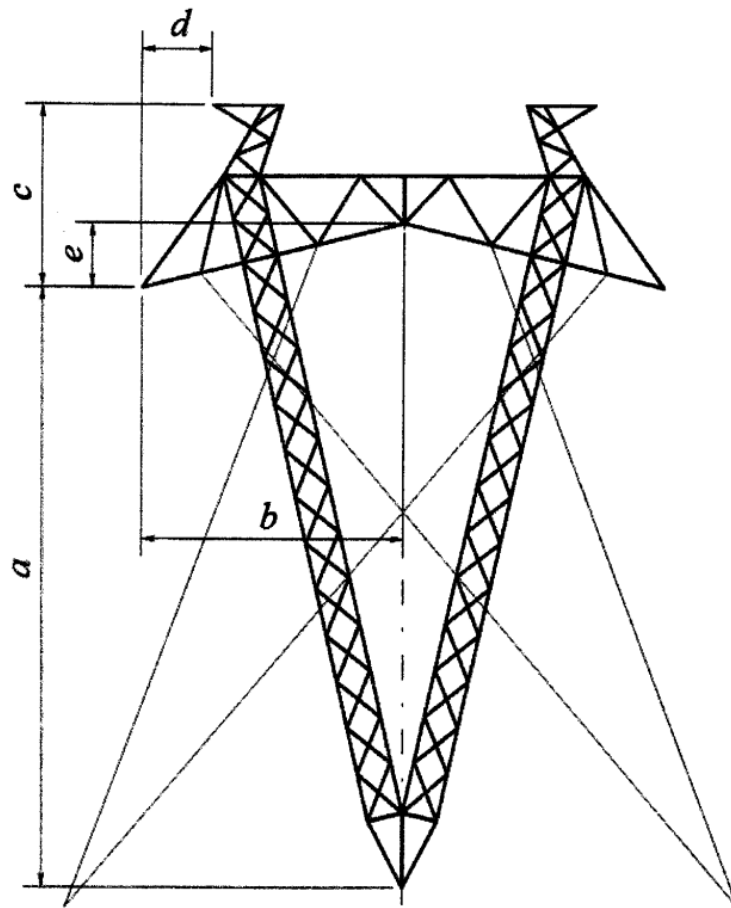


Рисунок 3.3 – Сталева опора повітряної лінії електропередач

Таблиця 3.1

Найменша відстань по вертикалі від проводів повітряних ліній до поверхні
землі

Характеристика місцевості	Найменша відстань, м, для повітряної лінії напругою		
	330 кВ	500 кВ	750 кВ
Населена місцевість	11,0	15,5	—
Ненаселена місцевість	7,5	8,0	12,0
Важкодоступна місцевість	6,5	7,0	10,0

При цьому необхідно вважати, що відстані між фазними проводами лінії і грозозахисними тросами зберігаються незмінними відповідно до рисунків 3.2 і

3.3, і тому відстань між грозозахисними тросами і землею необхідно перерахувати з урахуванням рисунків 3.1 і 3.2 та таблиці 3.1.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Визначення невідомих зарядів за допомогою детермінантів зручно виконувати за допомогою програмного забезпечення, що має вбудовані функції для обчислення детермінантів (наприклад, функція `det` в MATLAB або МОПРЕД в Microsoft Excel). Незалежно від кількості невідомих такий спосіб більш наочний і менш витратний ніж вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь за методом Гауса зі зворотним ходом або без зворотного ходу (схема Жордана).

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ 330 кВ

4.1 Розрахунок напруженості електричного поля під крайньою лівою фазою повітряної лінії електропередачі 330 кВ

Щоб виконати розрахунок напруженості електричного поля під крайньою лівою фазою повітряної лінії електропередачі 330 кВ, зображеною на рисунку 4.1, необхідно врахувати наступні параметри та умови:

1. Тип фази та кількість проводів: На лінії використовуються два проводи в розщепленій фазі типу 2х АС300/39. Діаметр одного проводу становить 24,0 мм.
2. Тип лінії: Лінія прокладена в населеній місцевості, де напруженість електричного поля може досягати певних гранично допустимих значень, що регулюються санітарними нормами.
3. Розташування фаз: За умовами задачі, перша фаза розташована на лівій траверсі, друга — на верхній правій, а третя — на нижній правій. Всі фази формують розщеплену конструкцію.
4. Система координат: Початок координат співпадає з перетином землі і центральної осі опори. У даному випадку координати точок на проводах визначаються в контексті їх відстані від центра опори та одна від одної.

Далі для розрахунку напруженості електричного поля треба визначити потенціал поля в даній точці, використовуючи основні рівняння для електричного поля системи точкових заряджених провідників. Оскільки система має розщеплені проводи, можна розглядати електричне поле як поле кількох точкових зарядів, розміщених у певному просторі, для кожного з яких можна порахувати внесок в загальну напруженість поля.

Математично це можна виразити як:

$$\dot{U}_1 = \frac{330}{\sqrt{3}} e^{j0}; \quad \dot{U}_2 = \frac{330}{\sqrt{3}} e^{-j2\pi/3}; \quad \dot{U}_3 = \frac{330}{\sqrt{3}} e^{+j2\pi/3}.$$

Оскільки на лінії використовується розщеплена фаза, розрахуємо радіус еквівалентного проводу (враховуємо, що згідно із завданням до розрахункової роботи для лінії 330 кВ крок розщеплення фази $a = 0,4$ м

$$R = \frac{a}{2 \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} = \frac{0,4}{2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} = 0,2 \text{ м}; \quad r_{\Sigma} = \sqrt[n]{nr_0 R^{n-1}} = \sqrt[3]{2 \cdot \frac{0,024}{2} 0,2^{2-1}} = 0,069 \text{ м}.$$

Для розрахунку напруженості електричного поля в середині прогону повітряної лінії електропередачі, де проводи знаходяться на визначених висотах, необхідно врахувати відстані між проводами та поверхнею землі, а також розміщення проводів згідно з заданими параметрами.

Згідно з даними, лінія прокладена у населеній місцевості, і найменша відстань від проводів до поверхні землі становить 11,0 м. Далі зазначені відстані для кожної фази:

1. Перша фаза: на відстані 11,0 м від поверхні землі.
2. Друга фаза: на відстані 18,0 м від поверхні землі (оскільки друга фаза розташована вище на 7,0 м порівняно з першою та третьою фазами).
3. Третя фаза: на відстані 11,0 м від поверхні землі, так само як і перша фаза.

З цих відстаней можна продовжити розрахунок електричного поля в середині прогону лінії, використовуючи відомі формули для обчислення напруженості поля для системи розташованих проводів.

Напруженість електричного поля можна оцінити як результат взаємодії всіх провідників, враховуючи їх заряди, розміщення та відстань до кожної точки, де обчислюється поле.

Враховуємо, що в середині прогону проводи розташовані на однаковій висоті, за винятком другої фази, яка знаходиться на більшій висоті. Тому необхідно виконати розрахунок для кожної фази окремо, а потім знайти сумарне поле в точці під лінією.

Точний розрахунок напруженості поля вимагатиме врахування таких параметрів, як крок розщеплення, радіус розщеплення та відстань між точкою вимірювання і проводами лінії.

Таблиця 4.1. – Найменша відстань по вертикалі від проводів повітряних ліній до поверхні землі

Характеристика місцевості	Найменша відстань, м, для повітряної лінії напругою		
	330 кВ	500 кВ	750 кВ
Населена місцевість	11,0	15,5	–
Ненаселена місцевість	7,5	8,0	12,0
Важкодоступна місцевість	6,5	7,0	10,0

Згідно з обраною системою координат можемо записати, що

$$x_1 = -8,0 \text{ м}; x_2 = 5,1 \text{ м}; x_3 = 8,0; y_1 = 11,0 \text{ м}; y_2 = -18,0 \text{ м}; y_3 = 11,0 \text{ м}$$

Координати точки М, в якій необхідно розрахувати максимальне діюче значення напруженості поля: $x_M = -8,0 \text{ м}$; $y_M = 1,8 \text{ м}$. Розраховуємо відстані від осей проводів до розрахункової точки М за формулою:

$$r_i = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2}$$

маємо, що $r_1 = 9,200 \text{ м}$; $r_2 = 20,834 \text{ м}$; $r_3 = 18,456 \text{ м}$.

Розраховуємо відстані від осей дзеркальних зображень проводів до розрахункової точки за формулою:

$$r'_i = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M + y_i)^2}$$

Отримуємо, що $r'_1 = 12,800 \text{ м}$; $r'_2 = 23,741 \text{ м}$; $r'_3 = 20,490 \text{ м}$. Розраховуємо r_{ij} , r'_{ij} – відстані r_i , r'_i за умови, що точка М знаходиться на осі проводу під номером j). Розрахунок проводимо для випадків коли $i \neq j$. Очевидно, що $r_{ij} = r_{ji}$ та $r'_{ij} = r'_{ji}$.

Спочатку обчислюємо

$$r_{ij} = r_{ji} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

при $i \neq j$.

Отримуємо, що $r_{12} = 14,853$ м; $r_{13} = 16,000$ м; $r_{21} = 14,853$ м; $r_{23} = 7,577$ м;
 $r_{31} = 16,000$ м; $r_{32} = 7,577$ м.

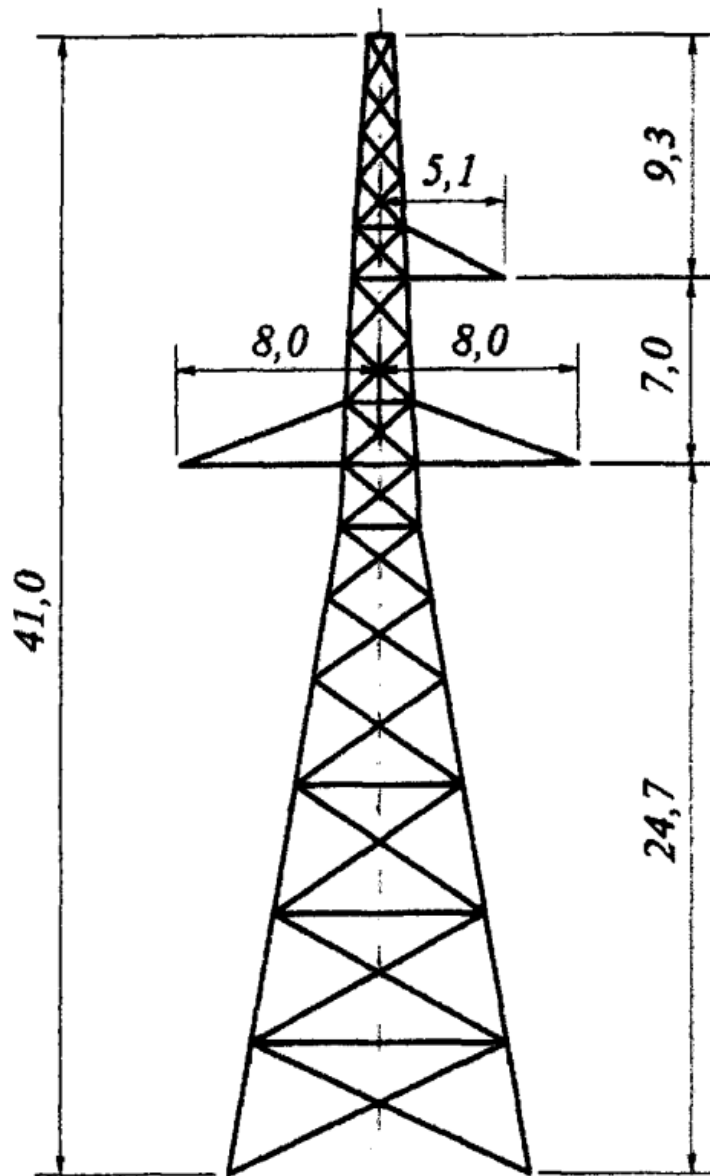


Рисунок 4.1. – До розрахунку електричного поля (розміри в метрах)

Тепер обчислюємо

$$r'_{ij} = r'_{ji} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j + y_i)^2}$$

при $i \neq j$.

Отримуємо, що $r_{12}' = 31,822$ м; $r_{13}' = 27,203$ м; $r_{21}' = 31,822$ м; $r_{23}' = 29,145$ м; $r_{31}' = 27,203$ м; $r_{32}' = 29,145$ м.

Тепер розрахуємо коефіцієнти a_{ij} основної матриці системи першої групи формул Максвелла за формулами:

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2y_i}{r_{\Sigma}}\right), \text{ при } i = j; \quad a_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r'_{ji}}{r_{ji}}\right), \text{ при } i \neq j$$

Отримуємо, що

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,035 \cdot 10^{11} & 1,370 \cdot 10^{10} & 9,540 \cdot 10^9 \\ 1,370 \cdot 10^{10} & 1,124 \cdot 10^{11} & 2,422 \cdot 10^{10} \\ 9,540 \cdot 10^9 & 2,422 \cdot 10^{10} & 1,035 \cdot 10^{11} \end{bmatrix}$$

Матриця–стовпець вільних членів має вигляд

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (330/\sqrt{3}) \cdot e^{j0} \\ (330/\sqrt{3}) \cdot e^{-j2\pi/3} \\ (330/\sqrt{3}) \cdot e^{+j2\pi/3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 190,526 \\ -95,263 - j165,000 \\ -95,263 + j165,000 \end{bmatrix}$$

Отже система рівнянь, яку необхідно вирішити має вигляд

$$\begin{bmatrix} 1,035 \cdot 10^{11} & 1,370 \cdot 10^{10} & 9,540 \cdot 10^9 \\ 1,370 \cdot 10^{10} & 1,124 \cdot 10^{11} & 2,422 \cdot 10^{10} \\ 9,540 \cdot 10^9 & 2,422 \cdot 10^{10} & 1,035 \cdot 10^{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 190,526 \\ -95,263 - j165,000 \\ -95,263 + j165,000 \end{bmatrix}$$

Допоміжні матриці, які необхідні для вирішення цієї системи за допомогою детермінантів мають вигляд:

$$\mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} 190,526 & 1,370 \cdot 10^{10} & 9,540 \cdot 10^9 \\ -95,263 - j165,000 & 1,124 \cdot 10^{11} & 2,422 \cdot 10^{10} \\ -95,263 + j165,000 & 2,422 \cdot 10^{10} & 1,035 \cdot 10^{11} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_2 = \begin{bmatrix} 1,035 \cdot 10^{11} & 190,526 & 9,540 \cdot 10^9 \\ 1,370 \cdot 10^{10} & -95,263 - j165,000 & 2,422 \cdot 10^{10} \\ 9,540 \cdot 10^9 & -95,263 + j165,000 & 1,035 \cdot 10^{11} \end{bmatrix}$$

$$a_3 = \begin{bmatrix} 1,035 \cdot 10^{11} & 1,370 \cdot 10^{10} & 190,526 \\ 1,370 \cdot 10^{10} & 1,124 \cdot 10^{11} & -95,263 - j165,000 \\ 9,540 \cdot 10^9 & 2,422 \cdot 10^{10} & -95,263 + j165,000 \end{bmatrix}$$

Попередньо обчисливши детермінанти в Excel, MATLAB, Mathcad, або іншому програмному забезпеченні, знаходимо невідомі щільності лінійних зарядів:

$$\tau_1 = \frac{\det a_1}{\det a} = \frac{2,288 \cdot 10^{24} + j7,366 \cdot 10^{22}}{1,120 \cdot 10^{33}} = 2,042 \cdot 10^{-9} + j6,572 \cdot 10^{-11}$$

$$\tau_2 = \frac{\det a_2}{\det a} = \frac{-1,012 \cdot 10^{24} - j2,145 \cdot 10^{24}}{1,120 \cdot 10^{33}} = -9,031 \cdot 10^{-10} - j1,914 \cdot 10^{-9}$$

$$\tau_3 = \frac{\det a_3}{\det a} = \frac{-1,005 \cdot 10^{24} + j2,281 \cdot 10^{24}}{1,120 \cdot 10^{33}} = -8,969 \cdot 10^{-10} + j2,035 \cdot 10^{-9}$$

Тепер можемо знайти проекції вектора напруженості на координатні осі за формулами:

$$E_x = \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x_M - x_i}{r_i^2} - \frac{x_M - x_i}{(r'_i)^2} \right); \quad E_y = \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{y_M - y_i}{r_i^2} - \frac{y_M - y_i}{(r'_i)^2} \right)$$

Отримуємо, що $E_{x1} = 0$; $E_{x2} = 0,113 + j0,239$; $E_{x3} = 0,143 - j0,324$; $E_{y1} = -6,858 - j0,221$; $E_{y2} = 1,176 + j2,493$; $E_{y3} = 0,927 - j2,103$.

Тепер знайдемо максимальне діюче значення напруженості електричного поля в точці М:

$$E_{\max} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 E_{xi} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 E_{yi} \right)^2} = \sqrt{22,634 - j1,653} =$$

$$= |4,761 - j0,174| = 4,764 \text{ кВ/м}$$

Як видно, напруженість електричного поля в точці, що розташована в середині прогону під крайньою лівою фазою на висоті 1,8 м від землі, є меншою за гранично допустимий рівень 5 кВ/м, встановлений державними санітарними нормами для населеної місцевості. Це означає, що в даному випадку рівень електричного поля не перевищує допустимі норми.

Тепер, щоб врахувати вплив грозозахисного троса, необхідно повторити розрахунок. Трос розташований на вершині опори, як показано на рисунку 3.1, і додається четвертий провід, координати якого в середині прогону будуть такі: $x_4=0$, $y_4=27,3$ м (враховуючи висоту 11,0 м для першої фази, 7,0 м для другої та додаткові 9,3 м для троса).

Для спрощення розрахунків, можна припустити, що радіус грозозахисного троса складає $r_x=0,069$ м, а його потенціал дорівнює нулю: $U_4=0$.

Враховуючи цей додатковий провід, система рівнянь Максвелла змінюється. Замість трьох невідомих з'являється чотири, що вимагає перерахунку за тими самими загальними формулами.

Відстані від осей проводів до розрахункової точки М дорівнюють:

$$r_1 = 9,200 \text{ м}; r_2 = 20,834 \text{ м}; r_3 = 18,456 \text{ м}; r_4 = 26,72 \text{ м}$$

Відстані від осей дзеркальних зображень проводів до розрахункової точки М дорівнюють: $r_1' = 12,800$ м; $r_2' = 23,741$ м; $r_3' = 20,490$ м; $r_4' = 30,180$ м

Відстані r_{ij} , r_{ij}' – відстані r_i , r_i' за умови, що точка М знаходиться на осі проводу під номером j дорівнюють:

$$r_{12} = r_{21} = 14,853 \text{ м}; r_{13} = r_{31} = 16,000 \text{ м}; r_{14} = r_{41} = 18,157 \text{ м};$$

$$r_{23} = r_{32} = 7,577 \text{ м}; r_{24} = r_{42} = 10,607 \text{ м}; r_{34} = r_{43} = 18,157 \text{ м};$$

$$r_{12}' = r_{21}' = 31,822 \text{ м}; r_{13}' = r_{31}' = 27,203 \text{ м}; r_{14}' = r_{41}' = 39,127 \text{ м};$$

$$r_{23}' = r_{32}' = 29,145 \text{ м}; r_{24}' = r_{42}' = 45,586 \text{ м}; r_{34}' = r_{43}' = 39,12 \text{ м};$$

Основна матриця системи першої групи формул Максвелла має вигляд

$$a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,035 \cdot 10^{11} & 1,370 \cdot 10^{10} & 9,540 \cdot 10^9 & 1,380 \cdot 10^{10} \\ 1,370 \cdot 10^{10} & 1,124 \cdot 10^{11} & 2,422 \cdot 10^{10} & 2,621 \cdot 10^{10} \\ 9,540 \cdot 10^9 & 2,422 \cdot 10^{10} & 1,035 \cdot 10^{11} & 1,380 \cdot 10^{10} \\ 1,380 \cdot 10^{10} & 2,621 \cdot 10^{10} & 1,380 \cdot 10^{10} & 1,199 \cdot 10^{11} \end{bmatrix}$$

Матриця–стовпець вільних членів має вигляд:

$$u = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \dot{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (330/\sqrt{3}) \cdot e^{j0} \\ (330/\sqrt{3}) \cdot e^{-j2\pi/3} \\ (330/\sqrt{3}) \cdot e^{+j2\pi/3} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 190,526 \\ -95,263 - j165,000 \\ -95,263 + j165,000 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Система рівнянь, яку необхідно вирішити має вигляд:

$$\begin{bmatrix} 1,035 \cdot 10^{11} & 1,370 \cdot 10^{10} & 9,540 \cdot 10^9 & 1,380 \cdot 10^{10} \\ 1,370 \cdot 10^{10} & 1,124 \cdot 10^{11} & 2,422 \cdot 10^{10} & 2,621 \cdot 10^{10} \\ 9,540 \cdot 10^9 & 2,422 \cdot 10^{10} & 1,035 \cdot 10^{11} & 1,380 \cdot 10^{10} \\ 1,380 \cdot 10^{10} & 2,621 \cdot 10^{10} & 1,380 \cdot 10^{10} & 1,199 \cdot 10^{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 190,526 \\ -95,263 - j165 \\ -95,263 + j165 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Допоміжні матриці, які необхідні для вирішення цієї системи за допомогою детермінантів мають вигляд:

$$a_1 = \begin{bmatrix} 190,526 & 1,370 \cdot 10^{10} & 9,540 \cdot 10^9 & 1,380 \cdot 10^{10} \\ -95,263 - j165,000 & 1,124 \cdot 10^{11} & 2,422 \cdot 10^{10} & 2,621 \cdot 10^{10} \\ -95,263 + j165,000 & 2,422 \cdot 10^{10} & 1,035 \cdot 10^{11} & 1,380 \cdot 10^{10} \\ 0 & 2,621 \cdot 10^{10} & 1,380 \cdot 10^{10} & 1,199 \cdot 10^{11} \end{bmatrix}$$

$$a_2 = \begin{bmatrix} 1,035 \cdot 10^{11} & 190,526 & 9,540 \cdot 10^9 & 1,380 \cdot 10^{10} \\ 1,370 \cdot 10^{10} & -95,263 - j165,000 & 2,422 \cdot 10^{10} & 2,621 \cdot 10^{10} \\ 9,540 \cdot 10^9 & -95,263 + j165,000 & 1,035 \cdot 10^{11} & 1,380 \cdot 10^{10} \\ 1,380 \cdot 10^{10} & 0 & 1,380 \cdot 10^{10} & 1,199 \cdot 10^{11} \end{bmatrix}$$

$$a_3 = \begin{bmatrix} 1,035 \cdot 10^{11} & 1,370 \cdot 10^{10} & 190,526 & 1,380 \cdot 10^{10} \\ 1,370 \cdot 10^{10} & 1,124 \cdot 10^{11} & -95,263 - j165,000 & 2,621 \cdot 10^{10} \\ 9,540 \cdot 10^9 & 2,422 \cdot 10^{10} & -95,263 + j165,000 & 1,380 \cdot 10^{10} \\ 1,380 \cdot 10^{10} & 2,621 \cdot 10^{10} & 0 & 1,199 \cdot 10^{11} \end{bmatrix}$$

$$a_4 = \begin{bmatrix} 1,035 \cdot 10^{11} & 1,370 \cdot 10^{10} & 9,540 \cdot 10^9 & 190,526 \\ 1,370 \cdot 10^{10} & 1,124 \cdot 10^{11} & 2,422 \cdot 10^{10} & -95,263 - j165,000 \\ 9,540 \cdot 10^9 & 2,422 \cdot 10^{10} & 1,035 \cdot 10^{11} & -95,263 + j165,000 \\ 1,380 \cdot 10^{10} & 2,621 \cdot 10^{10} & 1,380 \cdot 10^{10} & 0 \end{bmatrix}$$

Аналогічно попередньо обчисливши детермініанти в Excel, MATLAB, Mathcad, або іншому програмному забезпеченні, знаходимо невідомі щільності лінійних зарядів:

$$\tau_1 = \frac{\det a_1}{\det a} = \frac{2,557 \cdot 10^{35} + j5,905 \cdot 10^{33}}{1,256 \cdot 10^{44}} = 2,035 \cdot 10^{-9} + j4,698 \cdot 10^{-11}$$

$$\tau_2 = \frac{\det a_2}{\det a} = \frac{-1,152 \cdot 10^{35} - j2,453 \cdot 10^{35}}{1,256 \cdot 10^{44}} = -9,175 \cdot 10^{-10} - j1,953 \cdot 10^{-9}$$

$$\tau_3 = \frac{\det \mathbf{a}_3}{\det \mathbf{a}} = \frac{-1,134 \cdot 10^{35} + j2,539 \cdot 10^{35}}{1,256 \cdot 10^{44}} = -9,023 \cdot 10^{-10} + j2,021 \cdot 10^{-9}$$

$$\tau_4 = \frac{\det \mathbf{a}_4}{\det \mathbf{a}} = \frac{8,805 \cdot 10^{33} + j2,372 \cdot 10^{34}}{1,256 \cdot 10^{44}} = 7,019 \cdot 10^{-11} + j1,890 \cdot 10^{-10}$$

Проекції вектора напруженості на координатні осі дорівнюють:

$$E_{x1} = 0; E_{x2} = 0,114 + j0,244; E_{x3} = 0,144 - j0,322; E_{x4} = -0,00305 - j0,008211; E_{y1} = -6,834 - j0,158; E_{y2} = 1,195 + j2,544; E_{y3} = 0,933 - j2,088; E_{y4} = -0,085 - j0,230$$

Максимальне діюче значення напруженості електричного поля в точці М:

$$E_{\max} = \left| \sqrt{\left(\sum_{i=1}^4 E_{xi} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^4 E_{yi} \right)^2} \right| = \left| \sqrt{23,018 - j0,692} \right| =$$

$$= \left| 4,798 - j0,072 \right| = 4,799 \text{ кВ/м}$$

Як видно, при наявності грозозахисного троса напруженість поля в тій самій розрахунковій точці дещо збільшується порівняно з випадком без нього. Однак, вона все одно не перевищує гранично допустимий рівень 5 кВ/м, встановлений Державними санітарними нормами для захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань у населеної місцевості [41].

4.2. Аналіз перспективних методів і підходів до оптимізації електричних полів

Електричні поля у високовольтних конструкціях і апаратах можуть бути оптимізовані за допомогою різних методів і підходів, які вже отримали визнання в науковій спільноті. Серед основних методів можна виділити:

1. **Методи чисельного моделювання:** Використання комп'ютерних програм для моделювання електричних полів дозволяє отримати точні результати та аналізувати різні варіанти конструкцій. Метод кінцевих

елементів (МКЕ) та метод граничних елементів (МГЕ) є найпоширенішими у цьому контексті.

Чисельне моделювання є потужним інструментом для аналізу та оптимізації електричних полів у високовольтних конструкціях і апаратах. Основні методи чисельного моделювання включають:

Метод кінцевих елементів (МКЕ): Цей метод використовується для розв'язання диференціальних рівнянь, які описують електричні поля. Простір розбивається на кінцеві елементи, кожен з яких описується окремими рівняннями. Цей підхід дозволяє отримати високоточні результати для складних геометрій.

Метод граничних елементів (МГЕ): На відміну від МКЕ, МГЕ фокусується на граничних умовах задачі. Він дозволяє скоротити розмірність задачі, що часто веде до меншої кількості необхідних обчислень при збереженні високої точності.

Метод моментів (ММ): Використовується для аналізу електромагнітних полів і хвиль. Цей метод ефективний для задач з великою кількістю граничних умов і часто застосовується в електромагнітній сумісності та розрахунку антен.

Методи Монте-Карло: Застосовуються для статистичних аналізів і моделювання випадкових процесів в електричних полях. Ці методи корисні для оцінки надійності імовірнісних моделей.

Метод скінченних різниць у часі (FDTD): Використовується для моделювання хвильових процесів. Цей метод ефективний для задач, які вимагають розрахунків у часовій області.

2. Оптимізаційні алгоритми: Алгоритми генетичного пошуку, методи рою часток (PSO), симуляційна відпала, і інші евристичні методи дозволяють знайти оптимальні параметри для мінімізації втрат енергії та покращення ефективності.

Оптимізаційні алгоритми відіграють важливу роль у процесі оптимізації електричних полів у високовольтних конструкціях і апаратах. Вони дозволяють знаходити найкращі параметри для мінімізації втрат енергії, підвищення

ефективності та надійності системи. Ось кілька основних оптимізаційних алгоритмів, що використовуються у цій галузі:

Генетичні алгоритми (GA): Цей алгоритм імітує процес природного відбору, використовуючи операції схрещування, мутації та селекції для знаходження оптимальних рішень. Він ефективний для складних і багатовимірних задач, де традиційні методи можуть не справлятися.

Алгоритм рою часток (PSO): Імітує поведінку рою птахів або риб. Кожна "частка" в рою оновлює своє положення на основі власного досвіду і досвіду сусідів, що дозволяє швидко знаходити оптимальні рішення.

Метод симуляційного відпалу (SA): Натхненний процесом відпалу в металургії, цей метод використовує стохастичні пошукові процеси для знаходження глобальних оптимумів. Він ефективний для задач з великою кількістю локальних мінімумів.

Диференційна еволюція (DE): Це евристичний метод глобальної оптимізації, що використовує різницю між попарно обраними індивідуумами популяції для кращої пошукової здатності. Він є простим в реалізації і дуже ефективним.

Алгоритм імітації відпалу із зворотною дифузією: Це комбінація симуляційного відпалу і методів градієнтного спуску, що дозволяє швидко і точно знаходити оптимальні рішення для задач з великою кількістю параметрів.

3. Використання інноваційних матеріалів: Використання нових матеріалів, таких як суперпровідники та наноматеріали, може значно покращити характеристики електричних полів і знизити втрати.

Інноваційні матеріали відіграють ключову роль у оптимізації електричних полів у високовольтних конструкціях і апаратах. Вони дозволяють досягти нових рівнів ефективності, надійності та безпеки. Ось кілька прикладів використання інноваційних матеріалів:

Суперпровідники: Матеріали, що мають здатність проводити електрику без втрат при дуже низьких температурах. Використання суперпровідників

дозволяє значно знизити енергетичні втрати і підвищити ефективність передачі електроенергії.

Наноматеріали: Нанотехнології відкривають нові можливості для створення матеріалів з унікальними електричними властивостями. Наприклад, вуглецеві нанотрубки можуть бути використані для покращення провідності і механічної стійкості високовольтних апаратів.

Композити: Композитні матеріали, що складаються з двох або більше компонентів з різними властивостями, можуть поєднувати переваги кожного з них. Наприклад, використання композитів на основі полімерів і металів дозволяє створювати легкі, міцні та електропровідні конструкції.

П'єзоелектричні матеріали: Матеріали, що генерують електричний заряд у відповідь на механічний тиск. Їх використання може бути корисним для створення сенсорних елементів і пристроїв контролю в високовольтних системах.

Матеріали з високою діелектричною проникністю: Використання таких матеріалів дозволяє підвищити стійкість високовольтних апаратів до пробойів і знизити втрати на нагрівання. Це особливо важливо для ізоляційних систем.

4. Контроль та моніторинг: Сучасні системи моніторингу та контролю дозволяють в режимі реального часу аналізувати стан високовольтних апаратів і коригувати параметри для оптимізації роботи.

Контроль та моніторинг є важливими аспектами оптимізації електричних полів у високовольтних конструкціях і апаратах. Вони дозволяють забезпечити безперебійну роботу системи та вчасно виявляти і усувати потенційні проблеми. Ось деякі методи та підходи, що використовуються в контролі та моніторингу:

Системи моніторингу в реальному часі: Використання датчиків і систем збору даних, що дозволяють відстежувати параметри роботи високовольтних апаратів у режимі реального часу. Це допомагає швидко реагувати на будь-які відхилення від норми.

Автоматизовані системи діагностики: Використання автоматизованих систем, що здатні проводити діагностику стану апаратів без участі людини. Такі системи можуть виявляти зношування, перегрів, пробої та інші аномалії.

Прогнозне технічне обслуговування: Використання аналітичних інструментів та алгоритмів машинного навчання для прогнозування можливих збоїв і поломок. Це дозволяє проводити технічне обслуговування заздалегідь і уникати непередбачених простоїв.

Тепловізійний контроль: Використання тепловізорів для виявлення перегрівів і потенційних місць пробоїв у високовольтних апаратах. Це дозволяє швидко і точно визначати проблемні ділянки.

Аналіз часткових розрядів: Вимірювання та аналіз часткових розрядів допомагає визначити стан ізоляційних систем і виявити місця можливих пробоїв. Це є важливим аспектом для забезпечення надійності і довговічності апаратів.

Системи дистанційного моніторингу: Використання технологій Інтернету речей (IoT) для дистанційного моніторингу і керування високовольтними апаратами. Це забезпечує централізований контроль і управління на великих відстанях.

Ці методи та технології дозволяють забезпечити високу надійність та ефективність роботи високовольтних апаратів, мінімізуючи ризики аварій та збоїв.

5. Методи оптимізації конструкції: Оптимізація геометрії високовольтних апаратів, включаючи зміну форм електродів, відстаней між елементами та інших конструкційних параметрів.

Оптимізація конструкції високовольтних апаратів є критично важливим аспектом для підвищення їх ефективності, надійності та довговічності. Існує кілька основних методів оптимізації конструкції:

Оптимізація форми електродів: Зміна форми електродів для зменшення інтенсивності електричного поля в критичних точках. Це може включати

використання заокруглених або спеціально профільованих електродів для рівномірного розподілу поля.

Оптимізація відстаней між елементами: Коригування відстаней між електродами, ізоляторами та іншими елементами конструкції для мінімізації ризику пробою і підвищення надійності.

Використання композитних матеріалів: Заміна традиційних матеріалів на композитні, що дозволяють зменшити вагу конструкції, підвищити її міцність та стійкість до екстремальних умов.

Застосування методу топологічної оптимізації: Цей метод використовує комп'ютерне моделювання для визначення оптимальної структури конструкції. Він дозволяє автоматично знаходити найефективніше розміщення матеріалу в межах заданих обмежень.

Аналіз і оптимізація теплових процесів: Оптимізація конструкції з урахуванням теплових процесів, щоб уникнути перегріву і забезпечити ефективне відведення тепла. Це може включати проектування теплових шляхів і використання спеціальних матеріалів з високою теплопровідністю.

Аналіз напружено-деформованого стану: Використання чисельних методів для аналізу напружень і деформацій у конструкції. Це допомагає визначити критичні точки і внести зміни для підвищення стійкості до механічних впливів.

Експериментальні дослідження: Проведення лабораторних і польових випробувань для верифікації та оптимізації конструкційних рішень. Це дозволяє врахувати реальні умови експлуатації і скоригувати модельні припущення.

Оптимізація конструкції є багатогранним процесом, що вимагає інтеграції знань з різних галузей, включаючи механіку, теплотехніку, матеріалознавство та електротехніку. Комбінація цих методів дозволяє досягти високої ефективності та надійності високовольтних апаратів.

Кожен з цих методів має свої переваги і обмеження, тому часто використовуються комбінації різних підходів для досягнення найкращих результатів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Як видно, напруженість поля в тій же розрахунковій точці за наявності грозозахисного троса дещо більше ніж за його відсутності. Але так само не перевищує гранично допустимого рівня 5 кВ/м, встановленого Державними санітарними нормами і правилами захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань для населеної місцевості [41].

На відміну від матриць розмірністю 3×3 , детермінанти матриць більшої розмірності в символьному вигляді мають не такий компактний вигляд, як вирази (2.21)-(2.24). Ці вирази можна вважати допоміжними проміжними результатами, що представляють теоретичний інтерес, оскільки згадане вище сучасне програмне забезпечення дозволяє безпосередньо розраховувати детермінанти, для чого достатньо тільки правильно ввести елементи матриць.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

Забезпечення енергетичної безпеки є критично важливим завданням сучасної енергетики. Оптимізація електричних полів у високовольтних апаратах дозволяє значно підвищити ефективність та надійність енергетичних систем.

У роботі були досліджені аспекти забезпечення енергетичної безпеки шляхом оптимізації електричних полів у високовольтних конструкціях і апаратах, проаналізовано термін енергетична безпека та представлена модель ієрархічної структури енергетичної безпеки.

В рамках кваліфікованої роботи проаналізована методика розрахунків магнітного поля й електромагнітних сил, був проведено детальний аналіз напруженості і електричного поля повітряної лінії електропередачі напругою 330 кВ. Використання чисельних методів, таких як метод кінцевих елементів, дозволило отримати високу точність розрахунків напруженості електричного поля. Це забезпечує надійність моделювання і прогнозування поведінки лінії під навантаженням.

Аналіз показав, що найбільша напруженість спостерігається в місцях з найменшим радіусом кривизни проводу. Це відповідає теоретичним очікуванням і підтверджує правильність вибраної методики розрахунків. Дослідження впливу різних конструктивних параметрів, таких як відстань між проводами та висота підвісу, показало, що оптимізація цих параметрів може значно знизити напруженість електричного поля, що сприяє підвищенню безпеки та ефективності передачі енергії. Проведені експериментальні дослідження підтверджують теоретичні розрахунки, що забезпечує високу достовірність отриманих результатів. Це також дозволяє впроваджувати розроблені методики у практику без необхідності суттєвих коректив.

На основі проведених досліджень було запропоновано низку рекомендацій щодо оптимізації конструкції та експлуатації повітряних ліній електропередачі. Це включає коригування конструктивних параметрів,

використання нових матеріалів та впровадження систем моніторингу в реальному часі.

Ці висновки демонструють значні переваги використання чисельних методів моделювання для аналізу та оптимізації параметрів повітряних ліній електропередачі, що сприяє підвищенню їх ефективності і надійності.

Для подальшого розвитку даної теми буде проведено експериментальні дослідження для підтвердження ефективності запропонованих методів і алгоритмів. Також варто дослідити можливості інтеграції інноваційних матеріалів у існуючі енергетичні системи та оцінити їх вплив на загальну енергетичну безпеку.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України : Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96–ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
3. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
4. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665–III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803–р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540–VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019–VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
8. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908–р // База даних «Законодавство України» /

Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80>.

9. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021–2030 роки : Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
10. Паливно–енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
11. Сайт світової енергетичної ради [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.worldenergy.org/document/ethiopia_june_30_v_gbeddy_security.pdf.
12. Міжнародне енергетичне агентство [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.iea.org/subjectetqueries/keyresult.asp?KEYWORD_ID=4103
13. Микитенко В. В. На чому базується енергетична безпека держави/В.В. микитенко// Вісник НАН України. – 2005. – № 3. – С.41–47.
14. Сайт світової енергетичної ради [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.worldenergy.org/document/ethiopia_june_30_v_gbeddy_security.pdf.
15. Міжнародне енергетичне агентство [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.iea.org/subjectetqueries/keyresult.asp?KEYWORD_ID=4103
16. A Model for Hourly Solar Radiation Data Generation from Daily Solar Radiation Data Using a Generalized Regression Artificial Neural Network / T. Khatib, W. Elmenreich // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy Volume 2015, Article ID 963024,13 pages
17. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition / J.A. Duffie, W.A. Beckman, 2013 P. 910

18. Hybrid solar and wind power: an essential for information communication technology infrastructure and people in rural communities / LA. Adejumobi, S.G. Oyagbinrin, F. G. Akinboro & M.B. Olajide // IJRRAS 9(1) – October 2011–P.130–138
19. Hybrid power generation system / Gagari Deb, Ramananda Paul, and Sudip Das // International Journal of Computer and Electrical Engineering. Vol.4. No. 2. April 2012 – P. 141–144
20. Configuration of a standalone hybrid wind–diesel photoelectric unit for guaranteed power supply for mineral resource industry facilities / A.A. Belsky, A.N. Skamyin, E.V. Iakovleva // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973–4562 Volume 11. Number 1 (2016) – P. 233–238
21. Optimal Sizing of a Hybrid Grid–Connected Photovoltaic–Wind–Biomass Power System /Arnan Gonzalez, Jordi–Roger Riba and Antoni Rius // Sustainability 2015. 7. P. 12787–12806
22. Cost Benefit Analysis of Self–Optimized Hybrid Solar– Wind–Hydro Electrical Energy Supply as compared with HOMER Optimization / A. Amevi, B.H. Essel, B.M. Mathias // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Vol. 114–No. IS. March 2015 P. 32–38
23. A Simple Sizing Optimization Method for Wind– Photovoltaic–Battery Hybrid Renewable Energy Systems / S.M.R. Tito, T.T. Lie, T. Anderson – 2013 P. 8– 13
24. Simulation and Optimization of Independent Renewable Energy Hybrid System / Anita Gudelj and Maja Krcum // Trans marit. sci. 2013; 01. P. 28–35
25. <https://www.meteo.gov.ua>, <https://worldweather.wmo.int/en/home.html>
26. NASA Surface meteorology and Solar Energy – Location. Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>
27. A Model for Hourly Solar Radiation Data Generation from Daily Solar Radiation Data Using a Generalized Regression Artificial Neural Network / T. Khatib, W. Elmenreich // Hindawi Publishing Corporation International

- Journal of Photoenergy Volume 2015, Article ID 963024,13 pages
28. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Херсон>
 29. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition / J.A. Duffie, W.A. Beckman, 2013 P. 910
 30. Целочисленное программирование в Matlab. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html> свободный (Дата звернення 02.05.2017)
 31. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М–во освіти і науки України, Нац. гірн. ун–т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
 32. https://www.atmosfera.ua/for-home/hibrydni-soniachni-stantsii?utm_source=google&utm_medium=performance&utm_campaign=pmax&utm_term=&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAgeeqBhBAEiwAoDDhn1J904WozY0jTggpOUT-58fkGGue4dkRru-1Iewdgc9mEar9qyaHRhoCHT4QAvD_BwE
 33. https://220volt.com.ua/ua/akkumulatornie-batarei/tip_elementa_llitij-ionnaya/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAgeeqBhBAEiwAoDDhnwvaLMSqpftDZZ2AYegrqd5KoVRW-ZUvgxPQ6ePbVkd4Y2p8IaWVhoCYcAQAvD_BwE
 34. Череп О. Г. Управління фінансово–економічною безпекою підприємств в Україні / О. Г. Череп, З. П. Урусова, А. А. Урусов // Вісник ЖДТУ. – 2012. – № 3(61). – С. 328–330.
 35. Черниш О. В., Тарасенко І. О. Фінансова безпека підприємства в умовах кризового середовища / О. В. Черниш, І. О. Тарасенко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 5. – С. 117–119.
 36. Ярославський А.О. Управління економічною безпекою підприємства / Ярославський А. О., Правдюк Н. Л. // Норвезький журнал розвитку міжнародної науки. – 2020. – № 42 (3). – С. 41–44.
 37. ДСН 239–96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань, затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України від 01.08.96 № 239. – 1996 р.

38. Розрахунки магнітних полів в електротехнічних пристроях : навчальний посібник / В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2021. 136 с.
39. Електричні системи та мережі : конспект лекцій / укладачі: І. Л. Лебединський, В. І. Романовський, Т. М. Загородня. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 214 с.
40. Правила улаштування електроустановок, вид. 3–тє, перероб. і доп. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с.
41. Мілих В.І., Шавьолкін О.О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник / За ред. В.І. Мілих. – 3-є вид. – К.: Каравела, 2012. – 688 с.
42. Бржезицький В.О., Какова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПІ" – Торнадо, 2005. – 930 с.
43. Мілих В. І. Електромагнітні поля, параметри та процеси в електротехнічних пристроях : підручник / В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2020. – 396 с.
44. Дослідження електромагнітних полів електротехнічних пристроїв: Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Теорія електромагнітних полів та процесів в електротехніці» для студентів усіх форм навчання спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укладач В.І. Мілих. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 76 с. (сайт <http://web.kpi.kharkov.ua/elmash/>).
45. Розрахунки електромагнітних полів електротехнічних пристроїв : Завдання і методичні вказівки до курсової роботи з курсу «Теорія електромагнітних полів та процесів в електротехніці» для студентів усіх форм навчання спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укладач В. І. Мілих. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 45 с. (сайт <http://web.kpi.kharkov.ua/elmash/>).
46. Мілих В. І. Літерні позначення величин та параметрів електричних машин. Методичні вказівки до використання в навчальному процесі кафедри

«Електричні машини» / В. І. Мілих. – Х. : НТУ «ХП», 2007. – 31 с. (сайт <http://web.kpi.kharkov.ua/elmash/>).

47. Finite Element Method Magnetics: OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable. – Режим доступу: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions/>.