

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Патюк Роман Славович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Вплив електромагнітних зв'язків між проводами дволанцюгової повітряної
лінії та поверхнею землі на перехідні режими апаратів захисту
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело

Патюк Р.С.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Журавльов Валерій Пилипович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.ф-м.н., професор кафедри вищої
та прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Патюк Р.С. Вплив електромагнітних зв'язків між проводами дволанцюгової повітряної лінії та поверхнею землі на перехідні режими апаратів захисту. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Метою даної роботи є вдосконалення методу розрахунку струмів трифазного КЗ у дволанцюговій повітряній лінії при фазній несиметрії її конструктивних параметрів, що особливо важливо при виборі уставок спрацьовування струмового відсікання ліній.

Новизна роботи полягає у створенні математичної моделі ПЛ, яка враховує електромагнітні зв'язки між конструктивними елементами лінії, на базі багатопровідної схеми заміщення.

Ключові слова: дволанцюгова повітряна лінія, математична модель, трифазне КЗ.

ABSTRACT

Patyuk R.S. Influence of electromagnetic couplings between wires of a double-circuit overhead line and the earth's surface on transient modes of protection devices. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The purpose of this work is to improve the method for calculating three-phase short-circuit currents in a two-circuit overhead line with phase asymmetry of its design parameters, which is especially important when choosing the settings for triggering current cut-off of lines.

The novelty of the work lies in the creation of a mathematical model of the overhead line, which takes into account electromagnetic couplings between the structural elements of the line, based on a multi-wire equivalent circuit. **Keywords:** double-circuit overhead line, mathematical model, three-phase short-circuit.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. УТОЧНЕНІ ПИТОМІ ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ДВОЛАНЦЮГОВИХ ЛЕП	7
1.1 Схема заміщення прямої і зворотної послідовності дволанцюгової ЛЕП	7
1.2 Схема заміщення нульової наслідності дволанцюгової ЛЕП	9
Висновки по розділу 1	14
РОЗДІЛ 2 ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ПРОВОДАМИ ДВОЛАНЦЮГОВОЇ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ І ПОВЕРХНЕЮ ЗЕМЛІ НА ПЕРЕХІДНІ РЕЖИМИ	15
2.1 Математична модель для розрахунку усталених режимів дволанцюгових повітряних ліній	15
2.2 Вдосконалення методу розрахунку струмів трифазного КЗ у дволанцюгових ПЛ при фазній несиметрії її конструктивних параметрів	18
Висновки по розділу 2	26
РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ КІНЦЕВОЇ ПРОВІДНОСТІ ЗЕМЛІ НА БАГАТОПРОВІДНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	27
3.1. Аналітичне рішення впливу кінцевої провідності землі на багатопровідну лінії електропередач	27
3.2 Глибина проникнення кінцевої провідності землі	29
Висновки по розділу 3	31
ВИСНОВКИ	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	34

ВСТУП

Повітряні лінії електропередачі, зокрема ті, що працюють на надвисокій напрузі, генерують потужні електромагнітні поля, які можуть негативно впливати на навколишнє середовище. Сильною ознакою таких впливів є зміна в динаміці рослинності, зокрема, гальмування росту або навіть загибель чутливих видів рослин.

Електромагнітні поля, створювані проводами повітряними лініями (ПЛ), можуть впливати на здоров'я людини. Дослідження вказують на потенційний ризик для розвитку різних захворювань, включаючи лейкемію у дітей, які живуть поруч з вишками ПЛ. Наприклад, вивчення в Великобританії показало, що діти, які народилися поблизу високовольтних ліній електропередачі, мали зростаючий ризик захворювання.

Для зменшення впливу магнітних полів використовуються дволанцюгові ПЛ. Дволанцюгові ПЛ мають ряд конструктивних характеристик, які знижують електромагнітні поля. Розташування проводів в лінійній конфігурації, використання нових типів опор та ізоляційних матеріалів допомагає мінімізувати імпульсні електромагнітні впливи та покращити загальну безпеку.

Практичні розробки у проектуванні дволанцюгових повітряних ліній передбачають використання нових технологій зменшення напруженості електричного поля, таких як спеціальні конфігурації підвісок і підвісних ізоляторів, які можуть значно зменшити виробництво електромагнітних полів.

Таким чином електромагнітні зв'язки між проводами дволанцюгової повітряної лінії електропередачі сприяють не тільки ефективному постачанню електричної енергії, але й можуть чинити значний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини. Зменшення негативного впливу електромагнітних полів є важливим аспектом процесу проектування та модернізації електричних мереж. При розробці нових технологій необхідно враховувати не лише економічні, але й екологічні та соціальні фактори.

Сучасні завдання електроенергетики висувають високі вимоги до точності обліку параметрів багатопровідних ліній не тільки на промисловій частоті, але й у значно вищій частотній області. Такі вимоги насамперед в першу чергу обґрунтовуються появою передових алгоритмів релейного захисту та автоматики, що базуються на явищі кінцевої швидкості поширення високочастотних хвильових процесів у багатопровідних лініях.

Розрахунок струмів трифазного короткого замикання (ТКЗ) є одним із основних завдань, які вирішуються в процесі управління ЕЕС. Наявність інформації про вплив факторів (власних властивостей елементів мережі) на чутливість ЕЕС до зовнішніх збурень дозволить покращити властивості ЕЕС при її проектуванні та експлуатації.

До теперішнього часу досить добре розроблені методи розрахунку аварійних режимів в умовах синусоїдальності та симетричності параметрів мережі та режиму. Зокрема, побудовано метод симетричних складових (МСС). При розрахунку режимів ліній електропередачі (ЛЕП) високої напруги використовують спрощені однолінійні схеми заміщення (ОСЗ) Т- та П-подібні з зосередженими параметрами без урахування геометрії мережі. Урахування внутрішніх властивостей ЛЕП, що призводить до появи принципової несиметрії трифазної повітряної лінії (ПЛ), дозволить підвищити точність кінцевого результату розрахунку аварійного режиму.

Відповідно **метою кваліфікаційної роботи** є вдосконалення методу розрахунку струмів трифазного КЗ у ДПЛ при фазній несиметрії її конструктивних параметрів, що особливо важливо при виборі уставок спрацьовування струмового відсікання ліній.

Новизна роботи полягає у створенні математичної моделі ДПЛ, яка враховує електромагнітні зв'язки між конструктивними елементами лінії, на базі багатопровідної схеми заміщення (БСЗ) щодо перехідного процесу трифазного КЗ.

При виконанні роботи були **використані методи** математичного аналізу та математичного моделювання в середовищі Matlab Simulink.

Перелік публікацій автора за темою дослідження

Патюк Р.С., МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ
УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ДВОЛАНЦЮГОВИХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 162-164.

Журавльов В.П., Патюк Р.С. ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ
РОЗРАХУНКУ СТРУМІВ ТРИФАЗНОГО КЗ У ДВОЛАНЦЮГОВИХ ПЛ
ПРИ ФАЗНІЙ НЕСИМЕТРІЇ ЇЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ

Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. – С 151-153.

РОЗДІЛ 1

УТОЧНЕНІ ПИТОМІ ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ДВОЛАНЦЮГОВИХ ЛЕП

Одним із найпоширеніших способів моделювання ліній електропередач різного класу напруги є завдання їх параметрів питомим активним та індуктивним опором, а також питомою ємнісною провідністю. Такий підхід використовується в першу чергу для розрахунку параметрів режиму, що встановився [1,2]. Однак при вирішенні завдання досліджень перехідних режимів при різних коротких замиканнях не дає необхідної точності. По-перше, це пов'язано із усередненням середньгеометричної відстані між фазними проводами, тобто. відсутністю обліку фактичних геометричних характеристик опори. По-друге, це обумовлено тим, що питомі опори та провідності проводів перетином 300 та 330 мм² розраховані тільки для середньгеометричної відстані 8 м, що відповідає їх використанню в мережі напругою 220 кВ. Враховуючи, що проводи даного перерізу широко використовуються в мережі 110 кВ, де середньгеометрична відстань між фазами становить від 4 до 7 м, застосування довідкових даних дасть підвищене значення опору лінії.

У цьому розділі пропонуються розрахункові вирази для визначення питомих електричних параметрів дволанцюгової ЛЕП з одним грозозахисним тросом для подальшого аналізу перехідних режимів.

1.1 Схема заміщення прямої і зворотної послідовності дволанцюгової ЛЕП

Відповідно до [5] параметри схеми заміщення прямої послідовності визначаються однаково для будь-якої конфігурації опори і, таким чином, будуть залежати тільки від марки проводу, відстані між фазами та висотою підвісу фазних проводів.

Питомий поздовжній опір прямої послідовності визначається наступним чином:

$$\dot{Z}_{1(2)} = r_{\pi} + r_3 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{\rho_{\text{е.п}}}, \quad (1.1)$$

У свою чергу еквівалентний радіус сталевалюмінієвого проводу

$$\rho_{\text{е.п}} = 0,95 \cdot \rho_{\pi}, \quad (1.2)$$

де ρ_{π} - фактичний радіус проводу, м.

Для визначення поперечної ємності Керівними вказівками [2] рекомендується використовувати метод зеркальних зображень. Відповідно до цього методу земля розглядається як поверхня з нульовим потенціалом, тому можна ввести так звані «дзеркальні зображення» проводів, тобто. фіктивні проводу, розташовані під землею на глибині, що дорівнює висоті їх підвішування. Потенціали провідників пов'язані з їх зарядами через потенційні коефіцієнти, що визначаються

$$\begin{aligned} \alpha_{ii} &= 41,4 \cdot 10^6 \cdot \lg \frac{S_{ii}}{\rho_n}; \\ \alpha_{ij} &= 41,4 \cdot 10^6 \cdot \lg \frac{S_{ij}}{D_{ij}}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

де індекси $i, j = A, B, C, T, T'$; S_{ii} – відстань між проводом або тросом та його дзеркальним зображенням; S_{ij} – відстань між проводом або тросом i та зеркальним зображенням проводу або троса j ; D_{ij} - відстань між проводами чи тросами.

У (3) індекс ii відноситься до власних потенційних коефіцієнтів (α_c), індекс ij - до взаємних ($\alpha_{\text{вз}}$).

Ємність прямої послідовності лінії електротроєпередачі, Ф/км визначається по формулі

$$C_{1(2)} = \frac{1}{\alpha_c - \alpha_{\text{вз}}} = \frac{0,0241 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{cp} \cdot S_L}{\rho_n \cdot S_M}}, \quad (1.4)$$

де D_{cp} - середньоггеометрична відстань між фазами; S_L – середньоггеометрична відстань між проводом та його дзеркальним зображенням; S_M - середньоггеометрична відстань між проводом однієї фази та дзеркальним зображенням іншої.

$$\begin{cases} D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}}; \\ S_L = \sqrt[3]{S_{AA} \cdot S_{BB} \cdot S_{CC}}; \\ S_M = \sqrt[3]{S_{AB} \cdot S_{BC} \cdot S_{AC}}. \end{cases} \quad (1.5)$$

Знаючи ємність прямої послідовності лінії, неважко визначити її питому ємнісну провідність, См/км.

$$b_{C1(2)} = 2\pi \cdot f \cdot C_{1(2)}. \quad (1.6)$$

1.2 Схема заміщення нульової наслідності дволанцюгової ЛЕП

Розглянемо математичне моделювання дволанцюгової ліній електропередачі з одним грозозахисним тросом. Опори зазначеного типу широко використовуються в мережах 110 кВ систем електропостачання промислових підприємств. Однак для ліній такої конфігурації в чинних Керівних вказівках [2] відсутні розрахункові вирази для визначення питомих електричних параметрів схеми заміщення нульової послідовності (поздовжнього індуктивного опору та поперечної ємнісної провідності).

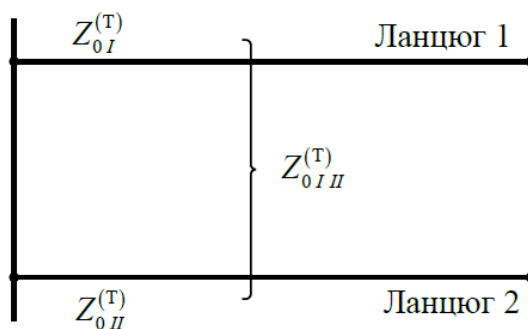
Схема двоколової ЛЕП, а також її схема заміщення для струмів нульової послідовності наведена на рис. 1.1.

Оскільки для розрахунків параметрів аварійного режиму пропонується використовувати Т-подібну схему заміщення, то схема на рис. 1.1, б має бути перетворена в еквівалентний поздовжній опір:

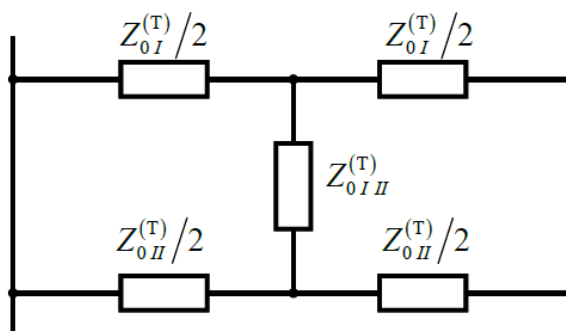
$$\dot{Z}_0^{(T)} = \frac{\left(\dot{Z}_{0I}^{(T)}\right)^2 \dot{Z}_{0II}^{(T)} + \left(\dot{Z}_{0II}^{(T)}\right)^2 \dot{Z}_{0I}^{(T)} + 4\dot{Z}_{0I}^{(T)} \dot{Z}_{0II}^{(T)} \dot{Z}_{0I}^{(T)}}{2 \left(\frac{\dot{Z}_{0I}^{(T)}}{2} + \frac{\dot{Z}_{0II}^{(T)}}{2} + 2\dot{Z}_{0I}^{(T)} \right) \left(\dot{Z}_{0I}^{(T)} + \dot{Z}_{0II}^{(T)} \right)}, \quad (1.7)$$

де власний опір першого ланцюга визначається як

$$\dot{Z}_{0I}^{(T)} = \dot{Z}_{0II}^{(T)} - \frac{\dot{Z}_{0\Gamma}^2}{\dot{Z}_{0T}}; \quad (1.8)$$



a



б

опір другого ланцюга визначається за (1.8) з індексами *II* замість *I*;
взаємний опір ланцюгів

$$\dot{Z}_{0I II}^{(T)} = \dot{Z}_{0I II}^{(T)} - \frac{\dot{Z}_{0\Gamma}^2 \cdot \dot{Z}_{0\Gamma}^2}{\dot{Z}_{0T}}. \quad (1.9)$$

У виразі (1.9) $\dot{Z}_{0I}^{(T)}$ та $\dot{Z}_{0II}^{(T)}$ обчислюються за виразом (1.1).

Опір троса визначається по формулі

$$\dot{Z}_{0T} = 1,5r_{\tau} + j0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt{\rho_{e,\tau}}}, \quad (1.10)$$

еквівалентний радіус троса, м.кв.

Опір взаємодукції між ланцюгами визначається виразом

$$\dot{Z}_{0I II} = 1,5r_{\tau} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{cpI II}}, \quad (1.11)$$

$$\text{де } D_{cpl II} = \sqrt[9]{D_{Aa} \cdot D_{Ab} \cdot D_{Ac} \cdot D_{Ba} \cdot D_{Bb} \cdot D_{Bc} \cdot D_{Ca} \cdot D_{Cb} \cdot D_{Cc}}.$$

Опір ланцюгів з урахуванням впливу грозозахисного троса визначається за виразом

$$\dot{Z}_{0IT} = \dot{Z}_{0IIT} = 0,15 + j0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{D_{пТ}}, \quad (1.12)$$

$$D_{пТ} = \sqrt[3]{D_{AT} \cdot D_{BT} \cdot D_{CT}} \cdot D$$

Окрім поздовжнього індуктивного опору лінії для розрахунків необхідно врахувати ємнісну поперечну провідність ЛЕП. Згідно методом дзеркальних зображень ємність нульової послідовності можна вивести із системи рівнянь, що зв'язують напруги проводів щодо землі зі своїми електричними зарядами. Бо у схемі заміщення нульової послідовності крім фазних проводів необхідно врахувати вплив грозозахисного троса, то для нього теж складається відповідне рівняння, при врахуванні, що напруга троса дорівнює нулю.

$$\begin{cases} \dot{U}_{0I} = \alpha_{II} q_{0I} + \alpha_{IT} q_{IT}; & (a) \\ \dot{U}_{0II} = \alpha_{II} q_{0I} + \alpha_{II} q_{0II} + \alpha_{IT} q_{IT}; & (б) \\ 0 = 3\alpha_{IT} q_{0I} + \alpha_{IT} q_{0II} + \alpha_{TT} q_{IT}, & (в) \end{cases}$$

$$\alpha_{II}^{(T)} = \alpha_{II} - \Delta\alpha_{IT};$$

$$\alpha_{II}^{(T)} = \alpha_{II} - \Delta\alpha_{IT};$$

$$\alpha_{II}^{(T)} = \alpha_{II} - \Delta\alpha_{IT};$$

$$\alpha_{II}^{(T)} = \alpha_{II} - \Delta\alpha_{IT},$$

Власний потенційний коефіцієнт ланцюга визначається як

$$\alpha_{II(II)} = 41,4 \cdot 10^6 \lg \frac{D_{cp} S_L}{\rho_n S_M}.$$

Взаємний потенційний коефіцієнт визначається як

$$\alpha_{I II(I I)} = 124 \cdot 10^6 \lg \frac{S_{cpl II}}{D_{cpl II}},$$

$$S_{cpl II} = \sqrt[9]{S_{AA} S_{BB} S_{CC} S_{AB}^2 S_{AC}^2 S_{BC}^2}.$$

Додаткові потенційні коефіцієнти ланцюгів визначаються по формулі

$$\Delta\alpha = \left[124 \cdot 10^6 \left(\lg \frac{S_{\pi\Gamma}}{D_{\pi\Gamma}} \right)^2 \right] \left[\lg \frac{S_{\pi\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \right]^{-1},$$

$S_{\pi\Gamma} = \sqrt[3]{S_{AT} S_{BT} S_{CT}}$, $S_{\pi\Gamma}$ – відстань між тросом та його зеркальним зображенням, м.

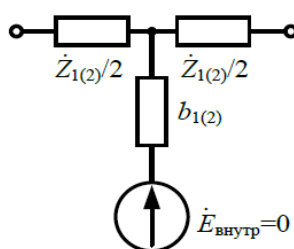
Знаходимо ємність ланцюгів:

$$C_{II} = \frac{\alpha_{II}^{(T)}}{\alpha_{II}^{(T)} \alpha_{II}^{(T)} - \alpha_{II}^{(T)}};$$

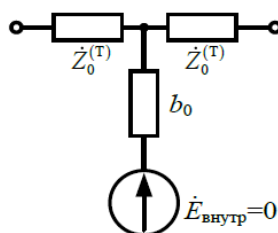
$$C_{II} = \frac{\alpha_{II}^{(T)}}{\alpha_{II}^{(T)} \alpha_{II}^{(T)} - \alpha_{II}^{(T)}}.$$

$$b_0 = 2\pi f (C_{II} + C_{II}). \quad (1.13)$$

В результаті лінія електропередачі може бути представлена Т-подібною схемою заміщення, яка показана на рис. 1.2.



a



б

Рисунок 1.2. Схема заміщення прямої, зворотної (а) та нульової послідовності (б) ЛЕП

Використовуючи вирази (1.1), (1.6), (1.7) і (1.13), були розраховані питомі поздовжні опори (Ом/км) і поперечна провідність (См/км) дволанцюгових ліній електропередачі напругою 110 кВ з проводами перерізом від 120 до 300 мм² при середньгеометричній відстані між проводами 4, 5,6, 7,1 м. Дані величини відповідають опорам типу ПБ110-8, У110-2 та ЦП-8 відповідно, які широко використовуються в системах електропостачання промислових підприємств. Отримані опори та провідності зведені в табл. 1.1 і 1.2. Усі значення визначені за умови, що на лінії використовується грозозахисний трос радіусом 4,55 мм з активним опором 2,8- 3,7 Ом/км.

Таблиця 1.1- Питомі параметри прямої (зворотної) послідовності

$D_{cp}, \text{ м}$	Провід	$r_{1(2)}, \text{ Ом/км}$	$x_{1(2)}, \text{ Ом/км}$	$b_{1(2)} \cdot 10^{-6}, \text{ См/км}$
4	АС-120	0,25	0,404	2,501
	АС-150	0,198	0,396	2,544
	АС-240	0,12	0,38	2,634
	АС-300	0,098	0,374	2,677
	М-185	0,1002	0,394	2,555
5,6	АС-120	0,25	0,424	2,347
	АС-150	0,198	0,416	2,384
	АС-240	0,12	0,402	2,463
	АС-300	0,098	0,394	2,5
	М-185	0,1002	0,4142	2,394
7,1	АС-120	0,249	0,438	2,239
	АС-150	0,198	0,43	2,274
	АС-240	0,12	0,416	2,345
	АС-300	0,098	0,41	2,379
	М-185	0,10015	0,428	2,282

$D_{cp}, \text{ м}$	Провід	$r_0,$ Ом/км	$x_0,$ Ом/км	$b_0 \cdot 10^{-6},$ См/км
4	АС-120	0,532	2,422	1,697
	АС-150	0,476	2,362	1,697
	АС-240	0,4	2,23	1,697
	АС-300	0,378	2,17	1,697
	М-185	0,38	2,346	1,697
5,6	АС-120	0,51	2,07	1,525
	АС-150	0,458	2,004	1,525
	АС-240	0,38	1,87	1,525
	АС-300	0,358	1,812	1,525
	М-185	0,36	1,986	1,525
7,1	АС-120	0,524	1,798	1,5
	АС-150	0,472	1,73	1,5
	АС-240	0,394	1,598	1,5
	АС-300	0,372	1,538	1,5
	М-185	0,374	1,714	1,5

Подані в розділі розрахункові вирази дозволяють визначати питомий поздовжній опір та поперечну ємність дволанцюгових ЛЕП з одним грозотрос. Оскільки в них враховано електромагнітна та електростатична взаємодія провідних елементів лінії, їх можна використовувати при розрахунку несиметричного аварійного режиму.

РОЗДІЛ 2

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ПРОВОДАМИ ДВОЛАНЦЮГОВОЇ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ І ПОВЕРХНЕЮ ЗЕМЛІ НА ПЕРЕХІДНІ РЕЖИМИ

Параметри електроенергетичної системи (ЕЕС), піддаючись зовнішнім та внутрішнім обуренням, що постійно змінюються. Зміна параметрів режиму залежить від зовнішніх факторів: виду, величини та швидкості обурення; місця його виникнення та характеру прояву та внутрішніх факторів: схеми, параметрів елементів ЕЕС та регулювальних пристроїв. Для забезпечення надійності електропостачання споживачів електроживлення здійснюється від двох незалежних джерел живлення. При цьому електропередача проводиться за дволанцюговими повітряними лініями (ДПЛ), які виконуються на одній несучій опорі.

2.1 Математична модель для розрахунку усталених режимів дволанцюгових повітряних ліній

Дволанцюгові повітряні лінії електропередач є специфічними об'єктами систем електропостачання, що пов'язано з малими відстанями між провідниками сусідніх ланцюгів. Взаємні електростатичні та електромагнітні зв'язки між провідниками істотно впливають на параметри не тільки перехідних, але й режимів, що встановилися, особливо при різних значеннях потоків потужностей в ланцюгах.

В даний час розрахунки режимів у мережах з дволанцюговими лініями проводяться в основному за однопровідними схемами заміщення, а взаємний вплив ланцюгів не враховується. У зв'язку з цим важливим моментом є розробка математичної моделі для розрахунку встановлених режимів у дволанцюгових лініях та її реалізація в вигляді методики розрахунку з допомогою багатопровідної схеми заміщення.

При аналізі режимів електричних мереж використовується відомий підхід, що дозволяє зменшити похибку моделювання лінії як об'єкта з розподіленими параметрами. Він пов'язаний, перш за все, зі штучним поділом на дві рівні

частини електростатичного або електромагнітного процесів, що призводить відповідно до Π або Γ -подібним схемам заміщення.

Для побудови багатопровідної схеми заміщення слід прийняти такі припущення [13].

- Електромагнітний та електростатичний зв'язок між провідниками лінії враховується величинами взаємних опорів та ємнісних коефіцієнтів.
- Визначення власних та взаємних ємнісних коефіцієнтів та опорів провадиться за загальноприйнятою методикою.

Відповідно до прийнятої концепції роздільного моделювання електромагнітних та електростатичних процесів у лінії електромагнітна складова багатопровідної схеми заміщення вихідно формується у вигляді матриці $\underline{Z}$ активно-індуктивних власних та взаємних опорів у вигляді

$$\underline{Z} = \underline{Z}^{\Pi} + \underline{Z}^3 + j\omega \mathbf{M} \quad (2.1)$$

де $\underline{Z}^{\Pi}$ - Діагональна матриця власних опорів, в яких враховані магнітні потоки, що проникають у ці проводи; $\underline{Z}^3$ - квадратна матриця власних та взаємних опорів, що вносяться провідною землею; $\mathbf{M}$ -квадратна матриця власних та взаємних індуктивностей, обумовлених магнітними потоками, які замикаються у повітряному середовищі.

Використання моделі матриці $\underline{Z}$ дозволяє у вигляді падінь напруги в провідниках описувати взаємні електромагнітні процеси.

Електростатична складова багатопровідної схеми заміщення у вигляді матриці власних та взаємних ємнісних коефіцієнтів $\mathbf{B}$ вихідно формується із матриці потенційних коефіцієнтів $\mathbf{A}$ шляхом її обігу $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1}$.

Розрахунок режиму роботи дволанцюгової лінії складається з наступних позицій.

- Побудова еквівалентної багатопровідної схеми заміщення та визначення її параметрів.
- Складання рівнянь Максвелла, Ома та Кірхгофа для схеми заміщення.
- Визначення матриць $\underline{Z}$ та $\mathbf{B}$.

Необхідно визначити напруги та струми ($\dot{U}_K, \dot{I}_K$) в кінці лінії по заданим на початку лінії напруг і струмів ($\dot{U}_\Pi, \dot{I}_\Pi$). Завдання розрахунку встановленого режиму для дволанцюгової лінії реалізується наступною алгоритмічною послідовністю, яку можна трактувати як математичну модель.

1. Використовуючи другу групу формул Максвелла, визначимо по лівій поперечній частини схеми (електростатичний процес) вектор ємнісних струмів $\dot{I}_{c\Pi}$ у виді

$$\dot{I}_{c\Pi} = \frac{1}{2} j\omega B \dot{U}_\Pi \quad (2.2)$$

2. Знаючи вектор струмів $\dot{I}_\Pi$, по першому закону Кірхгофа знайдемо вектор струмів $\dot{I}_{\text{под}}$ в подовжній частині схеми заміщення:

$$\dot{I}_{\text{под}} = \dot{I}_\Pi - \dot{I}_{c\Pi}. \quad (2.3)$$

3. Далі для подовжній частині схеми (електромагнітний процес) запишемо по закону Ома рівняння її стану для вектора $\Delta \dot{U}$ падінь напруги при протіканні струмів віток $\dot{I}_{\text{под}}$ у вигляді

$$\Delta \dot{U} = \underline{Z} \cdot \dot{I}_{\text{под}} \quad (2.4)$$

4. Тепер можна визначити вектор $\dot{U}_K$ напруг в кінці лінії:

$$\dot{U}_K = \dot{U}_\Pi - \Delta \dot{U}. \quad (2.5)$$

5. За аналогією з пунктом 1 знайдемо для правої поперечної частини схеми вектор ємнісних струмів $\dot{I}_{cK}$ у вигляді

$$\dot{I}_{cK} = \frac{1}{2} j\omega B \dot{U}_K. \quad (2.6)$$

6. Остаточо можна отримати вектор струмів $\dot{I}_K$ у вузлі кінця МСЗ

$$\dot{I}_K = \dot{I}_{\text{под}} - \dot{I}_{cK}. \quad (2.7)$$

Зазначимо, що потоки потужності в кожному з ланцюгів можуть відрізнятися один від одного. як за величиною, так і за напрямом за рахунок

$\dot{U}_\Pi, \dot{I}_\Pi$. Матричні вирази

(2.2)-(2.7) дозволяють визначити параметри режиму та оцінити взаємний вплив ланцюгів дволанцюгової лінії шляхом порівняння результатів, отриманих за наведеною вище методикою, з аналогічними результатами розрахунків, виконаних без урахування цього впливу.

2.2 Вдосконалення методу розрахунку струмів трифазного КЗ у дволанцюгових ПЛ при фазній несиметрії її конструктивних параметрів

Розрахунок струмів трифазного короткого замикання (ТКЗ) є однією із основних задач, розв'язуваних у процесі управління ЕЕС. Наявність інформації про вплив внутрішніх факторів (власних властивостей елементів мережі) на чутливість ЕЕС при зовнішніх збуреннях дозволить покращити властивості ЕЕС при її проектуванні та експлуатації.

На сьогодні досить добре розроблені методи розрахунку аварійних режимів в умовах синусоїдальності та симетричності параметрів мережі та режиму. Так, зокрема, побудований метод симетричних складових (МСС). При розрахунку режимів ліній електропередач (ЛЕП) високої напруги використовують спрощені однолінійні схеми заміщення (ОСЗ) Т- та П-подібні із зосередженими параметрами без урахування геометрії мережі. Врахування внутрішніх властивостей ЛЕП, що призводить до появи принципової несиметрії трифазної повітряної лінії (ПЛ), дозволить підвищити точність кінцевого результату розрахунку аварійного режиму. Для врахування впливу власних властивостей мережі застосовують метод фазних координат (МФК) [5]. Фазні координати також застосовуються для моделювання несинусоїдальних та несиметричних режимів [5,6], моделювання аварійних режимів та різних елементів ЕЕС [7]. На практиці цей метод стикається з низкою труднощів, особливо для ДПЛ невеликої протяжності без транспозиції проводів (до 20–25 км), які перешкоджають його широкого поширення. Таким чином, проблема розрахунку параметрів аварійного режиму нетранспонованих ДПЛ при несиметричності її геометрії є актуальною.

Новизна роботи полягає у створенні математичної моделі ДПЛ, яка враховує електромагнітні зв'язки між конструктивними елементами лінії, на базі багатопровідної схеми заміщення (БСЗ) щодо перехідного процесу ТКЗ. У якості тестованої моделі була розглянута мережа з ДПЛ, виконана проводом марки АС-300/39 з параметрами: активний опір проводу $R_{\text{пр}} = 0,0958 \text{ Ом/км}$; радіус проводу $r_{\text{пр}} = 12 \text{ мм}$; еквівалентний радіус проводу $r_{\text{ек}} = 11,4 \text{ мм}$; напруга 220 кВ; довжина між підстанціями (ПС) 500кВ «Західна» та ПС 220кВ «Центральна» $L=25,80\text{км}$, опори лінії електропередач типу П220-2 (рис. 2.1).

Як розрахунковий експеримент прийнято аварійний режим трифазного КЗ на шинах приймальної ПС «Центральна», з подальшим моделюванням у програмному комплексі Matlab Simulink. Проведено аналіз отриманих експериментальних та розрахункових результатів.

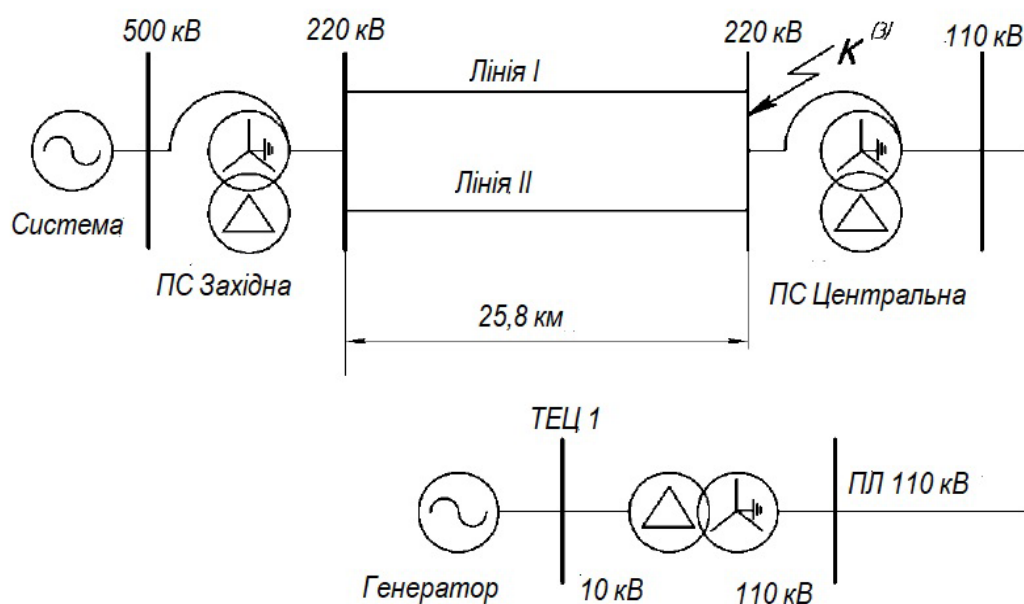


Рисунок 2.1. Розрахункова принципова схема електричної мережі

Для формування матричного рівняння стану аварійного режиму ДПЛ використовувалося табличне подання повної МСС на основі матриці відстаней між проводами різних фаз, матриці взаємних та власних опорів [5], а також матриці взаємних та власних ємностей.

Для обчислення початкового періодичного ТКЗ було створено три розрахункові моделі:

1) однолінійна схема заміщення, сформована у вигляді поздовжніх та поперечних частин ДПЛ;

2) однолінійна схема заміщення, сформована у вигляді поздовжніх частин ДПЛ з урахуванням взаємоіндукції провідників;

3) МСС з поздовжньої та поперечною частинами ДПЛ, сформована у вигляді квадратної матриці з урахуванням ємнісних зв'язків між проводами та тросом. Розрахункова частина за впливом взаємоіндукції сусідніх фаз на величини струмів КЗ була досить повно описана у роботах [7,9].

Повний опір Z_L та ємнісна провідність b_L лінії з достатньою для практики точністю визначається як:

$$Z_L = \left(R_{np} + j0,145 \lg \frac{D_{cp}}{r_{ek}} \right) \cdot L; \quad (2.8)$$

$$b_L = b_0 L = \left(\frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{cp}}{r_{np}}} \right) \cdot L; \quad (2.10)$$

Де R_{np} - питомий активний опір проводу; r_{ek} – еквівалентний радіус проводу; r_{np} - радіус проводу; D_{cp} - міжфазна середньгеометрична відстань одного ланцюга.

Опір взаємоіндукції для варіанта 2 визначено аналогічно (2.8), де середня геометрична відстань між ланцюгами I і II ДПЛ $D_{cp} = D_{I-II}$ і визначена за виразом

$$D_{cp} = \sqrt[15]{d(AB) \cdot d(BC) \cdot d(AC) \cdots d(ab) \cdot d(bc) \cdot d(ac)};$$

де A, B, C, a, b, c – умовне позначення фаз I ланцюга ДПЛ; фаз II ланцюга ДПЛ відповідно.

Розрахункові схеми заміщення для аналізованих варіантів 1 і 2 показані на рис. 2.2 та 2.3; з урахуванням ємнісних струмів – на рис. 2.4.

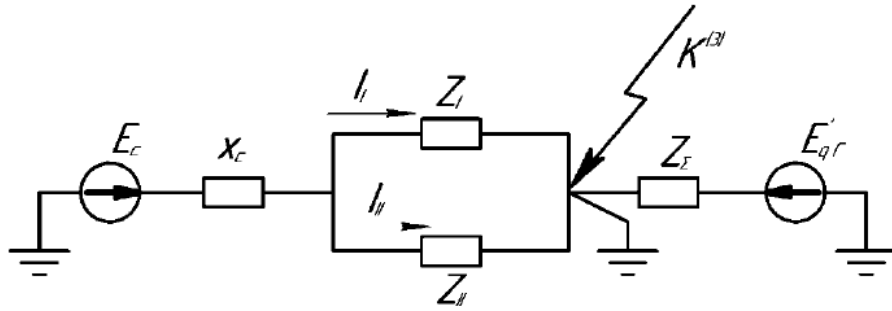


Рисунок 2.2. Розрахункова схема заміщення ДПЛ без урахування взаємоіндукції провідників фаз

Струм КЗ без урахування ємнісних струмів I_K відповідно до розрахункової схеми заміщення (рис. 2.2) визначено методом симетричних складових за виразом

$$I_K = \frac{U_\phi}{Z}; \quad (2.12)$$

Ємнісний струм, що генерується ПЛ, визначається за виразом

$$I_C = \frac{U_\phi \cdot b_\pi}{2}, \quad (2.13)$$

тоді струм КЗ з урахуванням ємнісних струмів відповідно до розрахункової схеми заміщення (рис. 2.3) складе

$$I_{KC} = I_K - I_C. \quad (2.14)$$

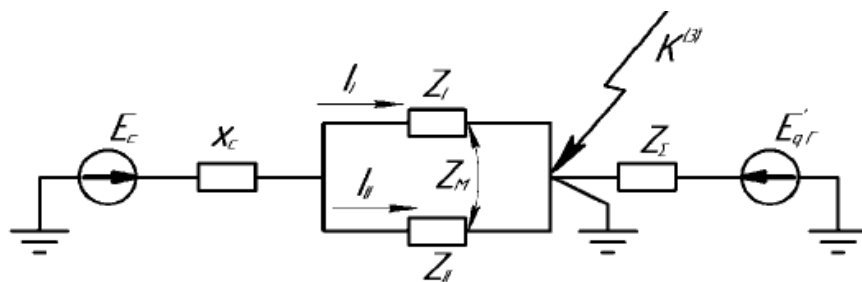


Рисунок 2.3. Розрахункова схема заміщення ДПЛ з урахуванням взаємоіндукції провідників фаз

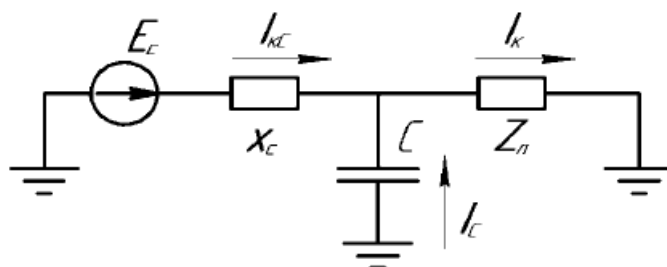


Рисунок 2.4. Схема для розрахунку ємнісної складової струму КЗ ДПЛ

Результати розрахунків двох варіантів розрахункових схем представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Результати розрахунків струму КЗ ДПЛ за двома варіантами розрахункових схем

Номер варіанта, розрахункової схеми заміщення	D_{cp} , м	Z , Ом	b_n , См	I_c , А	I_k , А	I_{kc} , А
1. ОСЗ	9,18	$2,47 + j10.87$	0,0000679	4,314	11394,6	11390,32
2. ОСЗ з урахуванням поперечної складової ДПЛ	10,695	$2,47 + j11.12$	0,0000664	4,217	11150,6	11146,42

Для реалізації моделі мережі, яка враховує несиметрію властивостей ланцюгів ДПЛ, складена МСС на базі матриці Z , що складається з власних $Z_{i,i}$ та взаємних $Z_{i,j}$ фазних опорів; власних та взаємних ємнісних провідностей $b_{ci,i}$ та $b_{ci,j}$ у відповідності до рис. 2.5. На головній діагоналі матриці опорів Z розташовуються власні активно-індуктивні опори фаз, розраховані за виразом (2.15), недиагональні елементи являють опір взаємоіндукції проводів ДПЛ, розраховуються за виразом (2.16):

$$Z_L = \left(R_{np} + R_z + j0,145 \lg \frac{D_3}{r_{ek}} \right) \cdot L ; \quad (2.15)$$

$$Z_M = \left(R_z + j0,145 \lg \frac{D_3}{d} \right) \cdot L , \quad (2.16)$$

де $D_3 = 1000$ м - глибина залягання фіктивного зворотного проводу при $f = 50$ Гц; $R_z = 0,05$ Ом/км – питомий опір землі; d – відстань між двома лініями "Провід-земля".

Фазні струми визначені рішенням матричного рівняння аварійного стану режиму ДПЛ по МСС у Z -формі без урахування ємнісних струмів у вигляді

$$|I| = |Z|^{-1} |E| ; \quad (2.17)$$

де E – матриця трифазної системи напруг джерел живлення; Z – матриця повних опорів фаз ДПЛ з урахуванням взаємовпливу від розташування ланцюгів на опорах ЛЕП та грозозахисного троса.

Використовуючи вбудовану утиліту *Matlab Powergui Compute RLC Line Parameters*, відповідно [8] були отримані матриці опорів і ємностей (рис. 2.6 і 2.7), аналогічні розрахованим.

На основі отриманих результатів у програмному комплексі Matlab Simulink був розрахований матричним методом за виразом (2.19), а потім змодельований розрахунковий експеримент (рис. 2.8), результати якого одержали взаємне підтвердження. У частині моделювання результати представлені у формі осцилограм фазних струмів ТКЗ в початку лінії, що проходять через релейний захист (рис. 2.9), і в точці короткого замикання (рис. 2.10). Дослідження підтвердили можливість використання запропонованого методу. На осцилограмі фазних струмів КЗ показані пікові (максимальні) значення.

Line Constant Tool: line parameters: LineParameters.mat

General

Units: metric

Frequency (Hz): 50

Ground resistivity (ohm.m): 180

Comments:

Розрахунок особистих і взаємних опорів та провідностей ДПЛ 220 кВ. Провід марка АС300/39, Опори П220-2

Line Geometry

Number of phase conductors (bundles): 6

Conduct...	Phase	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Cond.type
p1	1	-3.5000	36	28	1
p2	2	-6.4000	29	21	1
p3	3	-4.2000	22.5000	14.5000	1
p4	4	3.5000	36	28	1
p5	5	6.4000	29	21	1
p6	6	4.2000	22.5000	14.5000	1

Number of ground wires (bundles): 0

Conduct...	Phase	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Cond.type
------------	-------	-------	-------------	-----------	-----------

Conductor and Bundle Characteristics

Number of conductor types: 1

Conductor internal inductance evaluated from: Geometric Mean Radius (GMR)

☒ Include conductor skin effect

Conductor (bundle) type	Conductor outside diameter (cm)	Conductor T/D ratio	Conductor GMR (cm)	Conductor DC resistance (Ohm/km)	Conductor relative permeability	Number of conductors per bundle	Bundle diameter (cm)	Angle of conductor 1 (degrees)
1	2.4000	0.5000	1.2000	0.0958	1	1	1.0000e-03	1

Load typical data Load user data Save Compute RLC line parameters Help Close

Рисунок 2.6. Вікно введення вихідних даних для розрахунку розподілених параметрів ДПЛ

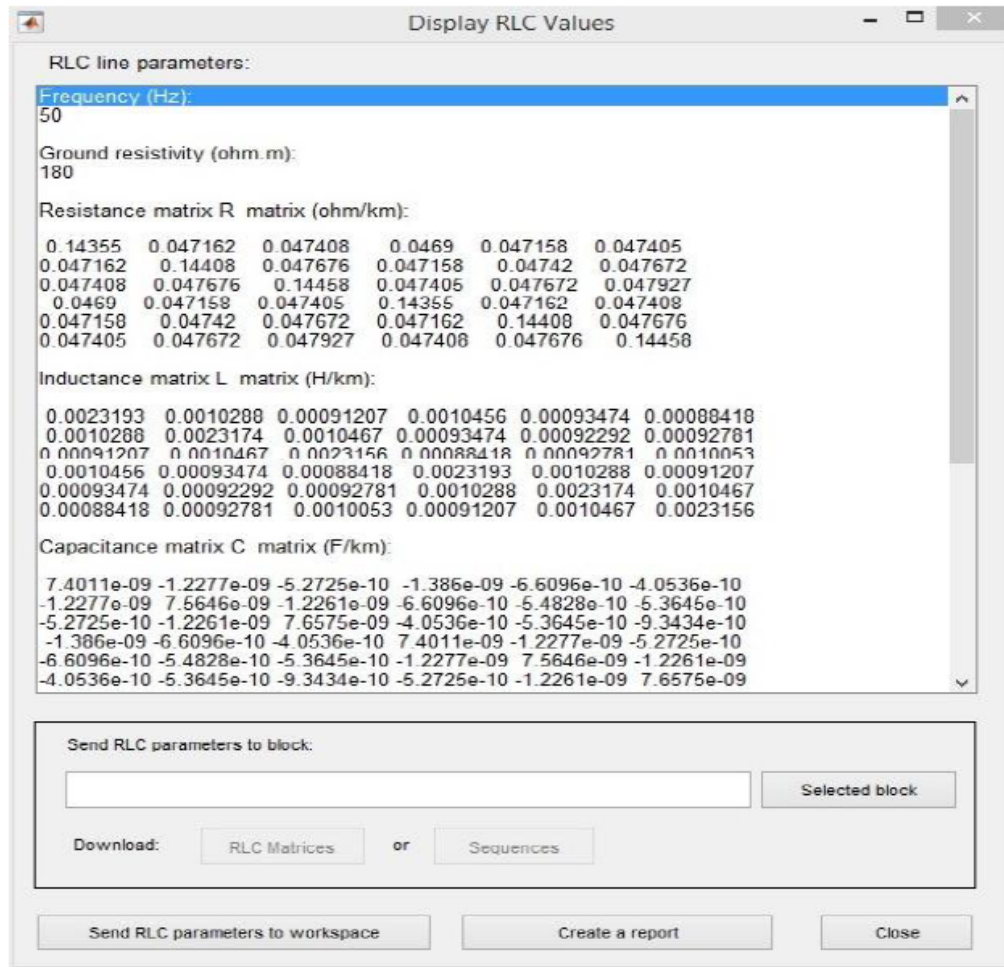


Рисунок 2.7. Результати розрахунку розподілених параметрів ДПЛ

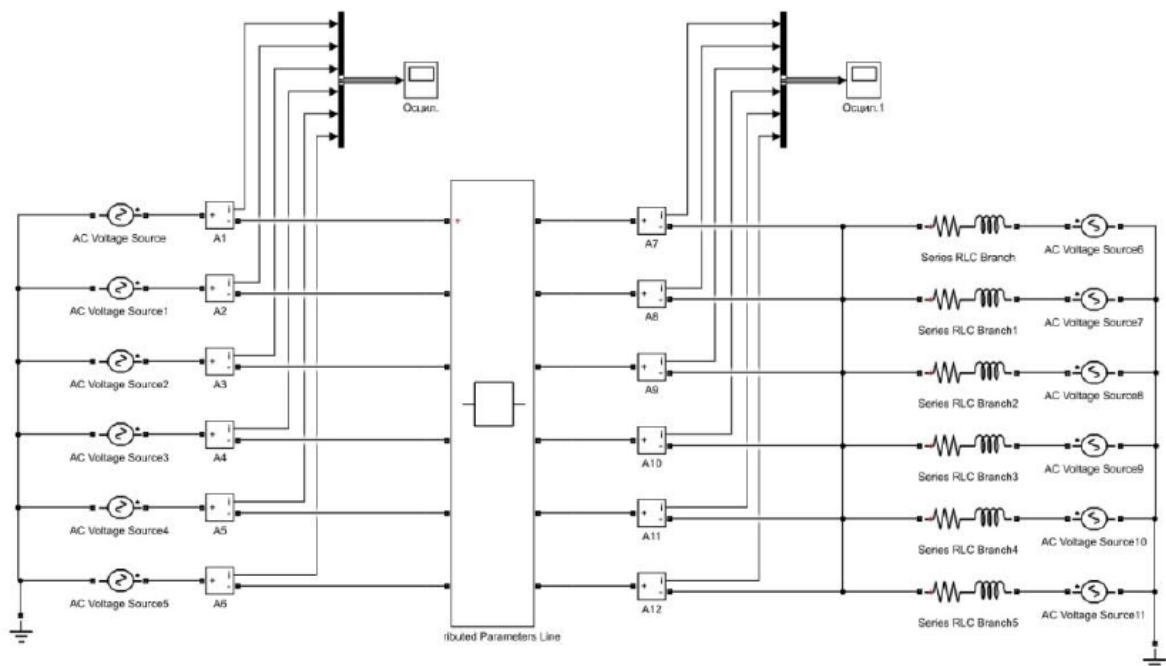


Рисунок 2.8. Електромагнітна модель ТКЗ на базі МСС для початкової ділянки досліджуваної ДПЛ у програмному комплексі Matlab Simulink

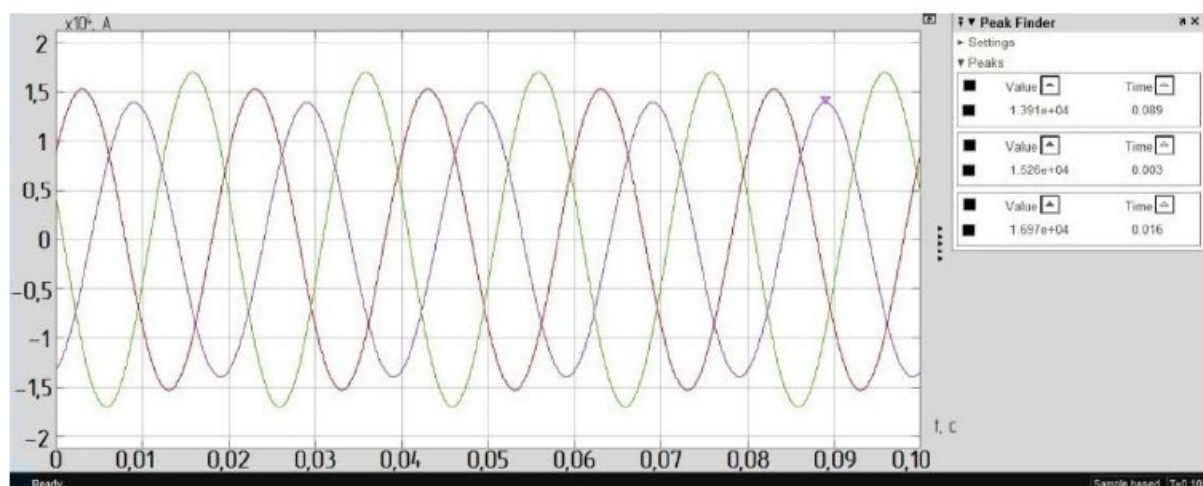


Рисунок 2.9. Осцилограма фазних струмів ТКЗ на початку ДПЛ

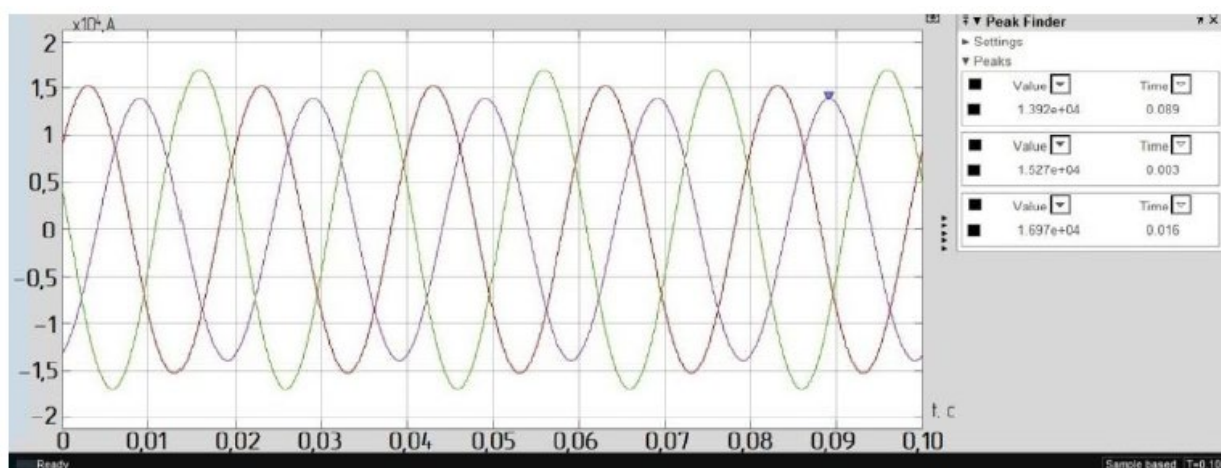


Рисунок 2.10. Осцилограма фазних струмів ТКЗ на кінці ДПЛ

Висновки по другому розділу

Наведені дослідження з використанням МФК показали, що нехтування взаємовпливом ланцюгів ДПЛ, ліній та тросів при розрахунку перехідних режимів призводить до виникнення знакозмінних похибок в оцінці початкового значення струму ТКЗ у фазних проводах

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ КІНЦЕВОЇ ПРОВІДНОСТІ ЗЕМЛІ НА БАГАТОПРОВІДНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Електромагнітна хвиля, поширюючись вздовж лінії електропередачі, наводить індуковані струми (поверхневий ефект) землі. Втрати енергії хвилі на створення цих струмів визначаються як геометричними параметрами системи проводів, так і параметрами ґрунту. У симетричній системі координат цього явища (повернення через землю) відповідає нульова послідовність, а модальної – земляний канал.

3.1 Аналітичне рішення впливу кінцевої провідності землі на багатопровідну лінію електропередач

Дослідження у сфері обліку впливу кінцевої провідності землі показують високий рівень залежності цього явища від частоти електромагнітного поля [5]. Цей факт значно ускладнює дослідження хвильових перехідних процесів у часовій області [5].

Аналітичне рішення. Вплив кінцевої провідності землі в частотній ділянці при її поданні однорідною напівнескінченною площиною з еквівалентною глибиною проникнення (рис. 3.1) може бути представлено за допомогою аналітичних виразів [10]:

$$Z_{зем}(j\omega)_{ii} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-(2h_i)g}}{\sqrt{g^2 + \gamma_{зем}^2} + g} dg; \quad (3.1)$$

$$Z_{зем}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)g}}{\sqrt{g^2 + \gamma_{зем}^2} + g} \cos(d_{ij}g) dg, \quad (3.2)$$

де

$$\gamma_{зем}(j\omega) = \sqrt{j\omega\mu_0\mu_{зем}(\sigma_{зем} + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{зем})}; \quad (3.3)$$

$\sigma_{зем}$ – провідність землі, См/м; μ_0 - абсолютна магнітна проникність, Гн/м; $\mu_{зем}$ – відносна магнітна проникність; ε_0 – абсолютна діелектрична проникність, Ф/м; $\varepsilon_{зем}$ – відносна діелектрична проникність; h_i - висота підвісу і-го проводу

над землею, м; d_{ij} - горизонтальна відстань між i -м та j -м проводами, м (рис. 3.1).

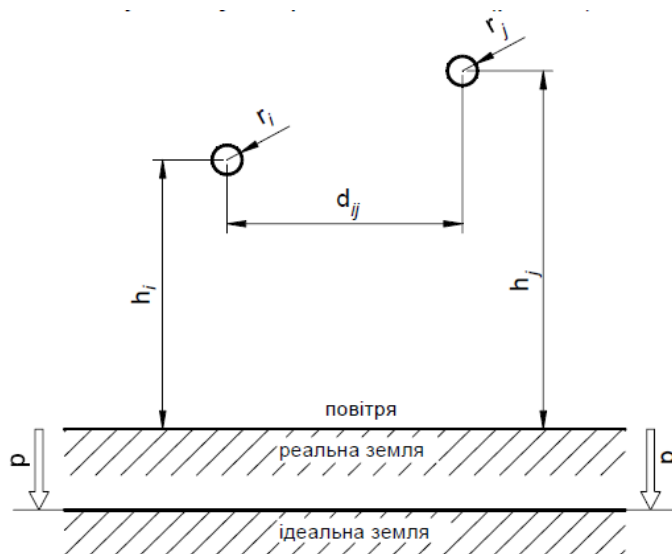


Рисунок 3.1. Еквівалентна глибина проникнення хвиль щодо поверхні землі

Вирази (3.1), (3.2) представлені у вигляді невластних інтегралів. Їх точне рішення може бути отримано з використанням функцій Бесселя першого та другого порядку [10]. Розв'язання цих функцій, у свою чергу, представляється у вигляді рядів. Таке уявлення не дуже зручне для практичних інженерних розрахунків. Тому зазвичай його спрощують шляхом використання лише перших членів рядів та виключенням з розгляду струму зміщення землі [11]. Як показують розрахунки [12], такий підхід демонструє відмінну точність у низькочастотній області та незадовільну точність у високочастотній.

Більш раціональним бачиться підхід до спрощення рішення виразів (3.1), (3.2) апроксимуючими [12] елементарними функціями комплексного аргументу:

$$Z_{зем}(j\omega)_{ii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1 + h_i \gamma_{зем}}{h_i \gamma_{зем}} \right); \quad (3.4)$$

$$Z_{зем}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{\left[1 + \frac{\gamma_{зем}(h_i + h_j)}{2} \right]^2 + \left[\frac{\gamma_{зем} d_{ij}}{2} \right]^2}{\left[\frac{\gamma_{зем}(h_i + h_j)}{2} \right]^2 + \left[\frac{\gamma_{зем} d_{ij}}{2} \right]^2} \right). \quad (3.5)$$

Вирази (3.4), (3.5) точно узгоджуються у всьому діапазоні частот [12] з виразами (3.1), (3.2) відповідно. З цієї причини вони бачаться повноправними кандидатами на заміщення використовуваних тільки для низькочастотної області виразів [12].

3.2 Глибина проникнення кінцевої провідності землі

Методологічно вплив, що вноситься кінцевою провідністю землі, необхідно відносити до зовнішнього опору багатопровідної лінії. Таким чином, зовнішній опір цієї лінії повинен включати в себе також опір землі. Вирази для цього можуть бути отримані виходячи з припущення, що повернення через землю здійснюється через якусь ідеально провідну площину [6]. Ця площина повинна розташовуватися на певній фіктивній глибині (рис. 3.1), відповідної комплексної глибини проникнення плоских хвиль щодо поверхні землі (рис. 3.2):

$$p(j\omega) = \frac{1}{\gamma_{зем}(j\omega)} . \quad (3.6)$$

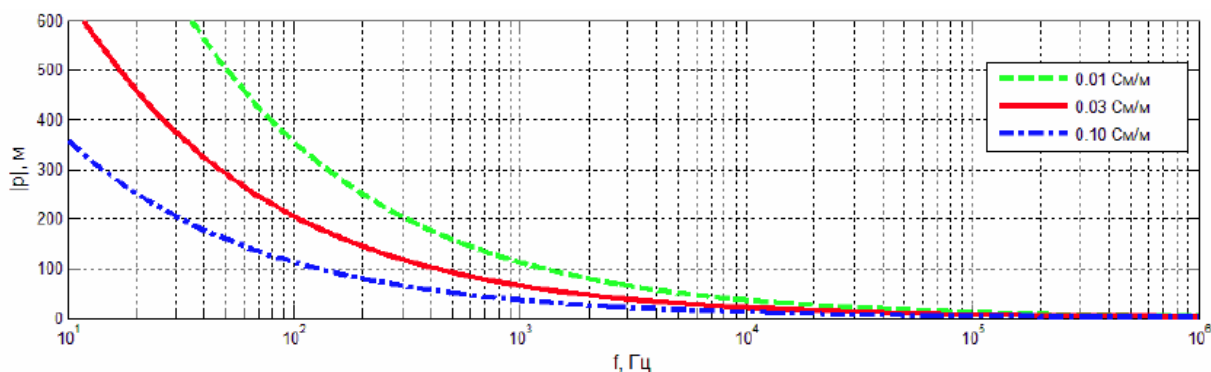


Рисунок 3.2. Залежності модуля комплексної глибини проникнення плоских хвиль у землю від частоти при різних провідностях землі (за виразом (3.6) без урахування струму зміщення у землі)

З фізичного погляду ця глибина відповідає «рівню нульового потенціалу» під поверхнею землі [1]. У низькочастотній області модуль цієї величини (для характерних показників провідності ґрунту) значно перевищує висоти підвісу проводів фаз над землею (рис. 3.2). У високочастотної області ця величина прагне до поверхні землі (поле майже проникає в землю).

Справді, при зменшенні питомої провідності землі (збільшенні питомого опору землі) повернення через землю здійснюватиметься на більшій глибині [1]. Що, власне, відповідає явищу збільшення втрат у землі.

Крім того, безпосередньо з виразу (3.6) може бути отримана еквівалентна глибина проникнення:

$$\delta(j\omega) = (1+j) p(j\omega). \quad (3.7)$$

Таким чином, підставивши вираз (3.6) у підінтегральні функції виразів (3.1), (3.2), можна розкласти останні вирази в ряд. Взявши, скажімо, лише перший член такого ряду, можна зробити інтегрування. Після чого отриманий вираз можна сумістити з виразом для зовнішнього опору проводу. Тоді зовнішнє опір багатопровідної системи, що знаходиться над поверхнею, що має кінцеву провідність землі, можна представити наступними виразами:

$$Z_{\text{зовніш}}(j\omega)_{ii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(2 \frac{h_i + p(j\omega)}{r_i} \right); \quad (3.8)$$

$$Z_{\text{зовніш}}(j\omega)_{ii} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln \left(\frac{[h_i + h_j + 2 \cdot p(j\omega)]^2 + [d_{ij}]^2}{[h_i + h_j]^2 + [d_{ij}]^2} \right). \quad (3.9)$$

Ці вирази показують високу точність, тільки коли висота підвісу проводу над землею набагато більша за відстань між фазами. Таке співвідношення виконується завжди для використовуваних в електроенергетиці типів опор. У випадках, коли, наприклад, необхідно розглядати вплив ЛЕП на лінії зв'язку, це співвідношення зазвичай не виконується. Похибка може досягати 15 % [5]. Для її зменшення потрібно використовувати апроксимацію підінтегральних функцій у виразах (3.1), (3.2) як першими членами низки [6], а й хоча б другими [5]. Похибка у разі не перевищуватиме 2,5 %.

Особливий інтерес викликає дослідження поведінки виразів (3.1), (3.2) із зростанням частоти. На дуже високих частотах дійсна глибина проникнення плоских хвиль у землю (3.7) стає кінцевою величиною [14]:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \delta(j\omega) = \frac{2}{\sigma_{зем}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{зем}}{\mu_0 \mu_{зем}}}. \quad (3.10)$$

Отже, опір землі (3.4), (3.5) у цьому випадку теж приймає якесь кінцеве значення. Причому уявна частина цих виразів звернеться в нуль, а дійсна набуде асимптотичне значення [13]:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_{зем}(j\omega)_{ii} = \frac{1}{2\pi h_i} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{зем}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{зем}}}; \quad (3.11)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_{зем}(j\omega)_{ij} = \frac{h_i + h_j}{\pi \left[(h_i + h_j)^2 + d_{ij}^2 \right]} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{зем}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{зем}}}. \quad (3.12)$$

Зауважимо, що при прагненні частоти у нескінченність прямий розрахунок чисельними методами виразів (3.1), (3.2), на відміну від апроксимуючих виразів (3.4), (3.5), може не завжди сходитися. Крім того, у цій області частот починає позначатися вплив струму зміщення у землі. При його виключенні з розгляду виразу (3.1), (3.2) звертаються до нескінченностей, а величина (3.7) – в нуль [14], що суперечить (3.11), (3.12).

Результати розрахунків представлені на рис. 3.3.

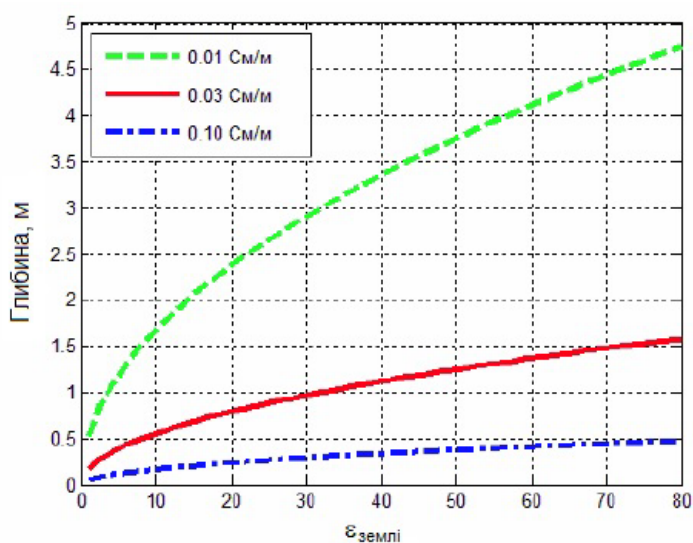


Рисунок 3.3. Залежність еквівалентної глибини проникнення плоских хвиль у землю від діелектричної проникності при різних провідностях землі (на дуже високих частотах)

Висновки по третьому розділу

Вплив кінцевої провідності землі є складною функцією частоти. Незважаючи на це, аналітичні вирази, що описують це явище для однорідної

напівнескінченної площини, можуть бути представлені в досить простій формі (3.4), (3.5).

ВИСНОВКИ

Параметри електроенергетичної системи (ЕЕС) під час експлуатації постійно піддаються зовнішнім та внутрішнім обуренням, які постійно змінюються. Зміна параметрів режиму залежить від зовнішніх факторів: виду, величини та швидкості обурення; місця його виникнення та характеру прояву та внутрішніх факторів: схеми, параметрів елементів ЕЕС та регулювальних пристроїв. Для забезпечення надійності електропостачання споживачів електроживлення здійснюється від двох незалежних джерел живлення. При цьому електропередача проводиться за дволанцюговими повітряними лініями (ДПЛ), які виконуються на одній несучій опорі.

Параметри електроенергетичної системи (ЕЕС), піддаючись зовнішнім та внутрішнім обуренням, що постійно змінюються від зовнішніх факторів: виду, величини та швидкості обурення; характеру прояву та внутрішніх факторів: схеми, параметрів елементів ЕЕС та регулювальних пристроїв. Для забезпечення надійності електропостачання споживачів. електроживлення здійснюється від двох незалежних джерел живлення.

При цьому електропередача проводиться за дволанцюговими повітряними лініями (ДВЛ), які виконуються на одній несучій опорі.

Відповідно в кваліфікаційній роботі розглянуті методи вдосконалення розрахунку струмів трифазного КЗ у ДПЛ при фазній несиметрії її конструктивних параметрів, що особливо важливо при виборі уставок спрацьовування струмового відсікання ліній.

Новизна роботи полягає у створенні математичної моделі ДПЛ, яка враховує електромагнітні зв'язки між конструктивними елементами лінії, на базі багатопровідної схеми заміщення (БСЗ) щодо перехідного процесу трифазного КЗ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розрахунок опор та проводів повітряних ліній електропередавання згідно з вимогами глав 2.4 і 2.5 ПУЕ: 2006;
2. Повітряні лінії електропередачі. Текст лекцій з дисципліни «Кабельні та повітряні лінії електропередачі» (для студентів 4 курсу денної та 5 курсу заочної форм навчання спеціальності 6.090603 – «Електротехнічні системи електроспоживання») / Укл.: Є.Д.Дьяков - Харків: ХНАМГ, 2008. – 67 с.
3. І.Л. Лебединський, В. І. Романовський, Т. М. Загородня. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 214 с. Електричні системи та мережі : конспект лекцій / укладачі: І. Л. Лебединський, В. І. Романовський, Т. М. Загородня. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 214 с.
4. Правила улаштування електроустановок/ МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ/ Наказ №476 від 21.07.2017р.- Київ, 2017.
5. Лободзинський Вадим Юрійович ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ПРЕДСТАВЛЕНИХ БАГАТОПОЛЮСНИКАМИ ТРИФАЗНИХ КОЛАХ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ/ Міністерство освіти і науки України Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря СІКОРСЬКОГО"/Дисер. канд. тех. наук
6. Перехідні електромагнітні процеси в електроенергетичних системах: розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/уклад.: Є.І. Бардик, М.П. Болотний / КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 1,28 Мбайт). – Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2022. – 53 с.
7. Лободзинський В. Ю., Чибеліс В. І. Математична модель трифазної лінії з розподіленими параметрами при електромагнітних перехідних процесах. Вісник КНУТД. 2018. № 4 (124). С. 96–102.

8. Кириленко О. В., Сегеда М. С., Буткевич О. Ф., Мазур Т. А. Математичне моделювання в електроенергетиці. Львів: Львівська політехніка, 2010. 608 с.

9. Математичне моделювання перехідних процесів у трифазній лінії електропередачі в режимі двофазного короткого замикання / В. Р. Левонюк // Electrical power and electromechanical systems. - 2020. - Vol. 2, № 1(s). - С. 9-17. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/elpoels_2020_2_1%28s%29_4

10. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. — 5-те вид., доопрац. та допов. — Дніпро : НГУ, 2016. — 600 с.

11. Математичні моделі електричних систем : Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. Л. Кацадзе, О. М. Паненко. — Електронні текстові дані (1 файл: 951 кБ). — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 63 с.

12. А. А. Савельєв МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ/ Національний університет «Одеська політехніка»/дис. доктора філософії

13. Сулейманов В. М. Електричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. — Київ: НТУУ «КПІ», 2008. — 456.

14. Денисенко М.А. Спеціальні питання електропостачання: навч. посіб. - :НТТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2009-Ч.І.:Вибір елементів електропостачальних систем на основі стохастичного моделювання процесів, що відбуваються в них.-288 с.