

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЛОБОДЗИНСЬКИЙ ВАДИМ ЮРІЙОВИЧ



УДК 621.315

**ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ПРЕДСТАВЛЕНИХ БАГАТОПОЛЮСНИКАМИ
ТРИФАЗНИХ КОЛАХ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ**

Спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерство освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор технічних наук,
професор, член-кореспондент НАН України
Щерба Анатолій Андрійович
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського", професор кафедри теоретичної
електротехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Резинкіна Марина Михайлівна
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут", завідувач
кафедри теоретичних основ електротехніки

кандидат технічних наук,
Красножон Андрій Васильович
Чернігівський національний технологічний
університет, доцент кафедри електричних систем
і мереж

Захист дисертації відбудеться «20» січня 2020 р. об 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.06 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги, 37, корпус 20, ауд. 3.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « 18 » грудня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої
ради



В.О. Шостак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наукові задачі розрахунку перехідних процесів, що виникають в трифазних електричних колах з розподіленими параметрами під час режимних та аварійних змінень пропускної потужності, відносяться до найбільш складних у сучасній електротехніці. Вони додатково ускладнюються при наявності міжфазних електромагнітних та ємнісних зв'язків, які, зокрема, виникають у сучасних потужних трифазних лініях електропередачі.

Суттєві наукові результати з досліджень перехідних електромагнітних процесів у розгалужених багатофазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками (якими є трифазні кабельні лінії електропередачі) отримали такі відомі вчені, як Уїді Б., Шидловський А.К., Щерба А.А., Подольцев О.Д., Резинкіна М.М., Кучерява І.М., Яндутьський О.С., Кирик В.В, Баженов В.А., Денисенко Г.І., Лежнюк П.Д., Півняк Г.Г., Ларина Е.Т., Крумм Л.А., Перхач В.С., Костенко М.В., Перельман Л.С., Базуткін В.В., Домоховська Л.Ф., Левінштейн М.Л., Wedepohl L.M. , Welcox D.J., Anderson R. J, Nagoaka N., Heaton A.G. та інші.

Аналіз чисельних досліджень показав, що найбільш доцільним при вирішенні дослідницьких задач такого типу є розвиток теорії багатополосників та чисельних методів математичного моделювання, реалізованих у відомих прикладних програмах. Це суттєво спрощує як проведення чисельних розрахункових досліджень, так і отримання узагальнюючих результатів. Проте тривалий час використанню такого підходу в дослідженнях перехідних електромагнітних процесів у багатофазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками до недавнього часу приділялося недостатньо уваги.

Зазвичай кабельні лінії електропередачі, які є трифазними колами з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, представляли електричними колами із зосередженими параметрами, а при дослідженні перехідних електромагнітних процесів вводили поняття функції часу і просторових координат. В математичних моделях використовували диференціальні, інтегральні та різницеві рівняння, вирішення яких суттєво ускладнювалось при наявності різнорідних елементів (зосереджених і розподілених), а при необхідності врахування міжфазних взаємних індуктивностей і ємностей та порушенні симетричності режимів ставало практично неможливим.

Тому, тема даної дисертації, що спрямована на розвиток теорії багатополосників у напрямку врахування міжфазних зв'язків у електричних колах з розподіленими параметрами для удосконалення методів розрахунку сталих і перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, що представлені багатополосними елементами, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні наукові дослідження проводилися протягом 2010 – 2019 років на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» згідно планів НДР

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» МОН України № 2349-п «Оптимізація нової технології промислового виготовлення кабелів з твердою полімерною ізоляцією для удосконалення енергетичних мереж надвисоких напруг» (№ ДР 0110U000269), НДР № 2536-п «Розробка науково-технічних засобів неруйнівної діагностики вітчизняних надвисоковольтних кабелів світового рівня для підвищення їх експлуатаційної надійності та ресурсу» (№ ДР 0112U002394), НДР № 2723-п «Створення енергоефективної резонансної установки для сертифікаційних випробувань вітчизняних кабелів з сучасною ізоляцією на високі та надвисокі напруги» (№ ДР 0114U000580), НДР № 2908-п «Методи та засоби ідентифікації електротехнічних систем технологічної лінії з виробництва вітчизняного кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокі напруги» (№ ДР 0116U003716). У даних НДР автор був виконавцем наукових досліджень електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах (зокрема, у колах трифазних високовольтних кабельних ліній) з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками з використанням багатополюсних елементів.

Мета і задачі наукових досліджень. Метою дисертації є розвиток методів аналізу перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополюсниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів.

Постановка такого наукового завдання обґрунтована сучасною тенденцією в теоретичній електротехніці розглядати багатозазні електричні кола як послідовно-паралельне з'єднання різних n -полюсників, що забезпечує підвищення ефективності розрахунку перехідних електромагнітних процесів в багатозазних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками.

Для досягнення поставленої мети треба було вирішити такі задачі:

1. На підставі критичного аналізу відомих наукових публікацій обґрунтувати актуальність обраної теми дисертаційних досліджень.

2. Розвинути метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками на основі представлення цих кіл багатополюсниками із зосередженими параметрами, знаходження їх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів при різних режимах підключення кіл до мережі електроживлення.

3. Удосконалити математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополюсників і врахування наведених ЕРС та індукованих струмів у екранах фазних кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє спрощувати визначення умов обмеження напруг і струмів у таких екранах.

4. На основі моделювання та аналізу перехідних напруг і струмів у трифазних колах типу довгих кабельних ліній електропередачі, що мають розподілені параметри і міжфазні взаємоіндуктивні та ємнісні зв'язки, визначити особливості появи власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях.

5. Розробити рекомендації для обмеження індукованих напруг і струмів у струмопровідних екранах кабелів довгих трифазних ліній електропередавання, як в електричних колах із розподіленими параметрами та міжфазними взаємоіндуктивними і ємнісними зв'язками.

6. Отримати науково-прикладні результати для удосконалення методик розрахунку перехідних процесів у трифазних кабельних лініях енергетичного призначення.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками.

Предмет дослідження – розрахунок перехідних електромагнітних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками шляхом представлення цих кіл багатополісниками, що ураховують наявні міжфазні зв'язки та особливості їх підключення до трифазної мережі електроживлення.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених у роботі задач використовувались: наукові положення теорії аналізу і синтезу трифазних лінійних електричних кіл, методи теорії багатополісників та їх використання для моделювання електромагнітних перехідних процесів в колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками, складання електричних схем заміщення із зосередженими параметрами для розрахунку електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях. Чисельне моделювання електромагнітних перехідних процесів реалізовано з використанням пакету прикладних програм Matlab.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розвинуто метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та взаємними міжфазними зв'язками шляхом представлення цих кіл багатополісниками із зосередженими параметрами, що враховують особливості міжфазних електромагнітних зв'язків.

2. Розроблено нову математичну модель розгалужених трифазних електричних кіл із розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками на основі складання диференціальних рівнянь стану цих кіл, урахування взаємних наявних міжфазних зв'язків, визначення граничних і початкових умов розрахунку виникаючих в них перехідних процесів при нормальних і аварійних умовах.

3. На основі моделювання та аналізу перехідних напруг і струмів у трифазних кабельних лініях електропередачі як трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та взаємними електромагнітними зв'язками, вперше визначено особливості виникнення в них власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях.

4. Удосконалено математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополісників і врахування впливу наведених ЕРС на індуковані струми в екранах кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє визначати необхідні перерізи екранів і необхідну кількість їх транспозицій.

Практичне значення одержаних результатів. Практична значимість отриманих результатів полягає в розробці інженерних методик для розрахунку і аналізу перехідних електромагнітних процесів у трифазних колах з взаємними електромагнітними зв'язками, зокрема в кабельних лініях електропередачі.

Отримано такі результати:

На основі розвитку теорії багатополісників удосконалено методику розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних ЛЕП з урахуванням наведеної ЕРС взаємоіндукції між її ділянками з різними складовими елементами.

Розроблено рекомендації для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях як у розгалужених електричних колах з зосередженими параметрами, шляхом урахування особливостей взаємних електромагнітних зв'язків між їхніми ділянками з різними параметрами, що дозволяє визначити необхідні транспозиції екранів кабелю для реалізації допустимих напруг та струмів короткого замикання в кабельних лініях.

Розроблено нову методику розрахунку допустимих і аварійних електромагнітних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, зокрема в трифазних кабельних лініях, що використовують транспозицію екранів кабелів.

Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи з розрахунку та аналізу перехідних процесів в високовольтних кабельних ЛЕП використано на заводі «Південкабель» (м. Харків) при розробці методично-керівних документів РД К28-006:2013 «Руководящий технический материал по нормативной базе, применяемым материалам, конструктивным особенностям, испытаниям и выбору кабелей и проводов повышенной пожаробезопасности» та РД К28-007:2017 «Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения», Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ) та впроваджено у навчальному процесі на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Теоретичні основи електротехніки» і «Теорія електричних та магнітних кіл».

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі, отримано автором особисто. В працях, опублікованих у співавторстві, автору належить у: роботах [1-3] – розробка математичної моделі для розрахунку та аналізу перехідних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі з різними з'єднаннями екранів; [4-5] – обґрунтування теорії багатополісників для моделювання трифазних електричних кіл з розподіленими параметрами та взаємними електромагнітними та ємнісними зв'язками для дослідження перехідних процесів при різних комутаційних режимах; [6] – удосконалення методів обмеження комутаційних перенапруг для аналізу перехідних процесів у трифазних електричних колах з електромагнітними міжфазними зв'язками; [7-9] – аналіз електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах із складними міжфазними зв'язками шляхом

створення нових і поліпшення існуючих математичних моделей та методів розрахунку багатофазних ліній з розподіленими параметрами.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались на міжнародних конференціях: МНТК молодих вчених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики» (м. Київ, в 2012-2016 рр.), XVI Міжнародній конференції IEEE «International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)» (м. Львів, в 2015 р.), XVII МНТК «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчуг, в 2016 р.), МНТК «Inzynieria i technologia. Wspolczesne tendencje w nauce i edukacji» (Krakow, Poland, в 2016 р.), МНТК «Inzynieria i technologia. Osiagniecia naukowe, rozwoj, propozycje na rok 2016» (Zakopane, Poland, в 2016 р.), Міжнародній конференції IEEE «Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)» (м. Київ, в 2017 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 22 наукових працях: 9 статей у фахових виданнях України (з них 4 – у виданнях, які входять до міжнародних науково метричних баз даних), 13 тез доповідей в збірниках міжнародних науково технічних конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків і списку використаних джерел. Обсяг дисертації становить 183 сторінки, до яких входить 145 сторінок основного тексту, 53 рисунків, 3 таблиці, 145 найменувань використаних джерел та 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про впровадження результатів роботи, наукові публікації та особистий внесок автора.

У першому розділі на підставі аналізу відомих спеціалізованих публікацій науково обґрунтовано необхідність удосконалення методів аналізу усталених і перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами під час режимних та аварійних змін пропускної потужності та розробки нових математичних моделей на основі розвитку теорії багатополосників у напрямку урахування наявних міжфазних взаємоіндуктивних зв'язків.

З аналізу відомих методів дослідження електромагнітних перехідних процесів в електричних колах з розподіленими параметрами, зокрема в довгих кабельних лініях електропередачі обґрунтовано, що найбільш доцільним є розвиток та використання теорії багатополосників для розрахунку виникаючих у трифазних колах електромагнітних процесів. У такому випадку, використовуючи класичний та операторний методи розрахунку стає можливим автоматичний облік початкових і граничних умов. Але при вирішенні такого класу задач потрібна обов'язковий запис всього зображення, що призводить до збільшення обсягу розрахункових даних.

При моделюванні розгалужених електричних кіл з розподіленими параметрами та взаємними міжфазними зв'язками типу трифазних кабельних ліній, що містять різномірні елементи – як з зосередженими, так і розподіленими параметрами –

виникає необхідність розробки методів і моделей, розрахунку та визначення чисельної процедури комп'ютерної їх реалізації. Використання теорії багатополосників дозволяє представляти елементи електричного кола макромоделями, що відображають їх зовнішні зв'язки і вплив на іншу частину кола. Основна складність застосування такого підходу полягає в розв'язанні взаємних електромагнітних зв'язків.

У другому розділі розвинуто метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками шляхом представлення цих кіл багатополосниками із зосередженими параметрами, що враховують особливості міжфазних електромагнітних зв'язків.

Розроблено нову математичну модель трифазних електричних кіл, як розгалужених кіл із розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, шляхом

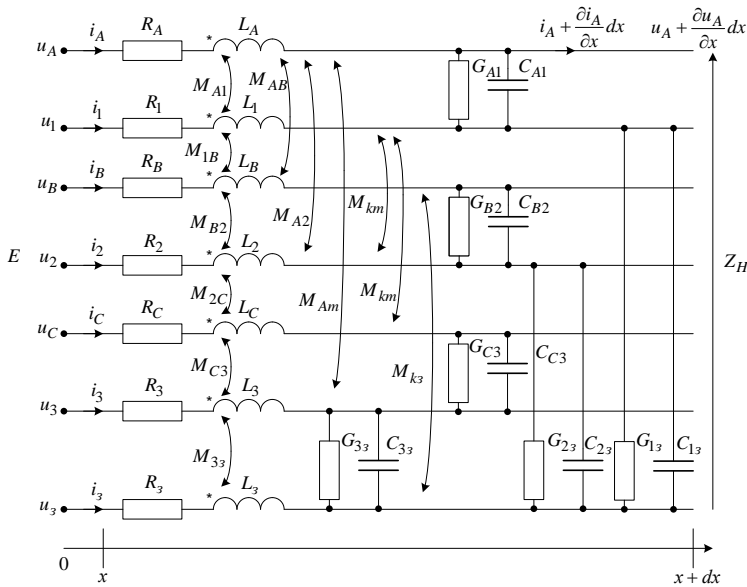


Рис. 1 Схема заміщення трифазного симетричного електричного кола з взаємноіндуктивними зв'язками

складання диференціальних рівнянь стану цих кіл, визначення граничних і початкових умов розрахунку виникаючих в них перехідних процесів при нормальних і аварійних умовах та з урахуванням взаємних електромагнітних зв'язків.

Дослідження перехідних процесів у трифазних кабельних електричних колах складають непросту задачу, необхідно спільно вирішувати рівняння Кірхгофа для струмів і напруг у жилах і екранах всіх трьох фаз.

На рис. 1 представлено схему заміщення трифазного

симетричного електричного кола з урахуванням взаємно-індуктивних зв'язків, ємнісних зв'язків між фазами і діелектричними втратами в ізоляції. Модель складається з семи ділянок лінії з розподіленими параметрами, що представляють собою три провідники (струмопровідні жили) (A, B, C) і три провідники електромагнітних екранів кабелю (1, 2, 3), сьома ділянка моделює землю (з). Кожна ділянка кола моделюється поздовжніми $\underline{Z} = R + j\omega L$ і поперечними $\underline{Y} = G + j\omega C$ параметрами на одиницю довжини.

За законами Кірхгофа було отримано систему диференціальних рівнянь для узагальненої схеми заміщення трифазного кабельної лінії з розподіленими параметрами:

$$-\frac{\partial u_{k3}}{\partial x} = R_k i_k + L_k \frac{\partial i_k}{\partial t} + \sum_{\substack{k,m=A,B,C \\ 1,2,3 \\ m \neq k}} M_{km} \frac{\partial i_m}{\partial t} - R_3 i_3 - L_3 \frac{\partial i_3}{\partial t} - \sum_{\substack{k,m=A,B,C \\ 1,2,3 \\ m \neq k}} M_{m3} \frac{\partial i_m}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i_k}{\partial x} = \sum_{\substack{k,m=A,B,C \\ 1,2,3 \\ m \neq k}} G_{km} u_{km} + \sum_{\substack{k,m=A,B,C \\ 1,2,3 \\ m \neq k}} C_{km} \frac{\partial u_{km}}{\partial t} \quad (2)$$

де M_{km} – це взаємна індуктивність між провідниками k та m . Параметри на одиницю довжини (R , L , M , C и G) задаються з урахуванням фізичних і геометричних характеристик кабелю.

Наявність часткових похідних в рівняннях (1) і (2) зумовлена тим, що напруга і струм залежать від двох аргументів: координати x і часу t . При дії синусоїдальної ЕРС, електрична модель трифазної симетричної кабельної лінії була представлена у вигляді матриці:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\mathbf{U}}}{\partial x} \\ \frac{\partial \dot{\mathbf{I}}}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{Z} \\ \mathbf{Y} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{I}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

де \mathbf{U} та \mathbf{I} матриці-стовпці зображень напруги і струму в фазних провідниках (ж) і електромагнітних екранах (е) трифазної кабельної лінії. Матриці повних опорів \mathbf{Z} і провідності \mathbf{Y} є квадратними матрицями шостого порядку, що складаються із симетричних квадратних матриць третього порядку

Матриця \mathbf{ZY} системи (3) є симетричною. Рішення даної матриці – завдання громіздке, оскільки потрібно враховувати взаємоіндуктивні зв'язки між провідниками і електромагнітними екранами кабелів трифазного електричного кола. У той же час отриману матричну систему (3) можна перетворити в три незалежних режими, які представляються в схемах заміщення симетричними складовими, що використовують аналітичні рішення диференціальних рівнянь.

Для того щоб визначити змінні напруги і струму матриці (3) у симетричних складових (де 1-пряма, 2-обернена та 0-нульова послідовності), потрібно обчислити диференціальні рівняння другого порядку $\frac{\partial^2 \dot{\mathbf{U}}}{\partial x^2}$ та $\frac{\partial^2 \dot{\mathbf{I}}}{\partial x^2}$ наведені в (4).

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{U}}^{012}}{\partial x^2} = \mathbf{Z}^{012} \mathbf{Y}^{012} \dot{\mathbf{U}}^{012} \\ \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{I}}^{012}}{\partial x^2} = \mathbf{Y}^{012} \mathbf{Z}^{012} \dot{\mathbf{I}}^{012} \end{cases} \quad (4)$$

Рішення системи (4) в загальному вигляді застосовується для кожної складової

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{U}}(x) &= \underline{\mathbf{X}}_1^{012} e^{p_1 x} + \underline{\mathbf{X}}_1'^{012} e^{-p_1 x} + \underline{\mathbf{X}}_2^{012} e^{p_2 x} + \underline{\mathbf{X}}_2'^{012} e^{-p_2 x} \\ \dot{\mathbf{I}}(x) &= \underline{\mathbf{X}}_3^{012} e^{p_1 x} + \underline{\mathbf{X}}_3'^{012} e^{-p_1 x} + \underline{\mathbf{X}}_4^{012} e^{p_2 x} + \underline{\mathbf{X}}_4'^{012} e^{-p_2 x} \end{aligned} \quad (5)$$

де $\underline{\mathbf{X}}_1^{012}, \underline{\mathbf{X}}_1'^{012}, \underline{\mathbf{X}}_2^{012}, \underline{\mathbf{X}}_2'^{012}, \underline{\mathbf{X}}_3^{012}, \underline{\mathbf{X}}_3'^{012}, \underline{\mathbf{X}}_4^{012}, \underline{\mathbf{X}}_4'^{012}$ – матриці-константи, що знаходяться з граничних умов, e^{p_x} – матрична експонента, де власні значення знаходяться з характеристичного рівняння

$$\det(\mathbf{p}^{012}\mathbf{E} - \underline{\mathbf{Z}}^{012}\underline{\mathbf{Y}}^{012}) = 0$$

де \mathbf{E} – одинична матриця.

Рішення для рівняння (5) є математичною моделлю розгалуженого електричного кола типу трифазної кабельної лінії, з використанням у рівнянні гіперболічних функцій. Остаточний вигляд стаціонарних функцій напруги і струму для кожної послідовності, що описують математичну модель однієї фази трифазної кабельної лінії

$$U_{\text{жс}}^{012}(x) = X_1^{012}ch(p_1x) + X_2^{012}sh(p_1x) + X_3^{012}ch(p_2x) + X_4^{012}sh(p_2x),$$

$$U_e^{012}(x) = \left[X_1^{012}ch(p_1x) + X_2^{012}sh(p_1x) \right] \frac{z_e p_1^2 - z_C y_{\text{жс}}}{z_{\text{жс}e} p_1^2 + z_C y_{\text{жс}e}} +$$

$$+ \left[X_3^{012}ch(p_2x) + X_4^{012}sh(p_2x) \right] \frac{z_e p_2^2 - z_C y_{\text{жс}}}{z_{\text{жс}e} p_2^2 + z_C y_{\text{жс}e}},$$

$$I_{\text{жс}}^{012}(x) = X_1^{012}ch(p_1x) \frac{z_e p_1^2 - z_C y_{\text{жс}}}{z_{\text{жс}e} p_1^2 + z_C y_{\text{жс}e}} + X_2^{012}sh(p_1x) \frac{z_e p_2^2 - z_C y_{\text{жс}}}{z_{\text{жс}e} p_2^2 + z_C y_{\text{жс}e}} +$$

$$+ X_3^{012}ch(p_2x) \frac{-p_1(z_e y_{\text{жс}e} + z_{\text{жс}e} y_{\text{жс}})}{z_{\text{жс}e} p_1^2 + z_C y_{\text{жс}e}} + X_4^{012}sh(p_2x) \frac{-p_2(z_e y_{\text{жс}e} + z_{\text{жс}e} y_{\text{жс}})}{z_{\text{жс}e} p_2^2 + z_C y_{\text{жс}e}}, \quad (6)$$

$$I_e^{012}(x) = \left[X_1^{012}ch(p_1x) + X_2^{012}sh(p_1x) \right] \frac{p_1 \left(z_{\text{жс}e}^2 p_1^2 - z_{\text{жс}} z_e p_1^2 + z_C z_{\text{жс}} y_{\text{жс}} + z_C z_{\text{жс}e} y_{\text{жс}} \right)}{z_C \left(z_{\text{жс}e}^2 p_1^2 + z_C y_{\text{жс}e} \right)}$$

$$+ \left[X_3^{012}ch(p_2x) + X_4^{012}sh(p_2x) \right] \frac{p_2 \left(z_{\text{жс}e}^2 p_2^2 - z_{\text{жс}} z_e p_2^2 + z_C z_{\text{жс}} y_{\text{жс}} + z_C z_{\text{жс}e} y_{\text{жс}} \right)}{z_C \left(z_{\text{жс}e}^2 p_2^2 + z_C y_{\text{жс}e} \right)},$$

де $z_C = z_{\text{жс}} z_e - z_{\text{жс}e}^2$; $z_{\text{жс}}$ – власні опори фазних провідників; z_e – власні опори екранів; $z_{\text{жс}e}$ – взаємні опори між провідником і екраном однієї і тієї ж фази.

Матриця (3) являє собою диференціальні рівняння у частинних похідних гіперболічних функцій, які можна вирішити з використанням класичного або операторного методу розрахунку перехідних процесів. Однак, при будь-якому методі ця матриця не може бути однозначною, якщо не задано додаткові початкові і граничні умови, які визначають фізичну природу досліджуваних явищ і схем з'єднання.

При підключенні лінії до трифазного джерела живлення потрібно визначити чотири коефіцієнта $X_1^{012}, X_2^{012}, X_3^{012}, X_4^{012}$ для кожної симетричної складової. Для цього слід задатися дванадцятьма граничними умовами, які визначають із записів напруги і струму на початку лінії і різних граничних умов, що залежать від електричної конфігурації кола (рис.2). Для комутаційного режиму, при включенні

лінії до джерела трифазного ЕРС, потрібно 12 рівнянь граничних умов, записаних шляхом завдання шести рівнянь початкових значень напруг і струмів в провідниках і жилах кожної з фаз кабельної лінії для кожної складової:

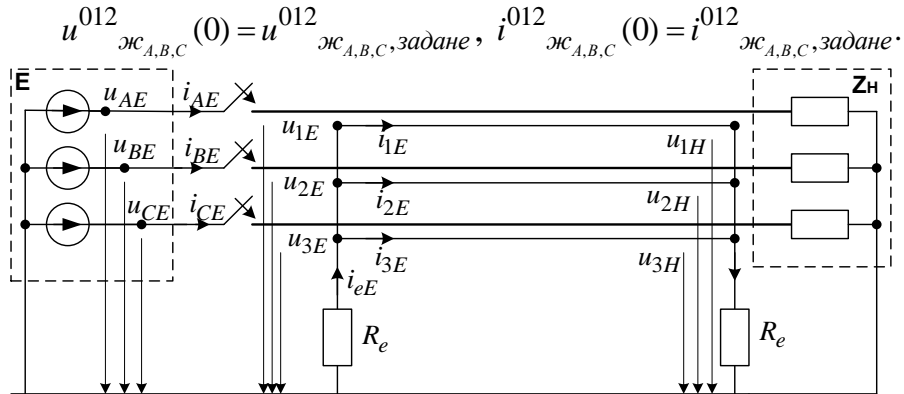


Рис. 2 Електрична конфігурація навантаженої трифазної кабельної лінії при підключенні до трифазного джерела живлення

І ще, шість рівнянь для напруги і струму в екранах кожної фази на початку (від джерела напруги E) і в кінці лінії (на навантаженні Z_H):

$$\begin{aligned} u_{1E}(0) &= -R_e i_{eE} & u_{1H}(l) &= R_e i_{eH}(l) \\ u_{2E}(0) &= -R_e i_{eE} & u_{2H}(l) &= R_e i_{eH}(l) \\ u_{3E}(0) &= -R_e i_{eE} & u_{3H}(l) &= R_e i_{eH}(l) \end{aligned}$$

У разі однофазного короткого замикання фази A на землю на відстані l_F (рис. 3) граничні умови записуються для ділянки трифазної лінії до ($0 \leq x \leq l_F$) та після ($l_F \leq x \leq l$) місця комутації (короткого замикання). В результаті отримано шість однофазних кіл з чотирма невідомими X_i^{012} в кожній, які визначаються з системи (6). Таким чином, внаслідок поділу лінії на дві ділянки, в загальному рішенні відбувається подвоєння числа невідомих параметрів схеми до восьми, для кожного наступного рівняння системи. Це вимагає 24 граничних умов для всіх послідовностей фаз.

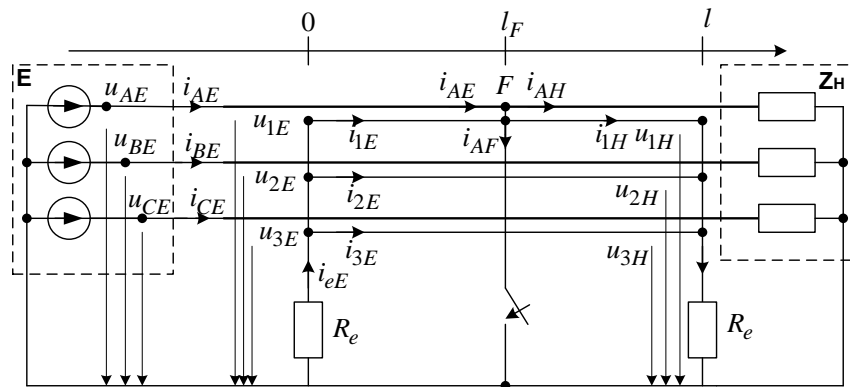


Рис. 3 Електрична конфігурація навантаженої трифазної кабельної лінії при однофазному замиканні на землю фази A

Початкова умова вхідної напруги провідника дорівнює заданій напрузі джерела живлення для всіх послідовностей фаз для ділянки лінії до місця комутації ($0 \leq x \leq l_F$):

$$u^0_{жЕ}(0) = u^0_{жЕ,задане}; u^1_{жЕ}(0) = u^1_{жЕ,задане}; u^2_{жЕ}(0) = u^2_{жЕ,задане}$$

Струм у провіднику дорівнює заданому струму джерела:

$$i^0_{жЕ}(0) = i^0_{жЕ,задане}; i^1_{жЕ}(0) = i^1_{жЕ,задане}; i^2_{жЕ}(0) = i^2_{жЕ,задане}$$

Нульова послідовність струму в екрані дорівнює: $i^0_{eE}(0) = i_{eE,задане}$.

Напряга екрану нульової послідовності задається як опір заземлення, помноженого на струм провідника: $u^0_{eE}(0) = -3R_e i^0_{eE}(0)$.

Напряга на екрані прямої і зворотної послідовностей дорівнюють нулю: $u^1_{eE}(0) = 0; u^2_{eE}(0) = 0$.

Наступні умови для напруги провідника і екрану повинні виконуватися в точці комутації для ділянки лінії ($x=l_F$):

$$u^0_{жH}(l_F) = u^0_{жЕ}(l_F); u^1_{жH}(l_F) = u^1_{жЕ}(l_F); u^2_{жH}(l_F) = u^2_{жЕ}(l_F);$$

$$u^A_{eH}(l_F) = u^A_{eE}(l_F); u^B_{eH}(l_F) = u^B_{eE}(l_F); u^C_{eH}(l_F) = u^{AC}_{eE}(l_F).$$

У робочих фазах В і С, струм в провідниках і екранах в точці комутації для ділянки лінії ($x=l_F$):

$$i^B_{жH}(l_F) = i^B_{жЕ}(l_F); i^C_{жH}(l_F) = i^C_{жЕ}(l_F); i^B_{eH}(l_F) = i^B_{eE}(l_F); i^C_{eH}(l_F) = i^C_{eE}(l_F).$$

Напряга провідника на навантаженні пошкодженої фази: $u^A_{жH}(l) = Z_H i^A_{жH}(l)$.

Напряга екрану нульової послідовності задається як опір заземлення, помножений на струм екрану: $u^0_{eH}(l) = 3R_e i^0_{eH}(l)$.

Напряга прямої і зворотної послідовностей після точки комутації на ділянці лінії ($l_F \leq x \leq l$) дорівнює нулю: $u^1_{eE}(l) = 0; u^2_{eE}(l) = 0$.

Отримана математична модель трифазного кабельної лінії з розподіленими параметрами дозволяє проводити розрахунки і аналіз перехідних процесів у трифазних кабельних лініях і забезпечує рішення практичних завдань. Розрахункова модель дозволяє підвищити точність розрахунку, шляхом обліку сукупності особливостей електромагнітних процесів в схемах заміщення, що визначаються міжфазними зв'язками внаслідок впливу електромагнітного поля між однофазними кабелями в трифазному електричному колі.

Математичну модель трифазної кабельної лінії з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками розроблено з використанням диференціальних рівнянь стану кола, граничних і початкових умов для розрахунку і аналізу перехідних електромагнітних процесів нормального і аварійного режимів роботи.

У **третьому розділі** виконані дослідження показали, що при складанні фізичних моделей і при моделюванні за допомогою спеціальних комп'ютерних програм для розрахунку перехідних процесів доцільно використовувати ланцюгові схеми заміщення кола з розподіленими параметрами.

Однорідну лінію можна розглядати як однорідну ланцюгову схему з нескінченно великим числом елементарних ланок (рис.4). Тому наближено, можна лінію кінцевої довжини замінити ланцюговою схемою з кінцевим числом ланок, які мають кінцеві значення параметрів. Ці міркування мають дуже велике значення для моделювання ліній. Для експериментального вивчення в лабораторних умовах

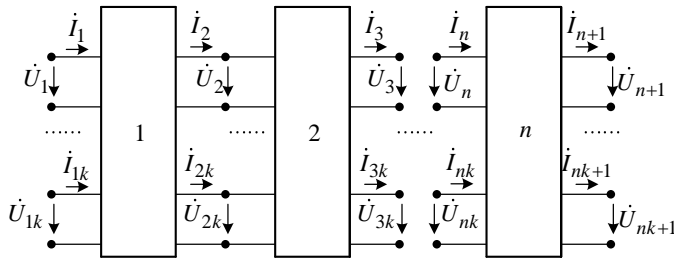


Рис. 4 Ланцюгова схема заміщення ділянки лінії

процесів в довгих лініях, а також процесів в різних системах, з'єднаних довгими лініями, зазвичай лінії замінюють еквівалентними їм ланцюговими схемами. Точність моделювання буде тим більше, чим більше число ланок буде містити ланцюгова схема. Вибір числа ланок в моделі лінії залежить від тих завдань, які ставляться при дослідженні. При моделюванні лінії ланцюговою схемою

з достатнім числом ланок для дослідження перехідних процесів достатньо брати 10-20 ланок.

При дослідженні однорідної ланцюгової схеми заміщення ділянки лінії з розподіленими параметрами, приймалося, що електричне коло складається з однакових k -ланок, всередині яких не діють ЕРС.

Зображення напруги і струму, для k -ї ланки, при нульових початкових умовах записано як рівняння скінченних різниць щодо невідомих \bar{u}_k та \bar{i}_k , що залежать від цілочисельної змінної k

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k+1} + z_1 \bar{i}_k; \quad \bar{i}_k = \bar{i}_{k+1} + \frac{\bar{i}_{k+1}}{z_2} \quad (7)$$

де $z_1 = R + pL$ и $z_2 = G + 1/pC$ – операторні опори відповідно поздовжніх і поперечних елементів ланцюгової схеми.

Розрахункові зображення для напруги і струму на вході k -ї ділянки схеми

$$u_k = E \left[1 - \frac{e^{-\delta t}}{(n+0.5)LC} \sum_{s=0}^{n-1} \operatorname{ctg} \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2} \sin \frac{k(s+0.5)}{n+0.5} \pi \cos \omega_s t \right] \quad (8)$$

$$i_k = \frac{Ee^{-\delta t}}{n+0.5} \sqrt{\frac{L}{C}} \sum_{s=0}^{n-1} \operatorname{ctg} \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2} \cos(k+0.5) \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi \sin \omega_s t \quad (9)$$

Якщо задані ЕРС, які прикладено до першої та останньої ділянок схеми, то можна визначати зображення напруг будь-якої ділянки ланцюгової схеми. В окремому випадку, при включенні на постійну ЕРС в режимі неробочого ходу ($z = \infty$), зображення напруги на вході k -ї ланки

$$\bar{u}_k = E \frac{\operatorname{ch}(n-k+0.5)v}{\operatorname{ch}(n+0.5)v} \quad (10)$$

Для аналізу напруги на кінці реальної лінії з розподіленими параметрами $u(l, t)$, записано відповідне рівняння

$$\bar{u}(l, p) = \frac{E}{\operatorname{ch} pl \sqrt{L_n C_n}} = \frac{2E}{e^{pl \sqrt{L_n C_n}} + e^{-pl \sqrt{L_n C_n}}} = 2E \left(e^{-pl \sqrt{L_n C_n}} - e^{-3pl \sqrt{L_n C_n}} + e^{-5pl \sqrt{L_n C_n}} \right) \quad (11)$$

Оригінал рівняння (11) отриманий шляхом накладання нескінченного числа функцій

$$u(l,t) = 2E \left[\sigma_0 \left(t - l\sqrt{L_l C_l} \right) - \sigma_0 \left(t - 4l\sqrt{L_l C_l} \right) + \sigma_0 \left(t - 5l\sqrt{L_l C_l} \right) \right] \quad (12)$$

де $\sigma_0(t)$ – функція Хевісайда.

Для порівняння виразу напруги в кінці ланцюгової схеми в режимі неробочого

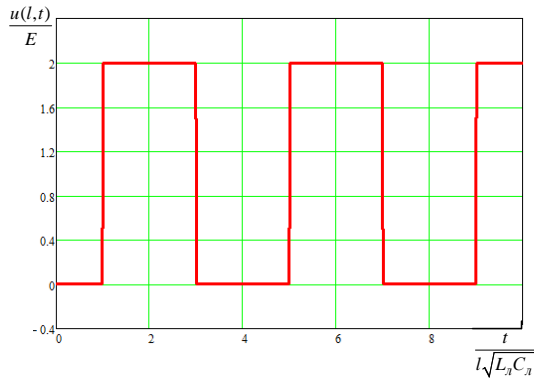


Рис. 5 Крива напруги в кінці реальної лінії

$n \geq 10$ напруга в кінці ланцюгової схеми і реальної лінії з розподіленими параметрами задовільно збігаються один з одним з допустимою похибкою.

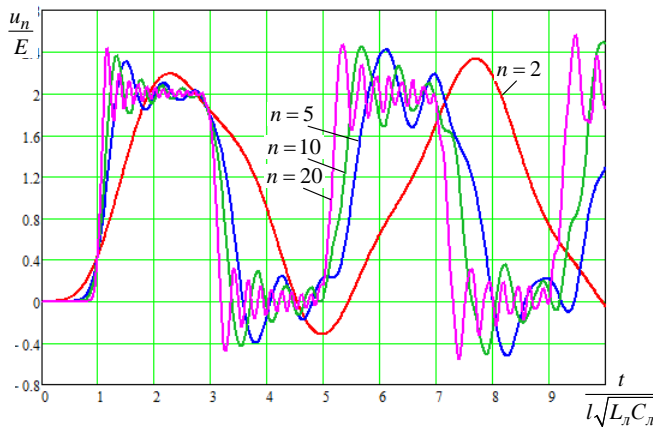


Рис. 6 Криві напруги в кінці ланцюгової схеми заміщення лінії

На підставі теорії багатополосників було удосконалено методика розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі з урахуванням наведеної ЕРС взаємоіндукції. Реалізовано методика в програмному пакеті Matlab Simulink, який забезпечує визначення особливостей протікання перехідних процесів у трифазних кабельних лініях з уточненням кількісних характеристик цих процесів.

У даній роботі найбільш раціональним для моделювання нормальних, аварійних режимів роботи і аналізу перехідних електромагнітних процесів, є застосування теорії багатополосників.

На підставі вищевикладеного в середовищі Matlab Simulink розроблено комплексну модель дослідження роботи високовольтної трифазної кабельної лінії електропередачі (рис. 7). З точки зору аналізу така лінія являє собою шестипровідну

ходу (8) з виразом для напруги на кінці реальної лінії з розподіленими параметрами (12) представлено відповідні криві. Крива напруги в кінці реальної лінії, при включенні її на постійну ЕРС показана на рис. 5, не залежить від вхідної напруги і параметрів лінії. Криві напруги (12) рис. 6. побудовані в залежності від величини $t / (l\sqrt{L_l C_l})$ для різного числа ланок n .

З порівняння наведених кривих рис.5 і рис. 6 видно, що при числі ланок

Для вирішення різних практичних задач при моделюванні кабельної лінії електропередачі, для дослідження нормальних і перехідних режимів використовується ланцюгова схема заміщення ділянки лінії, що складається з симетричних Т або П-схем багатополосників, з'єднаних каскадом. На етапах представлення лінії ланцюгової схемою, виникає ряд складнощів, а саме врахування струмів, індукованих в екранах, що призводить до появи перенапруг, які призводять до пошкодження ізоляції лінії.

систему (три жили і три екрани) з додатковим сьомим проводом – землею. Електрична схема заміщення ділянки довжиною L_{meters} , реалізується у вигляді еквівалентного багатополосника з урахуванням взаєміндуктивних зв'язків, які існують між індуктивностями жил та екранів.

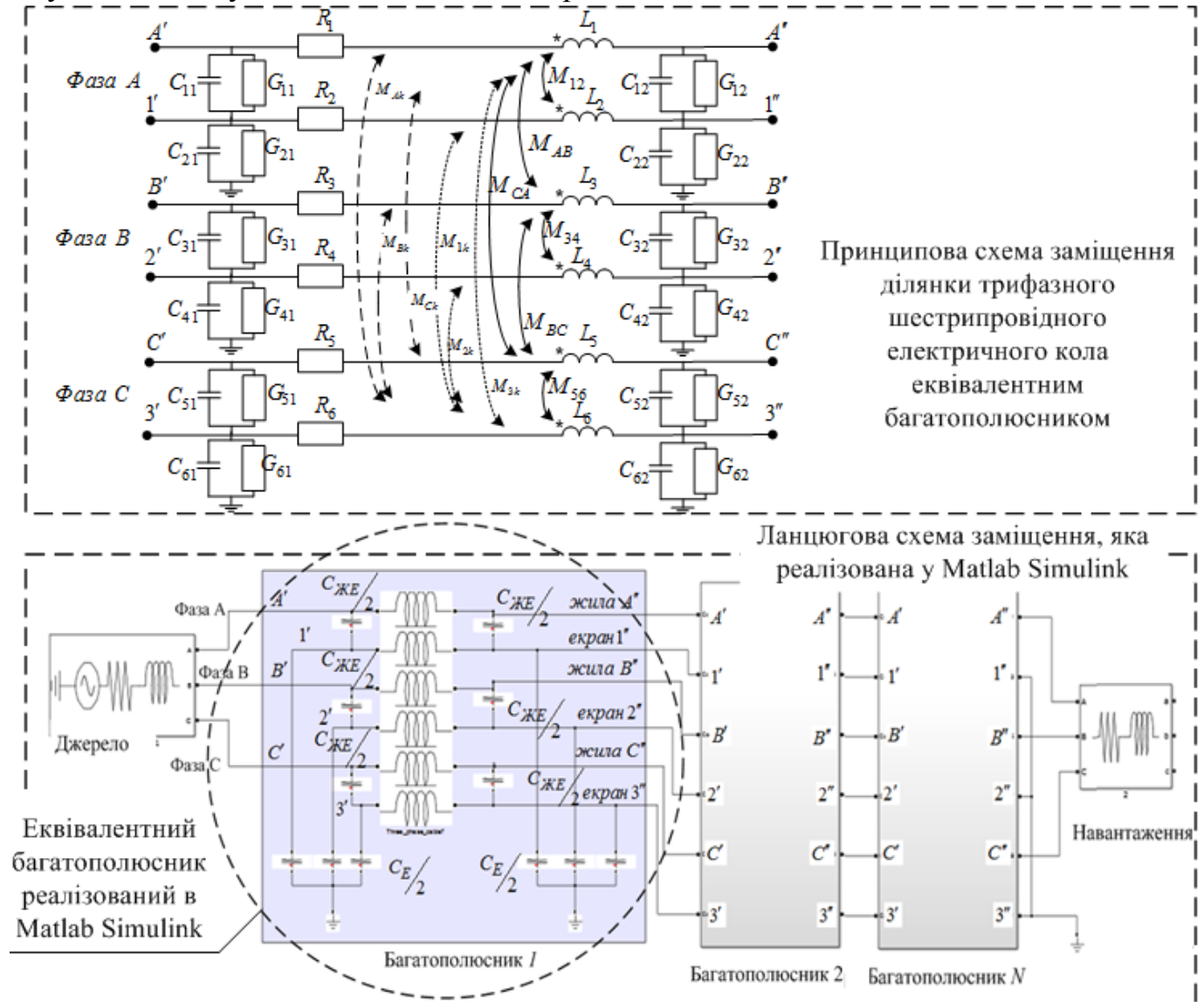


Рис. 7 Електрична схема заміщення ділянки кабельної лінії довжиною L_{meters} , яка реалізується у вигляді еквівалентного багатополосника у Matlab Simulink

У випадку довгих ліній широко використовуються схема з транспозицією екранів. Як правило, під транспозицією екранів розуміють ідеалізований випадок, коли дві транспозиційні муфти поділяють кабель довжиною L_K на три ділянки однакової довжини $L_1=L_2=L_3=L_K/3$. При ідеальній транспозиції струми в екранах в нормальному режимі відсутні.

Однак на практиці нерідко виникають певні обмеження на вибір місць установки транспозиційних з'єднань – в таких випадках застосування неідеальної транспозиція $L_1 \neq L_2 \neq L_3$.

У роботі за допомогою комплексної моделі електричної схеми заміщення ділянки кабельної лінії електропередачі, напругою 330 кВ довжиною 3000 м, що

реалізована у вигляді еквівалентного багатополісника у Matlab Simulink проведено дослідження впливу транспозиції екранів кабелю на величини напруг та струмів в екранах. При несиметричній транспозиції екранів, при різних довжинах ділянок кабельної лінії в екранах з'являється індуковані струми 120 А, що в свою чергу призводить до появи додаткових втрат в лінії. Для порівняння, в лінії без транспозиції, струми в екранах становлять 220 А, що практично в 2 рази більше ніж при використанні неповного циклу транспозиції, а в деяких випадках може співставлятися зі струмом жили.

Таким чином, у дисертації виконано, удосконалення математичної моделі для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополісників і врахування впливу наведених ЕРС на індуковані струми в екранах кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє визначати необхідні перерізи екранів та кількість їх транспозиції.

У **четвертому розділі** представлено аналіз перехідних електромагнітних процесів у трифазних колах типу кабельних ліній електропередачі з використанням багатополісних елементів. Для дослідження електромагнітних перехідних процесів у високовольтній кабельній лінії електропередачі в даній роботі було створено модель з ланцюгової схемою заміщення, яка складаються з еквівалентних багатополісників із з'єднанням екранних полюсів по типу транспозиції.

Розглянуто струми і напруги в жилах і екранах при замиканні фази *A* на землю, що дозволяє аналізувати змінення перехідних складових струмів і напруг кожної фази трифазного кабельної лінії електропередачі та оцінити рівень перенапруги і амплітуди струмів короткого замикання в екранах з урахуванням транспозиції.

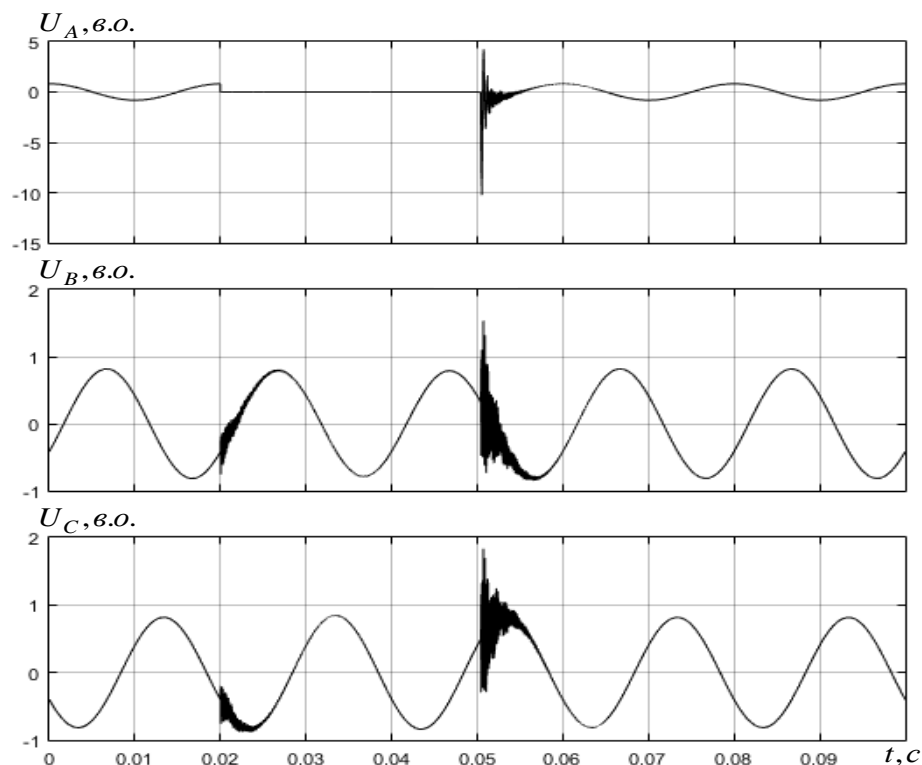


Рис. 7 Осцилограма напруг у фазах трифазної КЛ при замиканні фази *A* на землю

При замиканні фази A на землю, напруга U_A приймає нульове значення (рис.7). У фазах B і C максимальне значення амплітуди в цей час не змінюється, але в перший момент комутації з'являється перехідний процес, обумовлений перезарядом ємностей в лінії. Після відключення комутації на землю фази A , перехідний процес характеризується появою високочастотних коливань викликаних наявністю в колі RLC -контурів, що виникають при послідовному з'єднанні еквівалентних багатополісників. Коливання напруги виникає під час розряду ємностей поперечних гілок схем заміщення ділянок КЛ.

Крім того, можна побачити, що в фазі A амплітуда коливань напруги згасає швидше, в порівнянні з коливаннями в інших фазах, що обумовлено положенням вектора U_A в фазі в момент комутації.

Із рис. 7 видно, що відновлення напруги U_A після відключення КЗ фази, призводить до появи перенапруги, яка перевищує номінальне в 10 разів, у порівнянні з фазами B – 1.5 рази і C – майже 2 рази. При переході до робочого сталого режиму напруга фази A – U_A стрибком зростає від нульового значення до значення, амплітуда якого значно перевищує ЕРС джерела. Що є результатом перехідного коливального процесу, його вільні складові накладаються на амплітуду усталеної напруги.

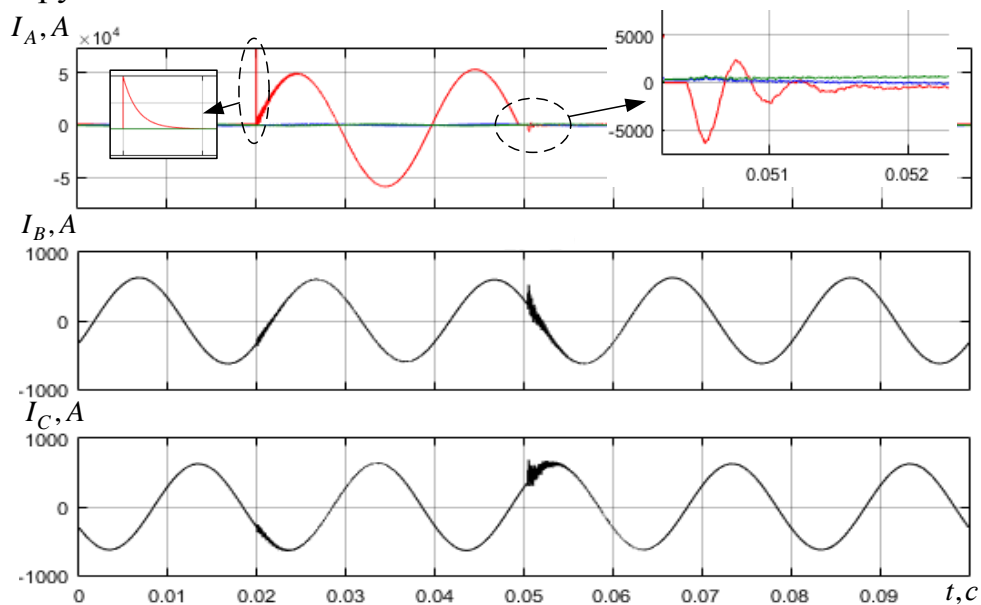


Рис. 8 Осцилограма струмів в фазах трифазної КЛ при замиканні фази A на землю

На рис. 8 показані часові залежності струмів в фазах трифазної кабельної лінії при замиканні фази A на землю. Струм I_A різко зростає, при цьому з'являється аперіодична складова. Різкий стрибок струму I_A обумовлений дією напруги джерела і зміною запасу енергії магнітного поля в індуктивності.

Коливання струмів непошкоджених фаз I_B , I_C викликано наведеннями з боку пошкодженої фази A , що пояснюється наявністю взаємної індуктивності між фазами кабельної лінії електропередачі.

Перехідні процеси в екранах однофазних кабелів і імпульси напруги є наслідком наведень з жили кабелю. Осцилограми комутаційних перенапруг, як

показано на рис.9, мають складну форму коливань різних частот, які накладаються один на одного і викликають тим самим підвищення напруги.

Підвищення струму в екрані в момент комутації фази А на землю (рис. 9), обумовлений зміною запасу енергії магнітного поля індуктивності жили і дією взаємоіндукції між жилою і екраном. Внаслідок збільшення взаємної індукції жили фази А на екран, ЕРС взаємоіндукції збільшується, і в транспонованих екранах починають протікати індуквані струми порівнянні з струмами короткого замикання фази, що призводить до перегріву струмоведучих частин та до термічного руйнування екрану.

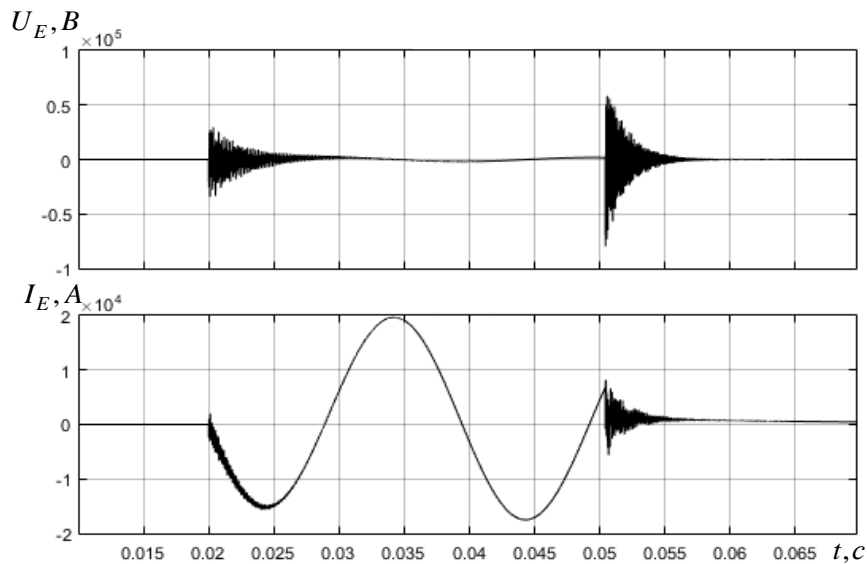


Рис. 9 Осцилограма напруги і струму в екрані трифазної КЛ при замиканні фази А на землю

Для обмеження комутаційних напруг застосовується принцип підбору сприятливих початкових умов перехідного процесу, при яких амплітуди вільних коливань мають мінімальні значення, наприклад управління моментом включення, шляхом зміни початкового кута кожної фази.

Комутація кожної фази відбувалася в різні моменти часу, так щоб кожна фаза мала початковий кут включення фази, що дорівнює нулю. Так як амплітуда вільної складової визначається кутом включення, то при початковій фазі $\varphi=0^\circ$, амплітуда фазної напруги має номінальне значення.

Змінення початкового кута кожної фази при комутації не впливає на підвищення напруги на екрані кабелю (рис 10), але при цьому з'являються індуквані струми в екранах (рис.11), криві перехідного процесу яких, підлягають дослідженню, щоб розуміти процеси, що відбуваються в екранах кабелю.

З рис. 10, 11 видно, що в перший момент часу при t_1 включається фаза А і по струмопровідній жилі починає протікати струм, внаслідок чого навколо провідника створюється змінне магнітне поле, що призводить до появи струму в екрані рис. 11. Струм в екрані викликає падіння напруги своєї фази, під дією магнітної індукції, викликає падіння напруги на екранах фази В і С (рис 10). Так само, напруга на екранах фаз В і С, що не увімкнулися, обумовлені ємнісним і електромагнітним зв'язком з фазою А.

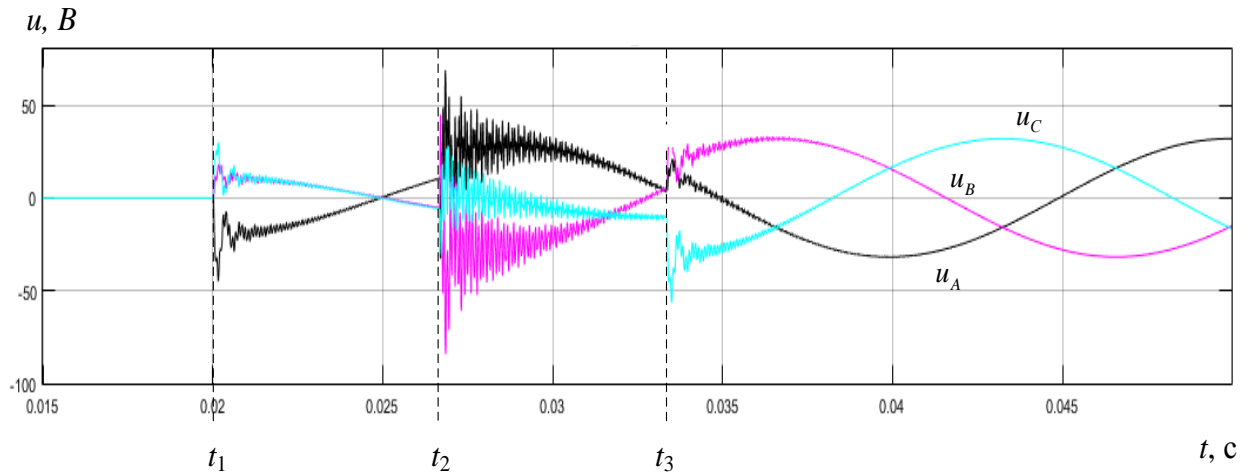


Рис. 10 Напруга в екранах трифазної КЛ при зміні початкового кута кожної фази

У момент включення однієї фази, у всіх екранах кожної фази починають протікати індуквані струми. В момент часу t_1 включається напруга фази A , що призводить до сильного збільшення струму (рис. 11), тому що транспозиція екранів не компенсує ЕРС взаємоіндукції. У момент часу t_2 підключається фаза B , що призводить до збільшення ЕРС взаємоіндукції на фазах. Це видно з осцилограми (рис 10), напруги u_A і u_B мають велику початкову амплітуду, в порівнянні з відключеною напругою u_C . Появи напруги на фазі B , внаслідок транспозиції екранів, компенсує поздовжні струми, що протікають через екрани, але не призводить до балансу фазних напруг.

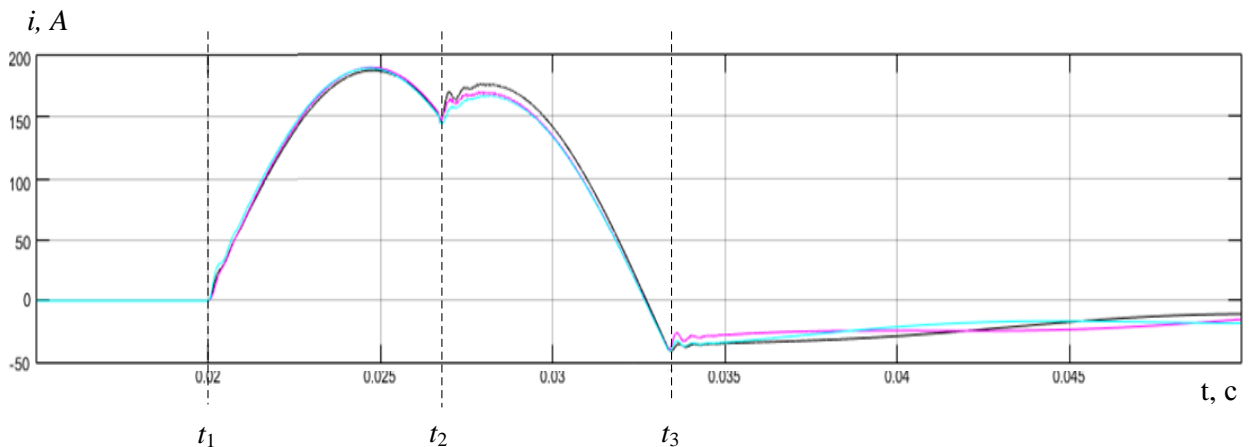


Рис. 11 Криві перехідних струмів при зміні початкового кута

У момент часу t_3 всі фазні напруги підключені до лінії, а отже ЕРС взаємоіндукції, яка наводиться в екранах трьох ділянок транспозиції, внаслідок зсуву фаз на 120° і 240° , дорівнює нулю. Тому струми, що наводяться в екранах, після незначного перехідного процесу приймають значення близькі до нуля.

Розроблена модель є універсальною і може бути застосована для розрахунку і аналізу високовольтних кабельних ліній при зміні будь-яких параметрів схеми заміщення і керуючих впливів, що дозволяє досліджувати різні електричні кола. Для розширення спектру розглянутих режимів, в моделі є можливість змінювати параметри і конфігурацію схеми заміщення на часовому діапазоні моделювання.

Модель застосовна для аналізу різних режимів навантаження, що дозволяє без труднощів враховувати різні види несиметрії трифазних кабельних ліній, досліджувати і аналізувати усталені та перехідні електромагнітні процеси.

Для верифікації отриманих результатів у роботі проведено розрахунки конкретної кабельної лінії на 330 кВ довжиною 13 км, яку вперше прокладено в Україні для електропостачання електросталеливарного комплексу заводу "Дніпросталь". У роботі розглянуто також перехідні величини напруг та струмів основних режимів роботи лінії: лінія без навантаження та при одно-, трифазних коротких замиканнях.

Реалізована комп'ютерна модель у програмному середовищі Matlab/Simulink на основі представлення багатополюсниками трифазної кабельної лінії, дозволяє досліджувати перехідні електромагнітні процеси в них, а також аналізувати різні режими роботи складних енергетичних систем з кабельними лініями, а на етапі їх проектування вибирати як раціональні схемно-конструктивні рішення та необхідне обладнання для захисту лінії при аварійних режимах роботи.

У додатку приведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальне наукове завдання розвитку методів аналізу перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними взаємоіндуктивними і ємнісними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополюсниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів при різних підключеннях до мережі електроживлення.

Отримані нові наукові результати у своїй сукупності мають важливе значення для розвитку теоретичної електротехніки в напрямку розвитку теорії розрахунку багатозфазних електричних кіл з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками, зокрема довгих високовольтних кабельних ліній електроенергетичного призначення.

Основні результати дисертаційного дослідження:

1. На підставі аналізу відомих наукових публікацій обґрунтовано необхідність удосконалення методів аналізу перехідних електромагнітних процесів у трифазних електричних колах із розподіленими параметрами і міжфазними взаємоіндуктивними і ємнісними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополюсниками з відповідними зосередженими параметрами.

2. Розвинуто метод аналізу перехідних електромагнітних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і взаємоіндуктивними та ємнісними зв'язками шляхом їх представлення багатополюсниками із відповідними зосередженими параметрами, які враховують особливості міжфазних зв'язків і перехідних процесів у первинних колах. Це забезпечило удосконалення методів розрахунку допустимих електромагнітних параметрів у вказаних колах при різних їх підключеннях до мережі електроживлення.

3. Розроблено нову математичну модель трифазних кіл із розподіленими параметрами та взаємоіндуктивними і ємнісними зв'язками на основі складання

диференційних рівнянь стану електричних кіл з багатополісниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов появи перехідних процесів у нормальних і аварійних режимах підключення таких кіл до мережі електроживлення. Використання такої моделі спрощує визначення недопустимих струмів у трифазних колах із розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками.

4. Удосконалено математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополісників з відповідними узгодженими параметрами і врахування впливу наведених ЕРС на індуковані струми в екранах кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє визначити необхідні перерізи струмопровідних екранів фазних кабелів та умови їх транспозиції.

5. Вперше на основі аналізу змінення напруг і струмів при виникненні перехідних процесів у трифазних колах типу довгих кабельних ліній електропередачі, що мають розподілені параметри і міжфазні взаємоіндуктивні та ємнісні зв'язки, визначено особливості появи власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях. Урахування виявлених особливостей дозволяє уточнювати умови виникнення і обмеження недопустимих напруг та струмів при різних умовах підключення кабельних ліній до трифазної мережі електроживлення.

6. Розвиток методів аналізу перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополісниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов появи перехідних процесів та їх розрахунку з використанням програми Matlab Simulink забезпечує спрощення визначення їх особливостей та уточнення кількісних характеристик.

7. Обґрунтованість і достовірність висновків, наукових положень роботи та рекомендацій підтверджено їх узгодженням з експериментальними результатами відомих організацій і публікаціями українських та іноземних вчених та їх використанням в методичних виданнях РД К28-006:2013 та РД К28-007:2017, що зазначено у відповідному акті використаних результатів роботи.

Для додаткової верифікації отриманих результатів у дисертації у середовищі Matlab Simulink було створено комп'ютерну модель кабельної лінії довжиною майже 13 км на напругу до 330 кВ і проведено розрахунок виникаючих перехідних електромагнітних процесів у такій лінії при різних умовах її підключення до трифазної мережі електроживлення. Отримані результати щодо визначення допустимих струмів і напруг в екранах фазних кабелів лінії та вибраних її проектантами транспозицій екранів відрізняються не більше ніж на 3%. Це дозволяє рекомендувати результати дисертації для розробки методик визначення допустимих і аварійних режимів аналогічних трифазних кабельних ліній електропередачі та вибору раціональних схемо-конструктивних рішень при їх проектуванні.

8. Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи з розвитку теорії перехідних процесів в трифазних кабельних лініях, які моделюються як кола з розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками використано на заводі

«Південкабель», в Інституті електродинаміки НАН України та впроваджено у навчальному процесі на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Теоретичні основи електротехніки» і «Теорія електричних та магнітних кіл».

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації
Статті у фахових наукових виданнях України:**

1. Щерба А. А., Лободзинський В. Ю. Математическое моделирование электромагнитных переходных процессов в трехфазной кабельной линии электропередачи при разных транспозициях экранов однофазных кабелей. *Техн. електродинаміка. Тем. випуск.* 2011. Ч.2. С. 271–276
2. Лободзинський В. Ю., Чибеліс В. І., Щерба А. А. Анализ переходных процессов и перенапряжений при коммутациях кабельной линии электропередачи в сверхвысоковольтных трехфазных электрических сетях. *Техн. електродинаміка. Тем. випуск.* 2012. Ч.1. С. 155–158.
3. Лободзинський В. Ю., Щерба А. А. Моделирование и анализ переходных процессов в трехфазной высоковольтной кабельной линии. *Техн. електродинаміка. Тем. випуск.* 2012. Ч.4. С. 151–156.
4. Chibelis V., Lobodzinskyi V., Illina O. Research on transposition efficiency of screens of three-phase cable lines with consideration of mutual phase disposition. *Computational Problems of Electrical Engineering.* 2016. Vol.6, №2. pp. 63–66.
5. Лободзинський В.Ю. Аналіз перенапруг та струмів однорідної довгої лінії при несиметричних коротких замиканнях. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки.* 2017. №2. С. 38–44. – Входить до МНМБД Index Copernicus.
6. Лободзинський В.Ю. Дослідження форм кривих перехідного процесу при комутаціях. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України.* 2017. №47. С. 11–15. – Входить до МНМБД Elibrary.
7. Чибеліс В. І. Лободзинський В.Ю. Аналіз методів розрахунку електромагнітних перехідних процесів багатофазних ліній електропередавання з розподіленими параметрами типу кабельних ліній високої напруги. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Електроенергетичні та електромеханічні системи».* 2017. № 870. С. 76–82.
8. Лободзинський В. Ю., Чибеліс В. І. Математична модель трифазної лінії з розподіленими параметрами при електромагнітних перехідних процесах. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки.* 2018. № 4. С. 96–102. – Входить до МНМБД Index Copernicus.
9. Лободзинський В. Ю., Довгаль М. О., Мудрик В. І. Комп'ютерне моделювання перехідних процесів при пошкодженні кабельної лінії електропередачі. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського, серія «Технічні науки».* 2018. Том 29 (68), №2. С. 46–50. – Входить до МНМБД Index Copernicus.

Праці апробаційного характеру:

10. Lobodzinskiy V., Maslak M. Mathematical modeling of the three-phase high-voltage cable lines under the theory of multiterminal networks. *In IEEE Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. 2015. pp. 96-98.
11. Lobodzinskiy V., Tsyban Y. The investigation of wave process during propagation of plate voltage pulse on three-phase performance cable line. *In IEEE Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017. pp. 448–451
12. Лободзинський В.Ю., Худик А.И. Математическая модель анализа перенапряжений на изоляции экрана в схеме с заземлением экранов по концам участка кабельной линии высокого напряжения. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів*. Київ. 2012. С. 578–580.
13. Лободзинський В.Ю., Чибелис В.И., Фаріна О.А. Анализ переходных процессов и перенапряжений при отключении ненагруженных линий электропередачи. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів*. Київ. 2012. С. 583–585.
14. Лободзинський В.Ю. Анализ установившихся, импульсных и переходных электромагнитных процессов в кабельных линиях высокого напряжения. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів*. Київ. 2013. С. 583–585.
15. Лободзинський В.Ю., Жук Б.О. Математическая модель расчета эквивалентных однофазных схем замещения трехфазных схем с взаимоиндуктивными связями в виде четырехполюсника. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів*. Київ. 2013. С. 583–585.
16. Лободзинський В.Ю., Солоп Б.К. Анализ расчета электромагнитных переходных процессов в трехфазных цепях при произвольной коммутации. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів*. Київ. 2013. С. 583–585.
17. Лободзинський В.Ю., Метельская О.В. Анализ переходных процессов при подключении имитационной модели кабельной линии к источнику питания. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів*. Київ. 2014. С. 583–585.
18. Лободзинський В.Ю., Пустовий Т. П., Комісарова І. П. Аналіз методів моделювання елементів кабельних ліній у фазних координатах на основі теорії багатополісників. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів*. Київ. 2015. С. 478-480.
19. Лободзинський В.Ю., Ілліна О. О., Губчук А. Є. Методологічний підхід для побудови моделей статичних багато провідних елементів. *Сучасні проблеми*

електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2016. С. 423-425.

20. Лободзинський В.Ю. Аналіз методики чисельного розрахунку перехідних процесів при комутаціях кабельних ліній. *Inzynieria i technologia. Wspolczesne tendencje w nauce i edukacji. Konferencji miedzynarodowej naukowo praktycznej*. Kraków (Poland). 2016. pp. 33–38.

21. Lobodzinskiy V., Tsyban Y., Lobodzinskaya T. Analysis of transients in case of changing a phase of power source at the moment of connection with cable lines. *Inzynieria i technologia. Osiagniecia naukowe, rozwoj, propozycje na rok 2016. Konferencji miedzynarodowej naukowo praktycznej*. Zakopane (Poland). 2016. pp. 62–65.

22. Лободзинський В.Ю. Теоретичні дослідження та аналіз перенапруг перехідного процесу при комутаціях високовольтної кабельної лінії. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах: матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції*. Кременчуг. 2016. С. 239–241.

АНОТАЦІЯ

Лободзинський В.Ю. Перехідні процеси в представлених багатополіусниками трифазних колах із розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розвитку методів розрахунку перехідних електромагнітних процесів у електричних колах з розподіленими параметрами на основі їх представленням багатополіусними елементами із зосередженими параметрами та урахуванням взаємних міжфазних індуктивних та ємнісних зв'язків.

Розвинуто метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, шляхом представлення цих кіл багатополіусниками із зосередженими параметрами, що враховують особливості міжфазних електромагнітних зв'язків.

Розроблено нову математичну модель трифазних електричних кіл, як розгалужених кіл із розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, шляхом складання диференційних рівнянь стану цих кіл, визначення граничних і початкових умов розрахунку виникаючих в них перехідних процесів при нормальних і аварійних умовах та з урахуванням взаємних електромагнітних зв'язків.

Удосконалено математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополіусників і врахування впливу наведених ЕРС на індуковані струми в екранах кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє визначати необхідні перерізи екранів та кількість їх транспозицій.

Ключові слова: кола з розподіленими параметрами, багатополіусник, трифазні електричні кола, перехідні процеси, міжфазні зв'язки, кабелі.

ABSTRACT

Lobodzinskyi V.U. Transients in represented by multipoles three-phase circuits with distributed parameters and electromagnetic coupling. – Qualifying scientific work as manuscript.

The thesis submitted in fulfillment of the Candidate of Science (PhD) in Engineering degree on specialty 05.09.05 – «Theoretical Electrical Engineering». – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», MES of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of methods of calculation of transient electromagnetic processes in electric circuits with distributed parameters based on their representation of multipole elements with lumped parameters and taking into account mutual in-phase inductive and capacitive couplings.

The statement of such a scientific task is justified by the modern tendency in theoretical electrical engineering to consider multiphase electric circuits as a series-parallel connection of different n-poles, which provides an increase in the efficiency of the calculation of transient electromagnetic processes in multiphase circuits with distributed parameters and interphase coupling.

In solving the problems set in the work were used: scientific provisions of the theory of analysis and synthesis of three-phase linear electric circuits, methods of multipole theory and their use for modeling of electromagnetic transients in circuits with distributed parameters and interphase bonds, drawing electrical circuits of substitution with lumped parameters electromagnetic processes in three-phase cable lines. Numerical simulation of electromagnetic transients was implemented using the Matlab software package.

In the dissertation the method of calculation of electromagnetic transients in three-phase electric circuits with distributed parameters and mutual interfacial connections is developed, by presenting these circuits by multipoles with lumped parameters, taking into account the peculiarities of interfacial electromagnetic connections.

A new mathematical model of branched three-phase electric circuits with distributed parameters and interfacial connections has been developed based on the compilation of differential equations of state of these circuits, determination of the boundary and initial conditions for the calculation of transient processes occurring in them under normal and emergency conditions taking into account the mutual interconnections.

On the basis of modeling and analysis of transient voltages and currents in three-phase cable transmission lines, as three-phase electric circuits with distributed parameters and mutual electromagnetic connections, the peculiarities of the occurrence of their own electromagnetic oscillations under complex boundary conditions and switching have been determined for the first time.

The mathematical model for the calculation of transient electromagnetic processes in three-phase cable transmission lines has been improved based on the use of multipole theory and taking into account the effect of the induced EMFs on the induced currents in

the cable screens at their various transitions, which allows to determine the necessary cross sections of the screens and the required number of their transitions.

In the dissertation the actual scientific task of development of methods of the analysis of transients in three-phase circuits with distributed parameters and interphase mutual inductive and capacitive connections is solved on the basis of representation of such circuits by multiples, finding their corresponding lumped parameters and determination of boundary and initial conditions of occurrence of transient power supply network.

The new scientific results obtained are important for the development of theoretical electrical engineering towards the development of the theory of calculation of multiphase electric circuits with distributed parameters and interphase connections, in particular long high voltage cable lines electric power purpose.

For the first time, on the basis of the analysis of changes of voltages and currents in the case of transients in three-phase circuits of the type of long cable transmission lines having distributed parameters and interphase mutual and capacitive connections, the peculiarities of the appearance of their own electromagnetic oscillations under complex boundary conditions and switching are determined. Taking into account the revealed features allows to specify the conditions of occurrence of voltages and currents under different conditions of connection of cable lines to the three-phase power supply network.

Theoretical and practical results of the dissertation on the development of the theory of transients in three-phase cable lines, which are modeled as circuits with distributed parameters and electromagnetic connections, were used at the Yuzhkabel plant, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine and introduced into the educational process at the electrotechnical department of University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" while teaching the subjects "Theoretical Foundations of Electrical Engineering" and "Theory of electrical and magnetic circuits".

Keywords: distributed circuits, multipole, three-phase electric circuits, transients, interphase connections, cables.

Підписано до друку 16.12.19 р. Формат 60x90¹/16
Ум. друк. арк.. 0,9. Обл-вид. арк. 0,9
Наклад 120 прим. замовлення № 542
Віддруковано на різнографі в видавничому центрі «Принт-центр»
04053, м. Київ, вул.. Січових Стрільців, 26А
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 227-40-16
<http://www.printc.com.ua>. E-mail printcenter@ukr.net