

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ЛЕВОНЮК ВІТАЛІЙ РОМАНОВИЧ

УДК 621.311:537-77

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АНАЛІЗУ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ
ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ
НА ОСНОВІ ВАРІАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Львівському національному аграрному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Чабан Андрій Васильович,
Львівський національний аграрний університет,
професор кафедри електротехнічних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Кулик Володимир Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри електричних станцій і систем

доктор технічних наук, доцент
Мірошник Олександр Олександрович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства ім. Петра Василенка,
завідувач кафедри електропостачання та енергетич-
ного менеджменту

Захист відбудеться « 24 » травня 2019 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий « 09 » квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Одним з найважливіших стратегічних об'єктів будь-якої держави є електричні мережі, основним призначення яких є об'єднання між собою джерел електроенергії (електричних станцій) та споживачів у єдину електроенергетичну систему. Якщо теорія аналізу усталених процесів у згаданих мережах розроблена практично досконало, то щодо теорії перехідних процесів є певні запитання, особливо коли це стосується ліній електропередач високої та надвисокої напруг. Зазвичай перехідні процеси в електричних мережах виникають під час пошкодження їх елементів або внаслідок комутації вимикачів. Відомо, що під час реальних комутацій розрив струму відбувається не обов'язково в момент проходження останнього через нуль, що породжує надскладну проблему пошуку цих струмів. Для її вирішення запропоновано модель вимикача надвисокої напруги, основний акцент у якій зроблено на динаміку дезаксіального механізму переміщення контактів. З точки зору фізики в згаданому пристрої (вимикачі) відбуваються надскладні процеси, для опису яких потрібно задіяти досить об'ємний апарат прикладної фізики, зокрема, рівняння електромагнітного поля, рівняння Фур'є, теорію плазми з урахуванням впливу середовища (його фізико-хімічних властивостей), а також теорію Лагранжа щодо механіки руху контактів. На нинішній день моделі згаданих пристроїв якщо й побудовані, то є досить складними й громіздкими, а відтак, не завжди прийнятні в задачах аналізу перехідних процесів у електричних мережах. Таким чином, побудова математичних моделей комутаційних пристроїв помірної складності, що на достатньому рівні описують згадану вище проблему, зокрема вимикачів надвисокої напруги, – на часі.

Для реальних ліній електропередач як основних елементів електричних мереж напруги на початку й кінці лінії є невідомими функціями. Це породжує проблему пошуку крайових умов до рівняння довгої лінії, оскільки для їх знаходження необхідно залучати математичну модель цілої підсистеми (як на початку, так і кінці лінії), що в об'ємних підсистемах достатньо проблематично. Тому пошуку крайових умов до рівняння лінії в роботі також приділено увагу.

У роботі аналізуються перехідні процеси в динамічних системах, що складаються з електромагнітних та механічних підсистем. Відтак, це дає підстави згідно з теорією Увайта-Вудсона для використання варіаційних підходів. За основу побудови моделей згаданих систем взято модифікований принцип Гамільтона-Остроградського.

У дисертації досліджуються мережі постійного й змінного струмів. Для мереж змінного струму досліджувалися лише симетричні режими, що дозволило представити трифазну симетричну електричну мережу в однолінійному виконанні з параметрами її елементів для прямої послідовності. Усі математичні моделі реалізовано виключно з використанням чисельних методів шляхом побудови алгоритмів з подальшою реалізацією за допомогою алгоритмічної мови *Visual Fortran*.

Науково-прикладним завданням, розв'язанню якого присвячена дисертаційна робота, є покращення методів аналізу перехідних процесів у елементах електричних мереж надвисокої напруги за нормальних та аварійних режимів роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розвиток методів аналізу перехідних процесів у лініях електропередачі надвисокої напруги на основі варіаційних підходів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі.

1. Застосувати апарат варіаційного числення до побудови математичних моделей елементів електричних мереж надвисокої напруги.
2. Розробити методику пошуку крайових умов до рівняння довгої лінії електропередач як елемента електричної мережі, використовуючи крайові умови другого та третього родів до диференціального рівняння лінії.
3. Розробити єдиний енергетичний підхід до побудови моделі елегазового вимикача, що враховує електричні та механічні процеси.
4. На основі розробленої моделі вимикача проаналізувати коливні електро-механічні процеси в механізмі переміщення контактів.
5. Проаналізувати необхідність врахування впливу механічних коливних процесів у елегазовому вимикачі на перехідні процеси в елементах електричних мереж.
6. Розробити алгоритмічно-програмний засіб реалізації створених математичних моделей.
7. Порівняти результати комп'ютерної симуляції розроблених математичних моделей з відомими прикладними програмами.

Об'єктом досліджень є перехідні процеси в електричних мережах надвисокої напруги.

Предметом дослідження є моделі елементів електричних мереж, створені на основі модифікованого принципу Гамільтона-Остроградського.

Методи дослідження. Науково-методичну основу виконаних досліджень склали: метод математичного моделювання, який ґрунтується на модифікації принципу Гамільтона-Остроградського, використаний для побудови математичних моделей; методи дискретизації диференціальних рівнянь з частинними похідними, які використовувалися для дискретизації рівняння довгої лінії за просторовою координатою; чисельні методи інтегрування систем звичайних диференціальних рівнянь, що описують електромагнітний та електромеханічний стани досліджуваних об'єктів за явним і неявним принципами; методи алгоритмізації досліджуваних задач, які використовувалися для побудови алгоритмів, блок-схем та комп'ютерних програм на відповідних алгоритмічних мовах.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Отримано подальший розвиток теорії моделювання електротехнічних систем шляхом застосування модифікованого принципу Гамільтона-Остроградського для задач аналізу перехідних процесів, що дало змогу будувати моделі елементів електричних мереж надвисокої напруги виходячи з єдиного енергетичного підходу.
2. Удосконалено метод пошуку крайових умов до рівняння довгої лінії надвисокої напруги як елемента електричної мережі шляхом використання крайових умов другого та третього родів, що дало змогу аналізувати електромагнітні перехідні процеси, зокрема, підвищити адекватність відтворення картини поширення електромагнітної хвилі в лінії електропередачі.
3. Уперше побудовано математичну модель елегазового вимикача як елемента електричної мережі надвисокої напруги, у якій на противагу до відомих враховано динаміку руху дезаксіального механізму переміщення контактів, а дугові процеси між контактами зеквівалентовано нелінійним активним опором та ємністю, що дало змогу досліджувати вплив коливних електромеханічних процесів рухомого контакту на перехідні процеси в елементах електричних мереж.

Практичне значення отриманих результатів:

– урахування впливу електро механічних коливних процесів у елегазовому вимикачі на електромагнітні процеси в електричних мережах дало змогу уточнити перебіг перехідних процесів у них, відтак скорегувати часовий інтервал для подачі команди на вимкнення вимикача;

– розроблена математична модель вимикача, у якій основну увагу приділено динаміці руху дезаксіального механізму переміщення контактів, є придатною до використання під час аналізу причин зношування вимикачів;

– створені на підґрунті розроблених математичних моделей програмні засоби придатні до використання як автономні продукти на етапах проектування та експлуатації електричних мереж.

Результати досліджень впроваджено в навчальному процесі Львівського національного аграрного університету для підвищення якості лекційних та лабораторних занять з курсів «Математичне моделювання електротехнічних систем» і «Проектування систем електропостачання» та на ПС 750 кВ «Західноукраїнська» з метою розширення можливостей аналізу електромагнітних процесів, які зумовлені комутацією вимикачів надвисокої напруги. Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, які наведено в дисертації отримані здобувачем самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, безпосередньо дисертанту належить: [1] – пошук крайових умов до рівняння довгої лінії в режимі неробочого ходу; [2] – побудова математичної моделі фрагмента електричної мережі; [3] – одержання рівнянь електромагнітного стану електричної мережі на основі модифікованого принципу Гамільтона-Остроградського; [4] – пошук крайових умов до рівняння довгої лінії за умови багатовузлових під'єднань до неї; [6] – побудова спрощеної математичної моделі механізму переміщення контактів вимикача; [7] – обґрунтування правомірності еквівалентності заступної схеми вимикача надвисокої напруги; [10] – побудова розширеного лагранжіану для динамічної системи; [11] – здійснення аналізу перехідних процесів під час виходу системи в усталений режим; [12] – побудова математичної моделі дезаксіального механізму переміщення контактів вимикача та аналіз перехідних процесів у електричній мережі в циклі АПВ; [13] – побудова математичної моделі фрагменту електричної мережі на основі класичних підходів до моделювання; [14] – побудова математичної моделі лінії постійного струму та аналіз перехідних процесів у режимі короткого замикання; [15] – аналіз часових, просторових та часово-просторових розподілів функціональних залежностей напруг та струмів у лінії; [16] – аналіз останніх досліджень та публікацій; [17] – порівняльний аналіз перехідних процесів за різних заступних схем лінії електропередачі.

Апробація матеріалів дисертації.

Основні результати дисертаційних досліджень були предметом обговорень на: засіданні кафедри електропостачання промислових підприємств, міст і сільськогосподарства Національного університету «Львівська політехніка» (2016 р); науковому семінарі кафедри електроенергетики та систем управління Національного університету «Львівська політехніка» (2017 р); науковому семінарі кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електро механічних систем Національного університету «Львівська політехніка» (2018 р); XVII міжнародному науково-практичному форумі «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільсь-

ких територій (2016)», Львів – Дубляни, 14 – 16 вересня 2016 р; Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва (2017)», м. Кривий-Ріг, 20 – 22 березня 2017 р.; XLVI науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки Вінницького політехнічного інституту (2017), м. Вінниця, 22 – 24 березня 2017 р.; XXVII symposium «Środowiskowe zastosowania elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i medycynie (2017)», Mierzecin, 18 – 21 czerwca 2017 r; міжнародній науково-практичній конференції присвяченій 10-річчю кафедри електротехнічних систем «Розвиток енергетичних систем в агропромисловому комплексі (2017)», м. Львів, 20 – 22 вересня 2017 р; 13th International Scientific Conference POWER ENGINEERING 2018 (ENERGETIKA 2018). Control of Power Systems 2018. Tatranské Matliare – Tatranská Lomnica, 5 – 7 June 2018.

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи викладені в 17 наукових працях, в тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях України, в тому числі 1 стаття – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних *Web of Science*, 3 статті – у закордонних періодичних виданнях, в тому числі 1 стаття – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних *Scopus*, 4 статті – у наукових журналах і збірниках наукових праць, 5 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографічного списку використаних джерел і 11 додатків. Загальний обсяг роботи становить 209 сторінок друкованого тексту, з них: 6 сторінок вступу, 128 сторінки основного тексту, 119 рисунків, 1 таблиця, список використаних джерел із 152 найменувань, 11 додатків на 44 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання, визначено об'єкт і предмет досліджень, наведено наукову новизну одержаних результатів та їх практичне значення, зазначено особистий внесок здобувача, а також інформацію щодо публікацій за темою дисертації та апробацій роботи.

У **першому** розділі проаналізовано публікації, які стосуються досліджень перехідних процесів у електротехнічних системах на основі варіаційних підходів. Аналіз згаданих публікацій дає право стверджувати про недостатність опрацювання цієї теми, а відтак підтверджує доцільність застосування варіаційних підходів для дослідження перехідних процесів у згаданих системах.

Проаналізовано публікації, у яких досліджуються перехідні комутаційні процеси. Аналіз показав, що вчені віддають перевагу двом підходам до моделювання комутацій: здійснення так званих «миттєвих комутацій» (вимикач у розрахункових схемах імітується активним опором і в момент переходу струму через нульове значення йому присвоюється безмежно велике значення) та здійснення комутацій з урахуванням дугових процесів у вимикачах. У більшості праць урахування дугових процесів здійснюють на основі моделей Кассі та Майра. Відтак, вчені одноставно підтримують імітацію дуги активним опором (провідністю дуги). Проте у більшості праць не враховуються перехідні механічні процеси у самих вимикачах під час здійснення комутацій, попри те, що швидкість їх перебігу

співмірна із швидкістю протікання перехідних процесів у елементах електричних мереж. А якщо й урахуються, то в досить спрощеному варіанті.

Аналіз підходів до розв'язування рівняння довгої лінії для дослідження перехідних процесів у лініях електропередач з розподіленими параметрами показав, що згадане рівняння зазвичай розв'язують для ідеалізованої лінії (лінії без втрат), або застосовують колочий еквівалент лінії. Таким чином, саме рівняння дещо втрачає свою фізичну сутність, що придає актуальність нашим дослідженням.

У **другому** розділі репрезентовано теоретичні засади отримання розширеного неконсервативного лагранжіана. За основу взято модифікований принцип Гамільтона-Остроградського, для функціоналу дії якого використано модифіковану функцію Лагранжа, розширену шляхом додаткового введення в останню енергії сил зовнішньої й внутрішньої дисипації та енергії активних і пасивних сил потенціального характеру, які діють на систему ззовні. Функціонал дії за Гамільтоном-Остроградським, функція Лагранжа та модифікована функція Лагранжа виглядають так:

$$S = \int_0^{t_1} \left(L^* + \int_l L_l dl \right) dt, \quad I = \int_l L_l dl, \quad L = T - P, \quad L^* = \tilde{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*, \quad \Phi^* = \int_0^t \Phi_R^*(t) \Big|_{t=\tau} dt, \quad (1)$$

де S – дія за Гамільтоном-Остроградським; L – функція Лагранжа; L_l – лінійна густина модифікованої функції Лагранжа; I – енергетичний функціонал; T – кінетична енергія; L^* – модифікована функція Лагранжа; \tilde{T}^* – кінетична енергія (ко-енергія); $P \equiv P^*$ – потенціальна енергія; D^* – енергія активних і пасивних потенціальних сил, які діють на систему ззовні; Φ^* – зовнішня та внутрішня дисипація енергії; Φ_R^* – дисипативна функція системи (зазвичай дисипативна функція Релея); τ – додаткова змінна інтегрування.

На цій основі у роботі представлено: рівняння руху інерційних мас з податною трансмісією руху, рівняння електричних контурів із зосередженими параметрами та рівняння двопровідної довгої лінії електропередач з розподіленими параметрами.

Третій розділ присвячений дослідженню перехідних процесів у електричних мережах без урахування комутацій. Під час дослідження цих процесів у довгих лініях необхідно розв'язувати диференціальне рівняння із частинними похідними (рівняння довгої лінії), що потребує наявності крайових умов інтегрування. У сучасній літературі досить часто використовують крайові умови першого роду. Такий підхід доцільний, коли ці умови на початку й кінці лінії (струми, напруги, заряди) є заданими функціями. Натомість у реальних задачах прикладної електротехніки згадані функціональні залежності є відомими не завжди. Досить часто крайові умови на початку й кінці лінії (тут напруги $u = u(x, t)$) є функціями невідомими. Для їх пошуку ми пропонуємо використовувати крайові умови другого й третього родів, застосування яких дає змогу виключити з системи рівнянь довгої лінії крайові напруги так, щоб останні знаходились послідовно із загальної системи диференціальних рівнянь стану. Таким чином, крайові умови, задані неявно, знаходимо під час інтегрування загальної системи диференціальних рівнянь.

У цьому розділі розв'язано три задачі. *Перша* стосується аналізу перехідних процесів у двопровідній лінії постійного струму.

Складники розширеного лагранжіану для першої задачі виглядають так:

$$\tilde{T}^* \equiv T^* = \frac{L_H i_H^2}{2}, \quad \Phi^* = \frac{1}{2} \int_0^t (R_H i_H^2) d\tau, \quad D^* = \int_0^t u(t) i(t) d\tau, \quad P^* = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \equiv T_l = \frac{L_0 Q^2(x,t)}{2}, \quad \frac{\partial P}{\partial x} \equiv P_l = \frac{1}{2C_0} Q_x^2(x,t), \quad \text{де } Q_t \equiv \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = i(x,t), \quad Q_x \equiv \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \equiv \Phi_l = \Phi_{l3} - \Phi_{lB} = \int_0^t \left(\frac{R_0}{2} Q_t^2(x,t) - \frac{g_0}{2C_0^2} Q_x^2(x,t) \right) d\tau. \quad (4)$$

Підставивши (2) – (4) в (1) отримаємо математичну модель системи:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = (C_0 L_0)^{-1} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - (g_0 L_0 + C_0 R_0) v - g_0 R_0 u \right), \quad \frac{\partial u}{\partial t} = v, \quad L_H \frac{di_H}{dt} = u_H - R_H i_H, \quad (5)$$

де u_H – напруга на навантаженні; R_H – активний опір гілки навантаження; L_H – індуктивність гілки навантаження; $i_N \equiv i_H$ – струм в останній дискретній гілці лінії (у гілці навантаження).

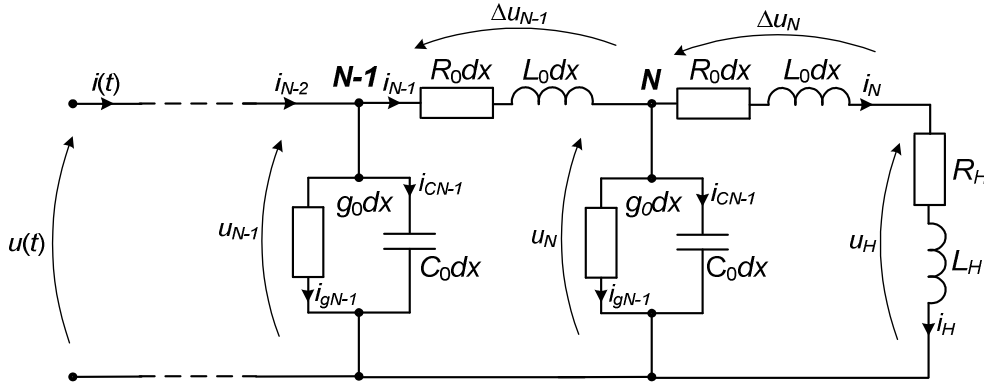


Рисунок 1 – Електрична схема з'єднання елементів розрахункової заступної схеми довгої лінії

На початку лінії крайова умова задана $u(0, t) = u(t)$, а в кінці лінії власне використано крайові умови другого й третього родів:

$$-\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = R_0 i(x,t) + L_0 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}. \quad (6)$$

Дискретизуючи за методом прямих (центральна похідна) перше рівняння в (5) та рівняння (6) одержимо:

$$\frac{dv_j}{dt} = (C_0 L_0)^{-1} \left(\frac{u_{j-1} - 2u_j + u_{j+1}}{(\Delta x)^2} - (g_0 L_0 + C_0 R_0) v_j - g_0 R_0 u_j \right), \quad \frac{du_j}{dt} = v_j, \quad j = 2, \dots, N; \quad (7)$$

$$-\frac{u_{j+1} - u_{j-1}}{2\Delta x} = R_0 i_j + L_0 \frac{di_j}{dt}, \quad u_1 = u(x,t)|_{x=0}, \quad u_N = u(x,t)|_{x=l}. \quad (8)$$

Тоді, з рівняння (8) знаходимо невідому напругу u_{N+1} у фіктивному вузлі.

У дисертаційній праці здійснено пошук крайових умов до першого рівняння в (5) для трьох режимів роботи лінії постійного струму: режим неробочого ходу, режим роботи на еквівалентне активно-індуктивне навантаження та режим короткого замикання в кінці лінії.

У режимі неробочого ходу напругу в фіктивному вузлі знаходимо так:

$$u_{N+1} = u_{N-1}. \quad (9)$$

У режимі роботи на еквівалентне активно-індуктивне навантаження так:

$$u_{N+1} = -2\Delta x \left(R_0 i_N + \frac{L_0}{L_H + L_0 \Delta x} [u_N - (R_0 \Delta x + R_H) i_N] \right) + u_{N-1}. \quad (10)$$

І в режимі короткого замикання в кінці лінії ця напруга виглядає так:

$$u_{N+1} = -2\Delta x \left[R_0 i_N + \frac{1}{\Delta x} (u_N - R_0 \Delta x i_N) \right] + u_{N-1}. \quad (11)$$

Струм у вітках дискретизованої лінії знаходимо дискретизуючи рівняння (6) за методом прямих, використовуючи праву похідну, з урахуванням (9) – (11):

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L_0 \Delta x} (u_j - u_{j+1}) - \frac{R_0}{L_0} i_j, \quad j = 1, \dots, N. \quad (12)$$

Комп'ютерну симуляцію здійснено на прикладі лінії постійного струму Волгоград – Донбас (на даний час виведена з експлуатації). Лінія має такі параметри: $R_0 = 0,82 \cdot 10^{-4}$ Ом/м, $L_0 = 0,175 \cdot 10^{-5}$ Гн/м, $C_0 = 0,103 \cdot 10^{-10}$ Ф/м, $g_0 = 3,235 \cdot 10^{-10}$ См/м, $R_H = 350$ Ом, $L_H = 1$ Гн, довжина лінії $l = 473$ км. Лінія живиться постійною напругою $u(x, t)|_{x=0} = 400$ кВ. Крок дискретизації рівняння лінії $\Delta x = l/20 = 23,6$ км. На рисунках 2 – 4 представлені деякі результати комп'ютерної симуляції.

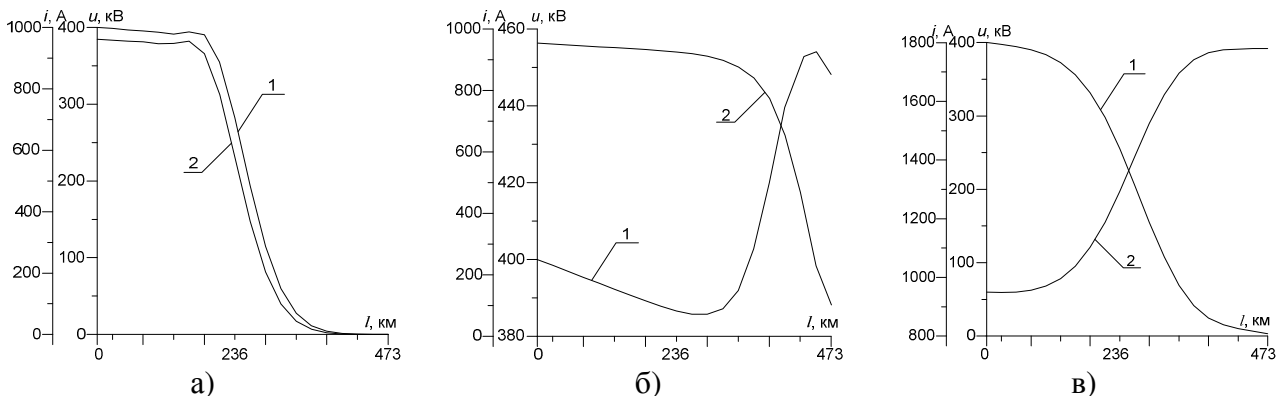


Рисунок 2 – Розподіл напруги (1) і струму (2) у лінії: а) – у момент часу $t = 0,001$ с у режимі неробочого ходу; б) – у момент часу $t = 0,002$ с у режимі роботи на еквівалентне активно-індуктивне навантаження; в) – у момент часу $t = 0,003$ с у режимі КЗ.

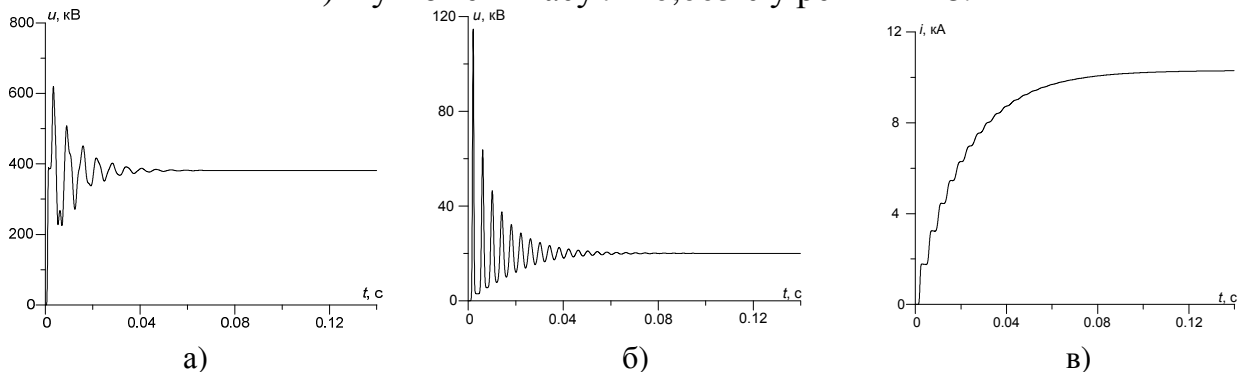


Рисунок 3 – Функціональні залежності лінії постійного струму під час її запуску: а) – напруга посередині лінії в режимі роботи на активно-індуктивне навантаження; б) – напруга на N -му дискретному вузлі лінії в режимі КЗ; в) – струм в останній дискретизованій гілці лінії в режимі КЗ.

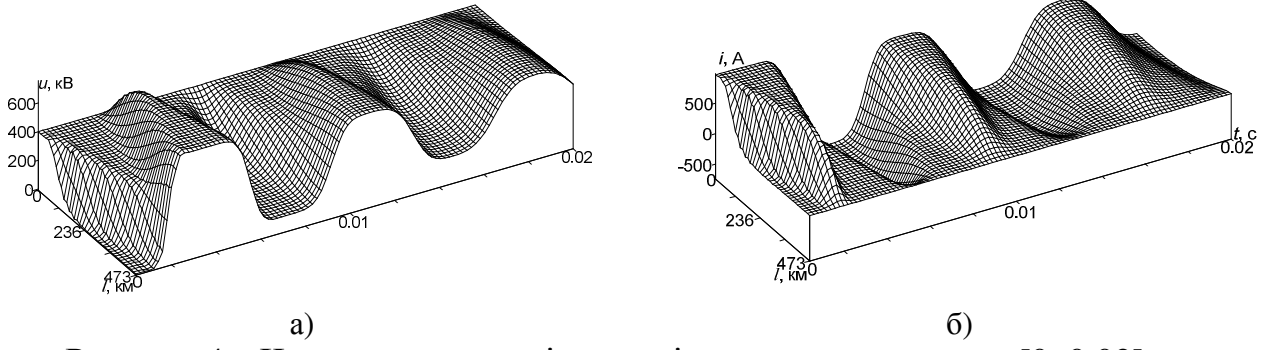


Рисунок 4 – Часово-просторові розподіли в момент часу $t \in [0; 0,02]$ с:
а) – функції напруги; б) – функції струму.

Друга задача стосується аналізу перехідних процесів у електричних мережах змінного струму. Зокрема, досліджувалися перехідні процеси у фрагменті електричної мережі представленому на рисунку 5.

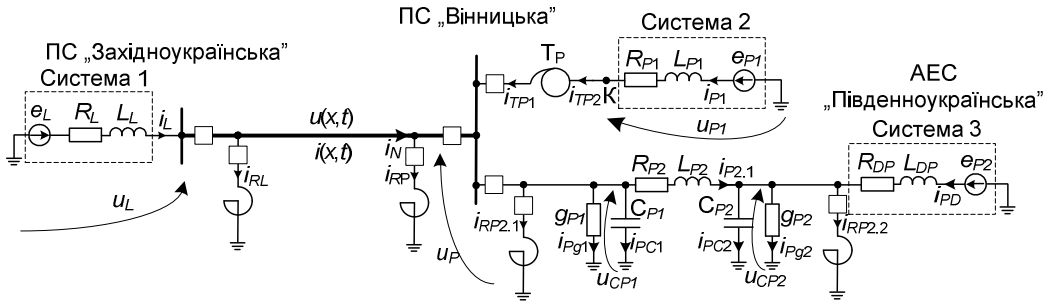


Рисунок 5 – Розрахункова схема фрагмента електричної мережі

Складники розширеної функції Лагранжа для неї будуть такими:

$$\begin{aligned} \tilde{T}^* = & \int_0^{i_{TP1}} \Psi_{TP1} di_{TP1} + \int_0^{i_{TP2}} \Psi_{TP2} di_{TP2} + \frac{L_{P1} i_{TP2}^2}{2} + \frac{L_{DP} i_{DP}^2}{2} + \frac{L_{P2} i_{P2.1}^2}{2} + \frac{L_{RL} i_{RL}^2}{2} + \\ & + \frac{L_{RP} i_{RP}^2}{2} + \frac{L_{RP2.1} i_{RP2.1}^2}{2} + \frac{L_{RP2.2} i_{RP2.2}^2}{2} + \frac{L_L i_L^2}{2}, \quad P^* = \frac{Q_{P1}^2}{2C_{P1}} + \frac{Q_{P2}^2}{2C_{P2}}; \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi^* = & \frac{1}{2} \int_0^t (r_{TP1} i_{TP1}^2 + r_{TP2} i_{TP2}^2) d\tau + \frac{1}{2} \int_0^t (R_{P1} i_{TP2}^2 + R_{DP} i_{DP}^2 + R_{P2} i_{P2.1}^2 + R_L i_L^2) d\tau + \\ & + \frac{1}{2} \int_0^t (R_{RL} i_{RL}^2 + R_{RP} i_{RP}^2 + R_{RP2.1} i_{RP2.1}^2 + R_{RP2.2} i_{RP2.2}^2) d\tau + \\ & + \frac{1}{2} \int_0^t (g_{P1}^{-1} i_{Pg1}^2 + g_{P2}^{-1} i_{Pg2}^2) d\tau, \quad D^* = \int_0^t (e_L i_L + e_{P1} i_{P1} + e_{P2} i_{DP}) d\tau, \quad (14) \end{aligned}$$

з урахуванням виразів (3), (4).

Тепер напруги у фіктивних вузлах знаходимо так, див. методику (7), (8):

$$u_0 = \frac{2\Delta x L_0}{3} \left[\left(\frac{2 + \Delta x^2 g_0 R_0}{\Delta x L_0} - \frac{1}{L_L} - \frac{1}{L_{RL}} \right) u_1 - \frac{1}{2\Delta x L_0} u_2 + \left(\frac{\Delta x (g_0 L_0 + C_0 R_0)}{L_0} - \Delta x g_0 \right) v_1 + \right.$$

$$\left. + \frac{R_0}{L_0} i_1 + \frac{R_{RL}}{L_{RL}} i_{RL} + \frac{1}{L_L} (e_L - R_L i_L) \right]; \quad (15)$$

$$u_{N+1} = u_{N-1} - 2(u_N - u_P), \quad u_P = u_N + i_N R_0 \Delta x + L_0 \Delta x \frac{di_N}{dt}. \quad (16)$$

На основі розробленої математичної моделі створено програмний засіб за допомогою якого досліджено перехідні процеси в фрагменті електричної мережі у режимі короткого замикання, якому передував вихід в усталений процес. Комп'ютерна симуляція здійснювалася для лінії електропередачі ПС «Західноукраїнська» – ПС «Вінниця» з такими параметрами лінії: довжина 360,5 км, $R_0 = 1,9 \cdot 10^{-5}$ Ом/м, $L_0 = 9,24 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $C_0 = 1,3166 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $g_0 = 3,25 \cdot 10^{-11}$ См/м. На рисунках 6, 7 представлено перехідні процеси фазного струму та фазної напруги вкінці лінії.

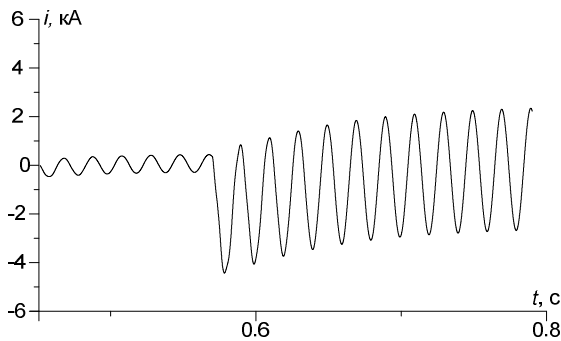


Рисунок 6 – Фазний струм укінці лінії

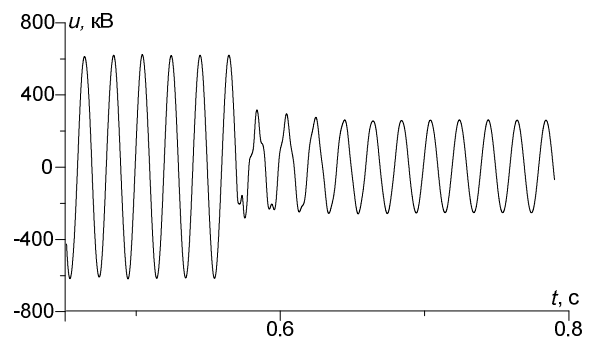


Рисунок 7 – Фазна напруга укінці лінії

Третя задача стосується аналізу перехідних процесів у електричних мережах змінного струму з вузловими під'єднаннями до лінії електропередач (рис. 8).

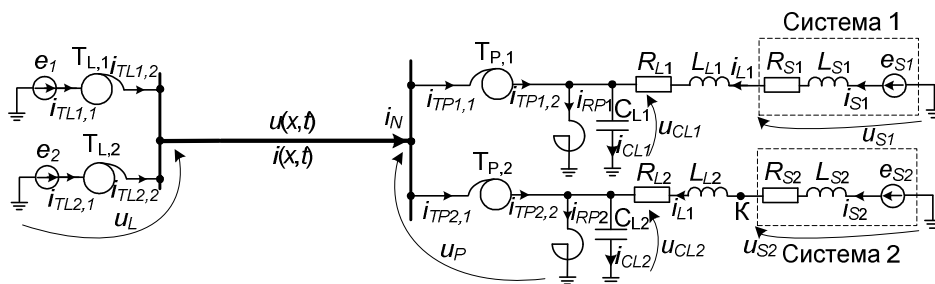


Рисунок 8 – Розрахункова схема фрагмента електричної мережі з багатовузловими під'єднаннями

Тут представлено варіанти пошуку крайових умов до рівняння довгої лінії у мережі змінного струму (рис. 8) та запропоновано методику пошуку крайових умов до згаданого рівняння за наявності вузлових під'єднань, зокрема, автотрансформаторів.

Комп'ютерну симуляцію здійснено на прикладі лінії електропередачі ПС «Західноукраїнська» – ПС «Альбертірша» довжиною 476 км. Параметри лінії такі ж, як у другій задачі.

У **четвертому** розділі для урахування комутаційних процесів у електричних мережах на основі теорії Лагранжа розроблено математичну модель вимикача надвисокої напруги. Дугові процеси в останньому враховуються нелінійним активно-ємнісним елементом, параметри якого залежать від відстані між контактами вимикача.

Для досліджень обрано елегазовий вимикач надвисокої напруги фірми *ABB* типу *LTV 362-800 (T) E4* (рис. 9), який достатньо широко використовується в електричних мережах України. Переміщення контактів згаданого вимикача виконується механізмом, який представлено на рисунку 10. Він складається з двох кривошипно-шатунних механізмів, які симетричні відносно поздовжньої осі цілого механізму. Механізм приводиться в рух за допомогою пружини (на рисунку не показано).

Рисунок 11 репрезентує кінематичну схему дезаксіального кривошипно-шатунного механізму. Особливістю даного механізму є те, що вісь руху контактів та вісь привідної пружини не лежать на одній осі із центром кривошипно-



Рисунок 9 – Фото загального вигляду вимикача фірми *ABB* типу *LTV 362-800 (T) E4* (ПС «Західноукраїнська»)

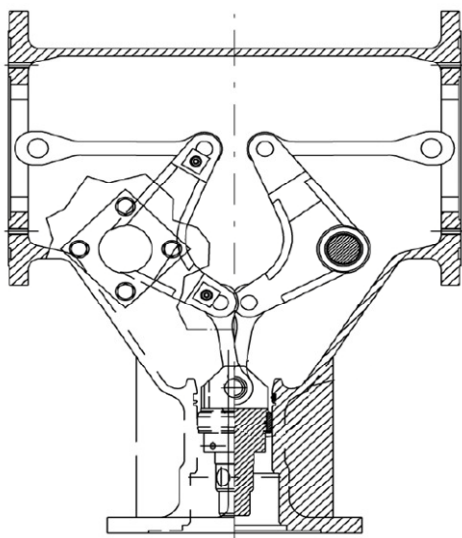


Рисунок 10 – Механізм переміщення контактів елегазового вимикача надвисокої напруги типу *LTV 362-800 (T)E4*

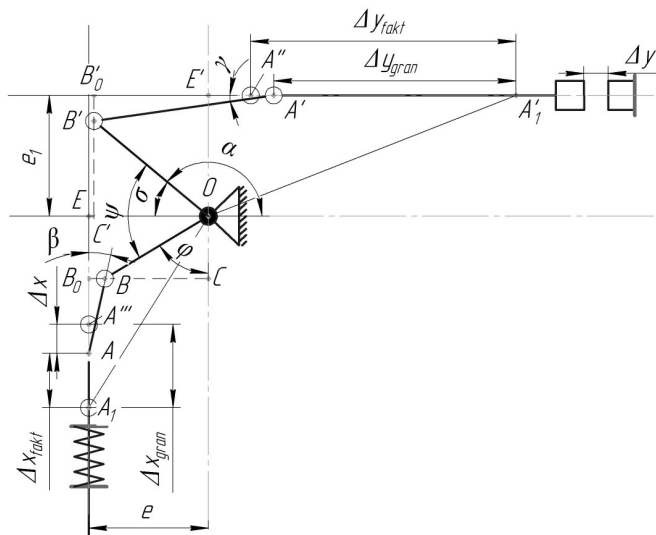


Рисунок 11 – Кінематична схема дезаксіального кривошипно-шатунного механізму переміщення контактів вимикача

шатунного механізму. Через наявність дезаксіальності істотно ускладнюється опис процесів, які виникають у механізмі. Зокрема, динаміку механізму неможливо описати із використанням відомої теореми про миттєвий центр швидкостей. У роботі математичну модель механізму переміщення контактів побудовано на основі методів аналітичної механіки.

Вираз для визначення відстані між контактами (див. рис. 11) виглядає так:

$$\Delta y = \Delta y_{fakt} - \Delta y_{gran}, \quad (17)$$

де Δy_{fakt} – переміщення точки A' в точку A'' , до моменту розходження контактів $\Delta y_{fakt} = \Delta y_{gran}$; $\Delta y_{gran} = \text{const}$.

$$\Delta y_{fakt} = \sqrt{(|OB'| + |B'A'|)^2 - e_1^2} -$$

$$-\left[|B'A'|\sqrt{1-\left[\frac{|OB'|\sin((\varphi+\psi)-90^\circ)-e_1}{-|B'A'|}\right]^2}-|OB'|\cos((\varphi+\psi)-90^\circ)}\right]. \quad (18)$$

Урахування дугових процесів під час комутації в вимикачі надвисокої напруги є надзвичайно складною задачею, тому ми враховуємо їх у першому наближенні за допомогою активних опорів з нелінійними характеристиками. Параметри цих опорів залежать від відстані між контактами, тобто опір міжконтактного проміжку r_D є невідомою функцією переміщення Δy .

Для апроксимації залежності $r_D(\Delta y)$, використано інтерполяційні сплайни третього порядку (див. рис. 12):

$$r_{D_{0 \div 0,01}} = 0,1 + 21990\Delta y_{0 \div 0,01}; \quad (19)$$

$$r_{D_{0,01 \div 0,02}} = 220 + 21990(\Delta y_{0,01 \div 0,02} - 0,01) + 8,01 \cdot 10^7 (\Delta y_{0,01 \div 0,02} - 0,01)^3; \quad (20)$$

$$r_{D_{0,02 \div 0,07}} = 520 + 46020(\Delta y_{0,02 \div 0,07} - 0,02) + 2,403 \cdot 10^6 (\Delta y_{0,02 \div 0,07} - 0,02)^2 + 3,6886 \cdot 10^{10} (\Delta y_{0,02 \div 0,07} - 0,02)^3. \quad (21)$$

Залежності $r_D(\Delta y)$, які визначені на основі статистичного аналізу перебігу дугових процесів у реальних електричних мережах з урахуванням рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії.

На підставі розробленої моделі вимикача у цьому ж розділі розв'язано дві задачі. *Перша* стосується аналізу перехідних процесів у фрагменті електричної мережі з вимикачем надвисокої напруги, ключовий акцент у якій поставлено на врахування дії механізму переміщення контактів цього вимикача.

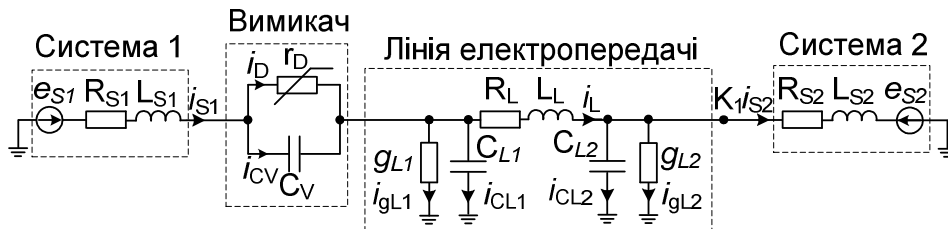


Рисунок 13 – Розрахункова заступна схема досліджуваного фрагмента електричної мережі

Складники розширеної функції Лагранжа для неї будуть такими:

$$T^* = \frac{mV_x^2}{2} + \frac{L_{S1}i_{S1}^2}{2} + \frac{L_L i_L^2}{2} + \frac{L_{S2}i_{S2}^2}{2}, \quad P^* = \frac{k(\Delta x)^2}{2} + \frac{Q_{CL1}^2}{2C_{L1}} + \frac{Q_{CL2}^2}{2C_{L2}} + \frac{Q_{CV}^2}{2C_V}; \quad (22)$$

$$\Phi^* = \frac{1}{2} \int_0^t (k_d V_x^2) dt + \frac{1}{2} \int_0^t (R_{S1}i_{S1}^2 + R_L i_L^2 + R_{S2}i_{S2}^2) dt + \frac{1}{2} \int_0^t (r_D i_D^2) dt + \frac{1}{2} \int_0^t (g_{L1}^{-1} i_{gL1}^2 + g_{L2}^{-1} i_{gL2}^2) dt; \quad (23)$$

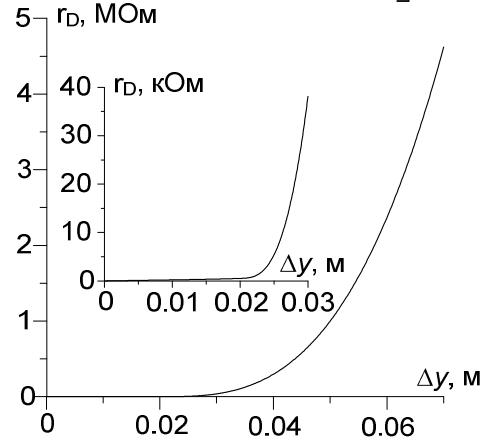


Рисунок 12 – Залежність опору міжконтактного проміжку вимикача від відстані між контактами

$$D^* = 4F_X \Delta x + \int_0^t (e_{S1} i_{S1} + e_{S2} i_{S2}) dt. \quad (24)$$

У результаті мінімізації розширеного функціоналу дії, рівняння електромагнітного та електромеханічного станів системи виглядають так:

$$\frac{di_{S1}}{dt} = \frac{1}{L_{S1}} (e_{S1} - R_{S1} i_{S1} - u_V - u_{CL1}), \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L_L} (u_{CL1} - R_L i_L - u_{CL2}); \quad (25)$$

$$\frac{du_{CL1}}{dt} = \frac{1}{C_{L1}} (i_{S1} - i_L - i_{gL1}), \quad \frac{du_{CL2}}{dt} = \frac{1}{C_{L2}} (i_L - i_{gL2} - i_{S2}); \quad (26)$$

$$\frac{di_{S2}}{dt} = \frac{1}{L_{S2}} (u_{CL2} - R_{S2} i_{S2} - e_{S2}), \quad \frac{du_V}{dt} = \frac{1}{C_V} \left(i_{S1} - \frac{u_V}{r_D} \right); \quad (27)$$

$$i_{gL1} = g_{L1} u_{CL1}, \quad i_{gL2} = g_{L2} u_{CL2}; \quad (28)$$

$$\frac{d\Delta x}{dt} = V_x, \quad \frac{dV_x}{dt} = \frac{k\Delta x + 4F_X + k_d V_x}{m}, \quad (29)$$

де L_{S1} , L_{S2} , L_L – індуктивності систем 1, 2 та лінії; R_{S1} , R_{S2} , R_L – активні опори систем 1, 2 та лінії; e_{S1} , e_{S2} – електрорушійні сили систем 1 та 2; C_{L1} , C_{L2} – ємності лінії; C_V – ємність еквівалентного конденсатора, який увімкнений паралельно до еквівалентного розриву контактів вимикача; i_{S1} , i_{S2} , i_L – струми систем 1, 2 та струм у лінії; g_{L1} , g_{L2} – активні провідності лінії; i_{gL1} , i_{gL2} – струми витоку лінії; r_D – опір еквівалентної дуги; i_D – струм еквівалентної дуги; Δx – відстань переміщення пружини; V_x – швидкість переміщення пружини; k – коефіцієнт пружності пружини; k_d – коефіцієнт дисипації; m – приведена маса контактів; F_X – виштовхувальна сила дуги одного контакту, зведена до системи координат руху пружини, u_{CL1} , u_{CL2} – напруги на початку та в кінці лінії відповідно; u_V – напруга між контактами вимикача.

Система рівнянь (25) – (27), (29) з урахуванням (17) – (21), (28) представляє математичну модель фрагмента електричної мережі репрезентованого на рисунку 13 з урахуванням механічних процесів у вимикачі. Під час проведення комп'ютерної симуляції здійснювалося два досліди.

У першому досліді було знехтувано втратами енергії в цілому механізмі та виштовхувальною силою дуги, тобто: $F_X = 0$ Н, а другий дослід здійснювався для різних характеристик сили, яка впливає на контакти вимикача. Представимо результати комп'ютерної симуляції тільки для другого досліді.

Цей дослід здійснювався так. Після виходу в усталений режим у момент часу $t_{КЗ} = 0,62$ с від початку комп'ютерної симуляції виникло трифазне КЗ в точці K_1 (див. рис. 13). Через 42 мс (час спрацювання релейного захисту $\Delta t_{РЗ} = 20$ мс плюс власний час вимкнення вимикача $\Delta t_{ВВ} = 22$ мс), тобто в момент часу $t_{ПК} = 0,662$ с, почалося розмикання контактів вимикача. Силу F_X враховано у вигляді функціональної залежності останньої від часу (див. рис. 14), зокрема, для трьох випадків. У першому випадку під час комутації на контакти вимикача в інтервалі часу $[0,675; 0,678]$ с діяла імпульсна сила величиною 15 кН, а в другому та третьому випадках вона мала наростаючий лінійний та експоненціальний характер до величини 20 кН та 30 кН відповідно. Деякі результати комп'ютерної симуляції для другого досліді показано на рисунках 15 – 17.

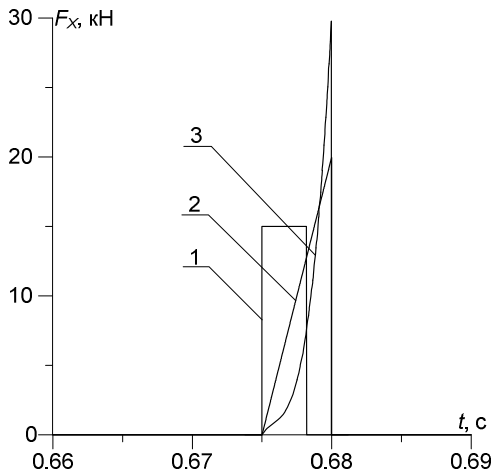
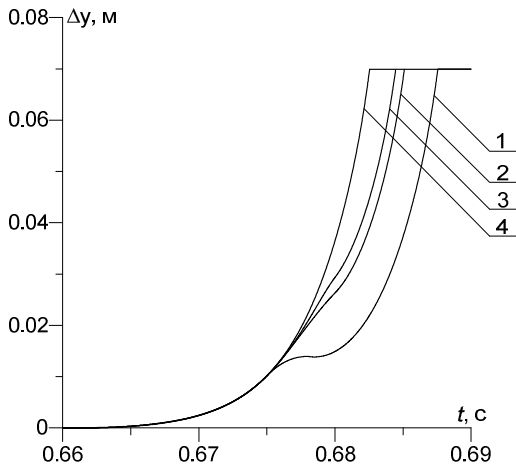


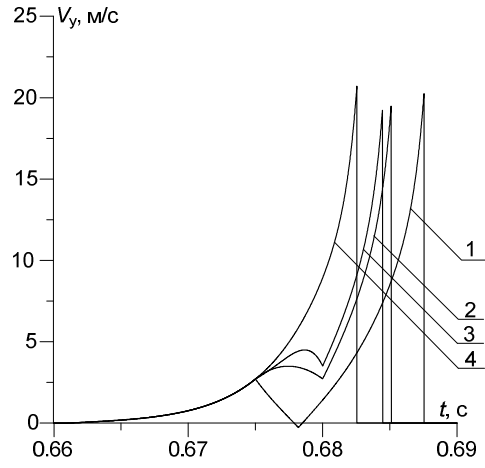
Рисунок 14 – Сила, яка діє на контакти (приведена до координат руху пружини): 1 – імпульсна; 2 – наростаюча за прямо-лінійним законом; 3 – наростаюча за експоненціальним законом.

Аналізуючи лінійний та експоненціальний характер впливу бачимо, що вони мають менший вплив на роботу механізму, попри більші значення їх сил 20 кН та 30 кН відповідно (рис. 15). При лінійному характері час повного розходження контактів збільшився на 2,7 мс, а при експоненціальному – на 2 мс.

Унаслідок збільшення часу розмикання контактів відбувся зріз струму (див. рис. 16). Вплив цього явища на вимикач є небезпечний, оскільки внаслідок зрізу струму між контактами вимикача виникли перенапруги, які мали значення приблизно 1 МВ (див. рис. 17), що складає $1,55 U_{m.p.}$



а)



б)

Рисунок 15 – Залежності переміщення (а) та швидкості переміщення (б) контактів вимикача за різних характерів впливаючої сили: 1 – імпульсний; 2 – лінійний; 3 – експоненціальний; 4 – без урахування впливаючої сили.

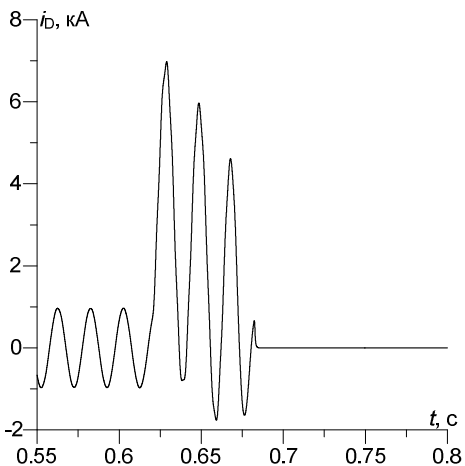


Рисунок 16 – Струм через вимикач від системи 1 для першого випадку другого досліду

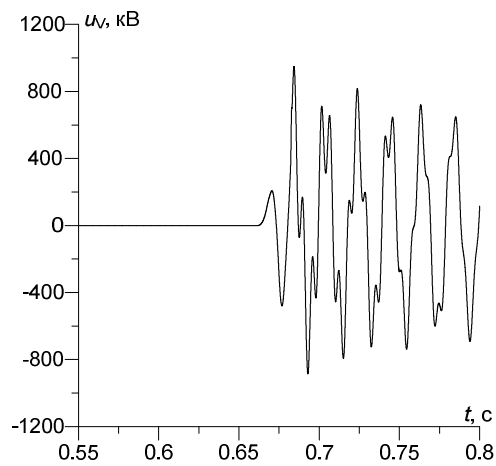


Рисунок 17 – Напруга між контактами вимикача для першого випадку другого досліду

Друга задача четвертого розділу стосується дослідження комутаційних процесів у фрагменті електричної мережі, ключовими елементами якої є довга лінія електропередачі та вимикач надвисокої напруги (рис. 18) під час циклу автоматичного повторного ввімкнення (АПВ).

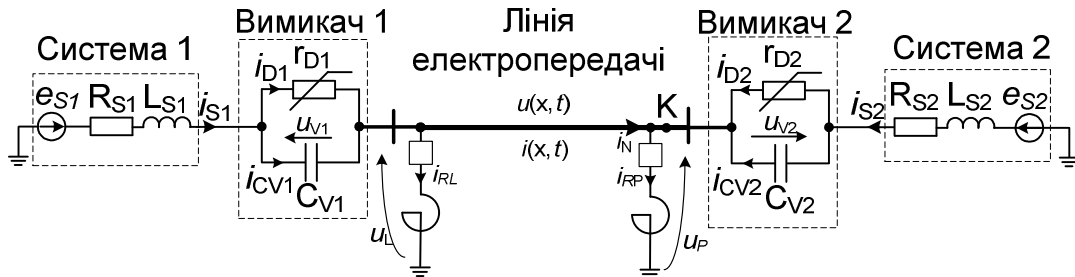


Рисунок 18 – Розрахункова заступна схема досліджуваного фрагменту електричної мережі

Задля зменшення обсягу матеріалу представимо лише рівняння для знаходження струмів через вимикачі та напруг між їхніми виводами, див. рисунок 18:

$$\frac{di_{S1}}{dt} = \frac{1}{L_{S1}}(e_{S1} - R_{S1}i_{S1} - u_{V1} - u_L), \quad \frac{di_{S2}}{dt} = \frac{1}{L_{S2}}(e_{S2} - R_{S2}i_{S2} - u_{V2} - u_P); \quad (30)$$

$$\frac{du_{V1}}{dt} = \frac{1}{C_{V1}}\left(i_{S1} - \frac{u_{V1}}{r_{D1}}\right), \quad \frac{du_{V2}}{dt} = \frac{1}{C_{V2}}\left(i_{S2} - \frac{u_{V2}}{r_{D2}}\right). \quad (31)$$

Традиційно у якості крайових умов до рівняння довгої лінії використано крайові умови третього роду, див. (7) та перший вираз у (8). На рисунках 19 – 22 представлені деякі результати аналізу перехідних процесів у фрагменті електричної мережі (рис. 18), яка працює в циклі неуспішного АПВ для віддаленого КЗ з урахуванням електромеханічних процесів у вимикачі. Параметри довгої лінії подані в третій задачі третього розділу.

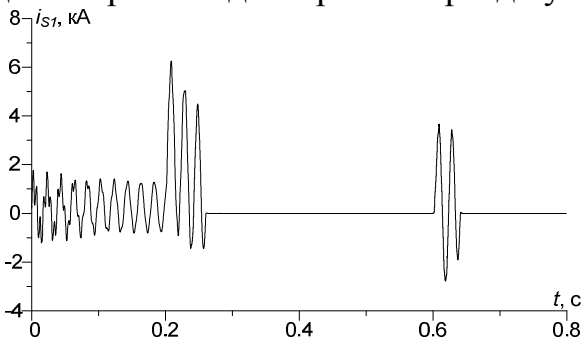


Рисунок 19 – Фазний струм i_{S1} від системи 1 через вимикач 1

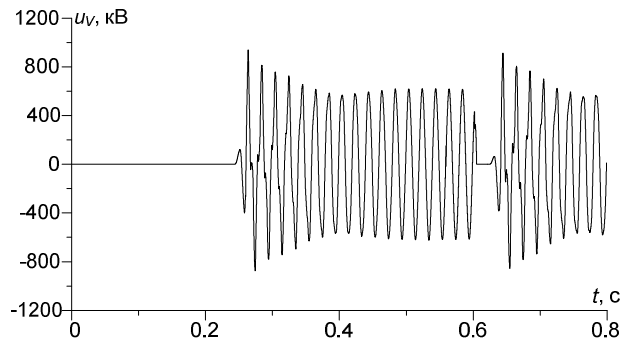


Рисунок 20 – Напруга між контактами вимикача 1

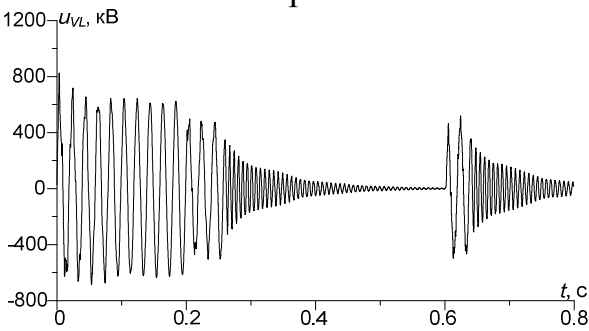


Рисунок 21 – Фазна напруга на вимикачі 1 з боку лінії

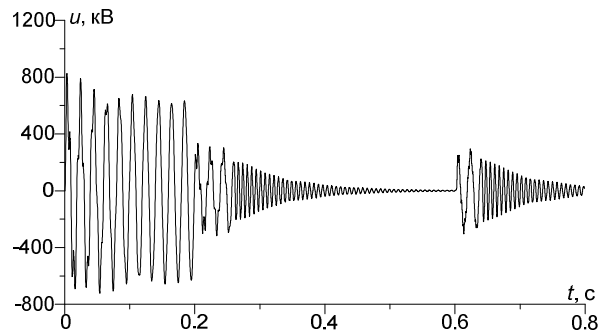


Рисунок 22 – Фазна напруга посередині лінії

Адекватність математичної моделі механізму переміщення контактів вимикача було перевірено за допомогою програмного комплексу *COMPAS 3D V13*. Результати верифікації показали, що найбільша відносна похибка становить 5,24 %, при розходженні контактів на відстань 0,0061 м, а найменша – 0,14 % при розходженні контактів на відстань 0,0405 м. Величину похибки можна пояснити точністю апроксимації функції $\varphi(\Delta x_{fakt})$ поліномом шостого ступеня. Виходячи з цього можемо сказати, що модель механізму приводу руху контактів є адекватною.

Також у роботі співставлено картину перехідних процесів, отриману з допомогою розробленої моделі вимикача та моделі вимикача відомого програмного комплексу *MatLab*, яка ґрунтується на «миттєвих комутаціях». Було здійснено два досліді: перший полягав у тому, що команда на розходження контактів (на вимкнення) подавалася за 1 мс до переходу струму через нуль, а другий – за 1 мс після переходу струму через нуль. Результати верифікації представимо для першого досліді.

В момент часу $t = 0,661$ с (див. рис. 23) за 1 мс до переходу струму через нуль (час переходу струму через нульове значення $t = 0,662$ с) було подано команду на вимкнення вимикачем струму КЗ і його контакти почали розходитися. Бачимо, що в момент першого переходу струму через нульове значення модель вимикача із програмного комплексу *MatLab* присвоїла вимикачу безмежно велике значення опору і він вимкнув струм короткого замикання (здійснив миттєву комутацію (рис. 23, крива 2). Щодо розробленої моделі вимикача, то бачимо, що струм після переходу через нуль поступово зменшуючись продовжував протікати (горіла дуга) і в кінці горіння дуги відбувся зріз струму (рис. 23, крива 1). Якщо проаналізувати перехідний процес напруги між контактами вимикача, то бачимо, що перших два піки напруги після комутації є зайвими (рис. 24, крива 2), оскільки між контактами вимикача горить дуга і поки вона горить таких перенапруг не буде, що власне й урахувала розроблена модель вимикача (рис. 24, крива 1).

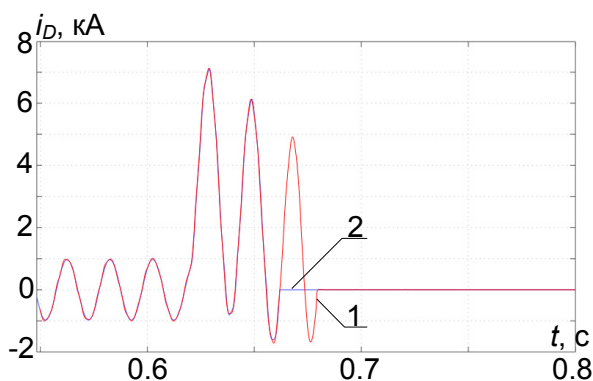


Рисунок 23 – Фазний струм через вимикач: 1 – розроблена модель; 2 – модель вимикача з *MatLab*.

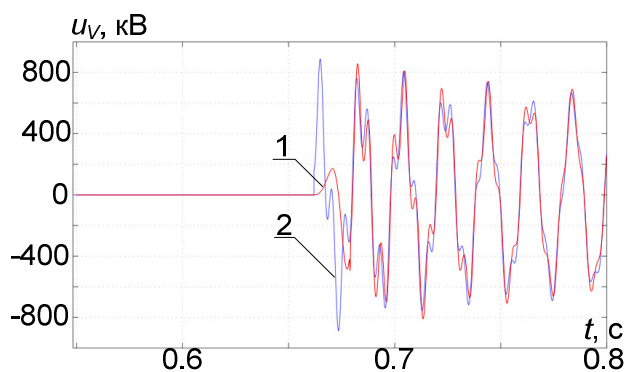


Рисунок 24 – Напруга між контактами вимикача: 1 – розроблена модель; 2 – модель вимикача з *MatLab*.

Щодо другого досліді, коли команду на вимкнення подали на 1 мс пізніше переходу струму через нуль, то модель вимикача із *MatLab* не зреагувала і затягнула час вимкнення струму короткого замикання наполовину періоду, а розроблена модель здійснила усі ті самі операції що й у першому досліді. А напруги між контактами вимикача зменшилися. Натомість модель вимикача із програмного комплексу *MatLab* відобразила значні перенапруги, при яких коефіцієнт перевищення амплітуди ПВН склав 1,48, що не відповідає реальній картині.

Окрім верифікації комутаційних процесів, у роботі здійснено верифікацію запропонованого підходу до аналізу перехідних процесів у довгих лініях електропередач, який ґрунтується на застосуванні крайових умов другого та третього родів до розв'язування диференціального рівняння довгої лінії. Для проведення верифікації досліджувався процес запуску лінії змінного струму, яка працює на еквівалентне активно-індуктивне навантаження, в усталений режим. Порівнювалися результати, отримані на основі запропонованого підходу та результати отримані з допомогою програмних комплексів *MatLab/Simulink* та *RE*. Верифікація показала, що результати симуляцій отримані з допомогою згаданих програмних комплексів відрізняються менше ніж на 1 %. Відтак, запропонований підхід дає прийнятні результати.

Варто зазначити, що запропонований у нинішній праці підхід до аналізу перехідних процесів у електричних мережах з довгими лініями здійснюється на польовому рівні в одновимірному просторі, що дає змогу максимально точно відтворити реальні фізичні процеси в згаданих об'єктах.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підґрунті єдиного енергетичного підходу, який полягає в застосуванні інтегрального варіаційного принципу Гамільтона-Остроградського розв'язано задачі, які стосуються покращення методів аналізу перехідних процесів у електричних мережах надвисокої напруги за нормальних та аварійних режимів роботи. Побудовано нові та покращено існуючі моделі окремих елементів електричних мереж із зосередженими та розподіленими параметрами, за допомогою яких здійснено аналіз перехідних електромагнітних та електромеханічних процесів у відповідних елементах. Основні результати досліджень, які одержані в роботі можна узагальнити такими положеннями.

1. Використання варіаційних підходів до моделювання перехідних процесів у електричних мережах надвисокої напруги уможливорює побудову математичних моделей елементів згаданих мереж виключно з єдиного енергетичного підходу, що спрощує роботу вузького спеціаліста, не потребуючи розширення його фаху. Натомість побудова моделі досліджуваного об'єкту зводиться виключно до формування розширеного функціоналу дії з подальшою мінімізацією останнього.

2. Отримані на основі варіаційних підходів рівняння: поступального руху інерційних мас, електричних контурів та довгої лінії електропередач з розподіленими параметрами підтверджують правильність застосування варіаційних підходів до побудови математичних моделей динамічних об'єктів у прикладних задачах електротехніки, електроенергетики та електромеханіки.

3. Запропонована в роботі методика пошуку крайових умов (другого та третього родів) до диференціального рівняння довгої лінії дає змогу аналізувати перехідні процеси в складних елементах електричних мереж не використовуючи при цьому коловий еквівалент самої лінії. Такий підхід покращує ефективність побудови моделі довгої лінії, оскільки не потребує створення розширених колових заступних схем, з одного боку; та дає змогу на польовому рівні врахувати перебіг електромагнітних процесів, з другого.

4. Побудована в роботі математична модель вимикача надвисокої напруги, основний акцент у якій поставлено на дезаксіальність механізму переміщення контактів, уможливорює врахування взаємного впливу механічних та електромагнітних явищ у вимикачі. Це дає змогу аналізувати складні комутаційні процеси в елементах електричних мереж, зокрема, враховувати природні коливання контактів, які безпосередньо впливають на зріз струму через вимикач, що призводить до перенапруг між контактами пристрою.

5. Інтегрування розробленої математичної моделі вимикача надвисокої напруги в загальну модель електричної мережі дає змогу враховувати складні комутаційні процеси під час аналізу перехідних станів у досліджуваному об'єкті, зокрема, аналізувати перехідні процеси в мережі під час циклу АПВ з урахуванням процесу зрізу струмів та перенапруг у мережі.

6. Розроблені алгоритми та комп'ютерні програми аналізу перехідних процесів у елементах електричних мереж і систем дають змогу відтворювати часові, просторові та часово-просторові розподіли функціональних залежностей у згаданих об'єктах, що забезпечує достатню візуалізацію реальної картини цих процесів, ураховуючи взаємовплив електромагнітних та електромеханічних явищ.

7. Результати верифікації підтверджують адекватність розроблених у роботі математичних моделей досліджуваних об'єктів та доцільність застосування варіаційних підходів до побудови математичних моделей елементів у електричних мережах надвисокої напруги.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

[1] А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, І. М. Дробот, та А. Ф. Герман, «Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 3, с. 30 – 35, 2016. (Індексується у *Web of Science*).

[2] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Аналіз неусталених процесів у лінії електропередачі, що з'єднує ПС «Західноукраїнська» та ПС «Вінницька»», *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*, Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи», № 870, с. 97 – 103, 2017.

[3] А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, та В. Г. Лисяк, «Аналіз перехідних процесів у довгій лінії електропередач як елемента електроенергетичної системи», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2 (131), с. 63 – 69, 2017.

[4] A. Czaban, M. Lis, M. Chrzan, A. Szafraniec, and V. Levoniuk, «Mathematical modelling of transient processes in power supply grid with distributed parameters», *Przegląd elektrotechniczny*, № 1, p. 17 – 20, 2018. (Індексується у *Scopus*).

[5] В. Р. Левонюк, «Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних процесів в елементах електроенергетичних систем», *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*, № 20, с. 155 – 161, 2016.

[6] А. Чабан, В. Левонюк, та І. Олексів, «Спрощена математична модель механізму приводу контактів елегазового вимикача», *Технічні вісті*, № 1(45), 2(46), с. 26 – 28, 2017.

[7] В. Левонюк, Г. Чабан, та І. Олексів, «Обґрунтування еквівалентної схеми заміщення елегазового вимикача надвисокої напруги», *Технічні вісті*, № 1(47), 2(48), с. 40 – 42, 2018.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[8] В. Р. Левонюк, «Аналіз числових методів для розв'язання систем диференціальних рівнянь під час дослідження перехідних процесів в електричних колах з R, L, C елементами», *Матеріали XVII міжнародного науково-практичного форуму «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій»*, Львів, 2016, с. 261 – 265.

[9] В. Р. Левонюк, «Математичне моделювання неусталених електромагнітних процесів в електроенергетичних системах на основі варіаційних підходів». *Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва»*, Кривий-Ріг, 2017, с. 58-59.

[10] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Аналіз перехідних електромагнітних процесів в локальній електроенергетичній системі, що складається з чотирьох трансформаторів, лінії електропередач та еквівалентного активно-індуктивного навантаження», *Тези доповідей XLVI науково-технічної конференції факультету електроенергетики та електромеханіки Вінницького політехнічного інституту*, Вінниця, 2017, с. 2708 – 2709.

[11] A. Czaban, M. Lis, M. Chrzan, A. Szafraniec, i V. Levoniuk, «Modelowanie matematyczne procesow nieustalonych w sieciach zasilajacych o parametrach rozlozonych», *Streszczenia XXVII symposiuma «Srodowiskowe zastosowania elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i medycynie»*, Mierzecin, 2017, s. 57 – 58.

[12] A. Czaban, A. Szafraniec, M. Lis, V. Levoniuk, H. Lysiak, and R. Figura, «Transient processes anflysis in a part of an power grid during a automatic reclosing cycle», *Proceedings of the 13th International Scientific Conference «Control of Power Systems 2018»*, Tatranské Matliare, 2018, pp. 43 – 48.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

[13] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Аналіз неусталених електромагнітних процесів у фрагменті електроенергетичної системи на основі класичних підходів до моделювання», *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*, № 21, с. 167 – 176, 2017.

[14] A. Czaban, M. Lis, J. Sosnowski, i W. Lewoniuk, «Model matematyczny dwuprzewej linii zasilania z wykorzystaniem modyfikowanej zasady Hamiltona», *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, Nr 1, p. 31 – 36, 2016.

[15] A. Czaban, A. Szafraniec, i V. Levoniuk, «Interdyscyplinarne modelowanie procesow nieustalonych w lokalnym ukkladzie elektroenergetycznym zawierajacym linie zasilania o parametrach rozlozonych», *Technika transportu szynowego*, № 12, p. 406 – 411, 2016.

[16] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Математична модель трифазної лінії електропередач, що живить еквівалентне активно-індуктивне навантаження», *Технічні вісті*, № 1(41), 2(42), с. 37 – 39, 2015.

[17] А. Чабан, В. Левонюк, та Р. Столярчук, «Математична модель локальної електроенергетичної системи, що живить активно-індуктивно-ємнісне навантаження», *Технічні вісті*, № 1(43), 2(44), с. 38 – 42, 2016.

АНОТАЦІЯ

Левонюк В. Р. Методи та засоби аналізу комутаційних перехідних процесів у лініях електропередачі надвисокої напруги на основі варіаційних підходів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

Робота присвячена розв'язанню задачі покращення методів аналізу перехідних процесів у електричних мережах надвисокої напруги за нормальних та аварійних режимів роботи.

Здійснено аналіз публікацій, які стосуються досліджень перехідних процесів у електротехнічних системах, у тому числі на основі варіаційних підходів. Отримано, виходячи з єдиного енергетичного підходу, який ґрунтується на модифікованому інтегральному варіаційному принципі Гамільтона-Остроградського рівняння руху інерційних мас з податною трансмісією руху, рівняння електричних контурів із зосередженими параметрами та рівняння довгої лінії електропередач з розподіленими параметрами. Побудовано моделі лінії постійного струму, а також двох фрагментів електричних мереж змінного струму, ключовим елементом у яких є довга лінія електропередачі з розподіленими параметрами. Запропоновано до розв'язування рівняння довгої лінії використовувати крайові умови другого та третього родів (умови Неймана й Пуанкаре). На основі розроблених математичних моделей аналізуються перехідні процеси в лініях постійного та змінного струмів які розглядаються як автономно, так і в якості елементів складних електричних мереж.

Для врахування комутаційних процесів у електричних мережах розроблено математичну модель вимикача надвисокої напруги, яка дає змогу враховувати вплив електромеханічних коливних процесів у вимикачі на перехідні процеси в елементах електричних мереж. Також досліджено перехідні процеси під час циклу автоматичного повторного ввімкнення.

Результати комп'ютерної симуляції представлені в вигляді рисунків, що аналізуються. Причому останні одержані з використанням чисельних методів. Матеріали дисертації містять математичні доведення, які ґрунтуються на теоріях диференціального, інтегрального та варіаційного числень.

Ключові слова: перехідні процеси, вимикач надвисокої напруги, електрична мережа, надвисока напруга, математична модель, принцип Гамільтона-Остроградського, рівняння Ейлера-Лагранжа, механізм переміщення контактів вимикача, довга лінія.

ABSTRACT

Levoniuk V. R. Methods and means of analysis of switching transients processes in ultra high voltage transmission lines on the basis of variational approaches. – Qualification research paper, manuscript copyright.

The dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences in speciality 05.14.02 «Electric power stations, networks and systems». – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.

The manuscript is devoted to the problem of improving the methods of analysis of transients processes in power lines of ultra-high voltage under normal and emergency operating modes.

In the thesis, the actual scientific tasks of improving the methods of analysis of transient processes in ultra-high voltage electrical networks under normal and emergency modes of work are formulated and solved, which will allow adequately to reproduce the real picture of the propagation of electromagnetic waves in power transmission lines and to investigate the influence of oscillating electromechanical processes of the moving contact of the circuit breaker on the transients processes in elements of electrical networks.

In the first section, the analysis of publications related to the study of transients processes in electrical systems based on variational approaches. The number of these publications was insignificant, and the analysis confirms the expediency of using variational approaches to the study of transients processes in these systems. Thus, scientists unanimously support the simulation of the arc with active resistance (arc conductivity). However, the works do not take into account the transient mechanical processes in the circuit breaker themselves in the implementation of switching, despite the fact that the rate of their flow is commensurate with the rate of transients in the elements of electrical networks. Analysis of approaches to solving the equation of the long line for the study of transients processes in power lines with distributed parameters showed that the above equation is solved for an idealized line (line without loss), or apply a circular equivalent line. Thus, the equation itself loses its physical essence, and therefore the improvement of methods for the study of transients processes in long power lines with distributed parameters is an urgent task.

In the second section of the dissertation work the theoretical foundations of the nonconservative Lagrangian are given. It is shown how it is possible to obtain equations of motion of inertial masses with a non-rigid motion transmission, equations of electric circuits with concentrated parameters and equations of a long power line with distributed parameters on the basis of a single energy approach, which is based on the modified Hamilton-Ostrogradsky integral variational principle. The obtaining of the mentioned equations was carried out by minimizing the extended functional action of Hamilton-Ostrogradsky.

The third section is devoted to the study of non-switching transients processes in electrical networks. In particular, here, based on the interdisciplinary method of mathematical modeling, models of the line of constant current and two fragments of electrical networks of alternating current are constructed, the key element of which is a long transmission line with distributed parameters. The theory of the electromagnetic field and circular approaches are used in the formation of the extended action functional on Hamilton-Ostrogradsky. This approach made it possible using ordinary differential equations and partial differential equations to adequately reproduce the physical processes in the objects under study. It is proposed to use the boundary conditions of the second and third genera (Neumann and Poincare conditions) to solve the long line equation. On the basis of the developed mathematical models, the transient processes in the direct current line for the modes of operation on the equivalent active-inductive load, short circuit and non-working stroke are analyzed. Transient processes in characteristic fragments of electrical networks in short-circuit modes, which were preceded by the output of systems in the steady state, are investigated.

In the fourth section to account for the switching processes in electrical networks, based on the theory of Lagrange, the mathematical model of ultra-high voltage circuit breaker. The developed mathematical model of the disaxial crank mechanism for switching contacts of the breaker allows to take into account the influx of electro-mechanical oscillatory processes in the circuit breaker on the transition processes in the elements of electrical networks. It also allows for the investigation of complex commutation processes in the elements of electrical networks, in particular, to take into account the natural fluctuations of contacts, which directly affect the cross section of the current through the circuit breaker, which leads to overvoltage in electrical network. The arc processes during commutation are taken into account by a nonlinear active-capacitive element whose parameters depend on the distance between the contacts of the circuit breaker.

The results of checking the adequacy of the mathematical model of the switch mechanism for switching contacts, which was checked with the help of the software complex SOMPAS 3D V13, were presented. The results of the verification showed that the highest relative error is 5.24%, with the difference of contacts at a distance of 0,0061 m, and the smallest - 0.14% with the difference of contacts at a distance of 0,0405 m. Also, the picture is compared to the transient process, obtained with the help of the developed model of the circuit breaker and model switch of the famous software package MatLab, which is based on "instantaneous commutation".

Key words: transients processes, ultra-high voltage circuit breaker, electrical network, ultra-high voltage, mathematical model, principle of Hamilton-Ostrogradsky, equation of Euler-Lagrange, mechanism of the movement of circuit breaker contacts, long line.

АННОТАЦИЯ

Левонюк В. Р. Методы и средства анализа коммутационных переходных процессов в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения на основе вариационных подходов. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 «Электрические станции, сети и системы». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

Работа посвящена решению задачи улучшения методов анализа переходных процессов у электрических сетях сверхвысокого напряжения при нормальных и аварийных режимах работы.

Осуществлен анализ публикаций, касающихся исследований переходных процессов у электротехнических системах, в том числе на основе вариационных подходов. Получено, исходя из единого энергетического подхода, который основан на модифицированном интегральном вариационном принципе Гамильтона-Остроградского уравнения движения инерционных масс с податной трансмиссией движения, уравнения электрических контуров с сосредоточенными параметрами и уравнения длинной линии электропередач с распределенными параметрами. Построены модели линии постоянного тока, а также двух фрагментов электрических сетей переменного тока, ключевым элементом в которых является длинная линия электропередачи с распределенными параметрами. Предложено к решению уравнения длинной линии использовать краевые условия

второго и третьего родов (условия Неймана и Пуанкаре). На основе разработанных математических моделей анализируются переходные процессы в линиях постоянного и переменного токов которые рассматриваются как автономно, так и в качестве элементов сложных электрических сетей.

Для учета коммутационных процессов в электрических сетях разработана математическая модель выключателя сверхвысокого напряжения, которая позволяет учитывать влияние электромеханических колебательных процессов в выключателе на переходные процессы в элементах электрических сетей. Также исследованы переходные процессы во время цикла автоматического повторного включения.

Результаты компьютерной симуляции представлены в виде рисунков, которые анализируются. Причем последние полученные с использованием численных методов. Материалы диссертации содержат математические доказательства, основанные на теориях дифференциального, интегрального и вариационного исчисления.

Ключевые слова: переходные процессы, выключатель сверхвысокого напряжения, электрическая сеть, сверхвысокое напряжение, математическая модель, принцип Гамильтона-Остроградского, уравнение Эйлера-Лагранжа, механизм перемещения контактов выключателя, длинная линия.