

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ БАГАТОФАЗНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТИПУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

О Чибеліс В. І., Лободзинский В. Ю., 2017

Викладено методологічні основи розрахунку багатофазних ліній електропередавання з розподіленими параметрами типу кабельних ліній високої напруги для аналізу електромагнітних та перехідних процесів у трифазних кабельних лініях. Показано методи побудови математичної моделі, вибору їх структури та обчислення параметрів моделі. Приклад використання і дослідження математичної моделі дано в системі Matlab.

Ключові слова: багатофазна лінія, високовольтна кабельна лінія, моделювання, коротке замикання, взаємодукація, комутація.

The article describes the methodological bases of calculation of multiphase transmission lines with distributed parameters of the type of cable lines of high voltage for the analysis of electromagnetic and transient processes in three-phase cable lines. Methods of constructing mathematical model, choice of their structure and calculation of model parameters are shown. An example of the use and research of mathematical model data in the Matlab system.

Keywords: multiphase lines, High-voltage cable line, modeling, short circuit, mutual induction, switching

Актуальність і постановка задачі

Аналізом електромагнітних та перехідних процесів у трифазних високовольтних кабельних лініях (КЛ) передачі електричної енергії необхідно вирішити завдання підвищення надійності та безпеки всієї системи електроживлення з урахуванням виникнення в них підвищення струмів та напруг. Високовольтні та надвисоковольтні КЛ України, країн СНГ, Європи, Америки та Азії орієнтовані на використання кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену, що дає змогу підвищувати пропускну здатність та екологічність ліній електропередачі [1–4].

Надійність КЛ визначається, з одного боку, високими технічними характеристиками кабелю, на основі якого виконано лінію, та умовами її експлуатації, що передбачають доцільне схемоконструктивне виконання лінії і засобів її захисту при виникненні аварійних перенапруг і струмів короткого замикання [5, 6].

Більшість підходів до вирішення проблеми моделювання у фазних координатах ґрунтуються на теорії багатополосників [7–9] або на спрощеному поданні трифазних кабельних ліній у вигляді груп однофазних кабелів. Основна складність моделювання полягає у розв’язанні магнітозв’язаних ланцюгів, і при використанні синтезу схем заміщення однофазних кабелів можна отримати доволі гнучкий алгоритм формування моделей різних кабельних ліній електропередачі за допомогою повнозв’язаних схем заміщення, що містять RLC-елементи.

Кабельні лінії електропередачі являють собою статичні багатопровідні елементи, струмопровідні частини яких мають електромагнітні зв’язки. Якщо винести з’єднання цих струмопровідних частин за межі системи, то лінії відрізняються одна від однієї тільки характером

взаємоіндуктивних зв'язків. Крім цього, для кабельних ліній, треба враховувати ємнісний зв'язок між кабелями, що для більшості випадків можна зробити, врахувавши власні і взаємні ємності проводів у П-подібній схемі заміщення, що має взаємоіндуктивні зв'язки. Ці припущення призводять до того, що струм, який входить на початку кабеля, дорівнює струму, що виходить з його кінця.

Мета роботи

Основною метою даної роботи є розвиток методів розрахунку багатофазних ліній електропередавання з розподіленими параметрами типу кабельних ліній високої напруги для аналізу електромагнітних та перехідних процесів у трифазних кабельних лініях створенням нових і поліпшення існуючих математичних моделей і макромоделей їх елементів, придатних для виникаючих у них усталених і перехідних електромагнітних процесів.

Підходи до моделювання електромагнітних перехідних процесів

Існує два основні підходи до моделювання електромагнітних процесів у кабельних лініях, які використовують схеми заміщення ліній електричним колом із зосередженими параметрами і представленням лінії у вигляді кола з розподіленими параметрами.

Порівнюючи основні рівняння довгої лінії з рівняннями чотиріполюсника, можна зробити висновок, що довга лінія є симетричним чотиріполюсником, тому для розрахунку електромагнітних процесів у відносно довгій лінії використовуємо поділ лінії на короткі ділянки такої довжини, щоби можна було використовувати схему заміщення зі зосередженими параметрами [7].

Досліджують процеси у ланцюгах з розподіленими параметрами часто на моделях із зосередженими параметрами. Можливість переходу до такої моделі при фіксованих параметрах C , L , R , G і довжині l визначається тим, що рівняння зв'язку вхідних і вихідних струмів і напруги лінії є рівняннями симетричного чотиріполюсника, і тому при моделюванні процесів на вході і виході лінії ми можемо скористатися однією з його схем заміщення – Т-подібної або П-подібної, використовуючи співвідношення, що зв'язують параметри цих схем з параметрами пасивного чотиріполюсника.

Моделювання багатофазних ліній електропередавання

Під багатофазною лінією мають на увазі трифазну кабельну лінію електропередачі, яка складається з трьох однофазних кабелів. У випадку моделювання статичних багатофазних елементів виникають деякі ускладнення, а саме близькість кабелів один від одного і неможливість простого обчислення індуктивних і взаємоіндуктивних опорів і часткових ємностей. Разом з тим довідкові характеристики трифазних кабельних ліній містять опори прямої послідовності та значення часткових ємностей кабелю.

Для набору n одножильних екранованих кабелів необхідно врахувати взаємоіндуктивний вплив кабелів, а також ємності екранів окремих кабелів один відносно одного і землі (кабель у повітрі і кабель у землі при цьому будуть суттєво відрізнятися) і ємності жила-екран кожного кабелю (рис. 1).

Ємностями між жилами та екранами різних кабелів можна знехтувати через їхні малі значення. Різницю між індуктивністю 1 км довжини контуру жила – земля та взаємоіндуктивністю між жилою кабелю та його екраном можна визначити за довідковими даними. Обчислювати власні індуктивності екранів необхідно як для циліндричного пустотілого провідника, тобто з коригуванням його внутрішньої індуктивності. При близькому розташуванні кабелів один до одного, коли відстань між ними приблизно дорівнює їх діаметру, для визначення

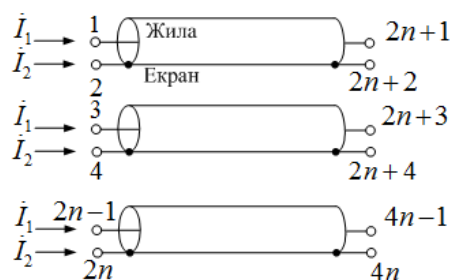


Рис.1. Модель багатофазної лінії електропередавання

взаємних індуктивностей між екранами краще скористатися опором прямої послідовності еквівалентної трифазної кабельної лінії. Нумерацію вузлів системи кабелів показано на рис. 1.

Рівняння для системи кабелів можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} U_1 - U_{2n+1} = I_1 Z_{1,1} L + \dots + I_{2n-1} Z_{1,2n-1} L + I_{2n} Z_{1,2n} L \\ U_2 - U_{2n+2} = I_1 Z_{2,1} L + \dots + I_{2n-1} Z_{2,2n-1} L + I_{2n} Z_{2,2n} L \\ U_3 - U_{2n+3} = I_1 Z_{3,1} L + \dots + I_{2n-1} Z_{3,2n-1} L + I_{2n} Z_{3,2n} L \\ U_4 - U_{2n+4} = I_1 Z_{4,1} L + \dots + I_{2n-1} Z_{4,2n-1} L + I_{2n} Z_{4,2n} L \\ \dots \\ U_{2n-1} - U_{4n-1} = I_1 Z_{2n-1,1} L + \dots + I_{2n-1} Z_{2n-1,2n-1} L + I_{2n} Z_{2n-1,2n} L \\ U_{2n} - U_{4n} = I_1 Z_{2n,1} L + \dots + I_{2n-1} Z_{2n,2n-1} L + I_{2n} Z_{2n,2n} L \end{cases}$$

де $Z_{i,j} = Z_{j,i}$ – взаємоіндуктивні опори на 1 км довжини між жилами кабелів i та j , між жилами та екранами, а також між екранами кабелів; $Z_{i,j} = R_i - j\omega L_i$ – повний опір 1 км контуру жила – земля при $i \leq n$ контуру екран – земля в іншому випадку; L – довжина кабелю. В системі рівнянь не враховано ємності, які вводяться окремо відповідно до П-подібної схеми заміщення багатofазної системи.

Така методика має дві особливості:

- обчислення власного опору $Z_{i,i}$ для екрана потребує використання виразів для опору полого провідного циліндра над поверхнею землі, які відрізняються від виразів для суцільного циліндричного провідника значеннями внутрішніх активного та індуктивного опорів;
- мала відстань між екранами сусідніх кабелів призводить до необхідності врахування ефекту близькості, і визначення взаємних опорів $Z_{i,j}$ для екранів кабелів стає непростим завданням.

Приклад розрахунку багатofазної кабельної лінії електропередавання

Розрахунок проведено для трифазної кабельної лінії 330 кВ однофазного виконання з жилою перетином 1000 мм². Екрани кабелів заземлено з обох кінців, і для обмеження напруги на екранах кабелів виконано транспозицію екранів кабелю [10]. Кабелі розташовано за схемою трикутник з відстанню між центрами жил, що дорівнює зовнішньому діаметру кабелю.

На рис. 2 показано схему з'єднання кабелів, яка моделюється, хрестиками позначено місця транспозиції екранів

Застосуємо метод фазних координат для моделювання кабельних ліній електропередачі, яка є природним представленням трифазної системи. Складнощі використання цього методу пов'язані з наявністю взаємоіндуктивних впливів між струмопровідними частинами різних фаз кабелів.

У роботі використано метод розподілення лінії на короткі ділянки такої довжини, яка дасть нам змогу використати схему заміщення зі зосередженими параметрами, а вся кабельна лінія буде заміщена ланцюговою схемою [10–12].

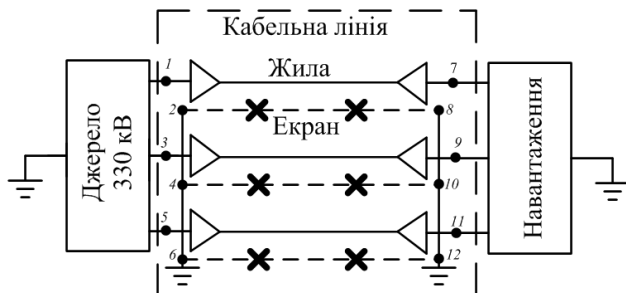


Рис. 2. Розрахункова модель багатofазної КЛ електропередавання

Для кабельних ліній електропередачі використовують П-подібну схему заміщення окремих фаз. Цю схему заміщення подамо у вигляді еквівалентного дванадцятиполюсника рис. 3

Розрахункову схему, яка розглядається як одноланцюгова лінія реалізована за допомогою прикладного пакета SimPowerSystem система Matlab, показано на рис. 4.

Модель, яку показано на рис. 4, містить такі основні елементи:

- джерело трифазної напруги з лінійною напругою 330 кВ;
- модель кабельної лінії завдовжки 1 км, яка складається з трьох блоків, з'єднаних по схемі транспозиція екранів, який своєю чергою моделюється у вигляді 12-полосника (три жили та три екрани);
- на виході розташований блок моделювання одно-, трифазних замикань на землю, а також блок трифазного навантаження.

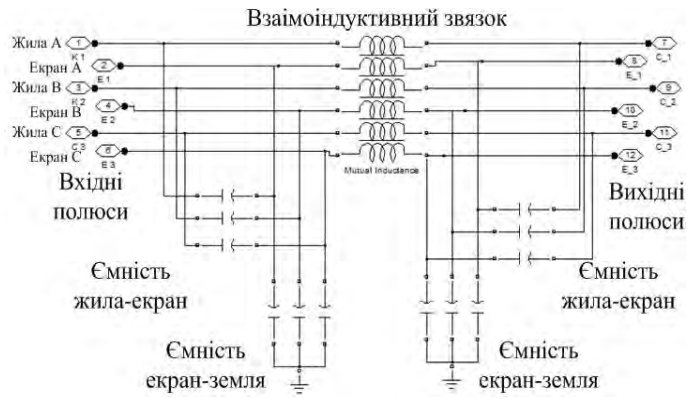


Рис.3. Схема заміщення КЛ у вигляді дванадцятиполосника

Для розрахунку електромагнітних параметрів кабелів у кабельній лінії електропередачі використовували результати роботи [11,13].

Комп'ютерні осцилограми напруги та струму на вході лінії в режимі неробочого ходу показано на рис. 5. Як видно із цих осцилограм, за декілька періодів відбувається перехідний процес, за час якого заряджаються всі ємнісні та індуктивні елементи. Як видно із осцилограми струму на вході, велика величина струму на початку перехідного процесу являє собою ємнісний струм, який тече по жилі кожного кабелю, потім по його екрану та замикається на землю.

Комп'ютерні осцилограми на виході лінії під час холостого ходу показано на рис. 6. Видно, що напруга на вході приблизно дорівнює напрузі на виході. Величина струму на виході лінії близька до нуля, що підтверджує той факт, що весь струм, який надійшов на вхід лінії, замикається на землю за ємнісними колами лінії.

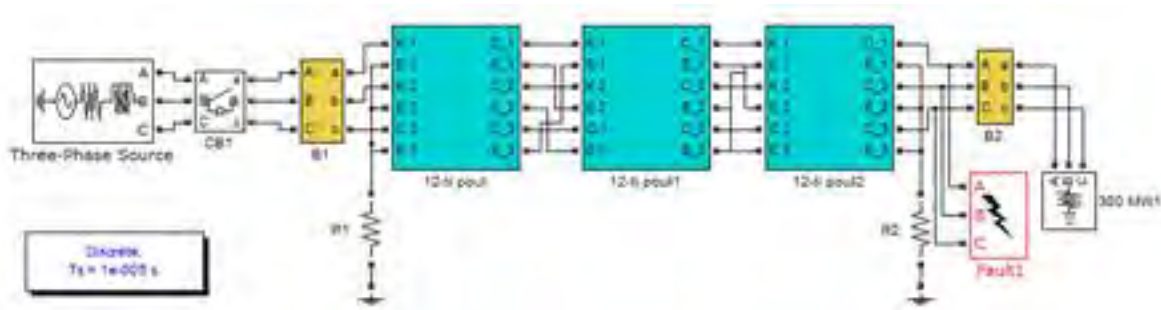


Рис.4. Розрахункова модель, реалізована за допомогою SimPowerSystem системи Matlab

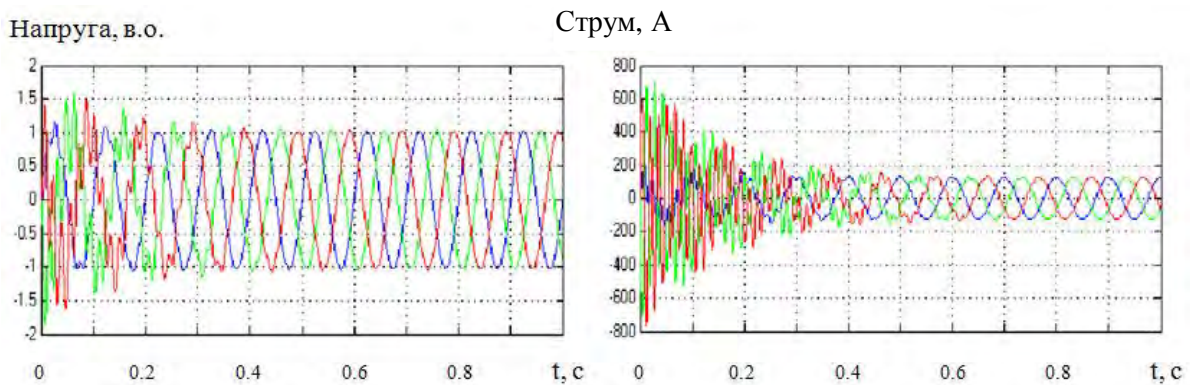


Рис.5. Комп'ютерні осцилограми напруги та струму на вході лінії в режимі неробочого ходу

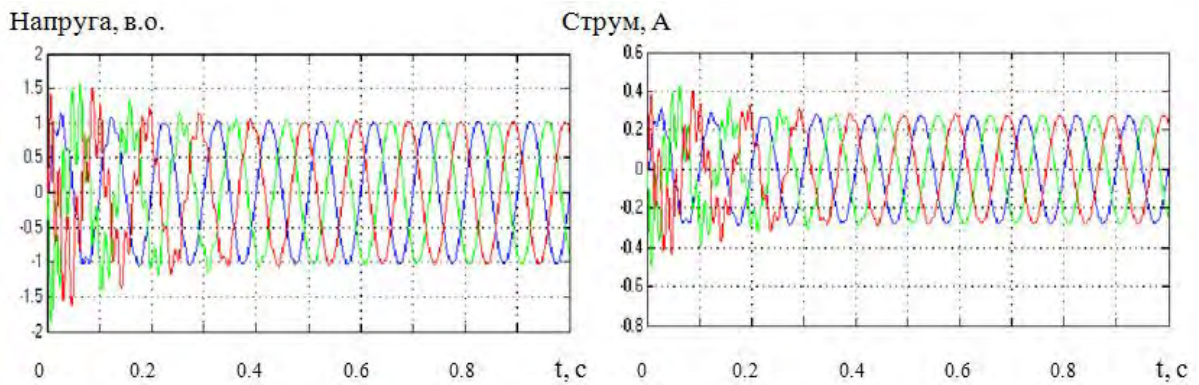


Рис.6. Комп'ютерні осцилограми напруги та струму на виході лінії при холостому ході

При моделюванні кабельної лінії в режимі однофазного короткого замикання (рис. 7), значення струму фази А у 4 рази перевищує номінальний струм, а в початковий момент часу – в 5 разів. Напруга у пошкодженій фазі зменшується на 50–70 % від номінальної.

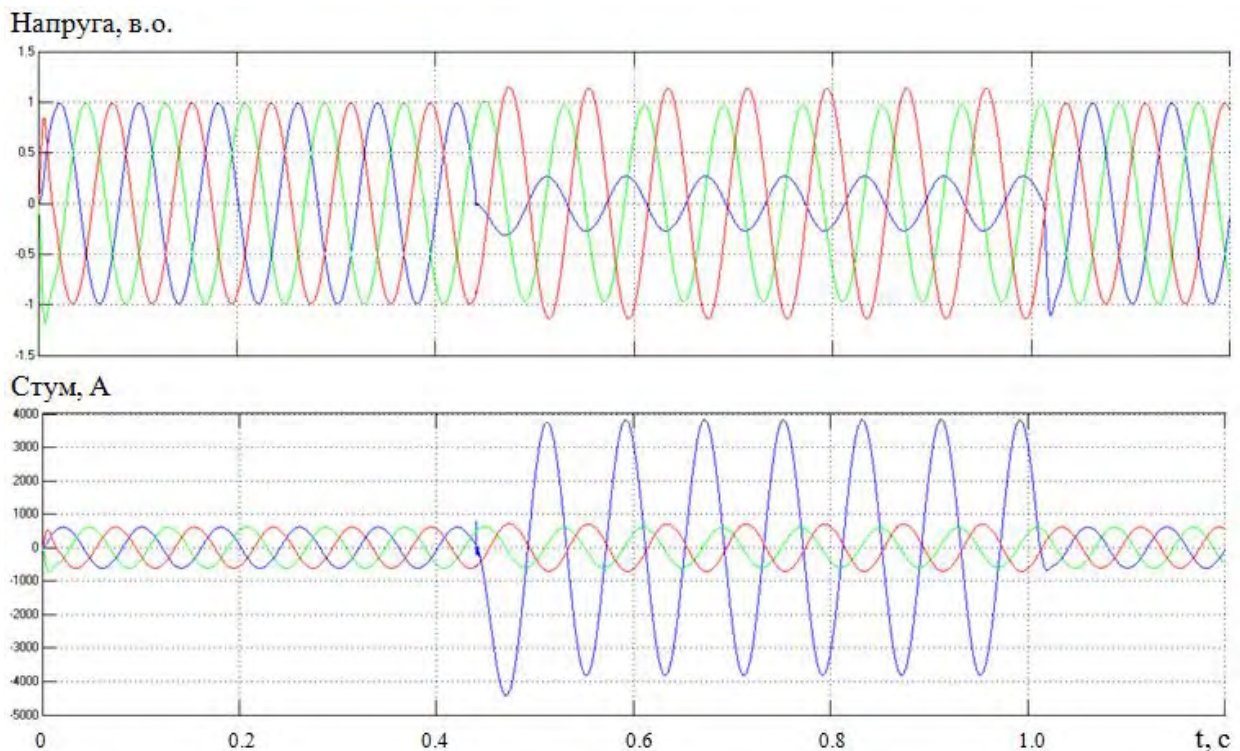


Рис.7. Комп'ютерні осцилограми напруги та струму в режимі однофазного короткого замикання

Під час моделювання кабельної лінії в режимі однофазного короткого замикання (рис. 7) значення струму фази А у 4 рази перевищує номінальний струм, а в початковий момент часу в 5 разів. Напруга у пошкодженій фазі зменшується на 50–70 % порівняно з номінальною.

Режим трифазного короткого замикання (рис. 8) характеризується вищими значеннями струмів у жилах кабелю, ніж при однофазному КЗ, які в 4,5 рази перевищують номінальний струм, а перший проміжок часу, під час стрибка струму – у 6 разів. Величина напруги в лінії в момент КЗ має значну високочастотну складову, та за незначний проміжок часу напруга знижується майже до нуля. Виникнення такої високочастотної напруги призводить до прискореного руйнування ізоляції, а також можливого пошкодження обладнання, яке знаходиться на вході кабельної лінії.

Напряга, в.о.

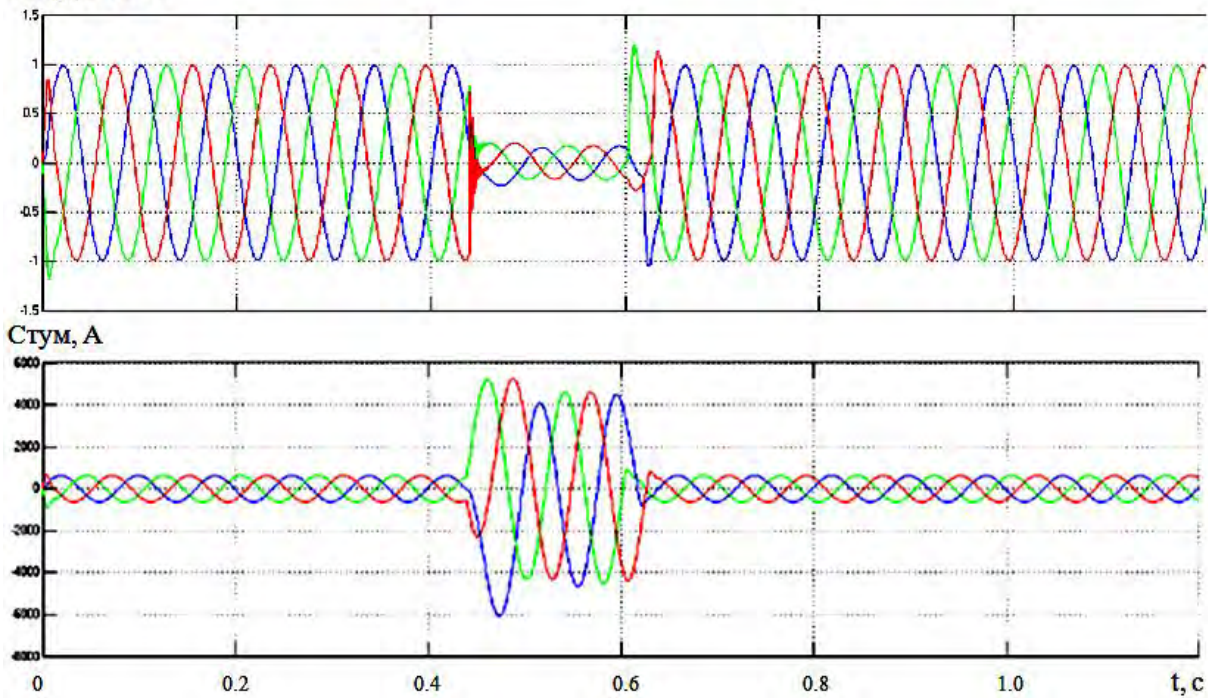


Рис.8. Комп'ютерні осцилограми напруги та струму в режимі трифазного короткого замикання

Висновок

За рівняннями зв'язку падінь напруг зі струмами розроблено єдиний методологічний підхід до побудови моделей статичних багатофазних елементів для розрахунків різних режимів, реалізованих набором RLC-елементів. Багатофазну систему з n проводів, кожен з яких має взаємні індуктивні зв'язки з іншими, можна замінити схемою, складеною з RLC-гілок; кількість яких дорівнює $2n(2n-1)/2$, а їхні провідності визначають за матрицею провідностей багатофазної системи.

За єдиним методологічним підходом отримано модель трифазної кабельної лінії і систем одножильних екранованих кабелів, розташовуваних у землі і на надземних конструкціях систем у фазних координатах.

За отриманими моделями ефективно вирішують завдання моделювання будь-яких практично здійснених режимів у високовольтних кабельних лініях для аналізу методів розрахунку електромагнітних перехідних процесів багатофазних ліній електропередавання з розподіленими параметрами типу кабельних ліній високої напруги.

1. Мещанов Г. И. Перспективы и направления развития производства кабелей и проводов энергетического назначения // Кабели и провода. – 2007. – № 3 (304). – С. 22–35. 2. Лях В. В., Молчанов В. М., Судакова И. В., Павличенко И. В. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины // Электрические сети и системы. – 2009. – № 3. – С. 16–21. 3. Щерба А. А., Перетятко Ю. В., Золотарев В. В. Самонесущие изолированные и высоковольтные защищенные провода. – Киев: Сучасність, 2008. – 292 с. 4. Золотарев М. В., Обозный А. Л. Новые отечественные разработки в области силовых кабелей // Вісник НТУ ХПІ. – 2006. – Вип. 34. – С. 129–132. 5. Шидловский А. К., Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н., Золотарев В. М. Анализ электромагнитных процессов и эквивалентных параметров сегментированных токопроводящих жил силовых кабелей на напряжение 330 кВ // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 7–13. 6. Золотарев В.В., Карпушенко В. П., Науменко А. А., Бузько С. В. Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей //

Физические и компьютерные технологии: Труды 12 МНТК. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2006. – С. 239–240.

7. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.*

8. Абраменкова Н. А., Воронай Н. И., Заславская Т. В. *Структурный анализ электроэнергетических систем в задачах моделирования и синтеза. – Новосибирск: Наука, 1990. – 125 с.*

9. Берман А. П. *Расчет несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат // Электричество. – 1985. – № 12. – С. 6–12.*

10. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. *Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 9–15.*

11. Tleis N. *Power systems modelling and fault analysis. – Elsevier, 2008. – 367 p.*

12. Wedepohl L. M. Wilcox D. J. *Transient analysis of underground power-transmission system – system model and wave propagation characteristics // Proceedings of IEE. – 1973. – Vol. 120. – No. 2. – P. 253–260.*

13. Щерба А.А, Лободзинский В.Ю. *Математическое моделирование электромагнитных процессов в трехфазной кабельной линии электропередачи при разных транспозициях экранов однофазных кабелей // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2011. – Ч. 2. – С. 271–276.*