

УДК 631.371:621.311/.318.3:519.87

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ  
ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ  
В ЕЛЕМЕНТАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

*В. Левонюк, магістр*

*Львівський національний аграрний університет*

**Постановка проблеми.** Основним призначенням елементів енергосистем є передавання та розподіл електроенергії для забезпечення ведення національного господарства з мінімальними витратами та високим рівнем надійності. Рівню і темпу прогресу техніки повинні відповідати методи й засоби керування режимами роботи та розвиток сучасних і перспективних енергосистем. Досягти згаданої відповідності можна лише в разі використання різноманітних досліджень енергосистем за різних режимів роботи.

Математичне моделювання електротехнічних пристроїв та систем є невід'ємною частиною сучасних технологічних комплексів. Використання математичного моделювання дає змогу дослідникам аналізувати процеси, які відбуваються в електротехнічних пристроях складних конструкцій, не проводячи при цьому дорогих натурних експериментів. Тому математичне моделювання перехідних електромагнітних процесів в елементах електроенергетичних систем є актуальною тематикою для дослідження згаданих процесів з метою подальшого встановлення закономірності їх перебігу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемі дослідження електромагнітних хвильових процесів в елементах електроенергетичних систем присвячено велику кількість публікацій як вітчизняних так і закордонних наукових шкіл. Наведемо короткий опис декількох наукових праць.

У роботі [1] розроблено математичну модель електроенергетичної системи для розв'язання задачі несиметричних режимів. Розробляючи математичну модель, автори прагнули до адекватного, з позиції поставленої задачі, опису елементів енергосистеми. Як основний елемент уніфікації схем заміщення використано багатополосник, вузлові провідності якого враховують групи з'єднання фазних обмоток і особливості схем регулювання напруги трансформаторів.

Запропоновано метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у довільній одно- або багатофазній мережі за допомогою

вузлових матриць провідностей [2]. Математичний апарат заснований на методі характеристик для розподілених параметрів і трапецій інтеграції для зосереджених параметрів. Представлено результати розрахунків у вигляді графічних залежностей.

**Постановка завдання.** Головним лейтмотивом нинішньої праці є аналіз доступних евентуальному користувачеві математичних моделей для дослідження електромагнітних перехідних процесів в елементах електроенергетичних систем для їх сумісного порівняння.

**Виклад основного матеріалу.** Для порівняльного аналізу ми не будемо описувати всі доступні математичні моделі, а опишемо тільки ті, які найбільш близькі до тематики наших досліджень.

У роботі [3] запропоновано новий метод розрахунку перехідних електромагнітних процесів у системі випрямлення змінного трифазного струму, яка працює на лінію електропередач постійного струму з навантаженням з урахуванням зовнішніх завод. Представлено розрахунок перехідного процесу напруги та струму у вигляді рисунків у всіх елементах досліджуваної системи.

Обговорюються проблеми розробки математичних моделей і макромодель ліній електропередач у статті [4]. Також розроблено дискретну макромодель лінії електропередач в однофазному вигляді з використанням «чорного ящика». Представлено опис моделі, порядок її створення та отримані результати досліджень.

У [5] розглядається побудова математичної моделі лінії електропередач, що дозволяє отримати розподіл струмів і напруг у лінії в усталеному і перехідному режимах. При цьому особливу увагу приділяємо обчисленню взаємних ємностей проводів, що визначають витік енергії між провідниками і землею. Також наводиться модель, яка дає змогу обчислити напруженість і потенціал електростатичного та магнітного полів, що генеруються протіканням струмів.

У роботі [6] представлено результати досліджень електромагнітних перехідних процесів та ефективності застосовуваних засобів обмеження ємнісних струмів і перенапруг при однофазних замиканнях на землю в електричних мережах 6-10 кВ з різними режимами нейтралі.

У [7] у середовищі MATLAB/SIMULINK репрезентована повна модель міжсистемної компенсованої ЛЕП постійного струму з дванадцятифазними випрямлячами та інвертором, який працює в режимі з одноступеневою штучною комутацією тиристорів. Показана можливість роботи випрямляючої та інверторної підстанції як у зоні споживання, так і в зоні генерування реактивної потужності, наведені

спектральні характеристики струмів і напруг, описаний аварійний режим при перекиданні інвертора на інверторній підстанції.

Розвинута й реалізована методика розрахунку перехідних процесів в електричних мережах через синтетичні схеми (алгоритм Г. Доммеля) у [8]. У разі застосування цієї методики розрахунок проводять для миттєвих значень параметрів, тому вона застосована до усталених і перехідних процесів. Реалізовані моделі елементів, необхідних для моделювання вузлів комплексного навантаження, такі як: лінії електропередач, трансформатори, статичне навантаження, а також напівпровідникові комплекси. Усі моделі елементів реалізовані в базисі фазних координат і дозволяють моделювати електричні мережі з урахуванням режимів заземлення нейтралі.

У праці [9] запропоновано метод математичного моделювання систем електропостачання в перехідних режимах, який забезпечує можливість подання електричної мережі довільної конфігурації. Представлена модель розроблена на основі рівнянь у фазних координатах і дає змогу відтворювати як електромагнітні, так і електромеханічні складові перехідних процесів.

Розроблена математична модель дво- та трипровідної лінії електропередач змінного струму для дослідження перехідних процесів та явищ перенапруг у лінії 500 кВ у роботі [10]. На основі програмного комплексу АТР-ЕМТР були розраховані перехідні процеси та досліджені явища перенапруг під час аварійного стану лінії.

Практичний підхід у дослідженні перехідних електромагнітних процесів репрезентовано в роботі [11]. Після опису багатьох випадків моделювання висвітлені вимоги для моделювання вибраних елементів енергосистеми. Також зроблено порівняльний аналіз досліджень перехідних електромагнітних процесів на коректних і неправильних моделях енергосистеми.

У роботі [12] розглянуто проблему дослідження електромагнітних перехідних процесів блока електропередачі “джерело живлення – силовий трансформатор – лінія електропередачі – автотрансформатор – навантаження”. Математичну модель системи сформовано в координатному базисі струмів і напруг віток електричних кіл, потягокзчеплень і магнітних напруг віток магнітних кіл електромагнітних апаратів на підставі окремих моделей кожного елемента. Виконано комп’ютерне моделювання блока електропередачі у середовищі MATLAB/Simulink та наведено результати досліджень перехідних процесів.

На рисунку репрезентовано графічний розподіл кількості математичних моделей за такими категоріями: математичні моделі, розроблені на основі розподілених та зосереджених параметрів; розроблені на основі програмних комплексів та на основі алгоритмічного програмування. Проаналізувавши рисунок, можна сказати, що більшість науковців під час побудови математичних моделей перехідних процесів в елементах електроенергетичних систем користуються заступними схемами із скупченими параметрами. Стосовно програмного забезпечення зазначено, що використання готових програмних комплексів не отримало значної переваги над алгоритмічним програмуванням. Це пов'язано насамперед із тим, що розробники до кінця не розповідають про допущення, прийняті ними під час розроблення стимуляційних програм.

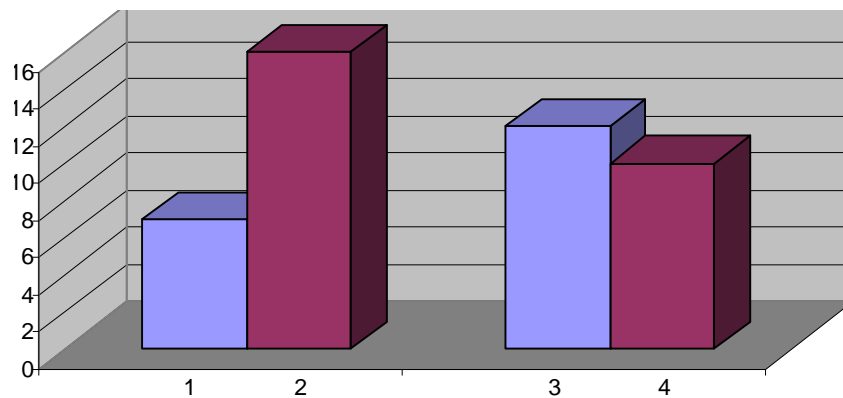


Рис. Діаграма розподілу математичних моделей за категоріями:  
 1 – розподілені параметри; 2 – зосереджені параметри;  
 3 – з використанням програмних комплексів; 4 – на основі алгоритмічного програмування.

**Висновки.** У роботі проведено аналіз існуючих математичних моделей перехідних електромагнітних процесів в елементах електроенергетичних систем. Аналіз показав, що існує велика кількість таких моделей і під час їх створення дослідники використовують схеми заміщення із зосередженими або розподіленими параметрами, готові програмні комплекси симуляції та проводять симуляції на основі програм, написаних на алгоритмічних мовах програмування. Використання заступних схем із розподіленими параметрами дає змогу врахувати вплив хвильових електромагнітних процесів у лініях електропередач на інші елементи енергосистеми, хоча з рисунка можна побачити, що дослідники надають перевагу заступним схемам із

зосередженими параметрами. Це пов'язано з тим, що заступні схеми із зосередженими параметрами дають можливість значно зменшити та спростити розрахунки. Щодо використання готових програмних комплексів симуляції, то тут можна сказати, що в разі моделювання локальних енергетичних систем, коли використовують електромагнітні моделі елементів цих систем ( $\Psi$ -типу та  $A$ -типу), виникають труднощі з використанням відомого методу вузлових напруг, що унеможлиблює знаходження напруги на початку та вкінці лінії, а відтак не дає змоги коректно розв'язати саме рівняння. Усе це ставить під сумнів ступінь адекватності евентуальних результатів, які одержані за допомогою відомих інженерних програм Mathematica, MatLab та ін., а особливо використання цих програм стає неможливим, коли розглядають колопольові моделі елементів. У такому разі до кожної конкретної задачі потрібно використовувати відповідний апарат математичного моделювання.

#### **Бібліографічний список**

1. Моделирование электроэнергетических систем при решении задач несимметричных режимов / А. А. Рагозин, М. Ш. Мисриханов, В. А. Попов [и др.] // Повышение эффективности работы энергосистем. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – С. 51.
2. Hermann W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks / W. Hermann // IEEE Transactions on power apparatus and systems. – 1969. – No 4. – P. 388–399.
3. Huo X. -Y. A new method for calculating transient electromagnetic responses of AC/DC power system with external electromagnetic pulse interference / X. -Y. Huo, Y. -Z. Lei // Progress In Electromagnetics Research M. – 2010. – P. 245-260.
4. Stakhiv P. Discrete mathematical macromodel of electric transmission line / Petro Stakhiv, Yuriy Kozak, Oksana Hoholyuk // Przegląd elektrotechniczny. – 2013. – Nr 4. – P. 272-274.
5. Нестеров Р. Е. Математическое моделирование линий электропередач и систем заземления / Р. Е. Нестеров, Ф. Ю. Канев, Н. А. Макенова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1.1. – С. 15-21.
6. Веприк Ю. Н. Математическое моделирование режимов работы электросетей с ОПН / Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебедка // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 8. – С. 25-29.
7. Хохлов Ю. И. Моделирование электромагнитных процессов в межсистемной компенсированной ЛЭП постоянного тока с

примыкающими энергосистемами разных частот // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2005. – № 6. – С. 4-10.

8. Славутский А. Л. Моделирование переходных процессов в узлах комплексной загрузки с нелинейными элементами методом синтетических схем : дис... канд. техн. наук : 05.09.03 / Славутский Александр Леонидович. – Чебоксары, 2016. – 159 с.

9. Веприк Ю. Н. Моделирование систем электроснабжения с двигательной нагрузкой в переходных режимах / Ю. Н. Веприк, О. А. Небера // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 6/1. – С. 55-59.

10. Nayir A. Simulation of transient processes on overvoltage in electric transmission lines using ATP-EMTP / A. Nayir // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. – 2013. – № 5. – P. 1553-1556.

11. Sowa P. Modeling of Power System Components During Electromagnetic Transients / Sowa Paweł, Kumala Rafał, Katarzyna Łuszcz // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2014. – Vol. 1. – P. 716-719.

12. Гоголюк О. П. Дослідження електропередачі в сучасних комп'ютерних середовищах / О. П. Гоголюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2010. – № 671. – С. 24-31.

#### **Левонюк В. Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних електромагнітних процесів в елементах електроенергетичних систем**

Виконано аналіз доступних евентуальному користувачеві математичних моделей для дослідження електромагнітних перехідних процесів в елементах електроенергетичних систем. Наведено та обґрунтовано результати аналізу математичних моделей для дослідження електромагнітних процесів в елементах електроенергетичних систем.

**Ключові слова:** математична модель, перехідні процеси, електроенергетична система.

#### **Levoniuk V. Comparative analysis of mathematical models of electromagnetic transient processes in elements of power systems**

The analysis of available eventual user of mathematical models for the study of electromagnetic transients in power systems elements. Shows and reasonable analysis of mathematical models for the study of electromagnetic processes in elements of power systems.

**Key words:** mathematical model, transient processes, power system.

**Левонюк В. Сравнительный анализ математических моделей переходных электромагнитных процессов в элементах электроэнергетических систем**

Проведен анализ доступных эвентуальному пользователю математических моделей для исследования электромагнитных переходных процессов в элементах электроэнергетических систем. Приведены и обоснованы результаты анализа математических моделей для исследования электромагнитных процессов в элементах электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** математическая модель, переходные процессы, электроэнергетическая система.