

**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



ВЕПРІК ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.311.014

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ
РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З НЕСИМЕТРІЄЮ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Донецьк – 2010

Дисертацією є рукопис.
Роботу виконано у Національному технічному університеті “Харківський

політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Сивокобиленко Віталій Федорович,
ДВНЗ “Донецький національний технічний
університет”, завідувач кафедри “Електричні станції”,
м. Донецьк;

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Авраменко Володимир Миколайович,
Інститут електродинаміки НАН України,
провідний науковий співробітник, м. Київ;

доктор технічних наук, професор
Заболотний Іван Петрович,
ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”,
завідувач кафедри “Електричні системи”, м. Донецьк;

доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем’янович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри “Електричні станції і системи”,
м. Вінниця.

Захист дисертації відбудеться « 16 » грудня 2010 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.02 при ДВНЗ “Донецький національний технічний університет” за адресою: Україна, 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 8-й навчальний корпус, ауд. 8.514.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ДВНЗ “Донецький національний технічний університет” за адресою: Україна, 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 2-й навчальний корпус.

Автореферат розіслано « 9 » листопада 2010 р

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



А. М. Ларін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Режимми роботи електричної системи (ЕС) як великої системи характеризуються наявністю великої кількості постійно діючих впливів: з боку зовнішнього середовища, з боку засобів керування й захисту. Результатом цих впливів, поряд зі зміною параметрів режиму, складу обладнання, схем з'єднання і параметрів елементів, є порушення симетрії. Причому з розвитком систем, зростанням кількості одночасно працюючого обладнання виникнення несиметрії й існування як короткочасних, так і тривалих несиметричних режимів з одним або кількома джерелами несиметрії в ЕС не є винятковою, малоймовірною подією.

Фактором, що ускладнює ситуацію, є і те, що значна частина обладнання відпрацювала свій розрахунковий ресурс, темпи його старіння вище темпів оновлення, тому несиметрію режимів усе з більшою підставою доводиться вважати однією з характерних властивостей ЕС.

Для розв'язання задач керування режимами роботи системи за наявності несиметрії необхідні дослідження стаціонарних і перехідних, аварійних і експлуатаційних, з простою і складною несиметрією режимів електричних мереж та відповідні засоби моделювання.

Розв'язання таких задач принципово можливо на основі переходу до математичних моделей, що використовують рівняння у фазних координатах. Перейти до більш повних і точних моделей на основі рівнянь у фазних координатах, що враховують електромагнітний і електростатичний вплив фаз, нелінійні ефекти, змінні коефіцієнти, зміни частоти, та інші фактори, дозволяють і можливості сучасних ЕОМ. Однак наявні публікації свідчать про те, що можливості переходу на більш повні моделі повністю ще не реалізовані. Моделі, які розроблені, в тому числі і на основі рівнянь у фазних координатах, орієнтовані на розв'язання окремих завдань, загальний підхід відсутній, цілий ряд проблем на цьому шляху ще чекають свого рішення, чим і обумовлена актуальність виконуваної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Національному технічному університеті "ХПІ". Основний зміст роботи становлять результати досліджень, виконаних під керівництвом автора у рамках держбюджетних і госпдоговірних НДР, договорів про науково-технічне співробітництво:

- держбюджетної НДР № М3712 "Розробка режимних принципів забезпечення неповнореакторних режимів електропередач 750 кВ ОЕС України", № ДР 0106U001489 (2005–2007 рр.);

- госпдоговірної НДР "Дослідження електромагнітних перехідних процесів і оцінка можливості зниження перенапруг при однофазних замиканнях на землю в мережах 6 кВ м. Суми", № ДР 0104U004175, Інв № 0205U002345 (2004 р.);

- госпдоговірної НДР "Дослідження тривалих електромеханічних і електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах 10 кВ з вузлами статичного й двигунного навантаження", № ДР 0106U012545, Інв № 0206U009339 (2006–2007 рр.);

- договору про науково-технічне співробітництво з Державним проектним і науково-дослідницьким інститутом (ДПІНДІ) Укренергомережпроект "Дослідження неповнореакторних режимів електричних мереж 750 кВ ОЕС України" (2004 р.).

Матеріали роботи використані в спільних роботах, виконаних кафедрою Передача електричної енергії із ДПІНДІ Укренергомережпроект.

Мета роботи й завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є:

- розвиток теорії і методів математичного моделювання електричних систем з простою та складною несиметрією в стаціонарних і перехідних режимах на основі розробки базових багатofункціональних математичних моделей, що забезпечують розв'язання ак-

туальних на сучасному етапі розвитку електроенергетики України завдань керування режимами роботи електричних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- визначити методологічні основи, загальні принципи моделювання ЕС при їхній декомпозиції до рівня трифазних багатополісників (макромоделювання) і побудови на цій основі системи багатofункціональних базових моделей електричних систем з несиметрією в стаціонарних і перехідних режимах;

- розробити математичні моделі елементів ЕС з урахуванням усіх основних факторів, що впливають на параметри режиму, в алгебраїчній, диференціальній, дискретній формах, які забезпечують можливість їхнього включення в модель системи в завданнях макромоделювання стаціонарних і перехідних режимів у фазних координатах;

- розробити формалізовані методи формування систем рівнянь стаціонарних і перехідних режимів в ЕС з несиметричними елементами й комутаціями, які за наявності багатополісників з електромагнітними й електростатичними зв'язками є інтегро-диференціальними, а за наявності обертових електричних машин – містять параметри, що періодично змінюються;

- розробити методи розв'язання систем алгебраїчних та інтегро-диференціальних рівнянь, що мають при прийнятому рівні декомпозиції матриці параметрів з явно вираженою блоковою структурою, слабким заповнюванням і більш високими порядками порівняно з моделями для однофазних еквівалентів;

- реалізувати розроблені базові моделі й методи у вигляді програмних засобів, що забезпечують ефективне рішення завдань дослідження стаціонарних режимів і перехідних процесів з урахуванням як відзначених вище їх особливостей, так і того, що з урахуванням електромагнітної й електромеханічної складових перехідного процесу розв'язання має великий розкид сталих часу;

- реалізувати в розроблених програмних засобах методики й алгоритми визначення параметрів елементів у фазних координатах, оскільки їхня відсутність створює складнощі на шляху реалізації математичних моделей у фазних координатах і стримує їхні розробки й застосування;

- підтвердити ефективність і працездатність розроблених методів і моделей.

Об'єкт дослідження – стаціонарні режими і перехідні процеси в електричних системах з несиметрією.

Предмет дослідження – математичне моделювання стаціонарних режимів і перехідних процесів електричних систем з несиметрією.

Методи дослідження. В основу дослідження як засоби розв'язання поставлених задач покладені методи системного аналізу й математичного моделювання. Під час виконання дисертаційної роботи використані положення теорії електричних кіл, графів, діактики, а також методи розв'язання систем лінійних і нелінійних алгебраїчних рівнянь, числові методи інтегрування диференціальних і інтегро-диференціальних рівнянь. Вірогідність і ефективність отриманих результатів забезпечена коректним використанням методів дослідження, підтверджена результатами тестування розроблених засобів, порівнянням результатів моделювання з експериментальними даними.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що уперше запропоновано і реалізовано комплексний підхід до задач моделювання стаціонарних режимів і перехідних процесів електричних систем з несиметрією на основі розробки системи узагальнених базових моделей, що забезпечують розширення можливостей моделювання до рівня, який потрібен для рішення актуальних задач з необхідною точністю.

Новизну роботи становлять наступні конкретні положення:

- Уперше запропоновано й реалізовано підхід до моделювання електричних систем на основі системи базових трифазних моделей, який забезпечує розв'язання широкого класу актуальних задач дослідження стаціонарних режимів і перехідних процесів з обмеженою кількістю припущень, замість застосування великої кількості спеціалізованих моделей на основі однофазних еквівалентів, які ці завдання не вирішують або вирішують лише приблизно.

- Уперше розроблено комплекс узагальнених базових моделей електричних систем у стаціонарних і перехідних режимах на єдиній алгоритмічній і інформаційній основі при поданні елементів не однофазними еквівалентами, а трифазними багатополюсниками (на макрорівні) й рівняннями у фазних координатах, який може служити як засобом розв'язання широкого класу задач дослідження стаціонарних і перехідних режимів електричних систем, так і основою для розробки нових моделей.

- Набули розвитку методи й засоби аналізу стаціонарних режимів роботи електричних систем зі складною несиметрією. Моделювання реальних параметрів режиму (а не їх складових) у складних несиметричних режимах дозволяє зняти припущення про лінійність та симетричність елементів, що забезпечує адекватне відображення режимів роботи і умов експлуатації обладнання за наявності несиметрії та дає можливість визначити шляхи зниження негативних наслідків таких режимів.

- Уперше в рамках моделювання складної несиметрії розглянуто завдання вибору й настроювання симетрувальних пристроїв для неповнофазних електропередач, запропоновано алгоритм вибору параметрів несиметрично ввімкнутих реакторів на основі використання базової математичної моделі і мінімізації режимних параметрів несиметрії.

- Одержали розвиток методи числового інтегрування стосовно до завдань математичного моделювання електромагнітних перехідних процесів у трифазних системах з різними режимами роботи нейтралі. Дослідження електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю з урахуванням реальних параметрів, конфігурації й структури мереж, з їхнім застосуванням, дозволяють виявляти фактори, що знижують ефективність застосування засобів компенсації ємнісних струмів у точці ОЗЗ і визначати шляхи їхнього вдосконалювання.

- Уперше визначені й обґрунтовані основні принципи формування математичних моделей електромагнітних і хвильових перехідних процесів у трифазних електричних системах з несиметрією у фазних координатах на основі макромоделювання, які дозволяють аналізувати перехідні процеси з урахуванням усіх основних впливових факторів, застосування яких дозволяє адекватно відтворювати комутаційні перенапруги й уточнювати розрахункові умови вибору засобів для їхнього обмеження в мережах з різними режимами нейтралі.

- Отримали подальший розвиток і модифіковані стосовно до систем з трифазними багатополюсними елементами методи формування і розв'язання алгебраїчних та диференціальних рівнянь, відомі у теорії однофазних електричних схем. Це дає можливість побудови узагальнених моделей з застосуванням обмеженої кількості базових обчислювальних уніфікованих процедур, які забезпечують формалізацію та автоматизацію усіх основних етапів моделювання систем з трифазними багатополюсними елементами будь якої структури.

- Запропоновано модель перехідних процесів в електричних системах з обертовими електричними машинами в рамках прийнятого підходу, що містить у своєму складі підсистеми моделювання електромагнітних, електромеханічних складових перехідних процесів і засобів регулювання, а це дозволяє в рамках однієї моделі одержувати всі потрібні кількісні характеристики й вирішувати завдання протиаварійного керування на якісно новому рівні.

- Удосконалені і подані в уніфікованій формі на рівні трифазних багатополюсників математичні моделі елементів – силових трансформаторів і автотрансформаторів з урахуванням їх схем і режиму нейтралі, синхронних і асинхронних машин з обчисленням змінних елементів матриць індуктивностей в аналітичній формі.

Практичне значення одержаних результатів визначається їх спрямованістю на розширення можливостей та збільшення точності методів і засобів математичного моделювання, підвищення ефективності процесів моделювання й розробки моделей електричних систем з несиметрією. Розроблено базові математичні моделі, що дозволяють досліджувати стаціонарні режими (базова модель № 1), електромагнітні (базова модель № 2) та електромеханічні (базова модель № 3) перехідні процеси електричних систем довільного складу й структури з несиметрією будь-якого виду з урахуванням усіх основних факторів, що впливають, – електромагнітного й електростатичного впливу фаз, схем з'єднання й режиму нейтралі силових трансформаторів і автотрансформаторів, змінних параметрів обертових електричних машин, реальних схем електричних мереж.

Базова модель електричних систем з несиметрією (№ 1) дозволяє відтворювати стаціонарні режими систем з елементами поздовжньої й поперечної несиметрії в будь-якій кількості й будь-яких сполученнях і може служити засобом дослідження як короткочасних аварійних, так і тривалих експлуатаційних режимів зі складною несиметрією з точністю, достатньою для перевірки режимів на відповідність вимогам норм щодо якості електроенергії. Модель має модульну структуру і може бути розвинена для розв'язання завдань симетрування, наведених напруг, електромагнітної сумісності.

Базова модель електромагнітних перехідних процесів (№ 2) забезпечує можливість моделювання електромагнітних перехідних процесів в електричних системах з несиметричними елементами при симетричних і несиметричних комутаціях. Засоби розробленої моделі дозволяють виконувати дослідження перехідних процесів у мережах з заземленою, ізолюваною, резонансно- і резистивнозаземленими нейтраліями.

Базова модель № 3 містить у своєму складі повні моделі статичних елементів електричної мережі й обертових (синхронних, асинхронних) електричних машин у фазних координатах, що дозволяє відтворювати в обчислювальних експериментах як електромеханічні, так і електромагнітні складові перехідних процесів в їхній взаємодії й взаємовпливі. Це дозволяє вирішувати широке коло задач електромеханічних перехідних процесів і стійкості електричних систем і вузлів двигунного навантаження з несиметрією, включаючи й задачі, не розв'язні відомими моделями.

Усі базові моделі допускають подальший розвиток і можуть бути використані як підґрунтя, основа для розробки моделей для розв'язання цілого ряду завдань, які моделями на основі однофазних еквівалентів не вирішуються або вирішуються наближено (неодночасність комутації фаз вимикачів, напруги, що відновлюється, перехідні процеси зі змінною частоти тощо).

Подані в дисертації результати є складовою частиною робіт, які виконані й продовжують виконуватися під керівництвом автора в Національному технічному університеті “ХПІ”. Виконані роботи впроваджені в навчальний процес, використовуються в практиці проектування й експлуатації ЕС:

- при розробці інститутом Укренергомережпроект проектів спільної установки на підстанціях 750 кВ шунтувальних реакторів (ШР) виробництва Запорізького трансформаторного заводу і Московського електротехнічного заводу (МЕЗ) виконані дослідження несиметрії, обумовленої різними параметрами реакторів, і показана можливість роботи реакторних груп з ШР виробництва різних заводів на період заміни реакторів МЕЗ реакторами вітчизняного виробництва;

- при виконанні держбюджетної НДР “Розробка режимних принципів забезпечення неповнореакторних режимів електропередач 750 кВ ОЕС України” у пріоритетному напрямку розвитку науки й техніки “Новітні технології й ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості й агропромисловому комплексі” досліджені складні несиметричні режими, обумовлені тим, що значна частина реакторних груп в електричних мережах 750 кВ через високу аварійність ШП працює неповним числом фаз, виявлені умови, за яких ступінь несиметрії перевищує припустимі значення, сформульовані рекомендації з забезпечення необхідних параметрів режиму за наявності неповнофазних груп реакторів;

- у Сумських електричних мережах на основі досліджень електромагнітних перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю в кабельних мережах 6 кВ, виконаних розробленими засобами математичного моделювання, виявлені кількісні характеристики перенапруг, що виникають, основні впливові фактори, визначені шляхи вдосконалення засобів компенсації ємнісних струмів і обмеження перенапруг;

- у Харківських електричних мережах виконаними дослідженнями перехідних процесів у вузлах з двигунним навантаженням показана можливість відтворення засобами розробленої моделі як електромагнітних, так і електромеханічних складових перехідних процесів, перенапруг на двигунах при комутаціях, знижень частоти в електричній мережі, що дозволяє на якісно новому рівні вирішувати задачі вибору засобів протиаварійного керування;

- у Північній енергосистемі в результаті дослідження комутаційних перенапруг в електропередачі 750 кВ за симетричних і несиметричних комутацій з урахуванням хвильового характеру перехідних процесів визначені умови виникнення найбільших кратностей перенапруг і показана необхідність заміни захисних апаратів у колах шунтувальних реакторів, вибраних за спрощеними методиками;

- основні положення й результати наукових досліджень дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі в Національному технічному університеті “ХПІ”.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, принципи, методи, моделі й результати досліджень, подані в дисертації, отримані здобувачем самостійно:

- запропоновано новий підхід до розробки математичних моделей електричних систем з несиметрією у фазних координатах на основі макромоделювання у фазних координатах, який забезпечує розширення складу задач, які вирішуються, і підвищення точності моделювання;

- розроблено систему базових математичних моделей електричних систем з несиметрією у стаціонарних і перехідних режимах на одній методичній, алгоритмічній, інформаційній базі, які охоплюють широке коло актуальних задач;

- методи формування і розв’язання систем алгебраїчних і диференціальних рівнянь, які відомі у теорії однофазних електричних схем, розвинуті на трифазні електричні системи з несиметрією, які мають у своєму складі як статичні елементи, так і електричні машини, що обертаються;

- виконана розробка і уніфікація обчислювальних процедур, які виконують основні етапи моделювання стаціонарних і перехідних режимів при поданні елементів електричних систем трифазними багатополюсниками та забезпечують програмну реалізацію запропонованих моделей.

Апробація результатів дисертації.

Результати досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних і регіональних науково-технічних конференціях, на наукових семінарах у 1990–2010 рр.: республіканській науково-технічній конференції «Функціонально-орієнтовані обчислювальні системи» (м. Харків, 1990), міжнародних науково-технічних конференціях «Комп’ютер: наука, техніка, технологія» (м. Харків, 1993, 1994), республіканській науково-технічній конференції «Діагностика електрообладнання» (м. Київ, 1993), Українській науково-технічній

конференції «Прилади перетворення інформації для контролю і керування в енергетиці» (м. Харків, 1996), IX, X, XI, XII, XIII міжнародних науково-технічних конференціях «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» (м. Харків 1998, 2002–2005 рр.), на науково-технічних семінарах: Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України (Київ, 2010), Інституту електродинаміки НАН України (Київ, 2009), кафедри «Електричні системи» Національного університету «Львівська політехніка» (Львів, 2009), кафедр «Електричні станції» та «Електричні системи» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (Донецьк, 2010 р).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 50 друкованих праць, у тому числі – 32 статті у виданнях, які входять до переліку наукових видань, затверджених ВАК України (з них 9 в журналах, 23 у збірниках, 12 без співавторів), 3 депонованих, 13 – доповіді і тези доповідей на конференціях, 2 навчальні посібники для студентів електроенергетичних спеціальностей.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, які викладені на 290 стор. машинописного тексту. У тому числі 41 рисунок на 33 сторінках і 5 таблиць на 2 сторінках. Робота містить список використаних джерел (272 найменування) і 5 додатків на 167 сторінках. Додатки містять 32 таблиці на 19 сторінках і 58 рисунків на 42 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Сучасні методи дослідження режимів роботи електричних систем та тенденції їхнього розвитку» на основі аналізу методів і засобів розв’язання завдань дослідження несиметрії в електричних системах і тенденцій їхнього розвитку показана необхідність подання електричних систем з несиметрією у фазних координатах, оскільки в рамках традиційно сформованого підходу, оснований на лінійних перетвореннях з метою переходу від трифазних систем до однофазних еквівалентів, ці завдання або не розв’язуються, або розв’язуються тільки приблизно.

Так, наприклад, строге розв’язання задачі аналізу електромагнітних перехідних процесів у симетричних складових операторним методом дає для зображень напруг фаз вирази

$$U_{KA}(p) = 0; \quad U_{KB}(p) = - \frac{a^2 Z_{\Sigma}^{(1)}(p) + a Z_{\Sigma}^{(2)}(p) + Z_{\Sigma}^{(0)}(p)}{Z_{\Sigma}^{(1)}(p) + Z_{\Sigma}^{(2)}(p) + Z_{\Sigma}^{(0)}(p)} E_{A\Sigma}(p);$$

$$U_{KC}(p) = - \frac{a Z_{\Sigma}^{(1)}(p) + a^2 Z_{\Sigma}^{(2)}(p) + Z_{\Sigma}^{(0)}(p)}{Z_{\Sigma}^{(1)}(p) + Z_{\Sigma}^{(2)}(p) + Z_{\Sigma}^{(0)}(p)} E_{A\Sigma}(p),$$

які не відповідають будь-яким функціям часу $U(t)$, оскільки вони містять комплексні незмінні a і a^2 , які можуть зникнути лише за умови, що

$$Z_{\Sigma}^{(1)}(p) = Z_{\Sigma}^{(2)}(p).$$

У задачах аналізу електромеханічних перехідних процесів у симетричних складових при поданні рівнянь руху роторів електричних машин у вигляді

$$T_{ji} \frac{ds_i}{dt} = P_{Ti} - E_{Qi}^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} - E_{Qi} U_i y_{EUi} \sin \delta_{EUi} - \alpha_{EUi} ,$$

де $T_{ji}, P_{Ti}, s_i, \delta_i$ – відповідно незмінна інерції, потужність первинного двигуна, ковзання і фазний кут ЕРС, визначаються складові тільки прямої послідовності.

Аналогічно в інших задачах під час переходу від реальної трифазної системи до еквівалентних, однолінійних (симетричні складові), однопровідних (модальний метод) систем, до обертових (d,q,0) координат тощо спрощення, поділ на частини підзадачі забезпечується ціною додаткових припущень з урахуванням особливостей кожної задачі, однак наслідком прямування у цьому напрямку є те, що:

- розроблена і використовується велика кількість ефективних, але вузько-спеціалізованих на розв'язання частинних типових підзадач моделей (несиметричні КЗ, режими мереж з несиметричними елементами, неповнофазні режими, несиметрія навантажень тощо), але навіть при великій їх кількості вони не охоплюють усіх задач, які потребують рішення;

- використані в цих моделях лінійні перетворення, які виконуються для переходу від реальної трифазної мережі до однофазних еквівалентів (у симетричних складових, d-q координатах, модальних та ін.) обмежують їхні можливості за областю застосування, за точністю, за можливостями подальшого розвитку рамками тих припущень, за яких здійснюються відповідні перетворення;

- вирішення реальних задач вимагає сумісного, комплексного використання ряду моделей, але вузька спеціалізація і розрізненість моделей, що застосовуються, складають труднощі при організації їх взаємодії.

Підхід, спрямований на збільшення кількості спеціалізованих моделей (екстенсивний), був виправданий і єдиний можливий на етапі розвитку електричних систем, коли засоби обчислювальної техніки були ще не досить розвинені й доступні. Подальший розвиток засобів моделювання тільки у цьому напрямку – лише ускладнює ситуацію, тому розробка моделі, що дозволяє відтворювати режими роботи систем зі складною несиметрією, як ще однієї спеціалізованої моделі, навряд чи доцільна, оскільки її використання буде пов'язане з тими ж складнощами.

Сучасний рівень розвитку засобів моделювання дозволяє поряд із застосуванням частинних моделей приступити до реалізації і другого підходу, спрямованого на розробку обмеженої кількості узагальнених, комплексних моделей (інтенсивний підхід), кожна з яких більш повно відтворює властивості об'єкту, що моделюється, і завдяки цьому дозволяє в рамках однієї моделі вирішувати не одну, а комплекс взаємозв'язаних задач.

З розвитком нових засобів дослідження – математичного моделювання і ЕОМ – методи аналізу, що раніше застосовувалися, значною мірою знецінюються, перехід від реальної трифазної системи до однофазних еквівалентів і від рівнянь у фазних координатах до яких-небудь інших стає зайвим, тому повинні набути розвитку і вдосконалення моделі, що використовують метод фазних координат.

Розвиток і вдосконалення повинні полягати у розробці й реалізації іншого, принципово нового підходу, спрямованого не на збільшення розмаїття вузькоспеціалізованих моделей, що недоцільно й нереально, а на скорочення кількості моделей шляхом розробки багатофункціональних моделей на основі пофазного моделювання на рівні трифазних багатополосників.

У другому розділі «Методологічні основи моделювання електричних систем з несиметрією у фазних координатах» визначені методологічні основи пропонуваного (інтенсивного) підходу до математичного моделювання електричних систем з несиметрією у фазних координатах.

Загальноприйнятий підхід спрямований на пошук компромісу між необхідною точністю й обмеженістю засобів для її досягнення. Прийнято всі властивості та складові, несуттєві з погляду на розв'язуване завдання, не розглядати. Необхідність мати більшу біб-

ліотеку й програм знижує ефективність роботи як користувачів, так і розроблювачів. За наявності повної моделі ці та інші завдання могли б бути розв'язані в рамках однієї моделі і з більш високою точністю.

Альтернативний (інтенсивний) підхід – перехід до меншого числа узагальнених базових математичних моделей трифазних електричних систем, що враховують можливо більшу кількість впливових факторів і повних настільки, на скільки це дозволяють можливості сучасних засобів моделювання. Для його реалізації в роботі прийняті такі основні положення.

1. Пофазне моделювання при поданні елементів трифазними багатополюсниками – макромоделювання у фазних координатах. При розробці математичних моделей, що відповідають рівню складності реальних систем, доцільно перейти на більш високий рівень декомпозиції (макрорівень), на якому як елементи розглядаються не двополюсні R-, L-, C-елементи, а трифазні багатополюсники, що відображають реальні параметри фаз трифазних елементів системи

2. Подання елементів рівняннями у фазних координатах. У роботах, присвячених розробці й використанню математичних моделей у фазних координатах для дослідження режимів роботи електричних систем, використовуються різні форми подання елементів у фазній системі координат – трифазні схеми заміщення елементів, гратчасті схеми, тощо з метою перенести методи й моделі, розроблені та застосовувані для однофазних схем і частинних задач, на трифазні.

Однак це призводить до ускладнення алгоритмізації завдань формування систем рівнянь, знижує ефективність моделювання. Тому більш доцільно використовувати для елементів мережі (трифазних багатополюсників) не схеми (схеми заміщення, гратчасті), а рівняння трифазних елементів мережі у формі, що безпосередньо відбиває електричні й магнітні зв'язки між контурами й обмотками окремих фаз.

3. Орієнтація на комплексні, узагальнені моделі. Перехід на пофазне моделювання й подання елементів трифазними багатополюсниками з індуктивними та ємнісними зв'язками фаз дозволяє відмовитися від цілого ряду припущень: про симетричність, про лінійність, про виділення окремих складових, що, у свою чергу, дозволяє реалізувати повноту охоплення модельованого об'єкта і багатфункціональність моделей – застосування їх для будь-яких схем, для широкого класу завдань.

4. Формалізація й алгоритмізація. Лінійні перетворення, що забезпечують перехід від фазних координат до яких-небудь інших, специфічні для кожної спеціалізованої моделі, вимагають у кожній конкретній задачі особливого, нетривіального підходу, що ускладнює узагальнення, формалізацію й алгоритмізацію.

Розробка математичних моделей у фазних координатах на макрорівні не вимагає будь-яких попередніх перетворень, тому стає можливим вирішення питань формалізації й уніфікації як даних, так і обчислювальних процедур.

5. Перехід на рівень трифазних багатополюсників вимагає розробки й нових методів формування й розв'язання систем алгебраїчних, диференціальних, інтегродиференціальних рівнянь.

При переході на моделювання у фазних координатах такі методи повинні бути розроблені й для схем з багатополюсними елементами, причому процедури формування рівнянь повинні забезпечити одержання рівнянь математичної моделі системи у вигляді, зручному для використовуваних процедур розв'язання.

6. Обмеження числа моделей невеликою кількістю узагальнених, базових. Замість множини вузькоспеціалізованих моделей той же діапазон завдань і з більшою точністю може вирішуватися значно меншою кількістю узагальнених моделей, і як основа для їх розробки у дисертації запропоновані три базові:

- математична модель стаціонарних режимів;
- математична модель короткочасних перехідних процесів;
- математична модель тривалих перехідних процесів.

У третьому розділі «Математичне моделювання електричних систем з несиметрією в стаціонарних режимах. Базова модель № 1» у відповідності до прийнятого підходу, спрямованого на розробку узагальнених моделей ЕС, задача моделювання несиметричних режимів вирішена в рамках більш широкої задачі – моделювання стаціонарних режимів електричних мереж, якщо під стаціонарними зрозуміти будь-які стаціонарні режими – нормальні і аварійні, симетричні і несиметричні, з простою і складною несиметрією.

Несиметричні режими в умовах експлуатації електричних систем можуть бути як короткочасними (аварійні), так і тривалими (експлуатаційні). У тривалих експлуатаційних режимах ступінь несиметрії параметрів режиму, допустима для елементів мережі й електроустаткування, становить 2–4 %. Необхідність визначення показників несиметрії параметрів режиму з такою точністю визначає й високі вимоги до точності моделі, тому для моделювання тривалих режимів використані вузлові рівняння у формі балансу потужностей (нелінійна модель), а аварійних – рівняння у формі балансу струмів (лінійна модель).

Як в аварійних, так і в експлуатаційних режимах цілком реальне виникнення декількох джерел несиметрії одночасно (несиметричні КЗ у мережі з несиметричними елементами, у неповнофазних режимах, несиметрія навантажень тощо), тому в моделях забезпечена можливість відтворення й таких режимів.

В дисертації математична модель систем з несиметрією в стаціонарних режимах, на відміну від спеціалізованих моделей, розроблена як одна з базових, узагальнених моделей електричних систем на основі рівнянь у фазних координатах, а для формалізації й уніфікації подання моделей виконано перехід на макрорівень – рівень трифазних багатополісників.

Виконаний модульний аналіз математичних моделей стаціонарних режимів електричних систем показав, що різні види запису вузлових рівнянь, які в них використовуються, можливо подати у єдиній, уніфікованій формі:

- лінійні вузлові рівняння у формі балансу струмів для однофазного еквіваленту мережі (лінійна модель M1) у симетричних аварійних режимах

$$\begin{bmatrix} g_{11} & -b_{11} & g_{12} & -b_{12} & \cdots & g_{1n} & -b_{1n} \\ b_{11} & g_{11} & b_{12} & g_{12} & \cdots & b_{1n} & g_{1n} \\ g_{21} & -b_{21} & g_{22} & -b_{22} & \cdots & g_{2n} & -b_{2n} \\ b_{21} & g_{21} & b_{22} & g_{22} & \cdots & b_{2n} & g_{2n} \\ \cdots & & \cdots & & \cdots & & \cdots \\ \cdots & & \cdots & & \cdots & & \cdots \\ g_{n1} & -b_{n1} & g_{n2} & -b_{n2} & \cdots & g_{nn} & -b_{nn} \\ b_{n1} & g_{n1} & b_{n2} & g_{n2} & \cdots & b_{nn} & g_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{a1} \\ U_{r1} \\ U_{a2} \\ U_{r2} \\ \cdots \\ \cdots \\ U_{an} \\ U_{rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{a1} \\ J_{r1} \\ J_{a2} \\ J_{r2} \\ \cdots \\ \cdots \\ J_{an} \\ J_{rn} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

- нелінійні вузлові рівняння у формі балансу потужностей для однофазного еквіваленту мережі (нелінійна модель M2) у симетричних режимах

$$\begin{bmatrix} a_{11} & -b_{11} & a_{12} & -b_{12} & \cdots & a_{1n} & -b_{1n} \\ c_{11} & d_{11} & c_{12} & d_{12} & \cdots & c_{1n} & d_{1n} \\ a_{21} & -b_{21} & a_{22} & -b_{22} & \cdots & a_{2n} & -b_{2n} \\ c_{21} & d_{21} & c_{22} & d_{22} & \cdots & c_{2n} & d_{2n} \\ \cdots & & \cdots & & \cdots & & \\ \cdots & & \cdots & & \cdots & & \\ a_{n1} & -b_{n1} & a_{n2} & -b_{n2} & \cdots & a_{nn} & -b_{nn} \\ c_{n1} & d_{n1} & c_{n2} & d_{n2} & \cdots & c_{nn} & d_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta U_1 \\ \Delta\delta_2 \\ \Delta U_2 \\ \cdots \\ \cdots \\ \Delta\delta_n \\ \Delta U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \cdots \\ \cdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}; \quad (2)$$

- лінійні рівняння у формі балансу струмів у фазних координатах (лінійна модель М3) у несиметричних режимах

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^F & Y_{12}^F & \cdots & Y_{1n}^F \\ Y_{21}^F & Y_{22}^F & \cdots & Y_{2n}^F \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n1}^F & Y_{n2}^F & \cdots & Y_{nn}^F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^F \\ U_2^F \\ \cdots \\ U_n^F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^F \\ J_2^F \\ \cdots \\ J_n^F \end{bmatrix}; \quad (3)$$

- нелінійні рівняння у формі балансу потужностей трьох фаз трифазної мережі (нелінійна модель М4) у несиметричних режимах

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}^F \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \cdots \\ U_n \end{bmatrix}^F = \begin{bmatrix} J_1(U_1) \\ J_2(U_2) \\ \cdots \\ J_n(U_n) \end{bmatrix}^F. \quad (4)$$

У (1) компонентні рівняння розкладені на реальні й уявні складові

$$\begin{bmatrix} g_{ij} & -b_{ij} \\ b_{ij} & g_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ai} \\ U_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ai} \\ I_{ri} \end{bmatrix}.$$

Рівняння балансу активних і реактивних струмів для всіх вузлів мережі сформовані попарно. Матриця коефіцієнтів Y має блокову структуру й відрізняється тим, що містить блоки другого порядку 2×2 .

У (2) лінеаризована система рівнянь складається щодо небалансів активної ΔP і реактивної ΔQ потужностей у вузлах, які записані також попарно,

$$a_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j}; \quad b_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j}; \quad c_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j}; \quad d_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j},$$

де ΔU , $\Delta \delta$ – поправки до модулів і кутів вузлових напруг. Тому матриці коефіцієнтів складаються із блоків розміром 2×2 , а стовпці невідомих і заданих величин містять попарно величини, що належать до одного вузла.

Елементами систем рівнянь (3), (4) є матриці власних Y_{11}^F і взаємних Y_{ij}^F провідностей трифазних вузлів розміром 3×3 , вектори напруг фаз у вузлах трифазної мережі

U_i^F і задавальні струми, $J_i^F = [Y_{J\Gamma}^F][E_{J\Gamma}^F]$ у вузлах підключення генеруючих елементів.

Пропоновані модифікації вузлових рівнянь (1)-(4) електричної мережі у формі балансу струмів і потужностей забезпечують можливість подання будь-яких рівнянь електричної мережі в стаціонарних режимах – аварійних (1), нормальних (2), у фазних координатах (3), (4) – у єдиній, уніфікованій блоково-матричній формі, характерними рисами якої є такі:

- матриці коефіцієнтів розглянутих систем рівнянь мають однакову структуру, складаються із блоків і різняться тільки розмірами цих блоків (2×2, 3×3, 6×6);
- елементи векторів заданих величин і невідомих також згруповані в блоки по 2 або 3 і містять величини, що належать до одного вузла мережі;
- кількість блоків у матриці й векторах заданих і шуканих величин дорівнює числу незалежних вузлів n модельованої мережі.

Основними обчислювальними процедурами в моделях М1-М4 є: топологічний аналіз схеми мережі, формування системи рівнянь і розв'язання отриманої системи. Зведення виділених чотирьох моделей до уніфікованого вигляду дозволяє: по-перше, уніфікувати ці обчислювальні процедури, а по-друге, включити їх у єдину узагальнену, базову модель ЕС у стаціонарних режимах і забезпечує можливість моделювання будь-яких стаціонарних режимів – нормальних і аварійних, симетричних і несиметричних, з поздовжньою і поперечною, з простою і складною несиметрією – на єдиній інформаційній, алгоритмічній, методичній основі.

При наявності узагальненої моделі і уніфікованих процедур спрощується процес розробки нових моделей на її основі – оптимізації стаціонарних режимів, вибору потужності і розміщення засобів компенсації реактивної потужності, електромагнітного впливу та ін.

Для реалізації моделей М3 і М4 у розділі 3 розроблені:

- математичні моделі елементів (ліній, трансформаторів, вузлів навантаження, джерел живлення) на макрорівні й методика визначення їхніх параметрів у фазних координатах;
- метод формування вузлових рівнянь для системи, елементами якої є трифазні багатополіусники;
- метод розв'язання систем лінійних і нелінійних рівнянь із урахуванням блокової структури й слабкого заповнювання матриць коефіцієнтів.

Лінійна і нелінійна моделі у несиметричних режимах (М3, М4) базуються на формуванні вузлових рівнянь балансу струмів і потужностей для вузлів трифазної мережі у фазних координатах і їхньому розв'язанні прямими чи ітераційними методами.

Несиметричні навантаження в довільній кількості вузлів мережі можуть бути задані нерівними опорами фаз або нерівними потужностями по фазах. Розв'язання системи рівнянь (4), сформованої з урахуванням несиметричних навантажень, неповнофазних, нетранспортованих ПЛ та інших видів несиметрії щодо вузлових напруг $[U]$ трифазної мережі, дозволяє з'ясувати ступінь впливу всіх цих факторів на якість електроенергії в експлуатаційних несиметричних режимах.

Всі несиметричні аварійні uszkodження в електричній мережі – короткі замикання окремих фаз між собою й на землю, відключення фаз, несиметричні навантаження, тощо можуть бути досить просто отримані під час формування вузлових рівнянь (4) з урахуванням відповідних комутацій у вузлах і гілках трифазної мережі.

Важливо підкреслити й те, що перехід від простої несиметрії до складної – з несиметрією різного виду й у різних елементах мережі – не призводить до появи будь-яких додаткових утруднень як при формуванні вузлових рівнянь у фазних координатах, так і при їхньому розв'язанні.

Одна узагальнена модель охоплює можливості багатьох разом узятих вузькоспеціалізованих моделей. Вона забезпечує відтворення несиметричних режимів за наявності будь-якої несиметрії – простої і складної, поздовжньої і поперечної, у будь-якій кількості й у будь-яких сполученнях і може служити як база для моделювання стаціонарних режимів електричних систем з несиметрією.

У четвертому розділі «Аналіз, діагностика, симетрування стаціонарних режимів електричних систем з несиметрією» подані результати досліджень, діагностики й симетрування режимів електричних систем як України, так і закордонних, зі складною несиметрією, виконаних із застосуванням розробленої моделі.

Один з об'єктів дослідження – електричні мережі 750 кВ ОЕС України. При загальній довжині близько 3300 км мережі є джерелом значної реактивної потужності, для компенсації якої встановлені 29 груп шунтувальних реакторів (ШР). Однак через високу аварійність у робочому (повнофазному) стані в мережах 750 кВ знаходяться одночасно не усі групи реакторів, а значна частина вимушено працюють неповним числом фаз. З урахуванням імовірності накладення в часі неповнофазних режимів декількох груп реакторів досліджувані режими розглядалися як режими зі складною несиметрією.

Результати моделювання складної несиметрії в мережах 750 кВ ОЕС України показали, що за відключення 3–4 реакторів (у різних вузлах і різних фазах) коефіцієнти несиметрії збільшуються до значень, близьких до гранично допустимих. Крім того, у неповнореакторних режимах виявлені підвищення напруги здорових фаз, що може бути однією з причин високої аварійності ШР.

Отримані результати свідчать про те, що розроблена математична модель дозволяє відтворювати несиметричні режими за наявності в мережі як простої (одномісної), так і складної (багатомісної) несиметрії й досліджувати вплив факторів спотворення симетрії напруг у мережі із простою та складною несиметріями. Іншими відомими моделями це реалізувати неможливо.

Інший приклад – системоутворюючі мережі 132–400 кВ Йорданії, джерелами багатомісної несиметрії в яких є наявність несиметричних навантажень і, крім того, ПЛ 400 кВ Амман-Агаба у вимушених неповнофазних режимах є ще одним джерелом несиметрії. Із застосуванням розробленої моделі здійснено дослідження показників якості електроенергії в електричній мережі в простих й складних несиметричних режимах, обумовлених несиметричними навантаженнями у вузлах мережі й використанням неповнофазних режимів ПЛ 400 кВ.

Для симетрування режиму мережі як елементи симетрувальних пристроїв у неповнофазних режимах запропоновано використовувати шунтувальні реактори, встановлені на кінцевих підстанціях для компенсації реактивної потужності. Симетруючий ефект забезпечується (рис. 1), якщо до неповнофазної лінії реактори підключені на відправному кінці ПЛ до ушкодженої і відстаючої від ушкодженої фази, а на прийомному – до ушкодженої і випереджаючої ушкоджену фази.

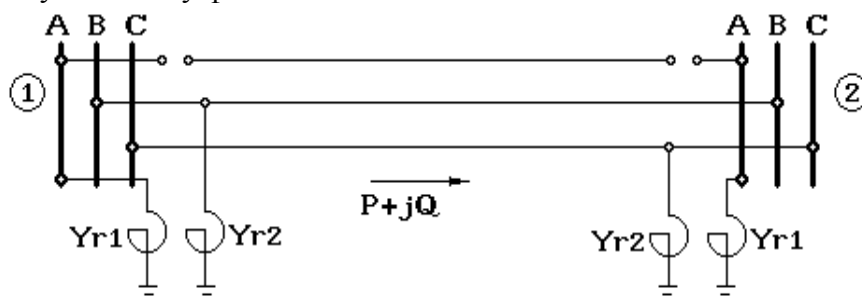


Рис. 1. Схема підключення симетрувальних реакторів до ПЛ 400 кВ у неповнофазному режимі

Запропоновано алгоритм визначення параметрів симетрувальних реакторів, підключених до неповнофазної ПЛ, визначені параметри реакторів, за яких допустима несиметрія струмів і напруг у мережі може бути забезпечена у всьому діапазоні потужностей, що передаються.

Результати досліджень підтверджують можливість отримання на базовій математичній моделі стаціонарних режимів усього комплексу розрахунків, пов'язаних з аналізом будь-яких режимів (симетричних і несиметричних, з простою і складною несиметрією).

У п'ятому розділі «Математичне моделювання електромагнітних перехідних процесів у фазних координатах. Базова модель № 2» на основі макромодельовання у фазних координатах виконана розробка другої узагальненої базової математичної моделі – моделі, призначеної для моделювання електромагнітних і хвильових процесів в електричних системах з несиметрією й з різними режимами роботи нейтралі.

Фактором, що стримує розвиток методів математичного моделювання перехідних процесів в електричних системах до рівня узагальненої постановки й для реальних схем довільної структури, є відсутність формалізованих методів формування й розв'язання інтегро-диференціальних рівнянь, ефективних для трифазних систем.

У дисертації запропоновано метод математичного моделювання електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних системах, в основі якого – перехід, як і в моделях стаціонарних режимів, на рівень трифазних багатополіусників (макрорівень), подання їх рівняннями у фазних координатах і розвиток неявних методів їх числового інтегрування на трифазні системи.

Для моделювання перехідних процесів у трифазних системах на макрорівні отримані моделі трифазних елементів у вигляді диференціальних рівнянь у фазних координатах (рівняння в потрібній формі є не для всіх елементів) і подані у формі, зручної для включення в модель системи.

Повні рівняння перехідних процесів для ділянки повітряної або кабельної лінії в диференціальній формі:

$$\begin{aligned} L_{ij}^F \frac{d}{dt} i_{ij}^F + R_{ij}^F i_{ij}^F &= u_i^F - u_j^F; \\ C_{i0}^F \frac{d}{dt} u_i^F + G_{i0}^F \frac{d}{dt} u_i^F &= i_{i0}^F, \end{aligned}$$

представлені в дискретній формі, відносно струмів

$$\begin{aligned} i_{ij}^{(k+1)} &= h L_{ij} + h R_{ij}^{-1} \Delta u_{ij}^{(k+1)} + L_{ij} + h R_{ij}^{-1} L_{ij} i_{ij}^{(k)}; \\ i_{i0}^{(k+1)} &= \frac{1}{h} C_{i0} + h G_{i0} u_{i0}^{(k+1)} - \frac{1}{h} C_{i0} u_{i0}^{(k)}, \end{aligned}$$

де h – крок інтегрування, $k, k+1$ – номер кроку. У скороченій формі маємо

$$\begin{aligned} i_{ij}^{(k+1)} &= Y_{ij} \Delta u_{ij}^{(k+1)} + J_{ij}^{(k)}; \\ i_{i0}^{(k+1)} &= Y_{i0} \Delta u_{i0}^{(k+1)} + J_{i0}^{(k)}, \end{aligned} \tag{5}$$

де Y_{ij}, Y_{i0} – матриці, елементи яких залежать від параметрів ділянки трифазної лінії й прийнятого методу числового інтегрування;

$J_{ij}^{(k)}$, $J_{i0}^{(k)}$ – вектори, що залежать від струмів індуктивних і напруг ємнісних гілок, обумовлені на попередніх кроках інтегрування.

Рівняння (5), подані відносно струмів фаз на $(k+1)$ -му кроці інтегрування, що дозволяє включати їх у систему вузлових рівнянь на кроці розрахунку. Індекс F для позначення фазних величин струмів і напруг для спрощення запису рівнянь тут і надалі опущено.

Повна система рівнянь перехідних процесів трифазного трансформатора, як і в установлених режимах, містить у собі дві групи рівнянь: компонентні і топологічні. Якщо для параметрів режиму й обмоток прийняті позначення:

L_{11} ; L_{22} ; $L_{12} = L_{21}$; r_1 ; r_2 – параметри обмоток;

V_1 ; V_2 ; j_1 ; j_2 – напруги й струми обмоток фаз;

U_1 ; U_2 ; i_1 ; i_2 – напруги й струми на виводах трансформатора, то компонентні й топологічні рівняння набудуть вигляду:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix};$$

$$V_{\Delta} = C_{\Delta} U_{\Delta}; \quad i_{\Delta} = C_{\Delta} j_{\Delta}; \quad V_Y = C_Y U_Y; \quad i_Y = C_Y j_Y.$$

Скінченнорізницева апроксимація компонентних рівнянь із урахуванням схем з'єднання обмоток (топологічних рівнянь) для формул неявних методів числового інтегрування дає рівняння

$$\begin{aligned} i_1^{(k+1)} &= Y_{11} U_1^{(k+1)} + Y_{12} U_2^{(k+1)} + A_{11} i_1^{(k)} + A_{12} i_2^{(k)}; \\ i_2^{(k+1)} &= Y_{21} U_1^{(k+1)} + Y_{22} U_2^{(k+1)} + A_{21} i_1^{(k)} + A_{22} i_2^{(k)}, \end{aligned} \quad (6)$$

що є апроксимацією компонентних диференціальних рівнянь трифазного трансформатора. У них

$$Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}, A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22} -$$

матриці, елементи яких визначаються власними й взаємними індуктивностями обмоток, схемою з'єднання, режимом нейтралі й методом чисельного інтегрування.

В уніфікованій формі (5)–(6) подані дискретні моделі всіх трифазних елементів (трансформаторів, генераторів, вузлів навантаження тощо).

На основі дискретних рівнянь окремих елементів мережі й інформації про те, як вони з'єднані в схемі електричної мережі, формується система дискретних алгебраїчних рівнянь на кроці розрахунку перехідного процесу неявними методами числового інтегрування:

У відомих і застосовуваних моделях електрична мережа й елементи системи подаються однофазними еквівалентами й розрахунки ведуться за діючим значенням параметрів режиму. Такий перехід можна реалізувати, і він безсумнівно виправданий, коли за умовами завдання досить знати тільки електромеханічні складові перехідних процесів і за наявності в мережі тільки одного джерела несиметрії. Урахування електромагнітних складових перехідних процесів в електричній мережі в таких моделях не передбачається, тому такі ефекти, як зміни напруг і перенапруги в мережі, зміни частоти, робота ОПН тощо ними не можуть бути відтворені. Заповнити цю прогалину дозволяють математичні моделі на основі рівнянь у фазних координатах. Причому за наявності моделі електромагнітних перехідних процесів (базова модель № 2) необхідно, по-перше, склад модельованих елементів доповнити моделями обертових електричних машин у фазних координатах і, по-друге, забезпечити включення їх до складу моделі системи.

Тому для включення в ці моделі обертових електричних машин з метою відтворення й електромеханічної складової перехідних процесів необхідно:

- розглядати й обертові електричні машини як трифазні багатополюсники;
- мати досить повні математичні моделі ЕМ, що відбивають як електромагнітні, так і електромеханічні складові перехідних процесів, що зв'язують параметри режиму ЕМ з параметрами мережі;
- визначити параметри ЕМ у фазних координатах, що відтворюють їхні залежності від положення обертового ротора;
- подати рівняння трифазних багатополюсників, що відповідають обертовій ЕМ, у формі, яка допускає формалізацію формування і розв'язання диференціальних рівнянь перехідних процесів.

Рівняння обертових електричних машин у фазних координатах, які наводяться в науковій і навчальній літературі, застосовуються, як правило, для дослідження тільки окремо взятих машин і для спрощеного подання зовнішньої (стосовно розглянутої машини) мережі.

Тому на даний час відсутні параметри електричних машин у фазних координатах і методики їх визначення, відсутні й рівняння елементів у формі, що допускає включення їх у модель системи.

Найбільш повна модель СМ, яка одержана при мінімальній кількості допущень, що ідеалізують ЕМ, містить рівняння напруг обмоток:

$$\begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + \left(\omega \begin{bmatrix} \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \\ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix};$$

і рівняння рівноваги моментів (рівняння руху ротора)

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{ЭМ}} - M_T,$$

де T_j – постійна інерції обертових мас; M_T , $M_{\text{ЭМ}}$ – механічний і електромагнітний момент синхронної машини (СМ).

Для параметрів статорних і роторних обмоток нижче прийняті позначення:

$$U_S^F = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}; \quad U_R = \begin{bmatrix} U_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad i_S^F = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; \quad i_R = \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix};$$

$$R_S^F = \begin{bmatrix} r_A & & \\ & r_B & \\ & & r_C \end{bmatrix}; [L^F] = \begin{bmatrix} L_S^F & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix},$$

де $U_i; i_i; r_i; i = A, B, C, f, D, Q$ – напруги, струми, опори обмоток статора й ротора, $L_{ij} i, j = A, B, C, f, D, Q$ – власні і взаємні індуктивності обмоток $L_{ij} = L_{ji}$. Індекси S і R прийняті для позначення величин, що стосуються обмоток статора й ротора відповідно; індекс F – для позначення фазних величин.

Для забезпечення можливості включення рівнянь СМ у модель системи виконана їхня різницева апроксимація

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = h [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix}^{(k+1)} + [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)};$$

або, у короткій формі,

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = [Y(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} j_S \\ j_R \end{bmatrix}^{(k)}, \quad (8)$$

де

$$[Y(\gamma)^{(k+1)}] = h [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1}; \begin{bmatrix} j_S \\ j_R \end{bmatrix}^{(k)} = [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)}.$$

Аналогічно, виконавши різницеву апроксимацію рівнянь асинхронного двигуна (АД)

$$\begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{dL_{SR}(\gamma)}{d\gamma} \\ \frac{dL_{RS}(\gamma)}{d\gamma} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix};$$

отримано дискретні рівняння АД у вигляді

$$\begin{aligned} i_S^{(k+1)} &= Y_S u_S^{(k+1)} + Y_S u_S^{(k)} + A_S i_S^{(k)} + A_{SR} i_R^{(k)}, \\ i_R^{(k+1)} &= Y_{RS} u_S^{(k+1)} + Y_{RS} u_S^{(k)} + A_{RS} i_S^{(k)} + A_R i_R^{(k)}. \end{aligned} \quad (9)$$

У рівняннях СМ (8) і АД (9), як і в дискретних рівняннях статичних елементів електричної мережі у попередньому розділі, струми в обмотках на поточному кроці числового інтегрування рівнянь перехідних процесів виражені через напруги на обмотках на поточному кроці й струми в обмотках на попередніх кроках інтегрування. На відміну від статичних елементів дискретні параметри СМ і АД є змінними й повинні обчислюватися на кожному кроці обчислювального процесу у функції кутового положення роторів. У такій уніфікованій формі рівняння СМ і АД включені в систему рівнянь, розв'язуваних на кроці числового інтегрування.

Система диференціальних рівнянь перехідних процесів синхронних і асинхронних машин включає ще рівняння руху роторів.

$$i_S^{(k+1)} = Y_{RS} u_S^{(k+1)} + Y_{RS} u_S^{(k)} + A_{RS} i_S^{(k)} + A_R i_R^{(k)};$$

$$\omega^{(K+1)} = \omega^{(K)} + \frac{h}{T_j} \left(\frac{1}{2} i_S^{(k+1)} L_{SR} i_R^{(k+1)} + \frac{1}{2} i_R^{(k+1)T} L_{RS} i_S^{(k+1)} - M_M \right); \quad (13)$$

$$\gamma^{(K+1)} = \gamma^{(K)} + h \cdot \omega^{(K+1)};$$

- підсистема регулювання

$$\Delta u_f^{(k+1)} = -k_1 \Delta u_i^{(k)} + k_2 \frac{\Delta u_i^{(k)}}{h}; \quad (14)$$

$$\Delta M_M^{(k+1)} = k \Delta \omega^{(k)}.$$

Обчислювальний процес на кроці числового інтегрування містить етапи:

- 1) складання й розв'язання рівнянь балансу струмів фаз статичної частини системи (елементів мережі і статорних обмоток ЕМ) на кроці числового інтегрування;
- 2) визначення струмів роторних обмоток і визначення обертових моментів ЕМ на кроці з урахуванням дії засобів регулювання;
- 3) визначення швидкостей обертання й кутового положення роторів, визначення власних і взаємних індуктивностей обмоток ЕМ відповідно до їхнього взаємного положення на кроці.

Одним з факторів, що перешкоджають широкому впровадженню макромодельовання у фазних координатах у практику математичного моделювання режимів роботи електричних систем з несиметрією, є відсутність у довідковій, нормативній, навчальній літературі даних про параметри елементів електричних систем у фазних координатах. Тому в роботі запропоновані методика й алгоритми визначення параметрів елементів електричних систем у фазних координатах, прийняті й реалізовані в розроблених математичних моделях.

У сьомому розділі «Дослідження електромеханічних і електромагнітних перехідних процесів у електричних системах з несиметрією» надані результати експериментальної перевірки розроблених програмних засобів і досліджень електромагнітних, електромеханічних і хвильових перехідних процесів в електричних системах з заземленою й ізольованою нейтраліями.

Оцінка вірогідності результатів, одержуваних за допомогою розроблених програмних засобів, виконана на основі зіставлення розрахункових і натурних експериментів. Вона показала, що: результати розрахунку збігаються з експериментальними даними; можливість розробленої моделі і її програмної реалізації дозволяють досить повно й вірогідно відобразити дійсну картину фізичних процесів, які супроводжують перехідні процеси в електричних мережах.

Дослідження перехідних процесів з відтворенням електромагнітних і електромеханічних складових перехідних процесів в електричних системах довільної структури й конфігурації як з ізольованою (або резистивно-, резонансно заземленою) нейтраліями (системи електропостачання з вузлами двигунового навантаження), так і із глухозаземленими нейтраліями (електричні мережі ВН і СВН), виконані із застосуванням розроблених базових математичних моделей у фазних координатах і програмних засобів (AnFaz2, AnFaz3), підтверджують їхню ефективність.

Із застосуванням розроблених програмних засобів виконані дослідження електромагнітних перехідних процесів і перенапруг, які їх супроводжують при комутаціях ПЛІ 750 кВ Курська АЕС – ПС Північноукраїнська. Досліджувалися характер зміни миттєвих значень напруг і струмів $u(t)$, $i(t)$ в елементах мережі, хвильові процеси в електропередачі. У розрахунках електромагнітних перехідних процесів, що виникають при комутаціях (вклю-

ченні ВЛ на неробочий хід, відключення фази, ОАПВ) електропередачі, варіювалися передана потужність і час безструмової паузи.

Характер перехідних процесів і перенапруг, які їх супроводжують, ілюструють цифrogramи, зображені на рис. 2.

Чисельне інтегрування при побудові цифrogram виконано з кроком інтегрування $h = 0.0001$ с

За результатами розрахунку з'ясовані умови, за яких виникають перенапруги, що перевищують допустимі для устаткування ПС значення, й показано, що рівень обмеження перенапруг засобами захисту реакторного обладнання, встановленими на ПС Північноукраїнська, не відповідає реальним перенапругам і необхідна їх заміна.

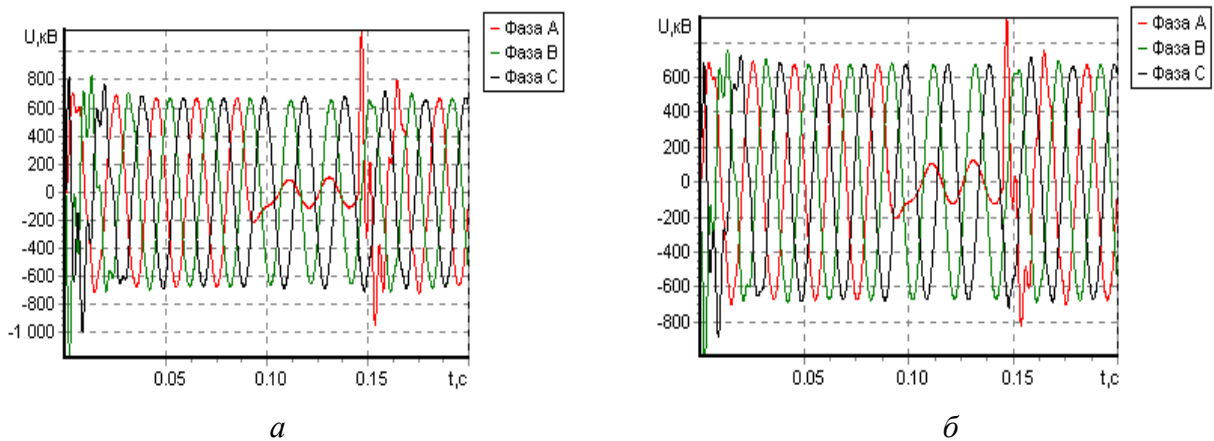


Рис. 2. Напруги фаз на початку (а) і кінці (б) ПЛ при ОАПВ ($P = 300$ мВт)

З використанням розроблених моделей і програмних засобів виконані також дослідження електромагнітних перехідних процесів при ОЗЗ у кабельних і повітряних мережах 6–10 кВ. Можливості програмних засобів дозволили з'ясувати ступінь впливу на характер і кількісні характеристики основних факторів, що впливають: розмірів і конфігурації мережі, відстані до точок замикань від джерела живлення, навантажень у вузлах мережі, напруг на шинах джерела живлення, початкових умов комутацій.

Результати розрахунку отримані у вигляді цифrogram, що відтворюють зміну струмів і напруг у всіх елементах мережі протягом перехідних процесів. Ряд цифrogram для ілюстрації характеру й основних параметрів перехідних процесів показані на рис. 3. Крок інтегрування під час розрахунків перехідних процесів дорівнює $h = 0.00005$ с. Ушкоджена фаза А.

Моделювання у фазних координатах, з урахуванням реальної конфігурації мережі, схем з'єднання обмоток і режиму нейтралі трансформаторів, початкових умов у момент виникнення замикань дозволяє одержати більш повну картину перехідних процесів, чим на спрощених моделях. Зокрема, відтворюються імпульси струмів і перенапруг, амплітуди, тривалості й форми імпульсів струму при спрацьовуванні ОПН, які встановлені у кабельних мережах для захисту від перенапруг тощо.

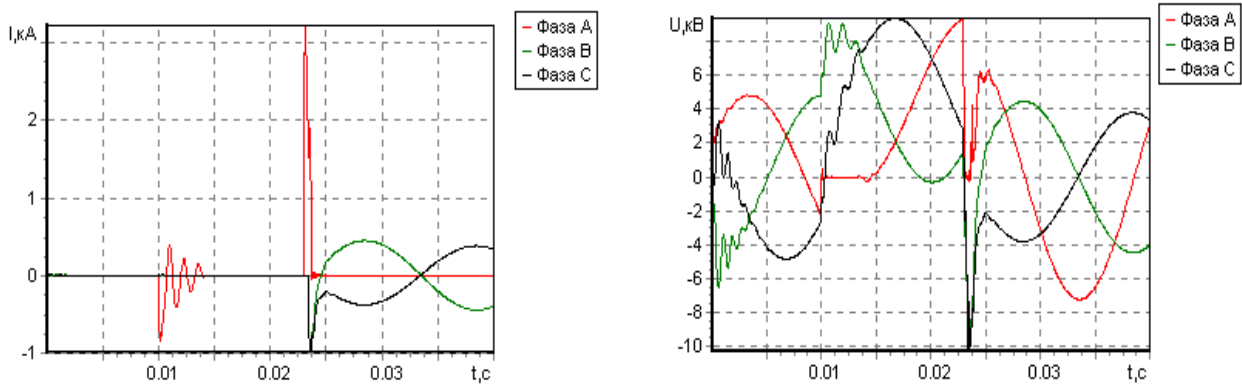


Рис. 3. Перехідні процеси під час відключення ОЗЗ і роботи ОПН

Результати моделювання з відтворенням реальних схем кабельних мереж (топології, довжини) показують, що ємнісний струм у точці ОЗЗ і в нейтралі різняться, і тим значніше, ніж більша довжина мережі. Тому компенсація струму за допомогою дугогасних реакторів (ДГР) не приводить до повної компенсації струму в точці ОЗЗ, що є чинником, який знижує ефективність їхнього використання як засобу обмеження перенапруг.

Розроблені математичні моделі та їх програмна реалізація (AnFaz3) дозволяють відтворювати як електромагнітні, так і електромеханічні складові перехідних процесів в електричних системах.

Виконано дослідження режимів роботи основної мережі Західного регіону ОЕС України, оскільки з виведенням з експлуатації Чорнобильської АЕС перетоки потужності між ОЕС України й суміжними енергооб'єднаннями істотно змінилися й такі збурювання, як відключення лінії 750 кВ (Рівненська АЕС-Західноукраїнська) або однофазне КЗ на шинах 750 кВ станції можуть призводити до порушення динамічної стійкості генераторів РАЕС. Як один із засобів забезпечення стійкості режимів показана можливість підвищення динамічної стійкості генераторів АЕС Західного регіону України з використанням пристроїв електричного гальмування (ЕГ) генераторів і автоматичного розвантаження з використанням потужних резисторних установок.

У дослідженнях перехідних процесів у системах електропостачання з двигунним навантаженням як об'єкти дослідження розглядалися схеми ділянок електричних мереж "Сумиобленерго" і "Харківобленерго" напругою 110/6 кВ, що містять вузли двигунного навантаження. Виконано дослідження перехідних процесів, що виникають під час симетричних (включення резервного джерела після короткочасної перерви живлення й роботи АВР) і несиметричних (двофазні КЗ) комутацій у мережі.

Під час розрахунків самозапуску АД у розрахунковій схемі також відтворюються як електромагнітні, так і електромеханічні (рис. 4) складові перехідних процесів.

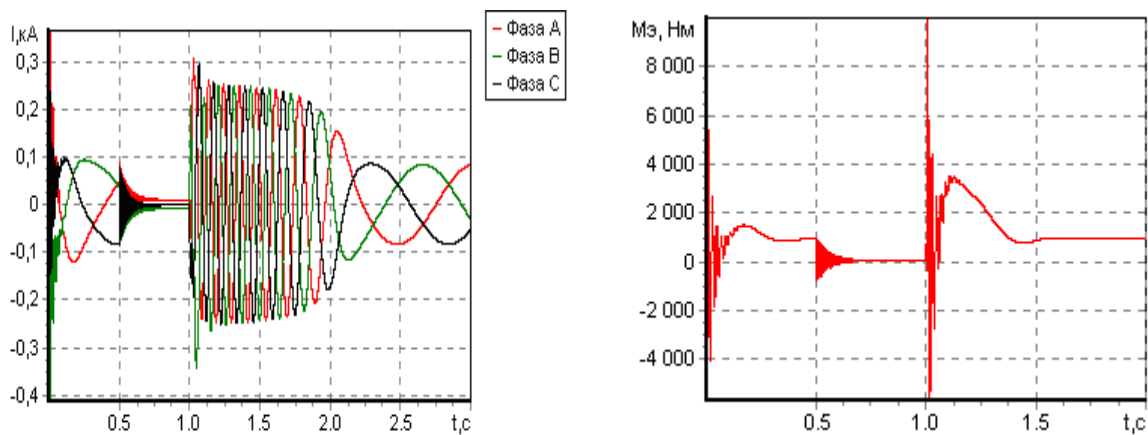


Рис. 4. Зміннені струмів ротора і електромагнітного моменту
($P_{ад}=0.4$ мВт, $t_{П}=0.5$ с.)

Моделювання перехідних процесів в електричних системах і системах електропостачання у фазних координатах з урахуванням електромеханічних і електромагнітних складових дає адекватну картину і дозволяє в рамках однієї моделі відтворювати прояви перехідних процесів, які не відображуються у спрощених моделях – перенапруги на двигунах під час комутацій, зміни частоти у мережі, імпульси струму під час роботи ОПН та ін.

Розроблені математичні моделі й програмні засоби відтворюють всі основні фактори, що впливають на електромагнітні й електромеханічні перехідні процеси, на параметри стаціонарних режимів електричних систем з несиметрією. Це дозволяє на якісно новому рівні вирішувати цілий ряд актуальних завдань – вибір засобів симетрування й визначення їхніх параметрів, оцінка ефективності засобів захисту (відключення КЗ, дія АПВ, АВР), розробка протиаварійних засобів і засобів підвищення стійкості режимів.

У додатках наводяться результати діагностування й експериментальної перевірки працездатності розроблених засобів, описи ухвалених рішень щодо складу, структури, алгоритмів програмних засобів, структури й складу банку даних, приклади реалізації й використання теоретичних положень дисертації для розв'язання конкретних завдань, а також документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова проблема розвитку теорії, методів і засобів математичного моделювання трифазних електричних систем з несиметрією в стаціонарних і перехідних режимах на основі розробки нових узагальнених базових моделей, що має важливе значення і на сучасному етапі розвитку електроенергетики України забезпечує підвищення ефективності функціонування електроенергетичних систем. При цьому отримані такі основні результати:

1. Аналіз традиційного підходу до розробки математичних моделей показав, що наявність великої кількості вузькоспеціалізованих моделей, розроблених на різній методичній, математичній, алгоритмічній основі, які різняться складом і формою подання вхідних і вихідних даних, не забезпечує необхідної точності результатів, ускладнює процес одержання потрібних оцінок і прийняття рішень. Визначено методологічні основи нового, альтернативного підходу до розробки математичних моделей, що дозволяє розширити можливості розроблювальних моделей і коло розв'язуваних ними завдань.

2. Показано, що реалізація такого підходу можлива на основі макромоделювання у фазних координатах – подання елементів електричних мереж і системи в цілому не однофазними еквівалентами, а реальною трифазною моделлю й обмеження числа необхідних моделей невеликою кількістю узагальнених, базових, які вирішують ту ж множину завдань з меншою кількістю допущень і з більш високою точністю. На даному етапі розвитку елементної бази й програмного забезпечення ЕОМ фактори, що стримували розвиток таких моделей (більший порівняно з іншими моделями обсяг даних, відсутність параметрів елементів, наявність періодичних і нелінійних параметрів) уже не є непереборними.

3. Базова математична модель стаціонарних режимів електричних систем з несиметрією (модель №1) і програмні засоби, що її реалізують, забезпечують можливість проведення всього комплексу досліджень будь-яких стаціонарних режимів (симетричних, несиметричних, з поздовжньою, поперечною, із простою і складною несиметріями) на єдиній методичній, алгоритмічній, інформаційній основі, що знижує трудомісткість таких досліджень, підвищує їхню ефективність і точність одержуваних результатів. Використання для дослідження аварійних та експлуатаційних несиметричних режимів моделей на макрорівні у фазних координатах дозволяє природно відтворити всі види несиметрії в матрицях параметрів відповідних елементів.

4. Базова математична модель електромагнітних перехідних процесів в електричних системах на макрорівні у фазних координатах (модель № 2) також багатofункціональна, оскільки забезпечує можливість моделювання перехідних процесів для будь-яких видів комутацій (симетричних, несиметричних) і за наявності несиметричних елементів (поздовжніх, поперечних) у будь-яких кількостях і сполученнях, у мережах із заземленою ізолюваною резонансно- або резистивнозаземленою нейтраліями.

5. Базова математична модель електромеханічних перехідних процесів в електричних системах (модель № 3) дозволяє відтворювати як електромагнітні, так і електромеханічні складові перехідних процесів за наявності симетричних і несиметричних комутацій і елементів. Реалізація на основі макромоделювання у фазних координатах розширює області застосування моделі по точності, а також дає можливість включити у число враховуваних фактори, які взагалі не розглянуті в традиційних моделях електромеханічних перехідних процесів – перенапруги, зміни частоти, неодноразовість комутації по фазах тощо.

6. Перехід на більш високий рівень декомпозиції – макромоделювання у фазних координатах і подання елементів трифазними багатополісниками з індуктивними та ємнісними зв'язками фаз виключає необхідність у перетвореннях до інших систем координат і прийнятті цілого ряду допущень, за яких ці перетворення здійснені. За меншої кількості допущень пропонувані базисні моделі забезпечують точніше врахування властивостей модельованого об'єкта, дозволяють відтворювати не яку-небудь одну, а цілий ряд складових (повільні, швидкі, періодичні, аперіодичні, високочастотні), тому й застосовні для розв'язання ширшого кола завдань.

7. Запропоновано блокові модифікації вузлових лінійних і нелінійних рівнянь для трифазних систем, розроблено метод блокової факторизації для їхнього розв'язання, що дозволило виконати уніфікованими найбільш трудомісткі елементи комплексу – модулі топологічного аналізу схем електричних мереж, імітації виключення, визначення оптимального порядку виключення невідомих при розв'язанні систем вузлових рівнянь із блоковими матрицями коефіцієнтів, формування й розв'язання вузлових рівнянь на всіх рівнях моделювання.

8. Система базових математичних моделей, запропонована в дисертації, є засобом вирішення широкого кола завдань дослідження стаціонарних і перехідних режимів електричних систем, забезпечує підвищення ефективності процесів моделювання режимів роботи електричних систем за рахунок того, що використання невеликої кількості узагаль-

нених моделей на одній алгоритмічній, інформаційній базі замість множини розрізнених і вузько-спеціалізованих скорочує витрати праці й часу на проведення досліджень.

9. Базові моделі електричних систем можуть бути основою для розробки нових моделей, підвищують ефективність таких розробок, оскільки за наявності в складі базисних моделей багатофункціональних та уніфікованих модулів на макрорівні скорочуються витрати праці на розробку моделей і їхню програмну реалізацію.

10. Впровадження макромоделювання у фазних координатах у навчальний процес підготовки студентів електроенергетичних спеціальностей підвищує ефективність навчання, оскільки замість великого числа розрізнених вузько спеціалізованих моделей, що різняться складом даних, прийнятими припущеннями, методами розв'язання, досить вивчити обмежене число узагальнених моделей на єдиній методичній, математичній, алгоритмічній основі.

Основний зміст роботи відображено у таких публікаціях:

1. Веприк Ю. Н. Математическое моделирование и диагностика режимов электрических систем: учебное пособие / Ю. Н. Веприк, В. О. Бондаренко, Е. М. Олейник. – Х. : ХГПУ, 1997. – 193 с.

2. Веприк Ю. Н. Комплекс программ для моделирования и диагностики режимов электрических систем : учебное пособие / Ю. Н. Веприк. – Х. : ХГПУ, 2000. – 97 с.

3. Веприк Ю. Н. Исследование неполнофазных режимов линии 220 кВ / Ю. Н. Веприк, Е. П. Гусев, Т. Б. Заславская // Труды СибНИИЭ. – Новосибирск : СОАН СССР, 1981. – Вып.20. – 89–91.

4. Веприк Ю.Н. Адаптивные алгоритмы в расчетах потокораспределения / Ю. Н. Веприк // Изв. высш. учебн. заведений. Энергетика. – Минск, 1982. – № 1.– С. 29–33.

5. Веприк Ю. Н. Учет топологических свойств электрической сети в расчетах потокораспределения / Ю. Н. Веприк // Изв. высш. учебн. заведений. Энергетика. – Минск, 1985. – № 8.– С. 41–43.

6. Веприк Ю. Н. Учет статических характеристик нагрузок при оптимизации параметров режима электрической сети /Ю. Н. Веприк // Вестник Харьковского политехнического института. – Х. : ХПИ, 1987. – Вып. 14, № 243. – С. 5–8.

7. Веприк Ю. Н. Метод двойной факторизации в расчетах режимов электрических сетей / Ю. Н. Веприк, Ш. Шульце // Вестник Харьковского политехнического института. – Х. : ХПИ, 1988. – Вып. 15, № 251. – С. 10–12.

8. Веприк Ю. Н. Метод декомпозиции для анализа нормальных и аварийных режимов энергосистем /Ю. Н. Веприк, А. Гебель, К. Гебель // Вестник Харьковского политехнического института. – Х. : ХПИ, 1989. – Вып. 16, № 264. – С. 5–8.

9. Веприк Ю.Н. Обобщенная математическая модель для анализа режимов работы энергосистем / Ю. Н. Веприк, М. П. Волчуков // Функционально ориентированные вычислительные системы : тезисы докл. Респ. научно-техн. конф. – Х.,1990. – С. 35–36.

10. Веприк Ю. Н. Математическое моделирование переходных процессов электрических систем в фазных величинах / Ю. Н. Веприк, М. П. Волчуков // Функционально ориентированные вычислительные системы : тезисы докл. Респ. научно-техн. конф. – Х., 1990. – С. 37–38.

11. Веприк Ю. Н. Обобщенный алгоритм анализа режимов электрических сетей / Ю. Н. Веприк // Вестник Харьковского политехнического института. – Х. : ХПИ, 1992. – Вып. 17, № 286.– С. 6–10.

12. Веприк Ю. Н. Дискретная математическая модель электромагнитных переходных процессов в электрической сети / Ю. Н. Веприк // Вестник Харьковского политехнического института. – Х. : ХПИ, 1992. – Вып. 17. – № 286. – С. 17–23.
13. Веприк Ю. Н. Комплекс программ для анализа нормальных и аварийных режимов электрических сетей / Ю. Н. Веприк // Вестник Харьковского политехнического института. – Х. : ХПИ, 1993. – Вып 18, № 14/93. – С. 11–14.
14. Веприк Ю. Н. Обобщенная математическая модель для анализа и диагностики режимов электрической сети / Ю. Н. Веприк // Компьютер: наука, техника, технология : тезисы докл. Междунар. научно-техн. конференции.– Х., 1993. – С. 49.
15. Веприк Ю. Н.. Моделирование несимметричных режимов электрических систем в фазных величинах / Ю. Н. Веприк, Х. Немри // Компьютер: наука, техника, технология : тезисы докл. Междунар. научно-техн. конференции.– Х., 1993. – С. 50.
16. Веприк Ю. Н. Математическое моделирование и диагностика несимметричных режимов электрических систем / Ю. Н. Веприк, Х. Немри. // Диагностика энергооборудования тезисы докл. Респ. научно-техн. конференции. – К., 1993. – С. 3.
17. Веприк Ю. Н. Алгоритм и программа анализа сложной несимметрии в электрических сетях в фазных величинах / Ю. Н. Веприк, В. Ю.Веприк, Х. Немри // Компьютер: наука, техника, технология, образование : тезисы докл. Междунар. научно-техн. конференции. – Х., 1994. – С. 54.
18. Веприк Ю. Н. Математическое моделирование и диагностика сложных несимметричных режимов электрических систем / Ю. Н. Веприк, В. Ю. Веприк, Х. Немри // Компьютер: наука, техника, технология, образование : тезисы докл. Междунар. научно-техн. конференции. – Х., 1994. – С. 55–56.
19. Веприк Ю. Н. Математическое моделирование и выбор средств симметрирования электропередач высокого напряжения в неполнофазных режимах / Ю. Н. Веприк, Х. Эль-Немри. – Деп. в ГНТБ Украины 12.08.96, № 1652-Ук96.
20. Веприк Ю. Н. Программная реализация обобщенной модели электрических сетей в стационарных режимах / Ю. Н. Веприк, Х. Эль-Немри, В. Ю.Веприк. – Деп. в ГНТБ Украины 12.08.96, № 1633-Ук96 10.
21. Веприк Ю. Н. Обобщенная математическая модель для анализа и диагностики электрических систем в стационарных режимах / Ю. Н. Веприк. – Деп. в ГНТБ Украины 23.10.96, № 1954-Ук96. 12.
22. Веприк Ю. Н. Распределение нагрузки между электростанциями по минимуму потерь мощности в сети / Ю. Н. Веприк, В. Ю. Веприк, А. В. Хорунжий // Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике: тезисы докл. Украинской научно-техн. конференции. – Х., 1996. – С. 15–17.
23. Веприк Ю. Н. Комплексная модель электрических систем в сложных несимметричных режимах / Ю. Н. Веприк, В. Ю.Веприк // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье : материалы Международн. научно-техн. конференции. – Х. ; Мишкольц ; Магдебург, 1996. – С. 111–112.
24. Веприк Ю. Н. Применение математических моделей в фазных координатах в задачах анализа и диагностики электрических сетей / Ю. Н. Веприк, Я. А. Скрипник // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: сборник научных трудов ХГПУ. Вып. 6. Харьков: 1998. – С. 484–487.
25. Веприк Ю. Н. Дискретные математические модели элементов электрических систем / Ю. Н. Веприк, В. Ю.Веприк // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: сборник научных трудов ХГПУ. – Вып. 6. – Харьков, 1998. – С. 479–483.
26. Веприк Ю. Н. Дискретные модели силовых трансформаторов в фазных координатах / Ю. Н. Веприк // Техническая электродинамика. – К. : ИЭД, 1999. – Тем. вып. 4 : Моделирование электронных, энергетических и технических систем. – С. 64–67.

27. Веприк Ю. Н. Комплексное моделирование электрических систем в стационарных режимах / Ю. Н. Веприк // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Х. : ХГПУ, 2000. – Вып. 112. – С. 22–27.
28. Керування режимами ОЕС України після виведення з роботи Чорнобильської АЕС: проблеми та шляхи вирішення / А. А. Мінченко, Ю.Н. Веприк, В.П. Моїсєєв, З.С. Хенкіна // Энергетика и Электрификация. –2001. – № 3. – С. 23–25.
29. Веприк Ю. Н. Методика и алгоритмы определения параметров элементов систем электроснабжения в фазных координатах / Ю. Н. Веприк, В. Ю. Веприк // Вестник национального технического университета “ХПИ”. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2003. – № 9. – С. 23–26.
30. Веприк Ю. Н. Исследование аварийных режимов распределительных сетей при однофазных замыканиях на землю / Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебеда // Вестник национального технического университета “ХПИ”. – Х. : НТУ “ХПИ”, 2003. – № 9. – С. 27–30.
31. Веприк Ю. Н. Електричне гальмування генераторів атомних електростанцій / Ю. Н. Веприк, А. А. Мінченко, Е. Н. Степа // Вестник национального технического университета “ХПИ”. – Х. : НТУ “ХПИ”, 2003. – № 21. – С. 27–30.
32. Веприк Ю. Н. Методика и алгоритмы определения параметров элементов электрических систем в фазных координатах / Ю. Н. Веприк, В. Ю. Веприк // Информационные технологии: наука, техника, технология: тезисы докл. XI Междунар. научно-практ. конференции. – Х., 2003. – С. 24.
33. Веприк Ю.Н. Исследование аварийных режимов распределительных сетей при однофазных замыканиях на землю / Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебеда // Информационные технологии: наука, техника, технология: тезисы докл. XI Междунар. научно-практ. конференции. – Х., 2003. – С. 24.
34. Веприк Ю.Н. Электрическое торможение генераторов атомных электростанций / Ю. Н. Веприк, А.А. Минченко // Информационные технологии: наука, техника, технология: тезисы докл. XI Междунар. научно-практ. конференции. – Х., 2003. – С. 24.
35. Лебеда С.Н. Получение дискретных моделей элементов сети неявным методом второго порядка численного решения дифференциальных уравнений / С.Н. Лебеда, Ю. Н. Веприк // Информационные технологии: наука, техника, технология: тезисы докл. XII Междунар. научно-практ. конференции. – Х., 2004. – С. 423.
36. Лебеда С. Н. Дискретные модели элементов электрической сети, полученные с использованием формулы второго порядка неявного метода Гира / С. Н. Лебеда, Ю. Н. Веприк // Вестник национального технического университета “ХПИ”. – Х. : НТУ “ХПИ”, 2004. – № 9, вып. 22 : Электроэнергетика и преобразовательная техника. – С. 21–26.
37. Веприк Ю. Н. Математическое моделирование переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью в фазных координатах / Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебеда, В. Ю. Веприк // Электротехника и электромеханика. – 2005. – № 3. – С. 74–77.
38. Веприк Ю. Н. Исследование электромагнитных переходных процессов в кабельных сетях 6 кВ при однофазных замыканиях на землю / Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебеда, В. Ю. Веприк // Энергетика и электрификация. – 2005. – № 9. – С. 27–32.
39. Сравнение расчета наведенного напряжения на отключенной ВЛ 110 кВ ‘Лисичанская 220–Горская’ с данными натуральных измерений / Минченко А. А., Веприк Ю. Н., Березка С. К., Сущенко Е. В. // Вестник национального технического университета “ХПИ”. – Х. : НТУ “ХПИ”, 2005. – № 35. – С. 9–13.
40. Веприк Ю. Н. Исследование длительных электромагнитных переходных процессов в электрических сетях 10 кВ. / Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебеда // Вісник Сумського державного університету. Сер. Технічні науки. – 2007. – № 4. – С. 64–70.

41. Вариант выполнения централизованного комплекса автоматики предотвращения нарушения устойчивости контролируемого района северной электроэнергетической системы / Минченко А. А., Веприк Ю. Н., Дружко В. И., Полух С. М. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Х. : НТУ «ХПІ», 2006. – № 28, тем. вип. : Електроенергетика і перетворююча техніка. – С. 97–100.

42. Веприк Ю. Н. Неполнореакторные режимы ВЛ 750 кВ ОЭС Украины / Ю. Н. Веприк, Д. Финк // Тези доповідей I Університетської наук.-практичної конф. магістрантів НТУ «ХПІ». – Х. : НТУ «ХПІ», 2007. – Т. 2. – С. 62–64.

43. Минченко А. А. Контроль изоляции конденсаторного типа неравновесно-компенсационным методом при неполнореакторном режиме электропередачи 750 кВ ОЭС Украины / А. А. Минченко, Ю. Н. Веприк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Х. : НТУ «ХПІ», 2007. – № 36, тем. вип. : Автоматика і приладобудування. – С. 76–79.

44. Веприк Ю. Н. Математическое моделирование электромагнитных переходных процессов методом фазных координат / Ю. Н. Веприк, С. В. Чмалъ // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2008. – Вип. 73 : Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження. – Т. 2. – С. 17–19.

45. Веприк Ю. Н. Перенапряжения в электрических сетях 6-35 кВ и современные средства их ограничения при замыканиях на землю / Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебедка, М. В. Петровський // Вісник Сумського державного університету. Сер. Технічні науки. – 2008 – № 4. – С. 59–69.

46. Довгаль С. А. Режимы нейтралей распределительных электрических сетей / С. А. Довгаль, Ю. Н. Веприк // III Університетська науково-практична конференція магістрантів Національного технічного університету «ХПІ»: тези доповідей : у 4-х ч. – Ч. 3. – Х. : НТУ «ХПІ», 2009. – С. 36–37.

47. Веприк Ю. Н. Коммутационные перенапряжения в электропередаче 750 кВ. / Ю. Н. Веприк, А. А. Минченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 4. – С. 17–20.

48. Веприк Ю. Н., Веприк В. Ю. Базовая модель электромеханических переходных процессов в электрических системах с несимметрией / Веприк Ю. Н., Веприк В. Ю. // Энергетика и Электрификация. – 2010. – № 6. – С. 14–21.

49. Веприк Ю. Н. Задача математического моделирования стационарных режимов электрических систем в обобщенной постановке / Ю. Н. Веприк // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 3. – С. 59–61.

50. Веприк Ю. Н. Базовая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией / Ю. Н. Веприк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 2. – С. 37–42.

У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, авторів належать:

[1] – математичні моделі електричних систем у стаціонарних і перехідних режимах на основі уніфікованих обчислювальних процедур – топологічного аналізу схем електричних систем, формування рівнянь із матрицями блокової структури, метод блокової факторизації; [3, 24, 25, 26, 35, 36] – розробка моделей елементів мережі, дискретні моделі елементів електричних систем і їхня уніфікація; [29, 32] – методика визначення параметрів елементів електричних систем у фазних координатах, склад необхідних даних і характеристик; [7, 22] – блочно-матрична структура рівнянь і метод рішення вузлових рівнянь зі слабозаповненими матрицями блокової структури; [8] – алгоритми декомпозиції й рішення систем рівнянь при поділі на підсистеми в симетричних і несиметричних режимах; [9, 23, 40] – математичні моделі елементів, структура моделі системи, виділення компонентної й топологічної інформації, топологічний аналіз схем; [15, 16, 17, 18, 39] – узагальне-

на постановка завдання математичного моделювання стаціонарних режимів електричних систем, структура й склад уніфікованих модулів; [19] – засоби симетрування неповнофазних режимів, алгоритм визначення параметрів симетруючих пристроїв; [10, 20, 44] – декомпозиція електричних систем до рівня трифазних багатополісників, форма подання моделей елементів на кроці розрахунку; [30, 33, 37, 38, 45, 46] – структура узагальненої математичної моделі електромагнітних перехідних процесів у системах з ізольованою нейтраллю, склад і функції компонентів моделі, уніфіковані обчислювальні процедури, форми подання результатів; [42, 43, 47] – структура узагальненої математичної моделі електромагнітних перехідних процесів у системах із заземленою нейтраллю, склад модулів і їхня взаємодія; [28, 31, 34, 41, 49] – структура узагальненої математичної моделі електромеханічних перехідних процесів у системах, розробка моделей обертових електричних машин у диференційній і дискретній формі, склад, функції й взаємодія модулів.

АНОТАЦІЇ

Вепрік Ю.М. Розвиток теорії і методів математичного моделювання режимів роботи електричних систем з несиметрією. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – Електричні станції, мережі та системи. – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2010.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми – розробці теоретичних основ, методів і засобів математичного моделювання електричних систем з простою і складною несиметрією в стаціонарних і перехідних режимах, що орієнтовані на сучасний рівень розвитку засобів обчислювальної техніки і забезпечують підвищення ефективності процесів як моделювання, так і розробки моделей таких систем. У роботі сформульовано і реалізовано узагальнений, системний підхід до завдань математичного моделювання стаціонарних і перехідних режимів електричних систем з несиметрією на основі узагальнених, багатфункціональних математичних моделей і макромоделювання у фазних координатах, розроблені і практично реалізовані методи, моделі і засоби, що дозволяють ставити і вирішувати широке коло завдань, які в рамках моделей, традиційно орієнтованих на спрощення завдання шляхом заміни реальних трифазних систем однофазними еквівалентами, не вирішуються або вирішуються лише приблизно. Розроблено базові математичні моделі, що дозволяють досліджувати стаціонарні режими, електромагнітні та електромеханічні перехідні процеси електричних систем довільного складу і структури з несиметрією будь-якого вигляду з урахуванням всіх основних впливаючих чинників.

Основні наукові і практичні результати роботи широко упроваджені у виробництво.

Ключові слова: електричні системи, складна несиметрія, фазні координати, перехідні процеси, стаціонарні режими.

Veprik Y.N. Development of theory and methods of mathematical design modes of operations of the electric systems with unsymmetry . – Manuscript.

Dissertation for getting of the scientific degree of doctor of technical sciences on speciality 05.14.02 “Electrical stations, nets and systems. Donetsk National Technical University, Donetsk, 2010.

Dissertation is devoted the decision of important scientific and technical problem – development of theoretical bases, methods and facilities of mathematical design of the electric sys-

tems with stand and by difficult unsymmetry in the stationary and transitional modes, oriented to the modern level of development of facilities of the computing engineering and providing the increase of efficiency of processes of both design and development of models of such systems. In-process formulated and realized the generalized, system going near the tasks of mathematical design of the stationary and transitional modes of the electric systems with unsymmetry on the basis of the generalized, multifunction mathematical models and macromodeling in phase coordinates, developed and methods, models and facilities, allowing to put and decide the wide circle of tasks, which within the framework of models, traditionally orientable on simplification of task substitutionally by monophasе equivalents the real three-phase systems, do not decide or decide only approximately, are practically realized. Base mathematical models, allowing to probe the stationary modes, are developed, electromagnetic and electromechanics transients of the electric systems of arbitrary composition and structure with unsymmetry of any kind taking into account all of basic influences.

Basic scientific and practical job performances are widely applied in industry.

Keywords: electric systems, difficult unsymmetry, phase co-ordinates, transients, stationary modes.

Веприк Ю.Н. Развитие теории и методов математического моделирования режимов работы электрических систем с несимметрией. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2010.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы – разработке теоретических основ, методов и средств математического моделирования электрических систем с простой и сложной несимметрией в стационарных и переходных режимах, ориентированных на современный уровень развития средств вычислительной техники и обеспечивающих повышение эффективности управления функционированием электрических систем, а также процессов как моделирования, так и разработки моделей таких систем. В работе сформулирован и реализован обобщенный, системный подход к задачам математического моделирования стационарных и переходных режимов электрических систем с несимметрией на основе обобщенных, многофункциональных математических моделей и макро моделирования в фазных координатах, разработаны и практически реализованы методы, модели и средства, позволяющие ставить и решать широкий круг задач, которые в рамках моделей, традиционно ориентируемых на упрощение задачи путем замены реальных трехфазных систем однофазными эквивалентами, не решаются или решаются лишь приближенно. Разработаны базовые математические модели, позволяющие исследовать стационарные режимы, электромагнитные и электромеханические, волновые переходные процессы электрических систем произвольного состава и структуры с несимметрией любого вида с учетом всех основных влияющих факторов.

Базовая математическая модель стационарных режимов электрических систем с несимметрией и реализующие ее программные средства обеспечивают возможность проведения всего комплекса исследований любых стационарных режимов (симметричных, несимметричных, с продольной, поперечной, с простой, сложной несимметрией), решения задач симметрирования и электромагнитного влияния на единой методической, алгоритмической, информационной основе, что снижает трудоемкость таких исследований, повышает их эффективность и точность получаемых результатов. Использование для исследования аварийных и эксплуатационных несимметричных режимов моделей на макро-

уровне в фазных координатах позволяет естественным образом отразить все виды несимметрии в матрицах параметров соответствующих элементов.

Базовая математическая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах на макроуровне в фазных координатах также многофункциональна, так как обеспечивает возможность моделирования переходных процессов при любых видах коммутаций (симметричных, несимметричных) и при наличии несимметричных элементов (продольных, поперечных) в любых количествах и сочетаниях, в сетях с заземленной, изолированной, резонансно- или резистивнозаземленной нейтралью.

Базовая математическая модель электромеханических переходных процессов в электрических системах позволяет воспроизводить как электромагнитные, так и электромеханические составляющие переходных процессов при наличии симметричных и несимметричных коммутаций и элементов. Реализация на основе макро моделирования в фазных координатах расширяет возможности модели по области применения, по точности, а также дает возможность включить в число учитываемых факторы, вообще не рассматриваемые в традиционных моделях электромеханических переходных процессов – перенапряжения, изменения частоты, неодновременность коммутации по фазам и др.

Разработанные математические модели и программные средства позволяют на качественно новом уровне решать целый ряд актуальных задач – выбор средств симметрирования и определение их параметров, оценка эффективности средств защиты (отключения КЗ, действие АПВ, АВР), разработка противоаварийных мероприятий и средств повышения устойчивости режимов.

Комплекс обобщенных базовых моделей электрических систем в стационарных режимах и переходных процессах разработан на единой алгоритмической и информационной основе, допускает дальнейшее развитие и может служить как средством решения широкого класса задач исследования режимов электрических систем, так и основой для разработки новых моделей.

Основные научные и практические результаты работы внедрены в производство, используются в практике проектирования и эксплуатации электрических систем, в учебном процессе.

Ключевые слова: электрические системы, сложная несимметрия, фазные координаты, переходные процессы, стационарные режимы.



Підп. до друку 26.10.2010 р. Формат 60 × 90 1/16. Папір офісний. Riso-друк.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,9. Наклад 100 прим.
Зам. № 13. Ціна договірна.

Видавець та виготовлювач ТОВ «Видавництво «Підручник НТУ «ХП»».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3656 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21