

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

НЕБЕРА ОЛЬГА ОЛЕКСІЇВНА



УДК 621.311.014

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ДВИГУННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Вепрік Юрій Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри передачі електричної енергії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій та систем

кандидат технічних наук, доцент
Буйний Роман Олександрович,
Чернігівський національний технологічний університет,
доцент кафедри електричних систем і мереж

Захист дисертації відбудеться «__» _____ 2016 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «__» _____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С.Ю.

Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Системи електропостачання промислових, транспортних підприємств, міст, сільського господарства та ін., а відповідно, і електрична система в цілому, містять значну частку електродвигунного навантаження у зв'язку з тим, що процеси виробництва та розподілу електричної енергії в енергосистемах, будь-який технологічний процес забезпечуються системами електричних машин (ЕМ).

Для споживачів з двигунним навантаженням навіть короточасні порушення електропостачання (перерви живлення, зниження напруги) призводять до аварійних ситуацій – неможливості самозапуску асинхронних двигунів (АД), порушення стійкості синхронних машин (СМ), зупинкам виробництва. При цьому порушення стійкості окремих двигунів може призвести до порушення стійкості всього вузла системи електропостачання. Ізоляція обмоток електродвигунів має найменші порівняно з іншими елементами електричної системи запаси міцності, тому перехідні процеси в системах електропостачання можуть призводити до неприпустимих для ізоляції електродвигунів перенапруг та складати передумови до появи аварійних ситуацій.

Запобігання негативних наслідків перехідних процесів в системах електропостачання доцільно забезпечити шляхом удосконалення засобів протиаварійного керування і захисту на основі результатів дослідження перехідних процесів. В той же час результати експлуатації свідчать про те, що значна частина аварій є наслідком того, що при проектуванні цих систем слід враховувати впливи перехідних процесів на двигунне навантаження та передбачувати відповідні протиаварійні заходи.

Викладені факти свідчать про те, що для вирішення задач забезпечення ефективного функціонування систем електропостачання на стадії їх проектування та експлуатації доцільним є подальший розвиток методів і засобів математичного моделювання перехідних процесів в системах електропостачання з двигунним навантаженням.

Таким чином, вдосконалення методів і засобів моделювання експлуатаційних і аварійних режимів роботи систем електропостачання, що дозволяють комплексно підійти до дослідження особливостей перехідних процесів в системах електропостачання та вибору засобів протиаварійного керування є науково-прикладним актуальним завданням, яке визначило напрям досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами та планами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» в рамках госпдоговірної НДР «Розробка математичних моделей для дослідження електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів в електричних мережах з вузлами двигунного навантаження» (ДР № 0114U002976, ПАТ «Укргідропроект», м.Харків), в якій здобувач була виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – аналіз режимів роботи систем електропостачання з двигунним навантаженням на основі вдосконалення методів та

засобів математичного моделювання перехідних процесів через рівняння у фазних координатах.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- аналіз і обґрунтування доцільності вдосконалення існуючих методів і засобів моделювання перехідних процесів у системах електропостачання;
- удосконалення математичної моделі перехідних процесів у системах електропостачання з двигунним навантаженням в фазних координатах для комплексного аналізу режимів роботи;
- формування та рішення інтегро-диференціальних рівнянь перехідних процесів для трифазних схем довільної конфігурації, що містять як статичні елементи, так і обертові електричні машини;
- розробка методів визначення параметрів електричних машин в фазних координатах за наявними каталожними даними;
- програмна реалізація розробленої моделі, дослідження перехідних процесів в реальних системах електропостачання з двигунним навантаженням для перевірки її достовірності.

Об'єкт дослідження – перехідні процеси в системах електропостачання 6-10 кВ, що містять вузли двигунного навантаження.

Предмет дослідження – моделювання перехідних процесів в трифазних системах електропостачання довільного складу і конфігурації.

Методи дослідження. В основу роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, що базується на фундаментальних положеннях теорії перехідних процесів в електричних системах та електричних машинах змінного струму. Диференціальні рівняння перехідних процесів отримані на основі вузлового методу, для чисельного інтегрування диференціальних рівнянь використано неявний метод Ейлера-Коші, для розрахунку початкового нормального режиму використовується метод Ньютона. Математичне моделювання процесів у системах електропостачання виконано на основі рівнянь у фазних координатах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- вдосконалено математичну модель перехідних процесів у вузлах з двигунним навантаженням на основі рівнянь у фазних координатах, що дозволяє відтворювати як електромагнітні, так і електромеханічні складові перехідних процесів в трифазних схемах довільної конфігурації;
- вдосконалено методику формування систем диференціальних рівнянь в фазних координатах для можливості використання їх стосовно до трифазних систем, що враховують великий діапазон постійних часу, наявність індуктивних і ємнісних елементів, обертових електричних машин, структуру і слабку заповненість матриць вузлових рівнянь, на відміну від відомих рівнянь для дво полюсних елементів;
- вперше отримані співвідношення між параметрами фаз і схем заміщення електродвигунів, що дозволили вирішити задачу визначення параметрів електродвигунів в фазних координатах за наявними каталожними даними. Елементи зворотніх матриць індуктивностей обертових електричних машин, які є періодичними функціями кутового положення ротора, отримані в аналітичній

формі, що забезпечує підвищення точності і стійкості обчислювальних процесів і зниження трудомісткості обчислення зворотних матриць на кроці чисельного інтегрування;

– вперше запропоновано метод визначення миттєвих значень частоти в електричних системах на основі узагальнених векторів параметрів режиму, що забезпечує можливість визначення та відтворення локальних миттєвих відхилень частоти під час перехідних процесів в системах електропостачання та який, на відміну від існуючих методів, не потребує фіксування моментів проходження сигналу через нуль.

Практичне значення отриманих результатів роботи для електроенергетичної галузі полягає в наступному:

– на основі розроблених методів і алгоритмів моделювання розроблено програмні засоби, що дозволяють проводити дослідження електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів при комутаціях (симетричні і несиметричні короткі замикання (КЗ), АПВ, перерви живлення, АВР та ін.) в електричних мережах з двигунним навантаженням при вирішенні задач вибору засобів протиаварійного керування і захисту;

– розроблена методика визначення параметрів елементів в фазних координатах за наявними каталожними даними;

– отримані моделі і програмні засоби відтворюють всі прояви перехідних процесів – кидки струмів при КЗ, перенапруги при їх відключенні, локальні відхилення частоти, змінення режимів роботи електродвигунів, дозволяють оцінити їх вплив на обладнання та ефективність рішень, що приймаються на стадії проектування та експлуатації.

Практична цінність підтверджена впровадженням результатів дисертаційної роботи в службах ПАТ «Укргідропроєкт» (м. Харків) та НВП «ХАРТРОН-ИНКОР» (м. Харків). Результати дисертаційної роботи використано в навчальному процесі кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» для підготовки студентів за спеціальністю 05070102 – «Електричні системи та мережі».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Серед них: дослідження сучасних методів та засобів математичного моделювання режимів електричних систем, розробка математичної моделі перехідних процесів у системах електропостачання з двигунним навантаженням в фазних координатах, розробка програмних засобів що забезпечують моделювання перехідних процесів при збурюючих і керуючих впливах, розрахунки перехідних процесів в реальних електричних системах, визначення шляхів удосконалення засобів моделювання та захисту.

Апробація роботи. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на: Міжнародному молодіжному форумі «Інтелектуальні енергосистеми» (Томськ, Росія, 2013); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, спеціалістів, аспірантів «Енергетика, енергозбереження на початку ХХІ століття» (Маріуполь, 2014); ХХІ, ХХІІ, ХХІІІ Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука,

техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2013, 2014, 2015), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПУ України» (Харків, 2015).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 10 наукових публікаціях, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях України (3 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 5 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, 4 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 170 сторінок, з них: 25 рисунків по тексту; 2 рисунки на 2 окремих сторінках; 3 таблиці по тексту; списку використаних джерел з 142 найменувань на 11 сторінках; 4 додатки на 28 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет досліджень, зазначено методи виконання досліджень, показано наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому розділі** виконано аналіз режимів роботи систем електропостачання з двигунним навантаженням (ЕПДН), причин порушення та вимог до надійності роботи.

Відзначено, що характерним і загальним для режимів роботи таких систем є:

- значну частину споживачів електроенергії становлять електродвигуни – елементи, найбільш чутливі до відхилень від нормальних умов електропостачання;
- через наявність електродвигунів, навіть при короткочасних порушеннях живлення електромеханічні перехідні процеси можуть призводити до серйозних порушень;
- ізоляція обмоток електродвигунів має найменші порівняно з іншими елементами запаси міцності, і електромагнітні перехідні процеси, що супроводжуються цілим рядом захисних і керуючих комутацій можуть призводити до неприпустимих для ізоляції електродвигунів перенапруг.

Виконано дослідження сучасних методів і засобів моделювання та аналізу режимів роботи систем електропостачання, яке приводить до висновку про те, що традиційний підхід до моделювання полягає у використанні безлічі моделей, кожна з яких відтворює окремі складові та етапи перехідних процесів. При такому підході розробка моделей спрощується, але обмежується достовірність одержуваних результатів.

Доцільним є використання методів і засобів моделювання на основі фазних координат. Проведено аналіз чинників, що перешкоджають впровадженню моделей в фазних координатах в практику моделювання: більший порівняно з іншими моделями обсяг пам'яті для зберігання параметрів елементів в фазних координатах; наявність періодичних коефіцієнтів в диференціальних рівняннях обертових електричних машин; відсутність даних про параметри елементів в фазних координатах; відсутність математичних моделей окремих елементів у фазній системі

координат; складність отримання та розв'язання інтегро-диференціальних рівнянь зі змінними параметрами і великим діапазоном постійних часу; існуючі традиції та чинні нормативні документи.

Доведено перспективи розвитку моделей перехідних процесів у системах електропостачання, що використовують метод фазних координат.

У **другому розділі** обґрунтовано підхід до розробки математичної моделі систем ЕПДН на основі рівнянь в фазних координатах і структурного моделювання, що забезпечує відповідність структури моделі й модельованого об'єкта.

Для реалізації структурного підходу, підвищення точності та ефективності моделі прийняті наступні положення:

- оскільки результати моделювання повинні відтворювати дійсну картину перехідних процесів, забезпечено можливість моделювання систем ЕПДН з урахуванням їх реальної конфігурації;

- моделі, що базуються на розділенні систем до рівня двополюсних R , L , C елементів призводять до великої кількості елементів в розрахункових схемах і застосовні до систем невеликого об'єму, тому в роботі при декомпозиції використано рівень не двополюсних, а трифазних елементів (ПЛ, КЛ, ЕМ, трансформатори), що представляються не схемами заміщення, а рівняннями в фазних координатах;

- при формуванні моделі використано вузловий метод, що забезпечує найменший порядок системи диференціальних рівнянь, однак для можливості застосування до трифазних схем виконано його подальший розвиток;

- для чисельного інтегрування рівнянь перехідних процесів прийнято неявний метод Ейлера-Коші, оскільки при його використанні забезпечується більш висока стійкість обчислювальних процесів.

Для реалізації структурного підходу до моделювання систем електропостачання з двигунним навантаженням потрібно, по-перше, отримати моделі трифазних елементів у вигляді диференціальних або інтегро-диференціальних рівнянь в фазних координатах і, по-друге, представити їх у формі, зручній для включення в модель системи – виконати апроксимацію рівнянь трифазних елементів дискретними рівняннями.

Рівняння статичних елементів електричної системи (ПЛ, КЛ, реактори, трансформатори, статичні навантаження) в загальному матричному вигляді отримані в роботах Вепріка Ю.М. та Лебедки С.М.

$$[L]_j^F \frac{d}{dt} [i]_j^F + [R]_j^F [i]_j^F = [u]_j^F, \quad (1)$$

де $[L]_j^F, [R]_j^F$ – матриці індуктивностей і активних опорів фаз, $[u]_j^F, [i]_j^F$ – вектор-стовпці напруг і струмів фаз, мають однаковий вигляд для всіх статичних елементів і відрізняються тільки порядком і структурою матриць параметрів.

Для подальшого розвитку математичної моделі перехідних процесів в системах ЕПДН запропоновано загальні рівняння статичних елементів доповнити рівняннями обертових ЕМ та включити їх у модель системи. В розділі отримані диференціальні та дискретні рівняння трифазних обертових ЕМ в фазних координатах і

представлені в уніфікованій формі, що забезпечує можливість алгоритмізації подальших етапів розробки моделі.

Диференціальні рівняння електромагнітних перехідних процесів в ЕМ (АД, СМ) містять індуктивності, що періодично змінюються при обертанні ротора. Якщо рівняння, наприклад, АД, представити у вигляді

$$\begin{bmatrix} L_C(\gamma) & L_{CP}(\gamma) \\ L_{PC}(\gamma) & L_P(\gamma) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_C \\ i_P \end{bmatrix} + \left(\omega \left[\frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \right] + \begin{bmatrix} r_C & \\ & r_P \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_C \\ i_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_C \\ u_P \end{bmatrix}, \quad (2)$$

(індекси С і Р відносяться відповідно до обмоток статора і ротора), для виразу в дужках прийняти позначення

$$\left(\omega \left[\frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \right] + \begin{bmatrix} r_C & \\ & r_P \end{bmatrix} \right) = |R_1|$$

і записати вираз (2) у вигляді $[L] \frac{d}{dt} [i] + [R_1] [i] = \begin{bmatrix} u_C \\ u_P \end{bmatrix}$, (3)

то рівняння (3) аналогічні рівнянням статичних елементів (1) і відрізняються лише тим, що елементи матриць індуктивностей фаз є періодичними функціями часу. Рівняння СМ також приводяться до вигляду (3) і відрізняються тільки структурою матриць параметрів.

Представлення в уніфікованій формі вихідних диференціальних рівнянь елементів дає можливість уніфікувати і процедури отримання дискретних рівнянь всіх елементів систем ЕПДН. На прикладі рівнянь АД для цього необхідно:

– отримані рівняння розв'язати відносно похідних

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_C \\ i_P \end{bmatrix} = -[L(\gamma)]^{-1} \left(\omega \left[\frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \right] + \begin{bmatrix} r_C & \\ & r_P \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_C \\ i_P \end{bmatrix} + [L(\gamma)]^{-1} \begin{bmatrix} u_C \\ u_P \end{bmatrix},$$

– перейти до різницевої апроксимації відповідно до формули Ейлера-Коші

$$\begin{bmatrix} i_C \\ i_P \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} i_C \\ i_P \end{bmatrix}^{(k)} - h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \left(\omega \left[\frac{dL(\gamma)^{(k+1)}}{d\gamma} \right] + \begin{bmatrix} r_C & \\ & r_P \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_C \\ i_P \end{bmatrix}^{(k+1)} + h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} u_C \\ u_P \end{bmatrix}^{(k+1)},$$

– розв'язати відносно струмів обмоток статора i_C і ротора i_P на $(k+1)$ -му кроці.

При цьому рівняння набувають вигляду:

$$\begin{bmatrix} i_C \\ i_P \end{bmatrix}^{(k+1)} = [Y(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} u_C \\ u_P \end{bmatrix}^{(k+1)} + [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} i_C \\ i_P \end{bmatrix}^{(k)}, \quad (4)$$

де

$$[A(\gamma)^{(k+1)}] = [E] + h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \left(\omega \left[\frac{dL(\gamma)^{(k+1)}}{d\gamma} \right] + \begin{bmatrix} r_C & \\ & r_P \end{bmatrix} \right), [Y(\gamma)^{(k+1)}] = h [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1}.$$

Рівняння (4) представлені у формі, зручній для включення їх в модель системи і дозволяють визначати струми фаз на поточному кроці чисельного інтегрування за параметрами режиму мережі на попередніх кроках. Рівняння СМ також отримані у формі (4).

Протягом досить тривалого часу єдиним засобом дослідження перехідних процесів в ЕМ були рівняння в координатах $d-q-0$ (рівняння Парка-Горєва). За умови, що при комутаціях зберігається симетрія параметрів мережі і швидкість обертання ЕМ залишається незмінною, результати моделювання за повними рівняннями Парка-Горєва досить точно відображають перехідні процеси в ЕМ і оцінкою достовірності результатів моделювання за рівняннями у фазних координатах може служити їх порівняння з результатами моделювання за рівняннями Парка-Горєва. Тому в роботі разом з моделюванням в фазних координатах виконано моделювання ЕМ і на основі рівнянь Парка-Горєва.

Для цього рівняння Парка-Горєва також представлені у прийнятій уніфікованій формі:

– для асинхронного двигуна

$$\begin{bmatrix} L_{c1} & & & & \\ & L_{c1} & & & \\ & & L_{p1} & & \\ L_{ad} & & & L_{p1} & \\ & L_{ad} & & & L_{p1} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_c & -\omega_k L_{c1} & & & \\ \omega_k L_{c1} & r_c & \omega_k L_{ad} & & \\ & -\omega_s L_{ad} & r_p & & \\ \omega_s L_{ad} & & \omega_s L_{p1} & r_p & \\ & & & r_p & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \\ u_{pd} \\ u_{pq} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

– для синхронної електричної машини

$$\begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & L_{aq} \\ L_{ad} & 0 & L_f & L_{ad} & 0 \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_D & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_d & -x_q & 0 & 0 & -x_{aq} \\ x_d & r_q & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

За прийятих умов рівняння Парка-Горєва мають вигляд такий же, як для статичних елементів, і відрізняються від них тільки порядком і структурою матриць коефіцієнтів.

Процедура отримання дискретних моделей ЕМ в фазних координатах відрізняється тим, що елементи матриць параметрів є періодичними функціями кутового положення ротора. Уніфікований алгоритм моделювання перехідних процесів ЕМ в фазних координатах відрізняється тільки тим, що індуктивності обмоток ЕМ змінюються при обертанні ротора і потребують визначення на кожному кроці обчислювального процесу.

В **третьому розділі** визначено склад необхідних каталожних даних і розроблені алгоритми визначення параметрів ЕМ в фазних координатах (Додаток Б), що необхідні для складання рівнянь перехідних процесів у ЕМ, а саме, власні і взаємні індуктивності обмоток статора і ротора $[L_C]$, $[L_P]$, $[L_{CP}]$ и $[L_{PC}]$.

Для асинхронних двигунів матриці $[L_{CP}]$ та $[L_{PC}]$ змінюються у функції кута повороту ротора γ і мають вигляд:

$$[L_{CP}] = L_{CP} \begin{bmatrix} \cos \gamma_A & \cos \gamma_B & \cos \gamma_C \\ \cos \gamma_C & \cos \gamma_A & \cos \gamma_B \\ \cos \gamma_B & \cos \gamma_C & \cos \gamma_A \end{bmatrix}, \quad [L_{PC}] = L_{PC} \begin{bmatrix} \cos \gamma_A & \cos \gamma_C & \cos \gamma_B \\ \cos \gamma_B & \cos \gamma_A & \cos \gamma_C \\ \cos \gamma_C & \cos \gamma_B & \cos \gamma_A \end{bmatrix},$$

де $\cos \gamma_A = \cos \gamma$, $\cos \gamma_B = \cos(\gamma + 120^\circ)$, $\cos \gamma_C = \cos(\gamma - 120^\circ)$.

Також отримані співвідношення між параметрами фаз і параметрами схем заміщення електродвигунів, що дозволили вирішити задачу визначення значень індуктивностей електродвигунів в фазних координатах у функції кута повороту ротора за наявними каталожними даними:

$$L_C = \frac{x_C + x_\mu}{\omega}, \quad L_P = L_C, \quad L_{CP} = \frac{2}{3} \frac{x_\mu}{\omega}, \quad (7)$$

де x_μ – індуктивний опір взаємоіндукції, x_C – реактивний опір обмотки статора.

Для синхронних двигунів елементи матриць індуктивностей також є функціями кута повороту ротора γ і, наприклад, матриця індуктивностей статора $[L_C]$ має вигляд

$$[L_C] = \begin{bmatrix} l_0 + l_2 \cos 2\gamma & m_0 + l_2 \cos(2\gamma - 2\pi/3) & m_0 + l_2 \cos(2\gamma + 2\pi/3) \\ m_0 + l_2 \cos(2\gamma - 2\pi/3) & l_0 + l_2 \cos(2\gamma + 2\pi/3) & m_0 + l_2 \cos 2\gamma \\ m_0 + l_2 \cos(2\gamma + 2\pi/3) & m_0 + l_2 \cos 2\gamma & l_0 + l_2 \cos(2\gamma - 2\pi/3) \end{bmatrix},$$

де значення елементів матриць l_0 , m_0 і l_2 потребують визначення. Як показано в розділі, ці значення знаходяться зі співвідношень:

– для неявнополюсного синхронного двигуна

$$l_0 = \frac{1}{3}(L_0 + 2L_d), \quad m_0 = \frac{1}{3}(L_0 - L_d), \quad (8)$$

– для явнополюсного синхронного двигуна

$$l_0 = \frac{1}{3}(L_0 + L_d + L_q), \quad m_0 = \frac{1}{6}(2L_0 - L_d - L_q), \quad l_2 = \frac{1}{3}(L_d - L_q), \quad (9)$$

де параметри L_0 , L_d , L_q визначаються за каталожними даними двигуна.

Формування дискретних рівнянь ЕМ у формі (4) вимагає обчислення і звернення матриці індуктивностей $[L(\gamma)^{(k+1)}]$ на кожному кроці, оскільки її елементи є періодичними функціями кута повороту ротора γ . Для підвищення ефективності обчислювальних процедур, матриці індуктивностей (прямі і зворотні) обмоток ЕМ у розділі 3 представлені в аналітичній формі за допомогою формул прямого й зворотного перетворення Парка-Горєва. Пряме перетворення полягає в тому, що для отримання матриці індуктивностей $[L]^\Pi$ в обертовій системі координат вихідна матриця $[L]^F$ множиться зліва на матрицю $[\Pi]$, а справа – на $[\Pi]^{-1}$

$$[L^\Pi] = [\Pi][L^F][\Pi]^{-1}. \quad (10)$$

З (10) отримано вираз для матриці індуктивностей в фазних координатах

$$[L^F] = [\Pi]^{-1}[L^\Pi][\Pi] \quad (11)$$

Елементи матриць перетворення Парка $[\Pi]$ і $[\Pi]^{-1}$ відомі з науково-технічної літератури. Всі елементи матриці $[L^\Pi]$ знаходяться за каталожними даними ЕМ. Формули визначення зворотних матриць дозволяють отримати зворотну матрицю індуктивностей ЕМ

$$[L^F]^{-1} = [\Pi]^{-1}[L^\Pi]^{-1}[\Pi]. \quad (12)$$

– рівняння для електромеханічних складових – струми в статорних і роторних обмотках двигунів, електромагнітні моменти, швидкості обертання, кутові положення роторів двигунів:

$$\begin{aligned} [i_C]^{(k+1)} &= [Y_C][u_C]^{(k+1)} + [Y_C][u_C]^{(k)} + [A_C][i_C]^{(k)} + [A_{CP}][i_P]^{(k)}, \\ [i_P]^{(k+1)} &= [Y_{PC}][u_C]^{(k+1)} + [Y_{PC}][u_C]^{(k)} + [A_{PC}][i_C]^{(k)} + [A_P][i_P]^{(k)}, \\ M_E &= \frac{1}{2}[i_C]^{(k+1)T} [L_{CP}]' i_P^{(k+1)} + \frac{1}{2}[i_P]^{(k+1)T} [L_{PC}]' [i_C]^{(k+1)}, \\ \omega^{(k+1)} &= \omega^{(k)} + \frac{h}{J}(M_{EM} - M_M), \\ \gamma^{(k+1)} &= \gamma^{(k)} + h \cdot \omega^{(k+1)}. \end{aligned} \quad (16)$$

У числі елементів, рівняння яких формуються в диференційній і дискретній формах на кроці розрахунку, в моделі передбачені: ПЛ та КЛ; силові трансформатори, режим нейтралі яких може бути заданий; джерела живлення із заданими напругами (ЕРС) фаз; вузли статичного навантаження індуктивного або ємнісного характеру; обертові ЕМ.

Системи диференціальних рівнянь перехідних процесів ЕМ включають рівняння руху ротора

$$J \frac{ds}{dt} = M_{EM} - M_M,$$

де J – момент інерції, M_M, M_{EM} – механічний і електромагнітний момент ЕМ, s –

ковзання

$$s = \frac{\omega_C - \omega_D}{\omega_C},$$

для визначення якого повинні бути відомі як частота обертання двигунів ω_D , так і миттєві значення частоти у вузлах підключення двигунів до мережі ω_C на кожному кроці чисельного інтегрування.

Що стосується частоти, то під час перехідних процесів вектори напруг мережі змінюються як за модулем, так і за фазою, і це призводить до зміни частоти у вузлах мережі ω_C при незмінній частоті на шинах джерела (локальні зміни миттєвих значень частоти). Тому для підвищення точності моделювання перехідних процесів в системах ЕПДН значення частоти необхідно мати на кожному кроці чисельного інтегрування. Відомі алгоритми вимірювання частоти, засновані на фіксуванні моментів проходження сигналу через нуль і визначенні частоти за періодом зміни контрольованого параметра, вимагають, щоб обробка дискретних миттєвих значень була виконана, як мінімум, протягом одного періоду, не дають миттєвих значень частоти і потребують удосконалення.

Вдосконалення алгоритмів обробки первинних даних в напрямку підвищення їх швидкодії і точності реалізовано шляхом переходу від миттєвих значень параметрів режиму трифазної системи до їх узагальнених векторів, що обертаються відносно початку координат з частотою мережі. Миттєві значення струмів фаз визначаються проекціями узагальненого вектора на три осі фаз, зміщені на кут $2\pi/3$:

$$i_A = I \cos \alpha, \quad i_B = I \cos(\alpha - 2\pi/3), \quad i_C = I \cos(\alpha + 2\pi/3), \quad (17)$$

де α – кут зміщення узагальненого вектора відносно осі фази A . Сума квадратів проекцій

$$i_A^2 + i_B^2 + i_C^2 = I^2 (\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha - 2\pi/3) + \cos^2(\alpha + 2\pi/3)) = \frac{3}{2} I^2,$$

звідки модуль і кут зміщення узагальненого вектора відносно осі фази A :

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)}, \quad \alpha = \arccos \frac{i_A}{I}. \quad (18)$$

При переході до узагальнених векторів задача визначення такого параметра, як миттєва частота, спрощується. Для цього по співвідношеннях (18) визначається модуль $I(t_1)$, $I(t_2)$ і кут α_1 і α_2 узагальненого вектора в моменти часу t_1 і t_2 , відповідні, наприклад, поточному і попередньому крокам дискретизації. Тоді поточне миттєве значення частоти, дорівнюватиме

$$\omega = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}. \quad (19)$$

Локальні зниження частоти у системах електропостачання, як показує практика експлуатації, можуть бути причиною неправильної роботи пристроїв АЧР. Реалізація даного методу визначення миттєвої частоти в розробленій моделі дозволяє відтворювати локальні зміни частоти при комутаціях в системі (рис. 1). і забезпечити правильну настройку засобів протиаварійної автоматики на основі більш точного моделювання.

Методика дослідження перехідних процесів реалізована у вигляді програми AnFaz3, що забезпечує аналіз електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів в системах ЕПДН довільної конфігурації і з різним режимом нейтралі при симетричних і несиметричних ушкодженнях і комутаціях.

Для забезпечення більш високої точності одержуваних результатів до розрахунку безпосередньо перехідних процесів в програму включені модулі, що забезпечують розрахунки параметрів елементів мережі в фазних координатах, а для задання початкових умов виконується розрахунок вихідного нормального режиму мережі методом Ньютона.

Всі етапи моделювання – розрахунок параметрів елементів, формування систем диференціальних рівнянь, чисельне інтегрування рівнянь, підготовка результатів – реалізовані програмно.

У п'ятому розділі наведені результати досліджень перехідних процесів в реальних системах з вузлами двигунного навантаження, що виникають при симетричних і несиметричних комутаціях в мережі.

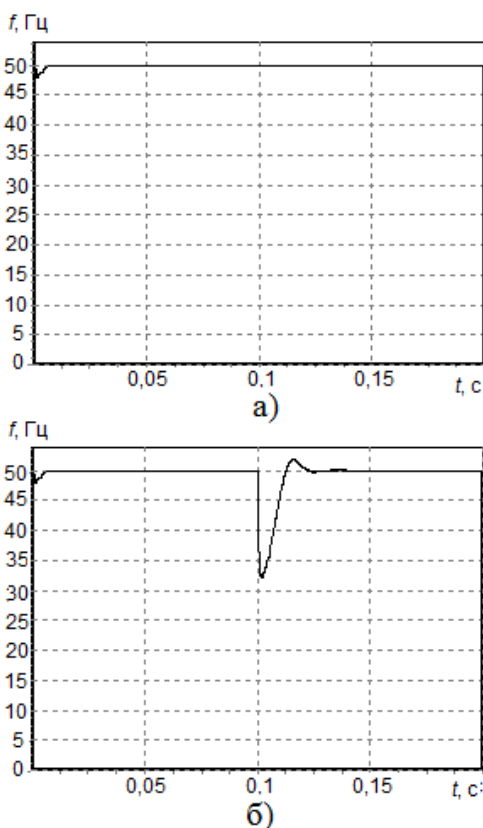


Рисунок 1 – локальні відхилення частоти у вузлах мережі – частота на шинах джерела живлення (а), частота в місці комутації (б)

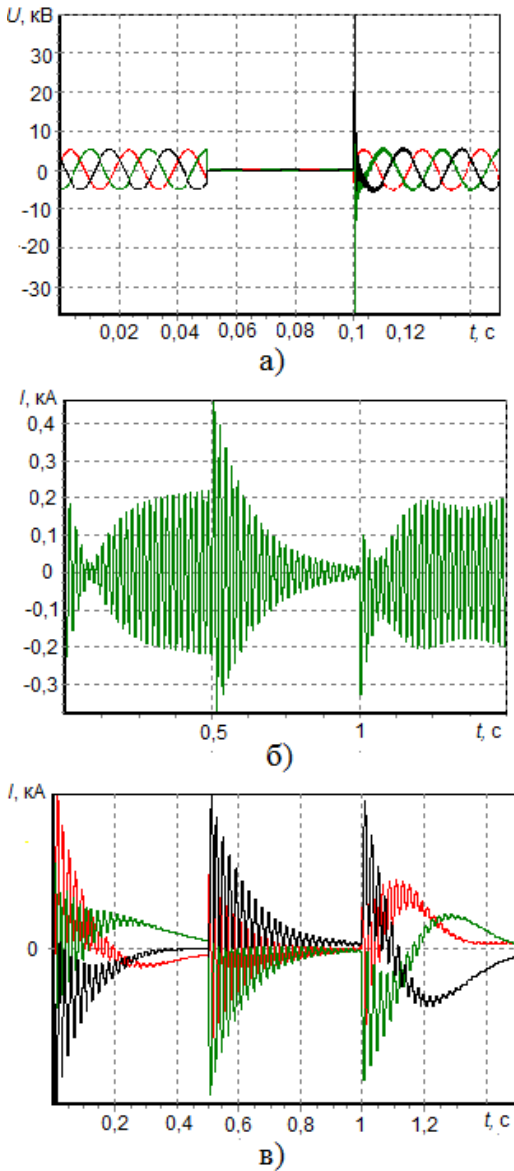


Рисунок 2 – напруги фаз на шинах ПС (а), струми фаз статора (б) і ротора (в) АД

збереженні незмінної частоти на шинах джерела живлення. Відключення КЗ при наявності в мережі індуктивних і ємнісних елементів супроводжуються перенапругами (рис. 4, в).

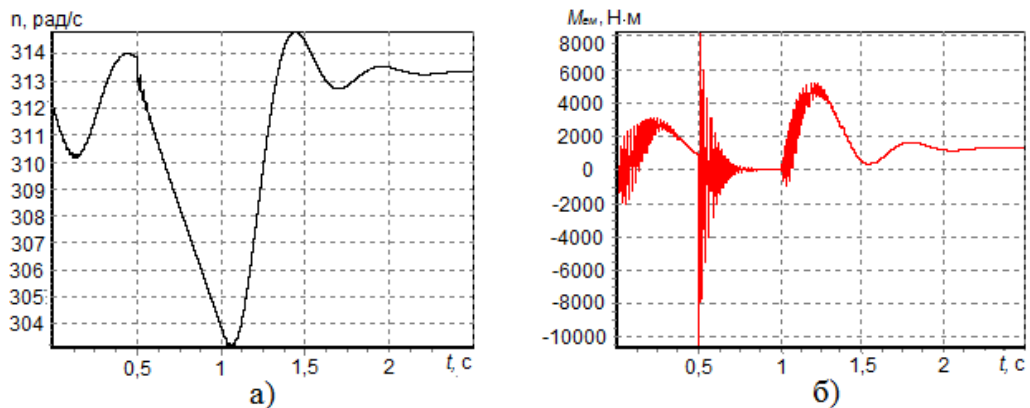


Рисунок 3 – швидкість обертання ротора (а) та момент електромагнітний АД (б)

В якості несиметричних комутацій виконано дослідження несиметричних КЗ і замикань фази на землю, в якості симетричних – короточасні перерви живлення, робота АВР і включення резервного джерела, відключення навантаження вакуумними вимикачами. На рис. 2 – 3 представлені цифрограми перехідних процесів в двигунах і електричній мережі при короточасному (на 0.5с) відключенні живлячої кабельної лінії. На цифрограмах перші 0.5с – перехідний процес до встановлення початкових умов, наступні 0.5с – перерва живлення та потім – час до закінчення заданого часу розрахунку перехідного процесу. На кроці чисельного інтегрування визначаються миттєві значення напруг у вузлах (рис. 2, а), по ним знаходяться струми фаз в елементах мережі та в обмотках двигунів (рис. 2, б, в), відтворюються електромагнітні моменти і швидкості обертання двигунів (рис. 3), що дозволяє визначити гранично допустиму тривалість перерви живлення та враховувати її при виборі й налаштуванні пристроїв АВР, оцінити вплив тривалості перехідних процесів на електродвигуни, а також використовувати результати розрахунку для оцінки механічних впливів на ізоляцію обмоток.

При симетричних КЗ в системах ЕПДН (рис. 4) поява небалансу моментів і потужностей також призводить до локального зниження частоти в розрахунковій частині схеми при

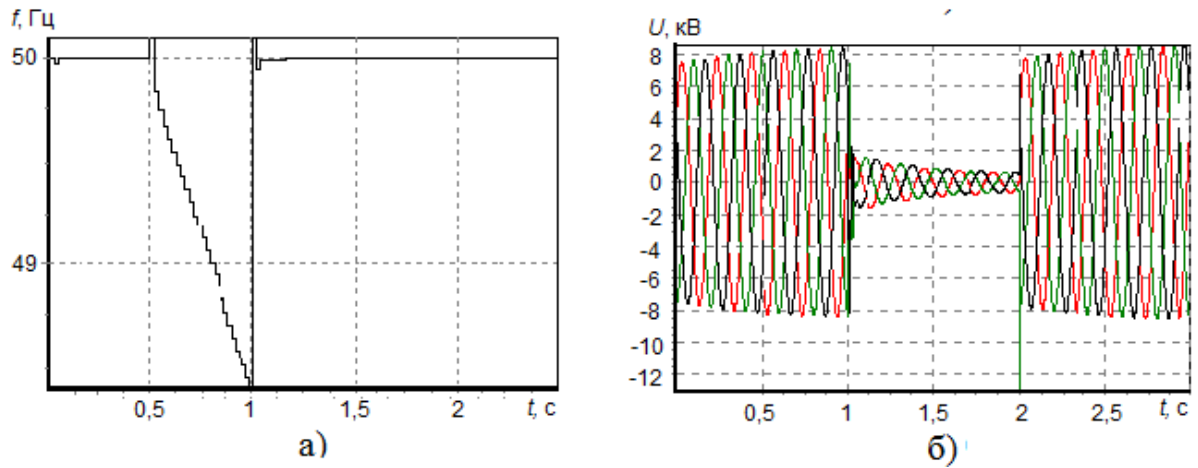


Рисунок 4 – локальні відхилення частоти (а), напруги фаз при відключенні КЗ (б)

В якості несиметричних комутацій виконано дослідження однофазних замикань на землю (рис. 5). При однофазних замиканнях вплив електромагнітної складової перехідних процесів на елементи мережі характеризується тим, що напруга непошкоджених фаз зростає до лінійної, високочастотні складові струмів і напруг призводять до додаткових перенапруг.

Важливо відзначити, що за наявності узагальненої моделі і картина перехідних процесів виходить більш обґрунтованою. Зокрема, моделювання перехідних процесів в електродвигунах з відтворенням процесів і в електричній мережі дає можливість визначити зміни вузлових напруг під час перехідного процесу як за модулем, так і за фазою.

Та обставина, що розроблена модель в фазних координатах забезпечує відтворення всіх складових перехідних процесів, підтверджує її ефективність і свідчить на користь розробки і застосування таких моделей.

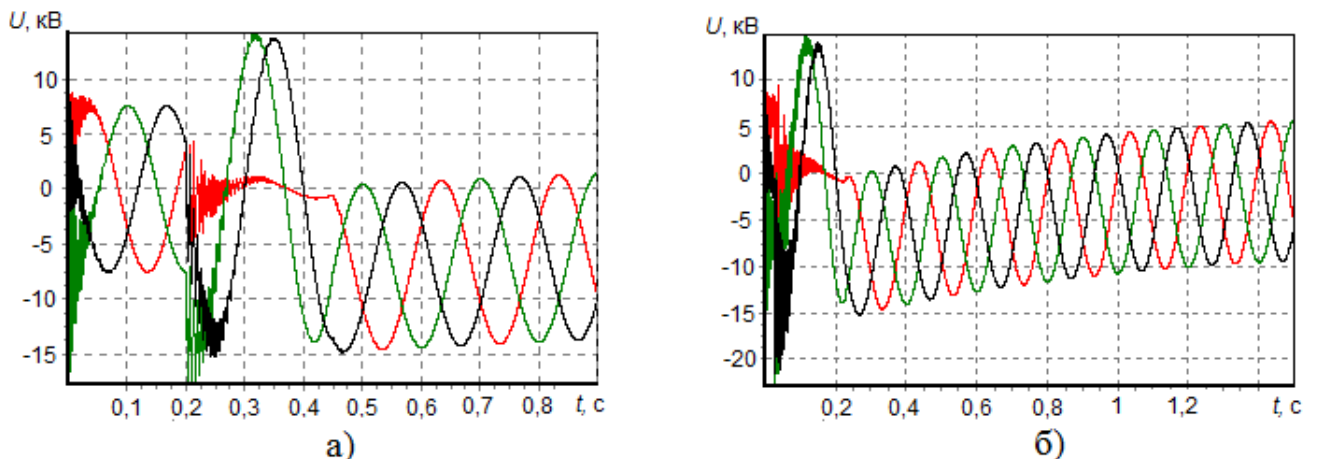


Рисунок 5 – напруги фаз в точці замикання при ОЗЗ і його відключенні

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу вдосконалення методів і засобів моделювання режимів функціонування систем електропостачання з двигунним навантаженням за рахунок відтворення електромагнітних і електромеханічних складових перехідних процесів.

Виконані розробки є внеском у розвиток теорії і методів дослідження перехідних процесів, що дає можливість вирішувати задачі вибору протиаварійних заходів і дозволяє зробити наступні висновки:

1. Виконано аналіз сучасних методів моделювання систем електропостачання, що засновані на відтворенні окремих складових перехідних процесів і обґрунтовано доцільність вдосконалення засобів моделювання, що дозволить підвищити точність результатів дослідження, об'єктивно оцінювати ступінь впливу аварійних перехідних процесів на обладнання й істотно розширити коло задач, що вирішуються при виборі засобів протиаварійного керування.

2. Розроблено узагальнену математичну модель режимів роботи системи електропостачання з двигунним навантаженням в фазних координатах, що орієнтована на можливості сучасних ЕОМ, яка моделює реальну трифазну мережу, її конфігурацію і трифазні елементи з індуктивними, ємнісними, змінними параметрами, забезпечує моделювання як електромагнітних, так і електромеханічних складових перехідних процесів, врахування електричних мереж зовнішнього і внутрішнього електропостачання. Отримана модель дозволяє відтворювати локальні зміни частоти, зниження напруги, перенапруги як в елементах мережі, так і в електричних машинах.

3. Отримали подальший розвиток і реалізовані у вигляді обчислювальних процедур методи формування та рішення систем диференціальних та інтегродиференціальних рівнянь для трифазних елементів, які враховують основні особливості модельованих систем та дають можливість проводити розрахунки сталих та аварійних режимів роботи.

4. Розроблені метод та алгоритм визначення та підвищення точності розрахунку параметрів електричних машин, засновані на використанні наявних каталожних даних і додаткових співвідношень, які дозволяють однозначно вирішувати задачу визначення параметрів електричних машин.

5. Розроблено програмні засоби, що дозволяють вирішувати задачі протиаварійного керування систем електропостачання на якісно новому рівні, оскільки забезпечують отримання всіх потрібних кількісних характеристик перехідних процесів в рамках однієї моделі, алгоритмізацію та автоматизацію всіх основних етапів моделювання. На основі чисельних експериментів зроблено оцінку достовірності результатів, отриманих за допомогою удосконаленої узагальненої математичної моделі. Збіг чисельних результатів з експериментальними даними свідчить про те, що можливості моделі дозволяють досить повно і достовірно відобразити дійсну картину фізичних процесів, що супроводжують перехідні процеси в системах електропостачання з двигунним навантаженням.

6. Результати наукових досліджень, а також практичних розробок, які виконані у дисертаційній роботі, втілені в проектну та експлуатаційну практику ПАТ «Укргідропроект», НВП «Хартрон-Инкор», а також в навчальний процес кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХП» для підготовки студентів за спеціальністю 05070102 – «Електричні системи і мережі».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ганус О.А. (Небера О.А.). Параметры электрических машин в математических моделях узлов двигательной нагрузки / Ю.Н. Веприк, О.А. Ганус // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №59 (1032). – С. 40 – 46.

Здобувачем розроблено алгоритм отримання прямих та зворотніх матриць індуктивностей електричних машин для можливості отримання їх параметрів у системі фазних координат.

2. Ганус О.А. (Небера О.А.). Контроль частоты в задачах математического моделирования и управления режимами электрических систем / Ю.Н. Веприк, О.А. Ганус // Електротехніка і електромеханіка. – 2014 р. – №1. – С. 62 – 64.

Здобувачем запропоновано виконати перехід від миттєвих значень параметрів режиму до представлення їх узагальненими векторами в задачах визначення та реєстрації частоти.

3. Небера О.А. Расчётные схемы электрических систем в переходных процессах и их эквивалентные преобразования / Ю.Н. Веприк, О.А. Небера // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2015 р. – №1. – С. 69 – 73.

Здобувачем виконаний розрахунок параметрів переходного процесу та аналіз результатів при представленні мережі повними та спрощеними схемами заміщення.

4. Небера О.А. Унифицированные модели элементов систем электроснабжения на основе уравнений в фазных координатах / Ю.Н. Веприк, О.А. Небера // Електротехніка і електромеханіка. – 2015 р. – №6. – С. 56 – 60.

Здобувачем розглянуто методи математичного моделювання елементів електричних систем та запропоновано алгоритм моделювання окремих елементів системи електропостачання.

5. Небера О.А. Моделирование систем электроснабжения с двигательной нагрузкой в переходных режимах / Ю.Н. Веприк, О.А. Небера // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015 р. – №6/1 (26). – С. 55 – 59.

Здобувачем запропоновано метод математичного моделювання систем електропостачання в перехідних режимах у системі фазних координат, що забезпечує можливість представлення мережі довільної конфігурації.

6. Ганус О.А. (Небера О.А.). Алгоритмы моделирования элементов электрических систем неявными методами / Ю.Н. Веприк, О.А. Ганус // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ, 29 – 31 травня 2013 р. – Харків, 2013. – С. 183.

Здобувачем запропоновано алгоритм отримання дискретних рівнянь елементів електричних систем в фазних координатах за допомогою неявного метода Ейлера-Коші.

7. Ганус О.А. (Небера О.А.). Математическое моделирование элементов электрических систем в фазных переменных неявными методами / Ю.Н. Веприк, О.А. Ганус // Интеллектуальные энергосистемы: материалы I Международного молодёжного форума, 21 – 25 октября 2013 г. – г. Томск, 2013. – Т.1, с. 24-28.

Здобувачем досліджено можливості використання фазної системи координат у задачах моделювання електричних систем та представлено диференційні рівняння елементів систем та виконано їх апроксимацію.

8. Ганус О.А. (Небера О.А.). Моделирование узлов двигательной нагрузки в фазных переменных / Ю.Н. Веприк, О.А. Ганус // Энергетика, энергозбереження на початку XXI століття: Сб. тезисов докладов Всеукраинской научно-практической конференции молодых учёных, специалистов, аспирантов, 20 марта 2014 г. – Мариуполь, ГВУЗ «ПГТУ», 2014. – С. 42.

Здобувачем виконано аналіз сучасних методів моделювання перехідних процесів та доведено необхідність розвитку моделей на основі рівнянь у фазних координатах.

9. Ганус О.А. (Небера О.А.). Необходимость совершенствования моделей электрических систем с двигательной нагрузкой / Ю.Н. Веприк, О.А. Ганус // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ, 21 – 23 травня 2014 р. – Харків, 2014. – С. 208.

Здобувачем доводиться необхідність вдосконалення методів і засобів математичного моделювання систем електропостачання.

10. Небера О.А. Эквивалентирование расчётных схем электрических систем в переходных процессах / Ю.Н. Веприк, О.А. Небера // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ, 20 – 22 травня 2015 р. – Харків, 2015. – С. 141.

Здобувачем доводиться необхідність використання реальної конфігурації мережі у задачах моделювання перехідних процесів.

АНОТАЦІЇ

Небера О.О. Вдосконалення методів і засобів моделювання систем електропостачання з двигунним навантаженням. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2016 р.

Дисертацію присвячено розробці математичних моделей систем електропостачання з двигунним навантаженням, що дозволяє відтворювати як електромагнітні, так і електромеханічні складові перехідних процесів в трифазних схемах довільної конфігурації.

В роботі проведено аналіз сучасного стану проблеми та існуючих методів і засобів моделювання систем електропостачання, вперше розроблена математична модель перехідних процесів на основі рівнянь в фазних координатах для систем електропостачання зі статичними елементами та обертовими електричними машинами. Вдосконалено методи формування та рішення систем диференційних рівнянь в фазних координатах стосовно до трифазних систем, запропоновано метод визначення параметрів елементів в фазних координатах, отримані в аналітичній формі елементи зворотних матриць індуктивностей обертових електричних машин.

Вперше запропоновано метод визначення локальних відхилень частоти в електричних системах, що забезпечує підвищення швидкодії та ефективності засобів вимірювання та діагностики.

Ключові слова: система електропостачання, перехідні процеси, фазні координати, коротке замикання, двигунне навантаження, математичне моделювання.

Небера О.А. Совершенствование методов и средств моделирования систем электроснабжения с двигательной нагрузкой. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – НТУ «ХПИ». – Харьков, 2016.

Диссертация посвящена разработке математических моделей систем электроснабжения с двигательной нагрузкой, позволяет воспроизводить как электромагнитные, так и электромеханические составляющие переходных процессов в трехфазных схемах произвольной конфигурации.

Узлы двигательной нагрузки, а вместе с ними и системы электроснабжения, содержащие такие узлы, являются одним из наиболее чувствительных к нарушениям электроснабжения элементов. Предотвращение отрицательных последствий таких нарушений может быть обеспечено только путем совершенствования средств противоаварийного управления и защиты на основе результатов моделирования переходных процессов.

Показано, что уровень развития современных методов и средств исследования режимов работы систем электроснабжения с двигательной нагрузкой не соответствует изменениям, которые произошли за последние десятилетия как в самих системах, так и в условиях их эксплуатации. В то время, как для решения целого ряда задач обеспечения эффективного функционирования систем электроснабжения на стадии их проектирования и эксплуатации необходимо дальнейшее развитие методов и средств математического моделирования переходных процессов в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой. Следует также отметить, что и возможности современных ЭВМ позволяют перейти к более полным и точным моделям на основе уравнений в фазных координатах.

В работе впервые разработана математическая модель переходных процессов на основе уравнений в фазных координатах для систем электроснабжения со статическими элементами и вращающимися электрическими машинами, которая отображает как электромагнитные, так и электромеханические составляющие переходных процессов в трехфазных схемах произвольной конфигурации.

В качестве уровня декомпозиции принят уровень трёхфазных элементов, которые представлены уравнениями в фазных координатах. На основе узлового метода получены интегро-дифференциальные уравнения вращающихся электрических машин и статических элементов систем электроснабжения с двигательной нагрузкой. С использованием неявного метода Эйлера-Коши получены дискретные уравнения переходных процессов на шаге численного интегрирования, которые связывают параметры режима на текущем и предыдущих

интервалах времени. Полученные уравнения представлены в унифицированной форме, обеспечивающей возможность алгоритмизации последующих этапов разработки модели.

Определен состав исходных данных и разработаны алгоритмы определения параметров электрических машин в фазных координатах. Для повышения эффективности вычислительных процедур, получены в аналитической форме элементы обратных матриц индуктивности вращающихся электрических машин.

Выполнена программная реализация математической модели системы электроснабжения с двигательной нагрузкой в переходных режимах, которая обеспечивает анализ переходных процессов в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой произвольной конфигурации и с различным режимом нейтрали при симметричных и несимметричных повреждениях и коммутациях

В числе элементов, уравнения которых формируются в дифференциальной и дискретной формах на этапе расчета, в модели предусмотрены: воздушные и кабельные линии, силовые трансформаторы, режим нейтрали которых может быть задан, источники питания с заданными напряжениями фаз, узлы статической нагрузки индуктивного или емкостного характера, вращающиеся электрические машины, средства регулирования.

Для повышения точности моделирования переходных процессов в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой значение частоты необходимо иметь на каждом шаге численного интегрирования. Предложен метод определения локальных отклонений частоты в электрических системах, путем перехода от мгновенных значений параметров режима трехфазной системы к их обобщенным векторам, обеспечивающий повышение быстродействия и эффективности средств измерения и диагностики.

С помощью полученной модели выполнены исследования переходных процессов в реальных системах с узлами двигательной нагрузки, возникающие при симметричных и несимметричных коммутациях в сети, которые показали её высокую достоверность и эффективность.

Ключевые слова: система электроснабжения, переходные процессы, фазные координаты, короткое замыкание, двигательная нагрузка, математическое моделирование.

Nebera O.O. Improvement of methods and tools for simulation electric power supply systems with motor load. Manuscript.

The thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.14.02 – power plants, networks and systems. – National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to the development of mathematical models of electric power supply systems with motor load that allows to reproduce electromagnetic and electromechanical components of transients in three-phase circuits of arbitrary configuration.

In the work current state of the problem, existing methods and tools for simulation of power supply systems were analyzed, first time a mathematical model of transients based

on equations in phase coordinates for power supply systems with static elements and rotating electrical machines was developed. Methods of forming and solutions of differential equations in phase coordinates in relation to three-phase systems were improved, method for determining parameters of elements in phase coordinates was proposed, elements of inverse matrices inductance of rotating electric machines in an analytical form were received.

First time the method of determining local frequency variations in the electrical systems which provides to increase speed and efficiency of measurement and diagnostic devices was proposed.

Key words: electric power supply system, transients, phase coordinates, short circuit, motor load, mathematical simulation.

