

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Шеїна Ганна Олександрівна *АШеїна*

УДК 621.313.3

**УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ
ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ РАПТОВИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ З
УРАХУВАННЯМ НАСИЧЕННЯ**

Спеціальність: 05.09.01 – Електричні машини і апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового степеня
кандидата технічних наук

Донецьк – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електричних систем Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» МОН України, м. Донецьк.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Ларін Аркадій Михайлович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» МОН України,
доцент кафедри «Електричні системи», м. Донецьк.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Заблудський Микола Миколайович,
Донбаський державний технічний університет МОН України,
перший проректор з навчальної роботи, м. Алчевськ;

кандидат технічних наук, доцент
Шевченко Валентина Володимирівна,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут» МОН України,
доцент кафедри «Електричні машини».

Захист відбудеться «20» березня 2014 р. о 13¹⁵ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д11.052.02 при ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 8 навчальний корпус, ауд. 8.514.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 2 навчальний корпус.

Автореферат розісланий “ ____ ” лютого 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 11.052.02, д. т. н., професор



В.П. Кондрахін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні вимоги в області експлуатаційної надійності електроенергетичних систем в умовах застосування високовикористовуваних турбогенераторів (ТГ) з підвищеними питомими електромагнітними навантаженнями потребують поглибленого вивчення поведінки синхронних генераторів при аномальних режимах, пов'язаних, в першу чергу, з виникненням значних струмів при коротких замиканнях (КЗ). Достовірне визначення поведінки в перехідних режимах електричних машин (ЕМ) залежить від точності їх математичних моделей, а також повноти інформації, яка характеризує фізичні властивості синхронних машин (СМ).

Підвищення точності дослідження перехідних процесів в високовикористовуваних турбогенераторах може бути досягнуто тільки у тому випадку, якщо їх математичні моделі будуть відображати реальні електромагнітні зв'язки з достатньою повнотою і, зокрема, враховувати складні явища магнітного насичення, а також витіснення струму в обмотках і масивних конструктивних елементах ротора. Для дослідження перехідних режимів роботи турбогенераторів за диференціальними рівняннями, в цьому випадку, важливо встановити характер залежностей параметрів електричної машини від насичення магнітних кіл по шляхах основного магнітного потоку і потоків розсіювання. Труднощі розрахункового визначення параметрів з використанням теорії електромагнітного поля пов'язані з наявністю в магнітопроводі масивних елементів, контактів по торцях ротора, а також присутністю матеріалів, які мають складні форми поверхонь і мають різні електротехнічні властивості.

Державний стандарт на випробування електричних машин ДСТУ ГОСТ 10169-77 «Машини електричні трифазні синхронні. Методи випробувань» передбачає для експериментального визначення електромагнітних параметрів турбогенераторів з урахуванням багатоконтурності роторів досліди раптового трифазного короткого замикання. Теоретичні положення цього методу ґрунтуються на спрощеній математичній моделі електричної машини, яка була розроблена ще в 70-і роки минулого століття.

У зв'язку з цим є актуальною задача розвитку теоретичних положень методу експериментального визначення електромагнітних параметрів турбогенераторів у формі частотних характеристик (ЧХ) або еквівалентних багатоконтурних схем заміщення, які відображають явища насичення, за даними параметрів режиму раптового трифазного короткого замикання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота безпосередньо пов'язана з плановою науковою тематикою кафедри електричних систем ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Дослідження, результати яких приведені в дисертації, пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт Д-8-03 (№ Держреєстрації 0103U001324) – «Розвиток теорії моделювання електричних машин змінного струму при аномальних режимах в енергосистемі»; Н-17-05 – «Удосконалення математичного, інформаційного і програмного забезпечення систем керування і діагностики електроенергетичних об'єктів»; Н-17-08 – «Удосконалення методів стабілізації режимів електричних систем», в яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення точності аналізу електромагнітних перехідних процесів в турбогенераторах при раптових трифазних коротких замиканнях шляхом удосконалення їх математичних моделей в напрямку врахування впливу одночасно як багатоконтурності масивних роторів, так і явища насичення шляхів магнітних потоків.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішувалися наступні задачі:

1. Розвиток методу експериментального визначення частотних характеристик провідностей з боку обмотки статора турбогенератора за даними вимірювання параметрів перехідного режиму при раптовому трифазному короткому замиканні на виводах електричної машини, який передбачений діючим в Україні галузевим стандартом ГОСТ-10169-77.

2. Розробка методу визначення електромагнітних параметрів обмотки збудження і масивного ротора турбогенератора в схемі заміщення, в якій враховується різниця взаємного індуктивного магнітного зв'язку між обмотками статора, збудження й еквівалентними контурами демпферної системи, для підвищення точності розрахунків струмів в обмотці збудження генераторів при трифазних коротких замиканнях.

3. Проведення експериментальних досліджень для встановлення узагальнених аналітичних залежностей параметрів еквівалентних схем заміщення різних турбогенераторів від величини початкового значення періодичної складової струму короткого замикання, які відображають явище магнітного насичення шляхів потоків розсіювання.

4. Розробка алгоритму і методики моделювання перехідних процесів при трифазних коротких замиканнях з урахуванням насичення магнітопроводу по шляхах потоків розсіювання турбогенераторів при використанні схем заміщення з різним магнітним зв'язком між обмотками при представленні масивного ротора довільною кількістю еквівалентних контурів.

5. Оцінка ефективності запропонованих у роботі математичних моделей и методик.

Об'єкт дослідження – електромагнітні перехідні процеси в турбогенераторах під час раптових трифазних коротких замикань.

Предмет дослідження – математичні моделі, які відображають вплив багатоконтурності роторів та насичення шляхів магнітних потоків розсіювання в динамічних режимах роботи.

Методи досліджень. В роботі використовуються і розвиваються ідеї і методи, які базуються на теорії комплексно–операторного аналітичного опису перехідних процесів, методи математичного моделювання за диференційними рівняннями; а також методи математичного аналізу, оснований на властивостях перетворення Лапласа і інтеграла Фур'є. Для уточнення математичної моделі турбогенераторів в режимі раптових трифазних коротких замикань застосовувався метод просторових комплексів і частотних характеристик. Визначення параметрів еквівалентних схем заміщення виконувалося на основі методів теорії синтезу лінійних електричних кіл. Оцінка ефективності й достовірності отриманих в роботі результатів виконувалася шляхом зіставлення результатів розрахунків за запропонова-

ною методикою з даними експериментів на промислових турбогенераторах.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Запропоновано новий підхід до експериментального визначення частотних характеристик провідностей з боку обмотки статора синхронних машин за даними дослідів раптового трифазного короткого замикання, який відрізняється від передбаченого діючим стандартом ГОСТ 10169-77, врахуванням фазових зсувів між окремими вільними періодичними складовими струму статора в початковий момент перехідного процесу.

2. Розроблено метод визначення електромагнітних параметрів обмотки збудження і масивного ротора турбогенератора в схемі заміщення, в якій враховується різниця взаємного індуктивного магнітного зв'язку між обмотками статора, збудження і еквівалентними контурами демпферної системи, який відрізняється врахуванням комплексних значень коефіцієнта розподілу струму статора в обмотці збудження.

3. Вперше отримані узагальнені аналітичні залежності параметрів еквівалентних схем заміщення турбогенераторів серії ТВВ від величини початкового значення періодичної складової струму короткого замикання, які відображають явища магнітного насичення шляхів потоків розсіювання.

4. Удосконалена методика моделювання електромагнітних перехідних процесів при трифазних коротких замиканнях з урахуванням насичення магнітопроводу по шляхах потоків розсіювання турбогенераторів в напрямку використання схем заміщення з різним магнітним зв'язком між обмотками при представленні масивного ротора довільною кількістю еквівалентних контурів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблена методика уточненого визначення частотних характеристик провідностей з боку обмотки статора синхронних машин, дозволяє знизити похибки за рахунок виключення систематичної помилки, яка властива стандартній методиці, що рекомендується діючим в Україні галузевим стандартом ГОСТ 10169-77 «Машини електричні трифазні синхронні. Методи випробувань».

2. Отримані аналітичні залежності параметрів схем заміщення з різною взаємодукцією між обмотками статора, збудження і контурами демпферної системи в функції початкового значення періодичного струму статора дозволяють виконувати уточнені розрахунки струмів в обмотках статора і збудження при трифазних коротких замиканнях з урахуванням впливу насичення шляхів магнітних потоків розсіювання.

3. Розроблено комплекс програм для ПЕОМ, який дозволяє за даними реєстрації миттєвих значень струмів в обмотках статора і збудження визначати частотні характеристики синхронних машин, виконувати синтез багатоконтурних еквівалентних схем заміщення, а також виконувати математичне моделювання електромагнітних перехідних процесів за диференційними рівняннями або аналітично при раптових трифазних коротких замиканнях з урахуванням насичення магнітної системи.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методики уточненого визначення частотних характеристик синхронних машин за даними дослідів раптового трифазного короткого замикання прийняті до використання на державному підприємстві.

ві завод „Електроважмаш” (м. Харків), для визначення електромагнітних параметрів і частотних характеристик турбогенераторів. Теоретичні результати роботи впроваджені також в навчальний процес ДВНЗ „Донецький національний технічний університет” при читанні лекцій з курсу “Електромагнітні перехідні процеси в електричних системах”.

Особистий внесок здобувача: розроблено метод визначення електромагнітних параметрів обмотки збудження для схем заміщення уточненої структури; одержані узагальнені аналітичні залежності параметрів схем заміщення уточненої структури від початкового значення періодичної складової струму короткого замикання; запропонована уточнена методика для визначення частотних характеристик турбогенераторів за даними дослідів раптового трифазного короткого замикання.

Апробація результатів дисертації. Основні результати виконаних в дисертації досліджень доповідалися і обговорювалися: на Міжнародному симпозіумі “Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика” (SIEMA-2004), (2004 р., м. Харків); на III Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційна техніка і електромеханіка” (ITEM-2005), (2005 р., м. Луганськ); на Міжнародній науково-технічній конференції „Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації” (2005 р., м. Кременчук); на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об’єктів електричних систем - 2008» (КРЕС-2008), (2008р., м. Донецьк); на Семінарі Наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» (2005р., м. Донецьк); на III Міжнародній конференції молодих вчених ERECS-2011 “ Енергетика та системи керування”, (2011 р., м. Львів).

Публікації. За результатами вирішених у роботі завдань надруковано 10 наукових робіт, серед яких 6 в провідних наукових фахових виданнях України, одна у зарубіжному виданні.

За матеріалами дисертації опубліковано 10 наукових робіт, з яких 6 – у фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого МОН України, в тому числі: 2– в наукових журналах, 4 – у збірниках наукових праць; 1 – у зарубіжному науковому журналі англійською мовою; 3 – в тезах конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації складає 152 сторінки друкованого тексту, з них: 40 рисунків за текстом; 23 таблиці за текстом, 2 таблиці на 1 окремій сторінці; 122 найменування використаних літературних джерел на 14 сторінках; 2 додатки на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз методів ідентифікації параметрів турбогенераторів і моделювання раптових коротких замикань з урахуванням насичення» виконаний критичний аналіз методів ідентифікації електромагнітних параметрів (ЕМП) турбогенераторів й математичного моделювання режимів коротких замикань з урахуванням впливу насичення.

В області математичного моделювання ЕМ проведені значні дослідження,

які відображені в наукових трудах Є.Я. Казовського, Я.Б. Данилевіча, В.І. Важнова, І.М. Постнікова, Л.Г. Маміконянца, Ю.А. Шумілова, В.Й. Чабана, В.Ф. Сивокобиленка, Г.Г. Рогозіна, С.В. Смоловіка, Д.Й. Родькіна, О.П. Чорного і багатьох ін.

Сучасні турбогенератори мають підвищенні електромагнітні навантаження, що ускладнює врахування впливу масиву ротора та явище насичення. При використанні традиційних методів розгляду перехідних процесів врахування цих факторів призводить до значних труднощів через збільшення порядку диференціальних рівнянь. Врахування вказаних факторів на основі розрахунку електромагнітного поля складно і в умовах експлуатації електричних машин практично не реалізується. Найбільш зручні узагальнені характеристики ЕМ відносно входів і виходів як елемента системи. Саме такими є частотні характеристики вхідних провідностей (опорів) машини, які відображають спільний вплив цих факторів.

Аналіз показав, що для дослідження перехідних процесів і підвищення точності розрахунку струму в обмотці збудження синхронних машин доцільно використовувати схему заміщення з різним взаємним індуктивним зв'язком між обмоткою збудження (ОЗ) і демпферними контурами при одночасному представленні демпферної системи довільною кількістю контурів по кожній осі симетрії ротора. Така схема заміщення по поздовжній осі представлена на рис.1.

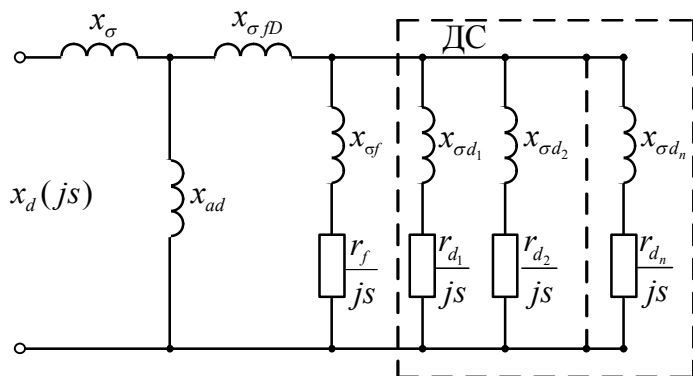


Рисунок 1 - Схема заміщення СМ по осі d з урахуванням різного магнітного зв'язку між контурами і багатоконтурності ДС

На практиці важливо врахувати реальний стан машини і реальний розподіл магнітних потоків, з урахуванням таких факторів, як рівень насичення, температура і т.п.. Тому особливий інтерес дослідники приділяють експериментальним методам визначення параметрів, таких як дослід раптового трифазного короткого замикання (РТКЗ), які дозволяють визначати сукупність характеристик і параметрів машин з урахуванням насичення в реальних умовах роботи генераторів.

Сформульовані задачі досліджень дисертаційної роботи.

У другому розділі «Розвиток методу визначення електромагнітних параметрів синхронних машин з урахуванням багатоконтурності ротора за даними дослідів раптового трифазного короткого замикання» уточнюється математична модель раптового ТКЗ СМ та на її підставі удосконалюється метод, передбачений ДСТУ ГОСТ 10169-77, що дозволяє підвищити точність визначення електромагнітних параметрів і ЧХ провідності з боку обмотки статора з урахуванням багатоконтурності ротора.

Виконані в роботі для синхронних генераторів різних конструктивних виконань та потужностей дослідження щодо впливу на перехідні процеси під час ТКЗ таких чинників, як: наявність струму подвійної частоти, обертання поля, яке утворене аперіодичною складовою, а також наявність роторних контурів, елект-

ромагнітні постійні часу яких сумірні з напівперіодом синхронної частоти, дозволили довести необхідність представлення вихідної інформації в дослідах РТКЗ у вигляді узагальненого вектора перехідного струму статора. Частота дискретизації вимірів фазних струмів за допомогою цифрових реєстраторів, в цьому випадку, має складати 5 кГц і більше.

У відповідності до п.25.1 ГОСТ – 10169-77 параметри машини по поздовжній осі ротора необхідно визначати за перехідною функцією, яка є зміненням огинаючої вільного періодичного струму якоря в досліді РТКЗ. Математична модель в цьому випадку, є аналітичним виразом для фазних струмів. Наприклад, для фази А обмотки статора при РТКЗ з режиму неробочого ходу він має вигляд:

$$i_A(t) = (I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_d^k e^{-t/T_d^k}) \cos(\omega t + \gamma_0) + I_{am} \cos(\gamma_0) e^{-t/T_a}, \quad (1)$$

де $I_{d\infty}$, I_d^k , I_{am} - сталий, початкові значення k -ої експоненціальної складової вільного періодичного струму й аперіодичної складової фазного струму; T_d^k , T_a - постійні часу затухання вільних струмів; n - кількість експонент, яка дорівнює кількості контурів, що враховується на роторі по поздовжній осі; γ_0 - кут між осью фази А статора і осью d ротора у момент КЗ; ω - частота обертання ротора.

Перехідному періодичному струмові в (1) відповідає наступний вираз для визначення ЧХ провідності з боку обмотки статора $y_d(js)$ за стандартною методикою

$$y_d(js) = I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_d^k \frac{js}{js + \alpha_d^k} = I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_d^k \frac{js}{js + 1/T_d^k} \quad (2)$$

або

$$y_d(js) = \frac{1}{x_d(js)} = \frac{1}{x_d} + \sum_{k=1}^n \frac{js}{x_d^k js + r_d^k}. \quad (3)$$

Індуктивні й активні опори, які входять в (3) визначаються за параметрами експонент:

$$x_d = \frac{1}{I_{d\infty}}; \quad x_d^k = \frac{1}{I_d^k}; \quad r_d^k = \frac{x_d^k}{\omega \cdot T_d^k}.$$

З (3) випливає, що геометричним місцем точок комплексних провідностей окремих еквівалентних роторних контурів $I_d^k \frac{js}{js + \alpha_d^k}$ є окружності, діаметри яких визначаються початковими значеннями відповідних експоненційних складових I_d^k , які апроксимують періодичний струм статора. Тоді можна дати наступну графічну інтерпретацію (рис. 2) стандартної методики визначення ЕМП з дослідів РТКЗ на основі частотної характеристики $y_d(js)$.

З аналізу рис.2 видно, що алгоритм стандартної методики ґрунтується на тому, що початкові значення складових перехідного струму статора при РТКЗ відповідають нескінченному ковзанню ротора, тобто визначають діаметри відповідних ЧХ. Тоді

$$y_d(js)_{s=\infty} = I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_d^k. \quad (4)$$

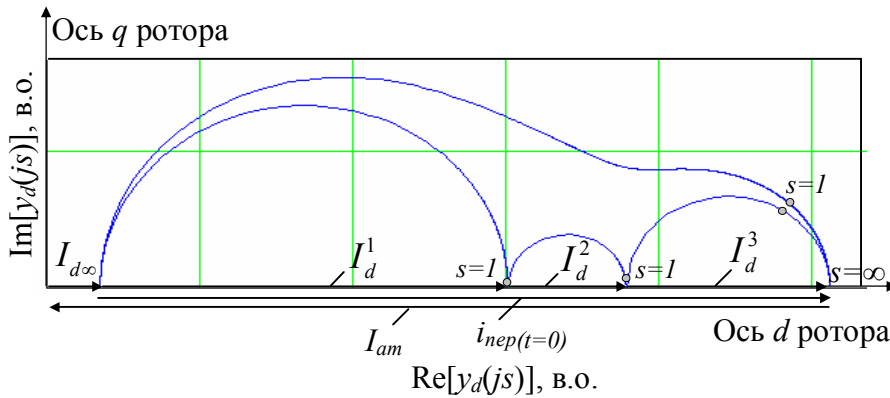


Рисунок 2 – Комплексні провідності еквівалентних роторних контурів

Змінення модульного значення узагальненого вектора струму статора було одержано на підставі розв'язання диференційних рівнянь Парка-Горєва, для заданих параметрів схем заміщення СМ.

На рис. 3 наведені розраховані згідно методики стандарту за отриманими в результаті апроксимації значеннями I_d^k , T_d^k (2) ЧХ для досліджуваних генераторів (крива 1 – модельний турбогенератор МТ-30, крива 3 – промисловий турбогенератор ТГВ-200М, крива 5 – синхронний генератор СГ-18,75). Там же показані ЧХ для вихідних параметрів роторних контурів заступних схем (крива 2 – МТ-30, крива 4 – ТГВ-200М, крива 6 – СГ-18,75).

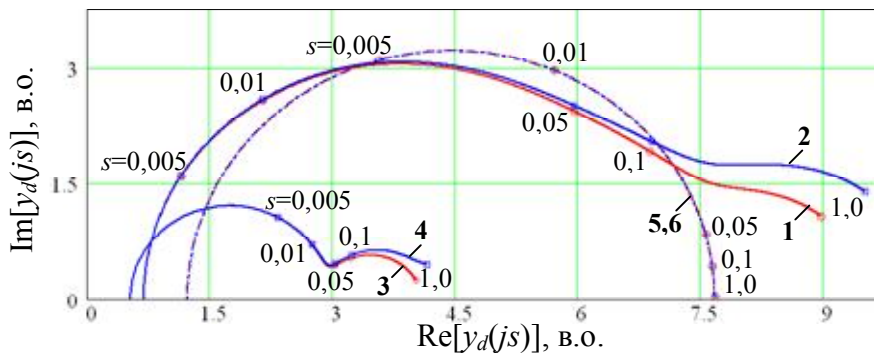


Рисунок 3 - Частотні характеристики синхронних генераторів

Аналіз вихідних і отриманих шляхом математичного моделювання ЧХ показав, що у відповідності до стандартної методики розрахунків частотних характеристик безпосередньо за результатами апроксимації перехідних функцій призводить до систематичної похибки. Дійсні та уявні складові, а також модульні значення комплексів струмів розрахованих провідностей завжди є менш ніж вихідні. При цьому доведено, що величина похибки тим більше, чим менше значення постійних часу експоненційних складових, які апроксимують періодичний струм статора, тобто чим більше уявна складова комплексу ЧХ при $s = 1$.

Для розробки уточненої методики визначення ЕМП турбогенераторів в роботі було використано відому математичну модель, основу на аналітичному опису змінення узагальненого вектора струму статора при РТКЗ на затисках СМ, яка отримана на підставі встановлених зв'язків між ЧХ і складовими перехідного струму. Цей вираз є розв'язання з похибкою не більш ніж 2-3% диференційних рівнянь Парка-Горєва.

Оцінка похибки визначення ЧХ за координатами перехідного режиму при раптовому ТКЗ на затисках обмотки статора за стандартною методикою була виконана шляхом проведення математичного ідеалізованого експерименту.

Закон зміни у часі узагальненого вектора струму РТКЗ на виводах СМ з режиму неробочого ходу, або ввімкнення її до мережі при $s = 0$ и $\delta_0 = 0$ можна описати наступним виразом:

$$\dot{i}_s(t) = (I_{d\infty} + \sum_{k=1}^N I_d^k \cdot e^{-\frac{t}{T_d^k}} + j \sum_{l=1}^M I_q^l \cdot e^{-\frac{t}{T_q^l}}) \cdot e^{j\omega t} + (I_{1cpm} e^{j\phi_{1cp}} \cdot e^{j\omega_a t} + \Delta I_{1m} e^{j\phi_{\Delta 1}} \cdot e^{-j2\omega t}) \cdot e^{-t/T_a} \quad (5)$$

де I_{1cpm} , ϕ_{1cp} - модуль і аргумент аперіодичної складової відповідно; ΔI_{1m} , $\phi_{\Delta 1}$ - амплітуда та аргумент струму подвійної частоти; T_a , ω_a - постійна часу і частота обертання аперіодичної складової струму статора.

Вираз для миттєвих значень фазних струмів буде мати наступний вигляд:

$$\dot{i}_A(t) = \text{Re}[\dot{i}_s(t) \cdot e^{j\gamma_0}]; \quad \dot{i}_B(t) = \text{Re}[\dot{i}_s(t) \cdot e^{j(\gamma_0 - \frac{2}{3}\pi)}]; \quad \dot{i}_C(t) = \text{Re}[\dot{i}_s(t) \cdot e^{j(\gamma_0 + \frac{2}{3}\pi)}] \quad (6)$$

Графічні побудови для визначення початкових значень складових узагальненого вектора струму статора для генератора типу МТ-30 з режиму неробочого ходу ($\delta_0 = 0$) відповідно з (5) показані на рис.4.

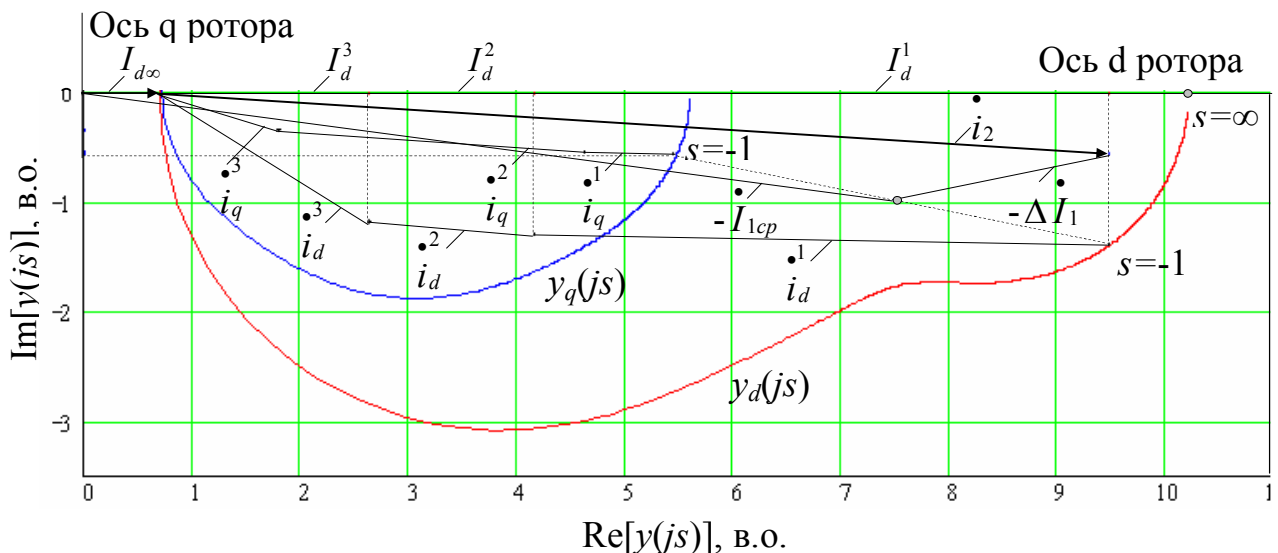


Рисунок 4 – Визначення складових перехідного струму статора при РТКЗ на виводах генератора МТ-30

Як виходить із зіставлення рис. 3 і рис. 4 дійсне модульне значення повного періодичного струму i_2 , відповідає ковзанню $s = -1$, яке використовується в стандартній методиці для визначення надперехідного опору x_d'' , менше значення провідності СГ по поздовжній осі при $s = \infty$, яка визначає дійсне значення останнього. Цим і пояснюється невідповідність алгоритму визначення ЕМП за стандартною методикою точній математичній моделі СМ.

Тому для розрахунку ЧХ початкові значення складових I_{dan}^k , отриманих в результаті апроксимації вільного періодичного струму неможна безпосередньо використовувати для розрахунку ЧХ за (2). Їх необхідно попередньо перерахувати до частоти струмів в роторі $s = \infty$.

У розділі розроблена методика уточненого визначення частотних характеристик синхронних машин за даними РТКЗ.

Умови проведення дослідів РТКЗ мають відповідати вимогам ДСТУ і вра-

ховувати рекомендації в частині постановки експериментів. В дослідях необхідно реєструвати миттєві значення трьох фазних струмів статора і струм в обмотці збудження. У попередньому режимі вимірюються значення напруг на обмотках статора і струм збудження. В сталому режимі КЗ необхідно зафіксувати сталий струм статора $I_{d\infty}$.

Реєстрація всіх величин повинна виконуватися за допомогою спеціалізованих цифрових реєстраторів. Частота дискретизації змінення в початковій стадії перехідного процесу ($0 < t < 0,1с$) повинна відповідати 5 кГц.

За даними вимірювань миттєвих струмів в трьох фазах визначаються значення модуля узагальненого вектора перехідного струму статора для різних моментів часу:

$$I_{son}(t_l) = \sqrt{\frac{2}{3}(i_a^2(t_l) + i_b^2(t_l) + i_c^2(t_l))}, \quad l=1,2,\dots,n, \quad (7)$$

де n - кількість вимірювань перехідних струмів.

Апроксимацію кривої змінення модуля узагальненого вектора струму статора для знаходження параметрів експоненційних складових вільного періодичного струму необхідно виконувати числовими методами, виходячи з умови мінімальної похибки апроксимації експериментальної кривої. Для цього можуть бути використані спеціальні функції прикладного математичного пакету MathCAD, які визначають мінімум критерію якості:

$$J(\bar{\alpha}) = \sum_{i=1}^m \left(\text{Mod}[i_s(\bar{\alpha}, t_i)] - I_{son}(t_i) \right)^2, \quad (8)$$

де $\bar{\alpha}$ - вектор параметрів перехідного струму, що синтезуються і входять у вираз (5), крім сталого струму КЗ, який визначається безпосередньо за даними експерименту: $I_d^k, T_d^k, I_{1cpm}, \phi_{1cp}, \omega_a, \Delta I_{1m}, \phi_{\Delta 1}, T_a$.

Таким чином, в результаті виконання процедури апроксимації визначаються значення $I_d^k, T_d^k, I_{1cpm}, \phi_{1cp}, \omega_a, \Delta I_{1m}, \phi_{\Delta 1}$ і T_a , які входять в праву частину рівняння (5), при яких модуль правої частини цього рівняння, що розраховується, мінімально відрізняється від модуля експериментально отриманої у відповідності до (7) лівої частини ($I_{son}(t)$) для всіх заданих значень часу.

Із співвідношення (5) маємо, що теоретично за даними досліду РТКЗ можливо визначення параметрів експоненційних складових вільного періодичного струму і відповідних ЧХ як по поздовжній, так і по поперечній осях ротора. Однак, як показали виконані дослідження, при КЗ з режиму неробочого ходу поперечна складова практично не впливає на перехідний струм статора. Це слідує також із аналізу рис. 4, з якого видно, що складова по поперечній осі приблизно в 15 разів менше поздовжньої. Тому, похибка у визначенні перехідної функції поперечного струму може бути істотною. Оскільки вплив цієї складової незначний, то з похибкою, що не перевищує 0,3 % для процедури апроксимації доцільно використовувати спрощений вираз для узагальненого вектора струму статора:

$$\dot{i}_s(t) = (I_{d\infty} + \sum_{k=1}^N I_d^k \cdot e^{-\frac{t}{T_d^k}}) \cdot e^{j\omega t} + (I_{1cpm} e^{j\phi_{1cp}} \cdot e^{j\omega_a t} + \Delta I_{1m} e^{j\phi_{\Delta 1}} \cdot e^{-j2\omega t}) \cdot e^{-t/T_a} \quad (9)$$

Таким чином, за даними апроксимації модуля узагальненого вектора струму статора функцією (9) знаходяться початкові значення і коефіцієнти загасання (постійні часу) експоненційних складових періодичного струму I_{dan}^k , $\alpha_{dan}^k = 1/T_{dan}^k$ по поздовжній осі ротора, які, як видно з рис.4, є проекціями векторів комплексних провідностей відповідних роторних контурів при $s = -1$ на поздовжню вісь ротора.

Зважаючи, що значення I_{dan}^k відповідають ковзанню $s = \infty$, знаходяться вектори відповідних комплексних провідностей при $s = -1$:

$$y_{dan}^k(js)_{s=-1} = I_{dan}^k \frac{-j}{\alpha_{dan}^k - j}; \quad \varphi_d^k = \arg(y_{dan}^k(-j1)). \quad (10)$$

Оскільки постійні часу, знайдені в результаті апроксимації, відображають змінення у часі як повних векторів, так і їх проекцій на поздовжню вісь, розраховуються дійсні значення комплексних провідностей роторних контурів i_d^k при ковзанні $s = -1$:

$$i_d^k = \frac{I_{dan}^k}{\cos(\varphi_d^k)} e^{j\varphi_d^k}. \quad (11)$$

Після цього знаходяться максимальні значення провідностей роторних контурів при $s = \infty$, які є діаметрами окружностей відповідних ЧХ:

$$I_{ducn}^k = \frac{Mod^2[i_d^k]}{Re[i_d^k]}. \quad (12)$$

За істинними початковими значеннями струмів I_{ducn}^k і знайденими безпосередньо у результаті апроксимації постійними часу (коефіцієнтами загасання) у відповідності до (2) розраховується ЧХ провідності з боку обмотки статора СМ $y_d(js)$.

Розраховані з використанням уточненої методики в математичному експерименті ЧХ генераторів практично співпали з вихідними (рис. 4, криві 2, 4, 6).

Для підвищення точності розрахунків струму в обмотці збудження в математичній моделі турбогенератора має бути здійснена структурна деталізація схеми заміщення ротора шляхом виділення контуру обмотки збудження. Для цього при проведенні досліджень під час проведення експериментів необхідно реєструвати змінення струму в обмотці збудження.

В розділі запропонована методика визначення за даними дослідів РТКЗ електромагнітних параметрів ОЗ і еквівалентної демпферної системи СМ.

Параметри уточнених схем заміщення турбогенератора (рис.1) визначаються шляхом виконання наступних розрахункових процедур:

- по параметрах експонент, які апроксимують аперіодичний струм в обмотці збудження, визначається ЧХ провідності обмотки збудження $y_f(js)$

$$i_{fan}(js) = \sum_{k=1}^N \frac{js \cdot i_{fan}^k(0)}{js + 1/T_{fan}^k};$$

- розраховується частотна характеристика коефіцієнту участі періодичного струму статора в гілці обмотки збудження: $C_f(js) = \frac{y_f(js)}{y_d(js)}$;

- передбачаючи відомими параметри x_{σ} , x_{ad} и $x_{\sigma D}$ знаходяться частотні характеристики провідності, яка вимірюється відносно опору x_{ad} ($Y_D^*(js)$) і результуючої провідності ОЗГ і демпферної системи:

$$Y_D^*(js) = \frac{1}{\frac{1}{y_d(js)} - x_{\sigma}} - \frac{1}{x_{ad}}; \quad Y_f(js) + Y_D(js) = \frac{1}{\frac{1}{Y_D^*(js)} - x_{\sigma D}}; \quad (13)$$

- знаходиться коефіцієнт участі всіх роторних струмів в струмі обмотці статора:

$$C_{f2}(js) = \frac{Y_D^*(js)}{Y_D^*(js) + \frac{1}{x_{ad}}}; \quad (14)$$

- визначається коефіцієнт розподілу струму обмотки збудження в сумарному струмі роторних контурів:

$$C_{f1}(js) = \frac{C_f(js)}{C_{f2}(js)}; \quad (15)$$

- розраховуються власні провідності ОЗ і демпферної системи:

$$Y_f(js) = C_{f1}(js) \frac{1}{\frac{1}{Y_D^*(js)} - x_{\sigma D}}; \quad Y_D(js) = \frac{1}{\frac{1}{Y_D^*(js)} - x_{\sigma D}} - Y_f(js). \quad (16)$$

За отриманими частотними характеристикам $Y_f(js)$ і $Y_D(js)$ виконується синтез схем заміщення обмотки збудження і масивних елементів ротора.

В третьому розділі «Експериментальне визначення сукупності електромагнітних параметрів турбогенераторів при різних рівнях насичення» для розробки математичних моделей турбогенераторів, які відображають вплив насичення шляхів магнітних потоків розсіювання, були виконані експериментальні дослідження щодо визначення сукупності електромагнітних параметрів у вигляді ЧХ і схем заміщення за даними серії дослідів раптових ТКЗ для різних рівней напруги у вихідному режимі. Досліди здійснювались для трьох промислових турбогенераторів одного конструктивного виконання серії ТВВ різних потужностей: 160 МВт типа ТВВ-160-2; 320 МВт типа ТВВ-320-2 и 500 МВт типа ТВВ-500-2. Напруги підбирались таким чином, щоб початкові значення періодичної складової струму РТКЗ склали близько 2,0; 3,0 и 4,0 в.о.

В результаті апроксимації перехідних струмів в обмотках статора і збудження визначались експоненційні складові періодичного струму статора і аперіодичного в обмотці збудження. Похибки аналітичного представлення дослідних залежностей миттєвих значень перехідних струмів в обмотках статора не перевищили 7,5% для всіх турбогенераторів.

За розробленою у розділі 2 методикою були визначені ЧХ провідності по поздовжній осі ротора ($y_d(js)$), а також ЧХ коефіцієнта розподілу струму статора у гілці ОЗГ ($C_f(js)$).

Аналіз ЧХ $y_d(js)$ показав, що має місце збільшення як модульних значень провідностей, так і їх дійсних та уявних складових при збільшенні ковзання ротора. Підвищення напруги до $0,7U_{ном}$ призводить до незначного змінення ЧХ при

ковзанні менш 0,01 в.о. Для різних генераторів воно знаходиться в межах від 3% до 6%. В області ковзань від 0,01 в.о. до 1,0 в.о. збільшення напруги в дослідях до $0,7U_{НОМ}$ викликає збільшення амплітудних значень провідності до 14% - 21%.

На рис.5 наведені ЧХ $y_d(js)$ ТГ ТВВ-160, які відповідають різним рівням насичення магнітної системи.

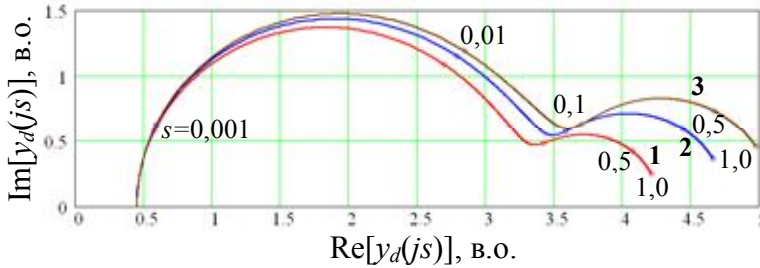


Рисунок 5 - Частотні характеристики турбогенератора ТВВ-160-2

Зіставлення ЧХ коефіцієнта розподілу $C_f(js)$ для турбогенераторів, що досліджувались, свідчить про те, що вони незначно відрізняються при змінній рівня насичення. Їх відмінність від середніх значень не перевищує 6,05% для генератора ТВВ-160; - 11,15% для ТВВ-320 та 15,87% - для ТВВ-500.

Аналіз комплексних провідностей ОЗ $y_f(js)$, визначених для різних рівнів насичення, свідчить про практичне їх співпадіння в діапазоні частот від 0 до 0,1 в.о. При більших ковзаннях має місце несуттєве, в межах 5-7% змінення амплітудного значення досліджуваного параметра. Однак при ковзаннях ротора, більше за 0,1 в.о. значно більше проявляється дія демпферної системи.

Безпосередньо отримані ЧХ практично не можливо застосовувати для моделювання перехідних процесів з урахуванням впливу насичення. Більш ефективніше отримати залежності параметрів заступних схем від початкового значення періодичного струму ТКЗ.

Згідно із запропонованим підходом до визначення параметрів роторних контурів схеми заміщення (рис.1) необхідно знати значення опорів розсіювання обмотки статора x_σ і взаємоіндукції $x_{\sigma D}$. Дослідження для різних значень індуктивностей x_σ та $x_{\sigma D}$, показали, що їх співвідношення між собою практично не впливає на результати визначення параметрів роторних контурів. Тому під час синтезу схем заміщення для всіх досліджуваних генераторів індуктивність $x_{\sigma D}$ приймалась однаковою і не залежною від насичення величиною 0,01 в.о. Опори розсіювання обмотки статора x_σ підбирались таким чином, щоб амплітудно-фазова характеристика, яка відображає ОЗГ, максимально наближалась до округлості.

Аналіз отриманих таким чином активних і індуктивних опорів схем заміщення для дискретних значень дослідних струмів ТКЗ статора дозволив одержати для всіх генераторів аналітичні вирази для визначення їх залежностей у функції струму статора, при значенні останнього більш 1 в.о., наступного виду

$$x_k(I_d^{II}) = x_{k_{НЕНАС}} \cdot [a + b(1 - e^{-I_d^{II}/c})]. \quad (17)$$

Ненасичені значення параметрів в (17) мають визначатися в дослідях КЗ,

Частотні характеристики $y_f(js)$ та $C_f(js)$, розраховувались з використанням результатів апроксимації струмів в обмотці збудження. Похибки аналітичного представлення дослідних залежностей були декілька меншими, ніж похибки струмів в обмотках статора.

при початкових струмах близьких до номінальних.

Знайдені значення коефіцієнтів, для всіх досліджуваних типів турбогенераторів при різних початкових рівнях струмів КЗ. Це дозволяє з похибкою не більш 6,1% визначати параметри заступних схем, з урахуванням як ефекту витіснення струму в обмотках, так і явище заданого рівня насичення шляхів потоків розсіювання по поздовжній осі ЕМ.

В четвертому розділі «Узагальнені залежності електромагнітних параметрів турбогенераторів від насичення, їх аналіз і можливість застосування для моделювання режимів ТКЗ» розглядається доцільність апроксимації опорів еквівалентних схем заміщення узагальненими для усіх досліджуваних ТГ серії ТВВ залежностями.

Оскільки досліди для кожного генератора проводились, при різних надперехідних струмах, то для оцінки значень параметрів, які відповідають одному рівню насичення за отриманими в розділі 3 залежностями для кожного турбогенератора були визначені параметри уточнених схем для наступних початкових періодичних струмів КЗ: 1,0; 2,5 и 3,5 в.о. (табл.1).

Таблиця 1 – Параметри уточненої схеми заміщення для різних рівнів насичення

Параметр	Тип турбогенератора								
	ТВВ-160-2			ТВВ-320-2			ТВВ-500-2		
	$I_d''=1$	$I_d''=2,5$	$I_d''=3,5$	$I_d''=1$	$I_d''=2,5$	$I_d''=3,5$	$I_d''=1$	$I_d''=2,5$	$I_d''=3,5$
x_σ	0,2104	0,1767	0,1627	0,2157	0,1812	0,1668	0,2442	0,2051	0,1888
$x_{\sigma f}$	0,1155	0,1492	0,1669	0,0660	0,0853	0,0954	0,1136	0,1468	0,1642
r_f	0,0018	0,0018	0,0018	0,0015	0,0014	0,0014	0,0012	0,0012	0,0012
$x_{\sigma d1}$	1,1322	1,2304	1,2707	1,0102	0,8107	0,7821	0,7033	1,1014	1,1389
r_{d1}	0,0102	0,0092	0,0090	0,0065	0,0058	0,0056	0,0342	0,0423	0,0453
$x_{\sigma d2}$	0,0176	0,0260	0,0269	0,0071	0,0064	0,0056	0,0289	0,0410	0,0469
r_{d2}	0,0212	0,0278	0,0297	0,0081	0,0104	0,0133	0,0262	0,0318	0,0387

Для отримання узагальнених залежностей співставлялись параметри схем різних ТГ, які відповідають одному рівню насичення, віднесені до ненасичених значень відповідного параметра, який отримано при $I_d''=1,0$ в.о.

В результаті аналізу дискретних значень індуктивних опорів x_σ і $x_{\sigma f}$, а також активного опору обмотки збудження r_f , одержані аналітичні вирази для визначення їх залежностей в функції струму статора:

$$x_\sigma(I_d'') = x_{\sigma_{\text{ненас}}} \cdot (1,1642 - 0,5421 \cdot (1 - e^{-I_d''/2,7})); \quad x_{\sigma f}(I_d'') = x_{\sigma f_{\text{ненас}}} \cdot (0,7428 + 1,4094 \cdot (1 - e^{-I_d''/5,3}));$$

$$r_f(I_d'') = r_{f_{\text{ненас}}} \cdot (1,3353 - 0,3641 \cdot (1 - e^{-I_d''/0,4})).$$

Максимальна похибка апроксимації дослідних значень опору x_σ складає 1,65%; $x_{\sigma f}$ - 8,74 %; r_f - 2,43 %.

Співставлення надперехідних індуктивних опорів, що розраховувались як

$x_d'' = x_d(j\omega)_{s \rightarrow \infty}$, також дозволило встановити загальну для усіх генераторів закономірність їх змінення від надперехідного струму, яка практично співпала з відомою, одержаною для ТГ 60Гц американської конструкції:

$$x_d''(I_d'') = x_{d_{\text{HEHAC}}}'' \cdot (1,1464 - 0,4142 \cdot (1 - e^{-I_d''/2,3})).$$

Для встановлення закономірностей змінення параметрів контурів, які відображають вплив масивних елементів ротора, було проаналізовано ЧХ, комплексної провідності, $y_D(j\omega) = \sum_{k=1}^2 \frac{j\omega}{j\omega x_{\sigma d_k} + r_{d_k}}$. Для ЧХ, віднесених до своїх комплексів, при

нескінченному ковзанні ротора $y_{*D}(j\omega) = \frac{y_D(j\omega)}{y_D(j\omega)_{s \rightarrow \infty}}$, визначалось їх середнє значення.

По знайденим усередненим характеристикам $y_{*D}(j\omega)$ синтезувались двоконтурні схеми заміщення ротора. Значення усіх індуктивних і активних опорів, при цьому, є віднесеними до результуючого опору роторних контурів кожного генератора при $s \rightarrow \infty$, тобто $x_{D\Sigma} = \frac{1}{y_D(j\omega)_{s \rightarrow \infty}}$.

Доведено, що узагальнення параметрів масивних елементів ротора, можливо також виконувати в часовій області.

Аналіз отриманих в частотній області параметрів дозволив одержати наступні залежності для двоконтурної схеми заміщення демпферної системи турбогенераторів серії ТВВ в функції початкового струму КЗ:

$$x_{*\sigma d_1}(I_d'') = 65,7854 - 33,6279(1 - e^{-I_d''/1,4531}); \quad r_{*d_1}(I_d'') = 0,9178 + 1,3708(1 - e^{-I_d''/2,5996});$$

$$x_{*\sigma d_2}(I_d'') = 0,9922 + 4,0187(1 - e^{-I_d''/0,93}); \quad r_{*d_2}(I_d'') = 0,9924 + 6,6989(1 - e^{-I_d''/89}).$$

За відносними узагальненими параметрами розраховуються дійсні параметри контурів конкретного ТГ: $x_{\sigma d_k}(I_d'') = x_{*\sigma d_k}(I_d'')x_{D\Sigma}(I_d'')$; $r_{d_k}(I_d'') = r_{*d_k}(I_d'')x_{D\Sigma}(I_d'')$.

Співставлення ЧХ $y_d(j\omega)$, отриманих за даними дослідів КЗ при напрузі $U = 0,7U_{\text{НОМ}}$ та розрахунком з використанням узагальнених параметрів, свідчить при їх задовільне співпадіння. Значення модулів векторів струму в межах частот $0 \leq s \leq 0,01$ і $0,01 \leq s \leq 1$ відрізняються не більш, ніж на 15,5% і 6,8% відповідно. Неспівпадіння дійсних значень і аргументів при частотах $s > 0,1$ в.о. не перевищує 5,2%.

Для можливості моделювання перехідних процесів були уточнені диференційні рівняння Парка-Горєва для схеми заміщення, представленої на рис.1.

За уточненими рівняннями аналізувались електромагнітні перехідні процеси під час РТКЗ на затисках генераторів. Оцінка достовірності отриманих в роботі моделей здійснювалась шляхом зіставлення результатів розрахунків струму в обмотках статора і збудження з експериментальними даними для різних рівнів вихідної напруги. Моделювання виконувалось для тих же значень напруг, при яких виконувались досліди. Значення індуктивного опору розсіювання обмотки статора перераховувались на кожному кроці інтегрування диференційних рівнянь. Наближене інтегральне урахування насичення на параметри роторних контурів здійснювалось вибором відповідних параметрів без наступного їх перерахунку на ко-

жному кроці інтегрування.

Для виявлення впливу насичення на рівень струмів ТКЗ виконувалось моделювання за параметрами, які враховують насичення, а також з використанням ненасичених значень опорів заступних схем. При цьому розрахунки виконувались як для схем, в яких виділявся контур ОЗГ, так і для схем без структурної деталізації ротора.

Це одночасно дозволило дослідити вплив запропонованої структурної деталізації ротора на точність визначення струму в ОЗ.

Зіставлення результатів розрахунку струму в ОЗГ (рис.6) свідчить, що величини струму при мінімальних значеннях, розраховані з використанням різних вихідних даних, є близькими між собою і дослідними значеннями. Неспівпадіння не перевищує 3,9%. Використання експериментальних параметрів СЗ уточненої структури (крива 2), або отриманих за узагальненими аналітичними залежностями (крива 3) відрізняються не більш, ніж на 4,28 %.

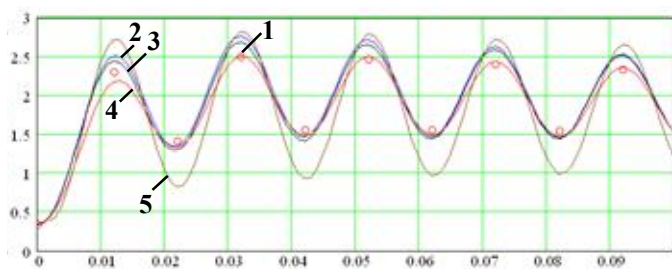


Рисунок 6 - Змінення струму в колі ОЗ турбогенератора ТВВ-160 для $0,70U_{ном}$

Моделювання РТКЗ на основі уточнених схем, які відповідають ненасиченому стану магнітних кіл (крива 4), призводить до зменшення розрахункового значення струму в обмотці збудження на 13,2 %. Однак, відмінність першого амплітудного значення від виміряного є близькою, як і при застосуванні насичених параметрів, і складає понад 5,3 %.

Моделювання за схемою, в якій не виділений контур ОЗ (крива 5), свідчить, про незадовільний збіг дослідних (крива 1) та розрахункових значень. Похибка досягає 41,9%.

Аналіз максимальних похибок у визначенні струму в обмотці збудження, виконаний для інших турбогенераторів при різних рівнях насичення, свідчить про те, що їх розкид знаходиться в межах від 2,9% до 17,4%.

Застосування, узагальнених залежностей під час визначенні струму в обмотці статора для досліджуваних генераторів, призводить до похибок, приблизно в тих же межах - 4,5% - 14,2%.

Це дозволяє зробити висновок про допустимість та доцільність для урахування насичення використовувати отримані в роботі аналітичні співвідношення.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі дано нове вирішення актуальної наукової задачі, що спрямована на удосконалення математичних моделей турбогенераторів для розрахунку динамічних режимів в умовах впливу насичення магнітних кіл потоків розсіювання і математичного моделювання на їх підставі перехідних процесів під час раптових коротких замикань. Отримані наукові результати є суттєвими для розвитку теоретичних положень ідентифікації електромагнітних параметрів синхронних машин, які відображають вплив насичення.

Основним підсумком виконаної роботи, спрямованої на розв'язання поставлених в дисертації задач, є одержання наступних нових наукових і практичних результатів.

1. Обґрунтована необхідність і запропоновані шляхи вдосконалення методу експериментального визначення електромагнітних параметрів турбогенераторів з урахуванням багатоконтурності ротора за даними дослідів раптових трифазних коротких замикань. Доведено, що для підвищення точності розрахунку частотних характеристик необхідно в математичній моделі перехідного процесу враховувати наявність довільної складової струму подвійної частоти, обертання поля, утвореного аперіодичним струмом статора, а також фазові зсуви між окремими складовими вільних періодичних струмів.

2. На підставі аналітичного опису змінення узагальненого вектора струму статора під час трифазного короткого замикання на затискачах СМ, який враховує фазові зсуви між окремими довільними періодичними складовими струму статора в початковий момент перехідного процесу, запропоновано новий підхід до експериментального визначення частотних характеристик провідностей з боку обмотки статора по поздовжній осі магнітної симетрії ротора, який дозволяє уточнити стандартну методику, передбачену ДСТУ ГОСТ 10169-77.

3. Для підвищення точності визначення ЧХ в області великих значень ковзання на відміну від рекомендацій ГОСТ-10169-77 в якості вихідної інформації необхідно використовувати зображуючий вектор перехідного струму статора. Для цього слід здійснювати цифрову реєстрацію миттєвих значень струмів усіх трьох фаз з дискретністю, що відповідає частоті не менш 5 кГц. Для турбогенераторів точність визначення, наприклад, надперехідних індуктивних опорів по поздовжній осі підвищується на 8 – 13%.

4. Одержав подальший розвиток метод синтезу схем заміщення турбогенераторів з урахуванням різного взаємного індуктивного зв'язку між обмоткою збудження і демпферними контурами за рахунок структурної деталізації ротора шляхом виділення обмотки збудження та представлення масивних елементів ротора довільною кількістю контурів. Для цього під час проведення дослідів необхідно реєструвати змінення струму в обмотці збудження.

5. За даними серії дослідів РТКЗ при різних значеннях напруги в попередньому режимі, одержані ЧХ провідності з боку обмотки статора і відповідні ним параметри еквівалентних схем заміщення для різних рівней насичення шляхів магнітних потоків розсіювання для трьох промислових турбогенераторів серії ТВВ різних потужностей: 160, 320 и 500 МВт, що дозволяє суттєво підвищити якісний рівень інформаційної бази даних і точність розрахунків електромагнітних перехідних процесів.

6. Отримані аналітичні залежності, які дозволяють з похибкою не більш 6,1% визначати ЧХ і параметри еквівалентних схем заміщення, які відображають як ефект витіснення струму в обмотках, так і явище заданого рівня насичення шляхів потоків розсіювання по поздовжній осі ротора турбогенераторів ТВВ-160, ТВВ-320 и ТВВ-500.

7. Дослідження динамічних властивостей демпферних контурів, які відображають вплив масивних конструктивних елементів ротора, в частотній та часо-

вій області дозволили вперше встановити узагальнені залежності індуктивних і активних опорів двоконтурної схеми заміщення ротора від величини початкового періодичного струму КЗ для турбогенераторів серії ТВВ. Показана ефективність їх застосування для уточнених розрахунків перехідних процесів під час трифазних коротких замикань з урахуванням впливу насичення магнітної системи ЕМ.

8. Розроблена методика уточненого визначення ЧХ за даними дослідів раптового трифазного короткого замикання на затисках турбогенераторів, передбачена діючим в Україні галузевим стандартом ГОСТ 10169-77, а також рекомендаціями міжнародної електротехнічної комісії IES 34-4. Згадана методика прийнята до впровадження на державному підприємстві завод „Електроважмаш” (м. Харків).

ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ларин А.М. Уточнение математической модели синхронной машины для определения совокупности электромагнитных параметров из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания / А.М. Ларин, А.А. Ткаченко // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. –Луганськ. – 2005. – №1 (10). – С. 49 – 53.

2. Ларин А.М. Определение электромагнитных параметров обмотки возбуждения синхронного генератора из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания / А.М. Ларин, А.А. Ткаченко, И.И. Ларина // “Електротехніка і електро механіка”. – Харків. – 2005. – №2. –С. 32-34.

3. Ларин А.М. Исследование влияния насыщения на значения электромагнитных параметров и характеристик явнополюсного генератора / А.М. Ларин, А.А. Ткаченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2005. – №4(33). – С.73-76.

4. Шеина А.А. Определение зависимости параметров эквивалентной схемы замещения турбогенератора от начального значения тока трехфазного короткого замыкания / А.А. Шеина, А.М. Ларин, И.И. Ларина // Кременчук: Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – № 4(51). – С. 113-116.

5. Ларин А.М. Новый подход к определению частотных характеристик синхронных машин по данным опытов внезапного трехфазного короткого замыкания / А.М. Ларин, А.А. Шеина // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”. – Донецьк. – 2011, №10(180). – С. 100-107.

6. Ларин А.М. Исследование влияния насыщения на совокупность электромагнитных параметров турбогенераторов / А.М. Ларин, И.И. Ларина, А.А. Шеина // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”. – Донецьк. – 2011, №11(186). – С. 235-240.

7. Sheina A. Simulation of transient process in generators for equivalent circuit with different mutual inductance among loops / A.Sheina // The advanced science open access journal – United states. – 2012. – Volume, 2012 Issue 5. – P.105-109.

8. Шеїна Г.О. Уточнення методу експериментального визначення електромагнітних параметрів турбогенераторів з дослідів трифазного короткого замикан-

ня / Г.О. Шеїна, К.В. Ситник // Енергетика та системи керування: Матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2011 – Львів – 2011 – С.104-105.

9. Белобородько Е.В. Разработка метода экспериментального определения параметров синхронных машин. Электротехнические и электромеханические системы: / Е.В. Белобородько, А.А. Ткаченко // Материалы Всеукраинской студенческой научно-технической конференции. – Севастополь: СевНТУ. – 2005. – С.5.

10. Белобородько Е.В. Уточнение математической модели синхронной машины / Е.В. Белобородько, А.А. Ткаченко // Третя всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених і спеціалістів. Тези наукових доповідей. – Кременчук: КДПУ, 2005р. - С. 9-10.

Особистий внесок здобувача: у [1,10] – обґрунтування уточненої математичної моделі синхронної машини для визначення електромагнітних параметрів СМ з урахуванням багатоконтурності ротора за даними дослідів раптового трифазного короткого замикання; у [2,9] – розробка методу визначення електромагнітних параметрів обмотки збудження для схем заміщення уточненої структури; у [3] – розробка методики визначення залежностей індуктивних опорів розсіювання обмоток статора і ротора, а також частотних характеристик СМ, яка не має демпферної системи, за даними дослідів раптового трифазного короткого замикання, відновлення напруги після відключення усталеного трифазного короткого замикання і гасіння електромагнітного поля; у [4,6] – одержані узагальнені аналітичні залежності параметрів схем заміщення уточненої структури від початкового значення періодичної складової струму короткого замикання; у [5,8] – запропоновано уточнена модель турбогенераторів для визначення частотних характеристик СМ за даними дослідів раптового трифазного короткого замикання.

АНОТАЦІЇ

Шеїна Г.О. Удосконалення математичної моделі турбогенераторів для аналізу режимів раптових коротких замикань з урахуванням насичення. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - Електричні машини і апарати. – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». – Донецьк, 2014.

Запропоновано новий підхід до експериментального визначення частотних характеристик провідностей з боку обмотки статора за даними трифазного короткого замикання. Розроблено метод визначення електромагнітних параметрів обмотки збудження і масивного ротора турбогенератора в схемі заміщення, в якій враховується різний взаємний індуктивний зв'язок між обмотками. Вперше отримані узагальнені аналітичні залежності параметрів еквівалентних схем заміщення турбогенераторів серії ТВВ від величини початкового значення періодичної складової струму короткого замикання, які відображають явища магнітного насичення шляхів потоків розсіювання. Удосконалена методика моделювання електромагнітних перехідних процесів при трифазних коротких замиканнях з урахуванням насичення магнітопроводу в напрямку використання схем заміщення з різним магні-

тним зв'язком між обмотками при представлені масивного ротора довільною кількістю еквівалентних контурів.

Ключові слова: математична модель, частотна характеристика, схема заміщення, турбогенератор, перехідний процес, коротке замикання, насичення.

Шейна А.А. Совершенствование математической модели турбогенераторов для анализа режимов внезапных коротких замыканий с учетом насыщения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет». – Донецк, 2014.

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи, направленной на усовершенствование математических моделей турбогенераторов для расчета динамических режимов в условиях влияния насыщения магнитных цепей потоков рассеяния и математического моделирования на их основе переходных процессов при внезапных коротких замыканиях. Полученные научные результаты являются существенными для развития теоретических положений идентификации электромагнитных параметров синхронных машин, отражающих влияние насыщения.

Обоснована необходимость и предложены пути совершенствования метода экспериментального определения электромагнитных параметров турбогенераторов с учетом многоконтурности ротора по данным опытов внезапных трехфазных коротких замыканий. Показано, что для повышения точности расчета частотных характеристик необходимо в математической модели переходного процесса учитывать наличие свободной составляющей тока двойной частоты, вращение поля, созданного апериодическим током статора, а также фазовые сдвиги между отдельными составляющими свободных периодических токов.

На основании аналитического описания изменения обобщенного вектора тока статора при трехфазном коротком замыкании на выводах синхронных машин, учитывающего фазовые сдвиги между отдельными свободными периодическими составляющими тока статора в начальный момент переходного процесса, предложен новый подход к экспериментальному определению частотных характеристик проводимостей со стороны обмотки статора по продольной оси магнитной симметрии ротора, позволяющий уточнить стандартную методику, рекомендуемую отраслевым стандартом ГОСТ 10169-77.

Разработанная методика уточненного определения частотных характеристик проводимостей со стороны обмотки статора синхронных машин, позволяет снизить погрешность за счет исключения систематической ошибки, присущей стандартной методике, рекомендуемой действующим в Украине отраслевым стандартом ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний».

Получил дальнейшее развитие метод синтеза схем замещения турбогенераторов с учетом различной взаимной индуктивной связи между обмоткой возбуждения и демпферными контурами за счет структурной детализации ротора путем выделения обмотки возбуждения и представления массивных элементов ротора

произвольным числом контуров.

Впервые получены обобщенные аналитические зависимости параметров эквивалентных схем замещения турбогенераторов серии ТВВ от величины начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания, отражающих явление магнитного насыщения путей потоков рассеяния.

Полученные аналитические зависимости позволяют выполнять уточненные расчеты токов в обмотках статора и возбуждения при трехфазных коротких замыканиях с учетом влияния насыщения путей магнитных потоков рассеяния.

Усовершенствована методика моделирования электромагнитных переходных процессов при трехфазных коротких замыканиях с учетом насыщения магнитопровода по путям потоков рассеяния турбогенераторов при использовании схем замещения с различной магнитной связью между обмотками при представлении массивного ротора произвольным числом эквивалентных контуров.

Разработан комплекс программ для ПЭВМ, позволяющий по данным измерений мгновенных значений токов в обмотках статора и возбуждения определять частотные характеристики турбогенераторов, осуществлять синтез эквивалентных схем замещения, а также выполнять математическое моделирование электромагнитных переходных процессов по дифференциальным уравнениям или аналитически при внезапных трехфазных коротких замыканиях с учетом насыщения магнитной системы.

Ключевые слова: математическая модель, частотная характеристика, схема замещения, турбогенератор, переходный процесс, короткое замыкание, насыщение.

Sheina A.A. Improvement of turbogenerators mathematical model for analysis of sudden short circuit modes in consideration of saturation.

The dissertation for academic degree candidate of technical science on the specialty 05.09.01 – electrical machines and apparatuses. – SHEE «Donetsk national technical university». – Donetsk, 2014.

A new approach for experimental determination of frequency-response characteristics from direction of stator on the experiments of sudden three-phase short circuits is proposed. A method was worked out for determination of exciting winding and turbogenerator massive rotor electromagnetic parameters for the equivalent circuit with different mutual inductive magnetic connection among loops. The generalized analytical dependences of equivalent circuit parameters for turbogenerator ТВВ series on initial value of periodic current component of sudden short circuit, which reflected the magnetic saturation of flux linkage way, were received. Modelling method of electromagnetic transient process at three-phase short circuit with taking into account saturation for equivalent circuit with different magnetic connection among loops and multi-loops massive rotor, was improved.

Key words: mathematical model, frequency-response characteristics, equivalent circuit, turbogenerator, transient processes, short circuit, saturation.