

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ**

**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

«На правах рукопису»  
УДК 621.313.322

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ В.Ф.Шинкаренко

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

## **Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**на тему: «Удосконалення демпферної системи потужного  
гідрогенератора-двигуна»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕМ-61м  
Московий Сергій Андрійович \_\_\_\_\_

Керівник:

доцент, к.т.н.  
Цивінський Сергій Станіславович \_\_\_\_\_

Консультант Розділу 3:

д.т.н.  
Кенсицький Олег Георгійович \_\_\_\_\_

Рецензент:

доцент, к.т.н.  
Король Сергій Вікторович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка обсягом 97 сторінок складається із чотирьох розділів і містить 50 рисунків, 9 таблиць та 26 бібліографічних найменувань за списком використаної літератури.

Актуальність роботи пов'язана із удосконаленням існуючих демпферних систем роторів потужних гідрогенераторів, на прикладі гідрогенератора-двигуна типу СВО-1255/255-40УХЛ4.

Мета дисертаційної роботи – удосконалення конструкції демпферної системи ротора гідрогенератора-двигуна для підвищення її стійкості і надійності функціонування при наявності відхилень конструктивних параметрів генератора.

Об'єктом дослідження є електромагнітні і теплові процеси в демпферній системі ротора гідрогенератора-двигуна при наявності відхилень конструктивних параметрів.

Предметом дослідження є демпферна система ротора потужного гідрогенератора-двигуна типу СВО-1255/255-40УХЛ4.

У роботі використані положення теорії електромагнітного поля і теорія магнітних кіл, а також методи математичного моделювання польової та коло-польової моделі та елементи функціонального аналізу.

В дисертаційній роботі сформульовано комплекс технічних рішень та рекомендацій щодо удосконалення конструкції полюсів ротора гідрогенератора-двигуна, які забезпечують підвищення надійності функціонування ДСР в умовах появи нерівномірності повітряного проміжку гідрогенератора-двигуна.

Ключові слова: генератор-двигун, демпферна система ротора, статичний ексцентриситет, польова модель.

## SUMMARY

The explanatory note consists of 97 pages 4 chapters and contains 50 figures, 9 tables and 26 bibliographic application names on the list of references.

The urgency of work is connected with the improvement of existing damping systems of rotors of powerful hydrogenerators on the example of a hydrogenerator-engine type SVO-1255/255-40.

The purpose of the dissertation work is to improve the design of the damper system of the rotor of the hydrogenerator-engine to increase their stability and reliability of functioning in abnormal operating modes and in the presence of deviations of the design parameters of the generator, which appeared during the prolonged operation.

The object of research is electromagnetic and thermal processes in damper systems of rotors of hydrogenerators in different modes of their operation.

The subject of the study is the damper system of a rotor of a powerful hydrogenerator-type engine SVO-1255/255-40.

The paper uses the provisions of the theory of electromagnetic field and the theory of magnetic circles, as well as methods of mathematical modeling of the field and the range of the field model and elements of functional analysis.

In the dissertation the complex of technical solutions and recommendations for the improvement of the design of the hydrogenerator-motor rotor poles is formulated, which provide an increase in the reliability of the DSC operation in the conditions of the unevenness of the air gap interval of the hydrogenerator-engine.

Keywords: generator-engine, damper system of a rotor, static eccentricity, field model.

## ЗМІСТ

Вступ.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Розділ 1. Проблеми функціонування демпферних систем гідрогенераторів та їх аналіз .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.1. Проблеми функціонування демпферних систем потужних синхронних гідрогенераторів.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.2. Аналіз проблем функціонування демпферних систем гідрогенераторів .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.3. Статичний ексцентриситет. Освоєння і оцінка існуючих методів діагностики .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.3.1. Визначення ексцентриситету по ЕРС системи вимірювальних котушок покладених в повітряному зазорі.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.3.2. Визначення ексцентриситету по значенню потенціалу нейтральної точки зірки обмотки статора щодо нейтральної точки зірки резисторів. ....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.4. Висновки до розділу 1 .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Розділ 2. Математичні моделі фізичних процесів в демпферній системі ротора гідрогенератора-двигуна .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.1. Польова математична модель фізичних процесів в демпферній системі ротора гідрогенератора-двигуна.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.2. Коло-польова математична модель фізичних процесів в демпферній системі ротора гідрогенератора-двигуна.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.3. Висновки до розділу 2 .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Розділ 3. Дослідження фізичних процесів в демпферній системі ротора гідрогенератора-двигуна та розробка технічних рішень щодо її удосконалення .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.1. Фізичні процеси в демпферній системі ротора гідрогенератора-двигуна при наявності нерівномірного повітряного проміжку.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

3.1.1. Результати досліджень на основі польової математичної моделі .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.1.2. Результати досліджень на основі коло-польової математичної моделі .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2. Удосконалення демпферної системи ротора гідрогенератора-двигуна .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2.1. Дослідження впливу на роботу демпферної системи гідрогенератора-двигуна кількості стрижнів на полюсі ротора	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2.2. Дослідження впливу на роботу демпферної системи гідрогенератора-двигуна способу розташування стрижнів на полюсі ротора .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2.3. Дослідження впливу електричного активного опору стрижнів на роботу демпферної системи гідрогенератора-двигуна .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2.4. Дослідження впливу індуктивного опору стрижнів на роботу демпферної системи гідрогенератора-двигуна	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.3. Висновки до розділу 3 .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Розділ 4. Стартап .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.1. Споживачі .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.2. Ключові партнери .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.3. Структура витрат.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.4. Висновки по розділу 4 .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Загальні висновки по роботі.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Список використаної літератури .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## Вступ

**Актуальність теми.** Потужні синхронні генератори виробляють основну частину електричної енергії, що споживається у суспільстві. На гідроелектростанціях (ГЕС) та гідроакumuлюючих електростанціях (ГАЕС) використовують явнополюсні тихохідні синхронні гідрогенератори (ГД). Удосконалення конструкцій потужних ГД на основі результатів новітніх наукових досліджень і розробок з урахуванням накопиченого досвіду експлуатації генераторів є важливим науковим напрямком в сфері електромеханіки і сучасного електромашинобудування, оскільки забезпечує підвищення техніко-економічних показників генераторів і надійність їх експлуатації.

Демпферні системи роторів (ДСР) потужних синхронних генераторів відіграють важливу роль в процесі їх функціонування. Ці системи забезпечують гасіння коливань швидкості роторів при зовнішніх збуреннях, короткочасну роботу генераторів в асинхронних режимах, захист ротора від струмів подвійної частоти 100 Гц в несиметричних режимах тощо. Сутність фізичних процесів, що відбуваються в ДСР, пов'язана з протіканням в демпферній системі індукованих струмів. В ГД конструкція демпферної системи представлена явно і містить сукупність стрижнів, розташованих в пазах, виконаних в шихтованих полюсних наконечниках полюсів, і з'єднаних з торців короткозамикаючими сегментами (КЗС) в єдину короткозамкнену обмотку.

Виникаючі в ДСР гідрогенераторів електромагнітні і теплові процеси мають складний характер, а величини струмів і втрат є значними за величиною. Тому відомо немало випадків руйнування демпферних систем під впливом різних факторів. Особливо це проявляється в умовах зменшення залишкового ресурсу генераторів,

які вже відпрацювали гарантійні терміни роботи, встановлені заводами – виробниками. Наприклад, в ГД виявлено пошкодження крайніх стрижнів ДСР на полюсах. Ці ушкодження мають характер аварій, наслідки яких ведуть до суттєвих економічних втрат.

Тому з метою підвищення надійності експлуатації ДСР гідрогенераторів потрібно поглиблене вивчення фізичних процесів в ДСР та обґрунтування нових технічних рішень щодо конструкції їх елементів з урахуванням нових обставин і аварійних випадків, виявлених в процесі експлуатації потужних ГД.

З огляду на складність конструкції ГД, розташування ДСР на рухомому роторі вивчення фізичних процесів в ДСР тільки експериментальними методами є вкрай складною задачею, яка не має позитивного вирішення. Таке дослідження необхідно проводити перш за все методами математичного моделювання на основі адекватних математичних моделей. Традиційні підходи до аналізу і дослідження синхронних машин не забезпечують необхідну достовірність розрахункових результатів при дослідженні ДСР. Це обумовлено тим, що вони мають багато різного роду допущень і спрощень, повною мірою не враховують геометричні характеристики, фізичні властивості матеріалів тощо. Методами, що забезпечують високу достовірність розрахунків, є інваріантними до характеру електромагнітних зв'язків електричної машини, враховують її реальну геометрію та властивості матеріалів є польові методи аналізу. Застосування цих методів дозволяє проводити поглиблені дослідження параметрів, характеристик і режимів роботи синхронних машин і розробляти ефективні технічні рішення щодо їх удосконалення.

Таким чином, удосконалення конструкцій ДСР потужних ГД за результатами досліджень проведених на основі польових та коло-

польових математичних моделей є актуальним науковим завданням в галузі електромеханіки, яке потребує невідкладного розв'язання.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є удосконалення конструкції демпферної системи ротора ГД для підвищення її стійкості і надійності функціонування при наявності відхилень конструктивних параметрів генератора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати та розробити польові та коло-польові математичні моделі для дослідження фізичних процесів в роторі ГД при наявності нерівномірного повітряного проміжку, що виник внаслідок тривалої експлуатації ГД;

- дослідити на базі розроблених математичних моделей вплив нерівномірності повітряного проміжку на фізичні процеси у ДСР в синхронних режимах роботи;

- обґрунтувати технічні рішення, щодо удосконалення конструкції ДСР з метою зменшення негативного впливу нерівномірності повітряного проміжку на ДСР;

*Об'єкт дослідження* – фізичні процеси в демпферній системі ротора гідрогенератора-двигуна СВО-1255/255-40УХЛ4.

*Предмет дослідження* – демпферна система ротора гідрогенератора-двигуна типу СВО-1255/255-40УХЛ4.

**Методи дослідження.** Методи математичного моделювання, які базуються на чисельному розв'язанні рівнянь поля за допомогою методу скінченних елементів. В роботі використовуються методи теорії нелінійної електротехніки, методи чисельного розв'язання диференціальних та алгебраїчних систем рівнянь, сучасні методи в сфері алгоритмізації та програмування.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- розроблено нові математичні моделі фізичних процесів в демпферній системі ротора ГД, які на відміну від існуючих враховують нерівномірність розподілу струмів, втрат і температури між окремими стрижнями ДСР ГД, що виникають внаслідок нерівномірності величини повітряного проміжку генератора;

- проаналізовано і описано причини та механізм руйнування ДСР ГД в сталих режимах роботи ГД при появі нерівномірного повітряного проміжку. Руйнування демпферної системи виникає внаслідок пульсацій у полюсах ротора магнітного потоку з частотою обертання ротора, що призводить до появи в ДСР значних струмів, пульсуючих електромагнітних сил, нерівномірного нагріву та несиметричних термомеханічних деформацій.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

Сформульовано комплекс технічних рішень та рекомендацій щодо удосконалення конструкції полюсів ротора ГД, які забезпечують підвищення надійності функціонування ДСР в умовах появи нерівномірності повітряного проміжку ГД.