

# МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ДЕМПФЕРНІ ОБМОТЦІ РОТОРА ГІДРОГЕНЕРАТОРА-ДВИГУНА СВО-1255/255-40 ПРИ НАЯВНОСТІ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ

Цивінський С.С., к.т.н., доцент, Московий С.А., студент  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

**Вступ.** Потужні синхронні генератори виробляють основну частину електричної енергії. На гідроелектростанціях та гідроакумуючих електростанціях використовують явнополюсні тихохідні синхронні гідрогенератори (ГГ). Удосконалення конструкцій потужних ГГ за результатами наукових досліджень є важливим напрямком в сфері електромеханіки, 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 ГГ 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 в єдину короткозамкнену обмотку.

Виникаючі в ДСР електромагнітні і теплові процеси мають складний характер, а величини струмів і втрат є значними за величиною. Тому відомо немало випадків руйнування ДСР під впливом різних факторів. Особливо це проявляється в умовах зменшення залишкового ресурсу генераторів, які вже відпрацювали гарантійні терміни роботи, встановлені заводами–виробниками. Ці ушкодження мають характер аварій, наслідки яких ведуть до суттєвих економічних втрат.

Тому з метою підвищення надійності експлуатації ДСР генераторів потрібно поглиблене вивчення фізичних процесів в ДСР та обґрунтування нових технічних рішень щодо конструкції їх елементів.

З огляду на складність конструкції ГГ, розташування ДСР на рухомому роторі вивчення фізичних процесів в ДСР тільки експериментальними методами є вкрай складною задачею. Такі дослідження необхідно проводити методами математичного моделювання.

Таким чином, удосконалення конструкцій ДСР потужних ГГ за результатами досліджень проведених на основі польових та коло-польових математичних моделей є актуальним науковим завданням в галузі електромеханіки.

Під впливом різних режимів експлуатації з часом змінюються геометричні параметри ГГ: розміри та форма осердя статора, полюсів ротора. Також слід відзначити, що в потужних ГГ відношення висоти повітряного

проміжку між полюсами ротора до діаметру розточки статора складає усього 0,1...0,3%. Внаслідок цього, величина повітряного проміжку в різних точках активної зони ГГ неоднакова. Одною з причин прояву нерівномірності повітряного проміжку між статором і ротором є ексцентриситет ротора.

Наявність ексцентриситету при обертанні ротора викликає в полюсах ГГ пульсації основного магнітного потоку. Пульсації потоку створюють електрорушійну силу і струми, що замикаються у стрижнях і короткозамкнених сегментах ДСР. Ці струми не пов'язані з режимом роботи ГГ, але мають значну величину і представляють загрозу для ДСР.

**Мета роботи.** Повести дослідження електромагнітних процесів у демпферні обмотці ротора гідрогенератора-двигуна СВО-1255/255-40 при наявності ексцентриситету, за допомогою математичного моделювання.

**Матеріали і результати досліджень.** Для дослідження фізичних процесів в ДСР гідрогенератора-двигуна при наявності ексцентриситету створено польову та ланцюгову математичні моделі, які у свої сукупності дозволяють дослідити електромагнітні процеси у поздовжньо-поперечні ДСР, на відміну від моделей, що запропоновані у [1-5].

Польова математична модель гідрогенератора-двигуна реалізована у двовимірній постановці і має наступні положення.

Рівняння електромагнітного поля відносно векторного магнітного потенціалу має вигляд

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{z\text{ стор}}$$

де  $\mu$  – магнітна проникність,  $J_{z\text{ стор}}$  – густина сторонніх струмів (густина струмів в обмотці збудження на роторі). Рівняння доповнюється граничними умовами першого роду  $A_z|_{G_1, G_2} = 0$  на лініях  $G_1$  зовнішньої поверхні ярма статора і  $G_2$  внутрішньої поверхні ярма ротора (рисунок 1).

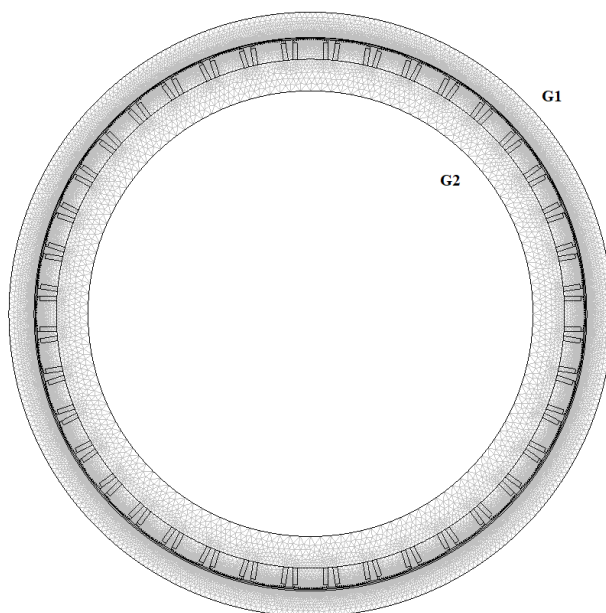


Рисунок 1 – Загальний вигляд розрахункової зони

Рівняння розв'язується в межах інтервалу часу  $[0 \dots T]$ , де  $T$  – період часу, який відповідає одному повному оберту ротора. При розв'язанні задачі інтервал часу розділяється на  $N$  рівних кроків розміром  $\Delta t$ . При цьому, з урахуванням обертання ротора, координати  $x$ ,  $y$  точок ротора в рівнянні (2.19) є функціями часу. Приріст декартових координат ротора  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  на кожному кроці по часу  $\Delta t$  задається наступними формулами:

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= \cos[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot x - \sin[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot y - x \\ \Delta y(t) &= \sin[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot x + \cos[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot y - y \end{aligned}$$

де  $\omega_R$  – кутова частота обертання ротора.

Складові вектору магнітної індукції  $B_x$  і  $B_y$  та напруженості електричного поля  $E_z$  визначаються за співвідношеннями:

$$B_x = \partial A_z / \partial y, \quad B_y = -\partial A_z / \partial x, \quad E_z = -\partial A_z / \partial t$$

Для розрахунку ЕРС, що наводиться в контурах ДС, використовується інтегральний вираз

$$U(t) = \frac{2 \cdot L_{cm}}{S_{cm}} \int_{S_{cm}} E_z \cdot ds$$

де  $S_{cm}$ ,  $L_{cm}$  – площа поперечного перетину і довжина стержня ДСР.

Таким чином, на кожному кроці по часу розв'язується стаціонарне рівняння для різних положень ротора. Об'єднання отриманих розв'язків на інтервалі часу  $[0 \dots T]$  дає часові залежності векторного магнітного потенціалу і усіх інших величин, що визначаються через його значення. Чисельне розв'язання моделі виконано методом скінченних елементів у додатку COMSOL Multiphysics.

Для визначення струмів у стрижнях і перемичках ДСР розраховані значення ЕРС у стрижнях експортуються у колову модель.

Ланцюгова модель ДСР реалізована у додатку SIMULINK пакету MATLAB.

На рисунку 2 зображено ланцюгову модель для одного полюсу, яка моделює замикання струмів у повздовжній демпферній системі.

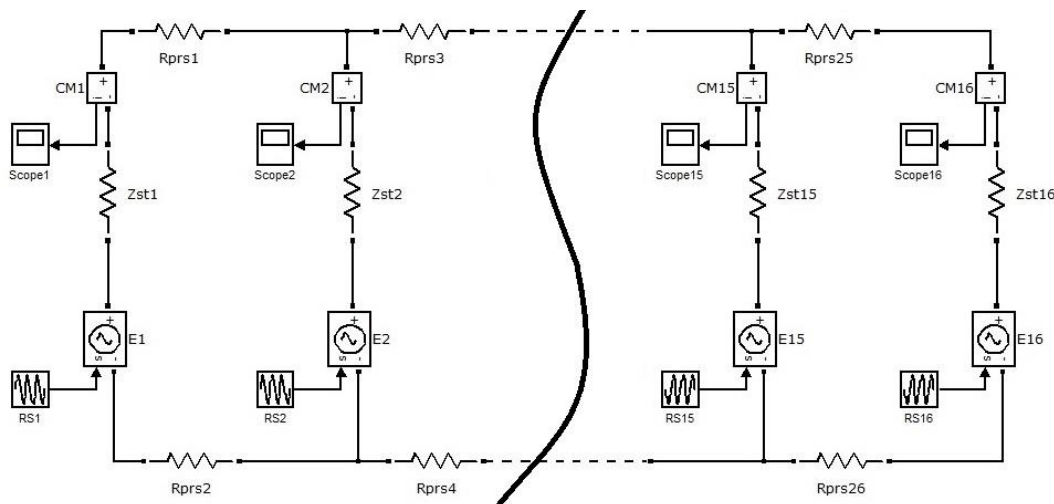


Рисунок 2 – Ланцюгова модель для одного полюсу

Модель складається з джерел ЕРС  $E1...E16$ , числові значення яких експортовані з польової моделі, повних опорів стрижнів ДСР  $Zst1...Zst16$  та активних опорів перемичок між стрижнями  $Rprs1...Rprs26$ .

На рисунку 3 показано колову модель для четверті всіх полюсів, яка моделює замикання струмів у поздовжньо-поперечній демпферній системі.

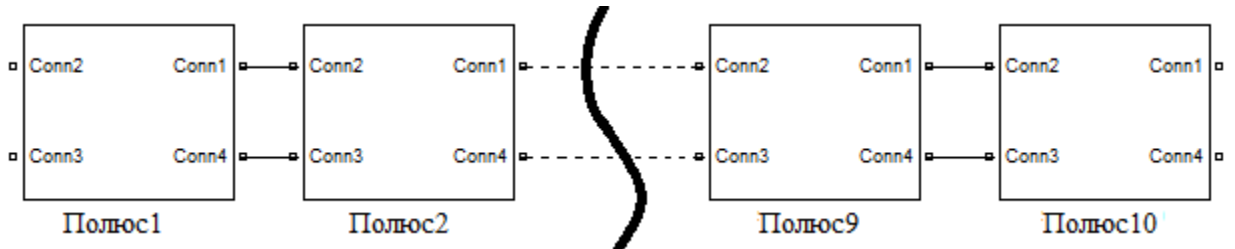


Рисунок 3 – Ланцюгова модель десяти полюсів

Модель складається з десяти блоків-полюсів, які в свою чергу містять джерела ЕРС  $E1...E160$ , повні опори стрижнів  $Zst1...Zst160$ , активні опори перемичок між стрижнями  $Rprs1...Rprs260$ , опорів перемичок між полюсами  $Rprp1...Rprp18$ .

Моделювання проводилось в режимі неробочого ходу при розімкнутій обмотці якоря.

На рисунку 4 зображені полюси під максимальним і мінімальним зазорами.

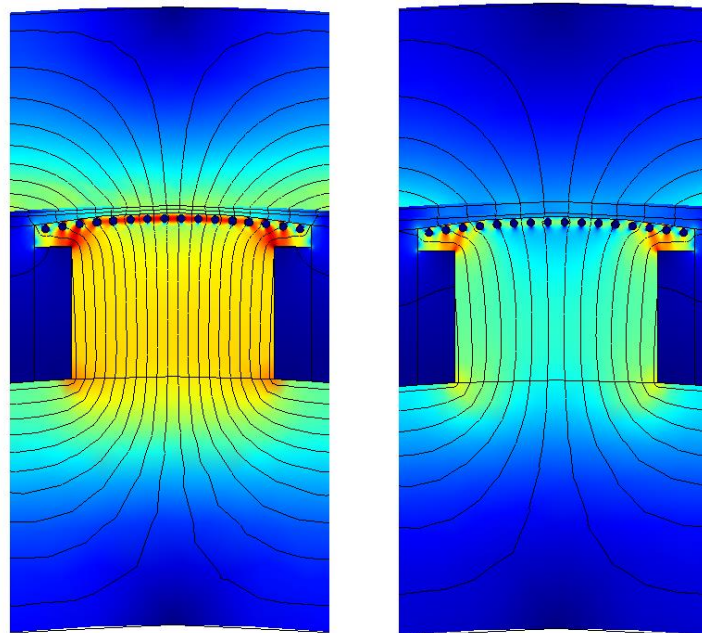


Рисунок 4 – Розподіл магнітної індукції під полюсами

Через коливання індукції навколо стрижнів в них наводяться ЕРС. На рисунку 5 зображені ЕРС, що індукуються у стрижнях при наявності ексцентриситету у одному полюсі. Величина амплітудних значень ЕРС у крайніх стрижнях дорівнює 2,45В, а у центральних 0,3В. Наведені ЕРС викликають у ДСР струми, значення яких сягають небезпечних величин (рисунок 6).

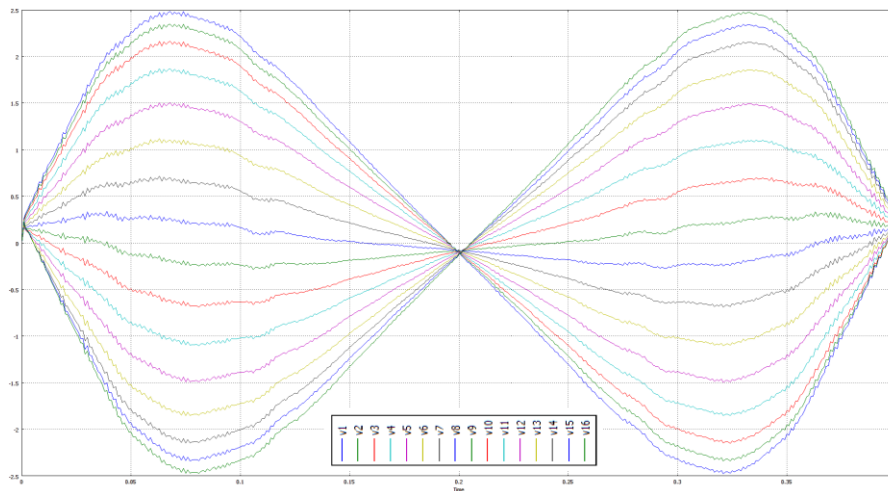


Рисунок 5 – ЕРС полюса при наявності ексцентриситету

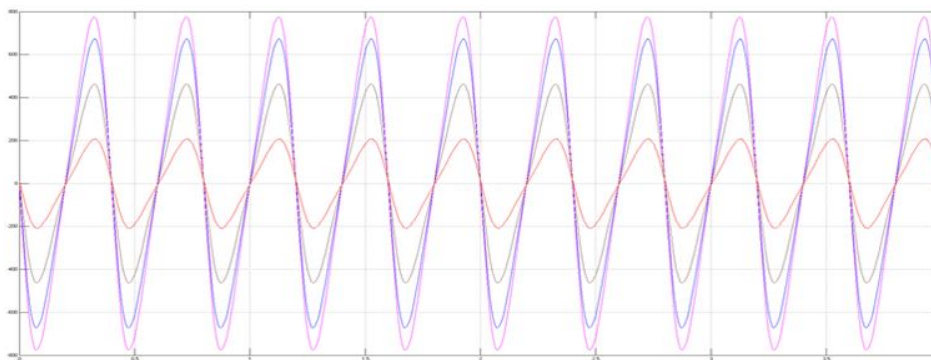


Рисунок 6 – Струми у ДСР при наявності ексцентриситету

**Висновки.** Створено польову та ланцюгову математичні моделі для дослідження електромагнітних процесів у поздовжньо-поперечні ДСР гідрогенератора-двигуна СВО-1255/255-40 при наявності ексцентриситету.

#### Перелік посилань

1. Васьковський Ю.М. Моделювання електромагнітного навантаження демпферної системи ротора гідрогенератора в синхронних режимах при ексцентриситеті повітряного проміжку / Ю.М. Васьковський, Г.М. Федоренко, В.О. Саратов, В.В. Черниш, С.С. Цивінський // Гідроенергетика України. – 2006. – № 1. – С. 25–32.
2. Васьковський Ю.М. Моделювання електромагнітних та теплових процесів в демпфері ротора гідрогенератора при нерівномірному повітряному проміжку між ротором та статором / Ю.М. Васьковський, Г.М. Федоренко, К.В. Вошинський, В.О. Саратов, С.С. Цивінський // Гідроенергетика України. – 2006. – № 3. – С. 11–17.
3. Васьковський Ю.М. Електромагнітні процеси у демпферній системі роторів гідрогенераторів при нерівномірності повітряного проміжку / Ю.М. Васьковський, С.С. Цивінський, О.І. Титко // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 1. – С. 65–71.
4. Цивінський С.С. Удосконалення конструкцій демпферних систем роторів потужних синхронних генераторів: дис. ... кандидата технічних наук: 05.09.01 / Цивінський Сергій Станіславович. – К., 2015. – 144 с.
5. Цивінський С.С., Галдінов М.В. «Моделювання електромагнітного навантаження демпферної системи ротора синхронного двигуна при наявності нерівномірності повітряного проміжку», Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики. – Київ: «Політехніка», 2015.