

ДІАГНОСТИКА КОТУШКОВОГО ОБРИВУ ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВІБРОЗБУДЖУЮЧИХ СИЛ

Гераскін О.А., к.т.н., доц., Дубчак Є.М., ст. викл., Татевосян А.А.,
магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

Вступ. В системах генерації електричної енергії широко застосовуються різні типи синхронних генераторів (СГ). На сьогоднішній день значна кількість потужних СГ, що знаходяться в експлуатації, у тому числі явнопольсні СГ, вичерпала гарантійні терміни роботи, які встановлені заводами – виготовлювачами. Одним з характерних ушкоджень СГ є котушкові обриви обмотки статора, ушкодження яких навіть при невеликій їх кількості може суттєво впливати на роботу СГ і призводити до ряду негативних явищ. Так, через зменшення потоку якоря розподіл магнітного поля в повітряному проміжку СГ стає несиметричним, ЕРС, що індукуються в окремих паралельних гілках обмотки статора, мають різну величину, що призводить до появи урівнюючих струмів, збільшення електричних втрат і зменшення ККД СГ. Слід також зазначити, що існує велика ймовірність подальшого руйнування обмотки статора. Для запобігання цим негативним процесам актуальним є застосування методів діагностування котушкових обривів. Процес діагностики котушкових обривів обмотки статора синхронного генератора здійснюється на базі аналізу змін в сигналі, отриманому з встановлених на поверхні СГ датчиків вібрації.

Визначення котушкового обриву обмотки статора в одній фазі на початковій стадії виникнення є актуальною проблемою, оскільки такий вид ушкодження важко виявити. Для цього необхідно використовувати більш чутливі датчики віброприскорення. Обрив однієї фази обмотки статора є аварійним режимом, який проявляється одразу, призводячи до спрацювання захисної автоматики. Цей режим легко виявляється стандартними методами діагностики, тому такий варіант ушкодження не досліджується.

Ефективні результати досліджень можна отримати при застосуванні польових математичних моделей, які реалізуються чисельними методами. Використання цих моделей дозволяє виявити та обґрунтувати достовірні діагностичні ознаки різних ушкоджень СГ, зокрема, його обмотки статора. Дослідженню ушкоджень обмоток в синхронних генераторів присвячені роботи [2-4].

Визначення котушкового обриву обмотки статора в фазі на початковій стадії є актуальною проблемою, оскільки такий вид ушкодження обмотки статора важко виявити. Обриви фаз є аварійним режимом, призводячи до спрацювання захисної автоматики, тому такий вид ушкодження не досліджується.

Мета роботи. Метою статті є визначення кількісних діагностичних ознак котушкового обриву обмотки статора синхронного генератора на основі аналізу

вібробуджуючих сил, які можуть використовуватися в системах вібраційної діагностики.

Матеріали і результати дослідження. Для дослідження методами математичного моделювання котушкового обриву обмотки статора в синхронному генераторі був вибраний явнополюсний СГ потужністю 500 кВт (рис. 1), що має наступні параметри: номінальна напруга статора – 6 кВ, номінальний струм статора – 57 А, кількість полюсів – 12, кількість витків фази обмотки статора – 360, номінальна частота обертання 500 об/хв, кількість пазів статора – 90.

Важливим елементом математичної моделі СГ, що базується на диференціальному рівнянні в часткових похідних в роторній системі координат і чисельно вирішується методом скінченних елементів в програмі COMSOL Multiphysics, є модель електромагнітних сил [1], які визначаються за допомогою *тензора магнітного натягу* Максвелла \vec{T} , що характеризує густину електромагнітної сили, прикладеної до поверхні розточки статора. Нормальна складова тензора магнітного натягу \vec{T}_n (направлена уздовж вектору нормалі до поверхні ротора) характеризує дію радіальних вібробуджуючих сил на осердя статора.

В процесі чисельних досліджень було побудовано математичну модель досліджуваного СГ і проведено ряд чисельних розрахунків. Моделювання котушкового обриву обмотки статора здійснюється заданням електропровідності $\sigma=0$ і струму $I=0$ в витках однієї котушки як в фазній зоні А

(верхній шар обмотки статора) з однієї сторони котушки, так і в фазній зоні Х (нижній шар обмотки статора) з іншої сторони котушки (рис.2).

Для знаходження кількісних ознак, що з'являються при появі ушкоджень в СГ необхідно досліджувати відхилення у спектрі вібробуджуючих сил ушкодженого СГ в порівнянні з базовим СГ. Зокрема, аналізуються такі гармоніки вібробуджуючих сил:

1. Величина постійної складової спектра віброприскорення T_{a_0} .

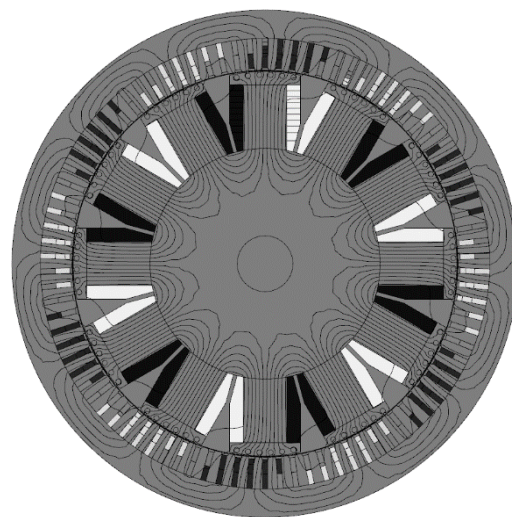


Рисунок 1 – Активна область досліджуваного СГ

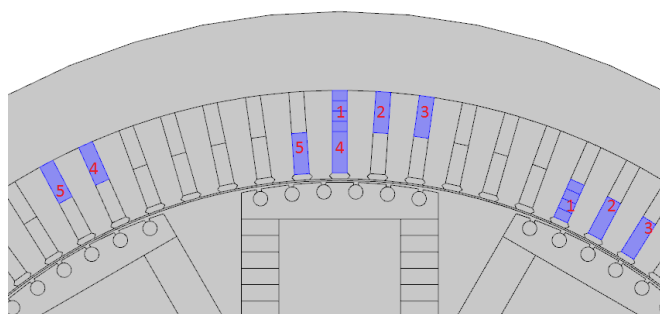


Рисунок 2 – Послідовність моделювання ушкоджень котушок СГ

2. Амплітуда обертової складової спектра віброприскорення $T_{a_{ob}}$, що має частоту $f_{a_{ob}}$, яка визначається за формулою:

$$f_{a_{ob}} = f_1/p$$

Для досліджуваного далі СГ $f_{a_{ob}} = 50 \text{ Гц} / 6 = 8,33 \text{ Гц}$.

3. Амплітуду складової подвійної частоти спектра віброприскорення $T_{a_{100}}$, що має частоту 100 Гц.

4. Амплітуду зубцевої гармоніки віброприскорення T_{a_z} , що має частоту f_z , яка визначається за формулою:

$$f_z = f_{a_{ob}} \cdot z_1$$

Для досліджуваного СГ: $f_z = 8,33 \text{ Гц} \cdot 90 = 749,7 \text{ Гц}$.

5. Середньоквадратичне значення спектра віброприскорення $T_{a_{SKZ}}$, що визначається за формулою:

$$T_{a_{SKZ}} = \sqrt{(T_{a1}^2 + T_{a2}^2 + T_{a3}^2 + \dots + T_{an}^2)/n}$$

6. Середньоквадратичне значення шумових гармонік спектра віброприскорення $T_{a_{SKZ_{sh}}}$. Шумовими гармоніками називаються гармоніки, що нижчі по амплітуді певного встановленого рівня (наприклад 10-15% від амплітуди гармоніки $T_{a_{100}}$) і не є кратними основній $T_{a_{100}}$ і зубцевим гармонікам T_{a_z} .

Для дослідження впливу котушкового обриву обмотки статора на віброзбуджуючі сили СГ було проведено ряд чисельних досліджень при зміні кількості ушкоджених котушок обмотки статора фази від 1 до 5 штук.

Спектр віброшвидкості отримується інтегруванням спектра віброприскорення. Спектр вібропереміщення отримується подвійним інтегруванням спектра віброприскорення.

На рисунку 3 показано розподіл тензора магнітного натягу по довжині розточки статора, що пропорційний віброзбуджуючим силам, і його спектр при котушковому обриві обмотки статора. З графіку видно, що при ушкодженні відбувається зменшення максимумів тензора в області ушкоджених котушок.

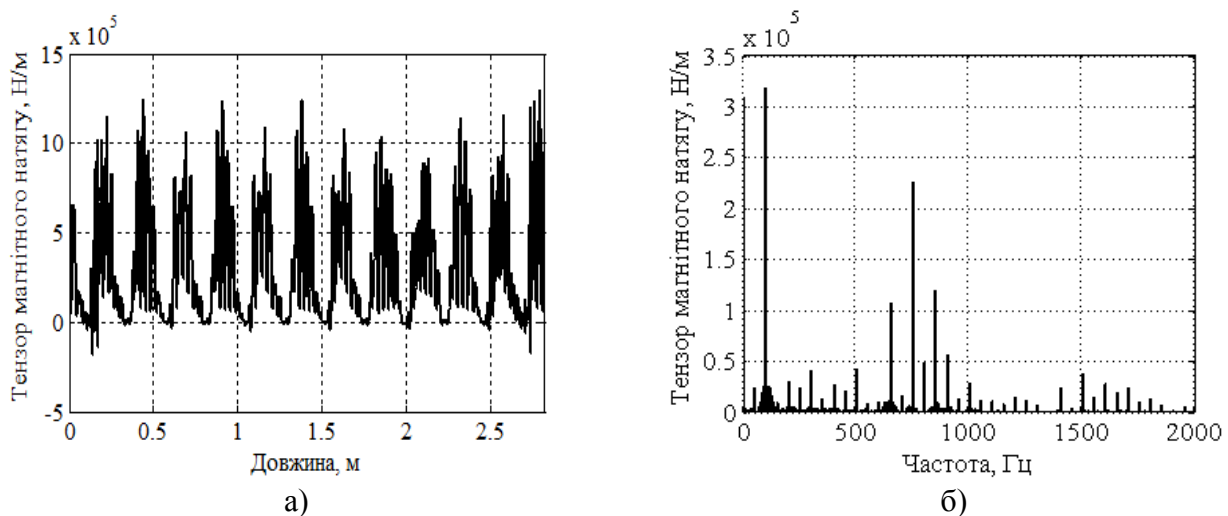


Рисунок 3 – Розподіл (а) і спектр (б) віброзбуджуючих сил при ушкодженні 5 котушок обмотки статора СГ

За результатами чисельного моделювання отримано графіки (рис. 4), що відображають зміни гармонік віброзбуджуючих сил в синхронному генераторі при котушковому обриві обмотки статора. З проведеного моделювання видно,

що зі зміною кількості ушкоджених котушок обмотки статора змінюються гармоніки віброзбуджуючих сил. При ушкодженні котушок обмотки статора в спектрі віброзбуджуючих сил найбільше змінюється середньоквадратичне значення шумових гармонік спектра віброприскорення $T_{a_{SKZ}_{sh}}$ (на 14%), що є основною діагностичною ознакою. При котушковому обриві обмотки статора зменшується амплітуда вібропереміщення гармоніки подвійної частоти на 4% від складової подвійної частоти спектру вібропереміщення, складова подвійної частоти спектру віброприскорення зменшується на 4%, а середньоквадратичні значення віброприскорення і віброшвидкості зменшуються на 2%.

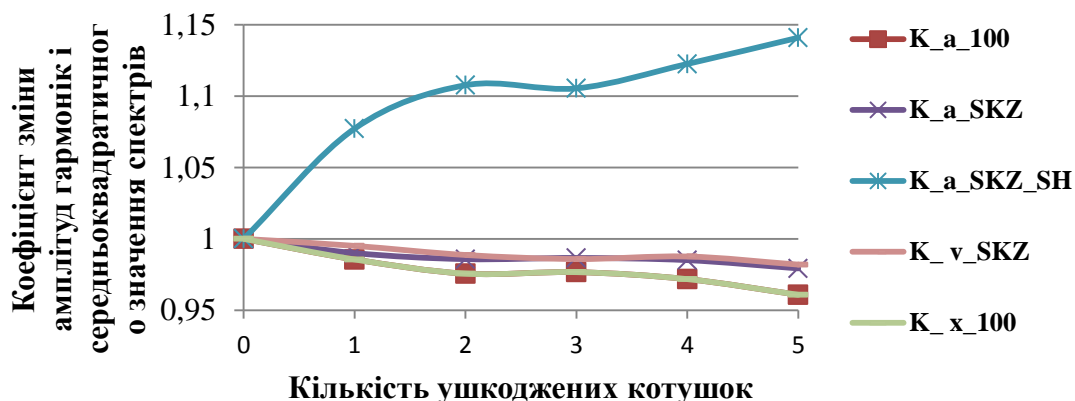


Рисунок 4 – Амплітуди гармонік віброприскорення, віброшвидкості і вібропереміщення при зміні кількості ушкоджених котушок

Теоретична і практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані при створенні інформаційної бази знань, яка входить до складу вібродіагностичних комплексів.

Висновки. Встановлено, що при котушковому обриві обмотки статора в спектрі віброзбуджуючих сил найбільше змінюється середньоквадратичне значення шумових гармонік спектра віброприскорення, що є основною діагностичною ознакою.

Перелік посилань

1. Васьковський Ю.Н., Гераскин А.А. Анализ сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях на основе математических моделей вибровозмущающих электромагнитных сил // Електротехніка і електромеханіка.– 2010. – Вип. 5. – С. 12-16.
2. Полищук, А. А., Хамухин, А. А. Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет-анализа магнитных потоков рассеяния // Известия Томского политехнического университета.– 2013. – Вип. 323(5). – С. 85-93.
3. Розум Т.И., Полищук В.И. Метод выявления витковых замыканий в обмотке возбуждения синхронного генератора // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–5. – С. 1061-1065.
4. Freire, N. M. A., Estima, J. O., & Marques Cardoso, A. J. “Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications”. Industrial Electronics, IEEE Transactions 9 (60) (2013): 3957–3967. Print.