УДК 621.313.333

ВАСЬКОВСЬКИЙ Ю.М., докт. техн. наук, професор,
ГЕРАСКІН О.А., канд. техн. наук,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського

ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ СИНХРОННОЇ МАШИНИ ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ ВИТКІВ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

За допомогою методів математичного моделювання досліджено розподіли температури і градієнта температури в явнополюсному синхронному генераторі при номінальному навантаженні. В статті визначено елементи конструкції, в яких температури і температурні градієнти мають найбільші значення. Досліджено вплив короткого замикання частини витків обмотки збудження на температуру елементів статора і ротора. При виникненні короткого замикання в обмотці збудження підвищення температури обмоток статора і ротора приблизно пропорційне кількості ушкоджених витків обмотки збудження.

Ключові слова: температурні градієнти, явнополюсний синхронний генератор.

Актуальність теми. На сьогоднішній день значна кількість потужних синхронних машин (СМ), що знаходяться в експлуатації, у тому числі явнополюсних СМ, вичерпала гарантійні терміни роботи, які встановлені заводами-виробниками. З огляду на те, що зазвичай фінансові ресурси для заміни таких потужних електричних машин на нові є обмеженими, актуальним завданням є подовження надійної їх експлуатації шляхом достовірного визначення технічного стану машин в умовах обмеженого залишкового ресурсу та розробка рекомендацій і заходів для забезпечення їх роботи з достатнім рівнем надійності.

Одним із головних факторів, який визначає надійність роботи СМ, є допустимий нагрів обмоток статора і ротора. При тривалій експлуатації в конструкції СМ з часом виникають дефекти та ушкодження, які призводять до спотворення "нормального" розподілу температури в активній зоні машини і, як наслідок, обумовлюють інтенсивне старіння машини з подальшим аварійним виходом з ладу.

Одним з характерних ушкоджень явнополюсних СМ є короткі замикання витків обмотки збудження. Загальна кількість витків обмотки збудження в багатополюсних СМ є достатньо великою. Тому прості методи виявлення невеликої кількості короткозамкнених витків, наприклад, контроль зміни загального активного опору обмотки збудження, є недостатньо чутливими. В результаті СМ може тривалий час працювати з таким ушкодженням. Зазвичай ушкодження обмеженої кількості поруч розташованих витків виникає на одному з полюсів ротора. Наявність короткозамкнених витків на одному полюсі навіть при невеликій їх кількості може суттєво впливати на роботу СМ і призводити до ряду негативних явищ. Так, через зменшення потоку збудження ушкодженого полюса ротора розподіл магнітного поля в повітряному проміжку СМ стає несиметричним, ЕРС, що індукуються в окремих пара-

лельних гілках обмотки статора, мають різну величину, що призводить до появи урівнюючих струмів, збільшення електричних втрат і зменшення ККД СМ. Змінюється розподіл температури в СМ — різні полюси ротора мають різну температуру, збільшується нагрів обмотки статора, на окремих ділянках конструкції збільшуються градієнти температури, що призводить до появи додаткових термомеханічних напружень, тощо.

Мета досліджень. Метою статті є дослідження методами математичного моделювання особливостей розподілу температурного поля в явнополюсній СМ, які виникають внаслідок коротких замикань в обмотці збудження.

Об'єкт дослідження. Дослідження проводилися на прикладі явнополюсної СМ потужністю 500 кВт, яка використовується як автономний синхронний генератор (СГ) на малопотужних гідроелектростанціях і має наступні номінальні дані: напруга статора — 6 кВ; струм статора — 57 А; cosφ = 0,9; ККД = 94%; напруга ротора — 65 В; струм ротора — 320 А; кількість полюсів — 12; частота обертання 500 об/хв; кількість витків обмотки збудження — 384; число витків фази обмотки статора — 360 (всі витки з'єднані послідовно); кількість пазів статора — 90; номінальний кут навантаження θ = 23,5?; число пазів на полюс і фазу статора q = 2,5; відносний крок обмотки статора β = 0,8; клас нагрівостійкості ізоляції обмоток статора і ротора — B (130 °С).

Математична модель. Математична модель досліджуваного СГ базується на диференціальному рівнянні теплопровідності в часткових похідних, яке чисельно розв'язується методом скінченних елементів в програмі COMSOL Multiphysics.

Рівняння, що характеризує фізичні процеси стаціонарної теплопровідності в декартових координатах в двовимірній постановці, представлено в наступному вигляді [1]:

$$\lambda\left[\frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial y^2}\right]=Q(x,y),$$

де $T(x, y)$ — невідома функція розподілу температури; λ — коефіцієнт теплопровідності; $Q(x, y)$ — об'ємні питомі втрати потужності, Вт/м^3 (відома функція, яка характеризує просторовий розподіл джерел теплового поля). Джерелами теплового поля є втрати потужності в обмотках СГ (в обмотці збудження на роторі і в обмотці статора) при роботі СГ в синхронному режимі.

При визначенні розподілу теплового поля статора і ротора СГ розглядався стаціонарний розподіл температури в поперечному перетині машини при живленні обмоток збудження і статора СГ.

На границі, що є зовнішньою поверхнею ротора і на поверхнях розточки і ярма статора, задавалися граничні умови третього роду [1—3]:

$$\lambda\frac{\partial\theta}{\partial n}=\alpha(\theta-\theta_C),$$

де θ_C — температура охолоджуючого повітря (θ_C = 40 °С).

Також задавались наступні параметри матеріалів:

- еквівалентний коефіцієнт теплопровідності пазової ізоляції обмоток статора і ротора $\lambda_{із}$ = 0,25 Вт/м·К;

- коефіцієнт теплопровідності мідних провідників статора і ротора $\lambda_{міді}$ = 400 Вт/м·К;

- коефіцієнт тепловіддачі поверхонь статора і ротора в охолоджуюче повітря α = 30 Вт/(м^{2}К);

Всі дослідження температурних навантажень здійснюються для номінального режиму роботи СГ. Основними величинами, що досліджуються при аналізі температурного поля СГ, є:

- максимальне значення температури в різних елементах активної зони СГ, зокрема, в провідниках обмотки збудження, в обмотці статора, в осердях полюсів ротора;

- максимальне значення градієнта температури в елементах активної зони СГ.

Аналіз розподілу температурного поля дозволяє оцінити асиметрію картини поля і дає гарантовану кількісну оцінку нагріву його елементів в режимі номінального навантаження, як неушкодженого СГ, так і при різних за обсягом коротких замиканнях витків обмотки збудження.

При короткому замиканні частини витків обмотки збудження утворюється струмопровідна ділянка, через яку проходить струм до решти неушкоджених витків, оминаючи ушкоджені витки електричного кола збудження. В математичній моделі таке ушкодження моделюється таким чином, що в короткозамкнених витках на ушкодженому полюсі ротора задається нульова густина сторонніх струмів J_2 = 0, оскільки ЕРС в цих витках обмотки збудження не індукується і струм не протікає. Важливий вплив на температуру має місце розташування закорочених витків уздовж висоти котушки збудження, оскільки витки, які розташовані ближче до центра ротора мають гіршу вентиляцію і можуть більше перегріватися, ніж витки, які розташовані ближче до полюсних наконечників. Всі котушки обмотки збудження на полюсах з'єднані послідовно.

При розрахунках ушкодженої СМ необхідно врахувати збільшення струму збудження через

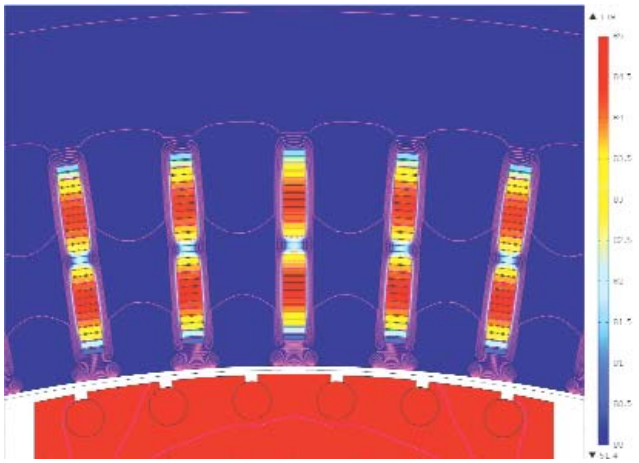

Рис. 1. **Розподіл температурного поля в обмотці статора СМ**

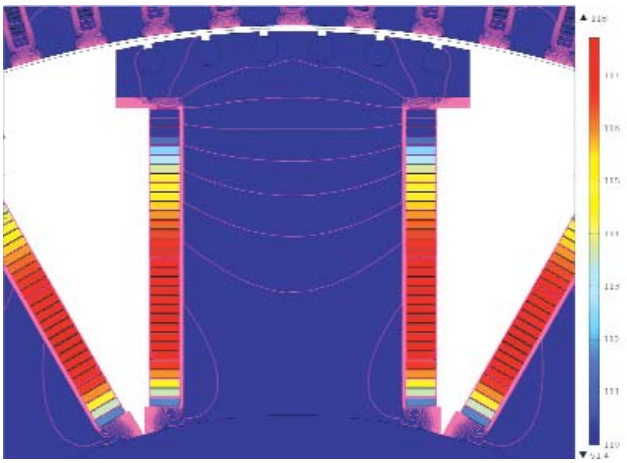

Рис. 2. **Розподіл температурного поля в роторі СГ**

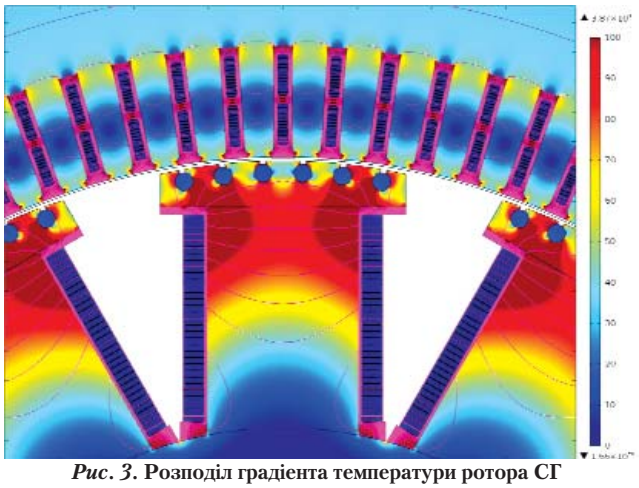

Рис. 3. **Розподіл градієнта температури ротора СГ**

зменшення загального електричного опору обмотки, викликаного закороченням частини витків. Номінальний струм обмотки збудження множиться на коефіцієнт $k_{ОЗ_І}$:

$$k_{ОЗ_І} = 2p/((2p - 1) + 1 \cdot k_{ПОЛ_І}),$$

де $k_{ПОЛ_І}$ — коефіцієнт, що характеризує відношення неушкоджених витків полюса $w_{неушкод}$ до повної кількості витків одного полюса $w_{пов}$:

$$k_{ПОЛ_І} = w_{неушкод}/w_{пов}.$$

Прийнятим припущенням в моделі є відсутність взаємного теплообміну між статором і ротором. Вважається, що все тепло, наприклад, від ротора відводиться через повітряний проміжок в систему охолодження СГ. Але при короткому замиканні частини витків обмотки збудження, можливий додатковий нагрів статора через вплив іншого фактора — зміну магнітного потоку збудження. Підвищення температури статора можна пояснити наступним чином. При ушкодженні обмотки збудження сумарна ЕРС всіх витків обмотки статора зменшиться через зменшення (або зникнення) магнітного потоку збудження ушкодженого полюса ротора (при незначному збільшенні потоку решти полюсів). Вважається, що при номінальному навантаженні СГ завжди видає незмінну електричну потужність P_2 = const. Тому через зменшення ЕРС в обмотці статора, а значить і вихідної напруги генератора має збільшитися струм статора, тобто електрична потужність буде передаватись в навантаження при іншому неразрахунковому співвідношенні напруги і струму. Це призведе до підвищеного нагріву статора.

Дослідження температурного поля в неушкодженому СГ.

За результатами проведених чисельних розрахунків отримані наступні результати.

При дослідженні температурного поля в стато-

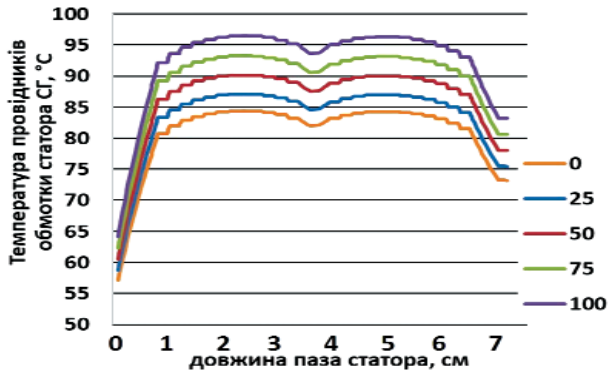

Рис. 4. **Розподіл температури провідників обмотки статора уздовж висоти пазу для різної кількості короткозамкнених витків одного полюса ротора СГ**

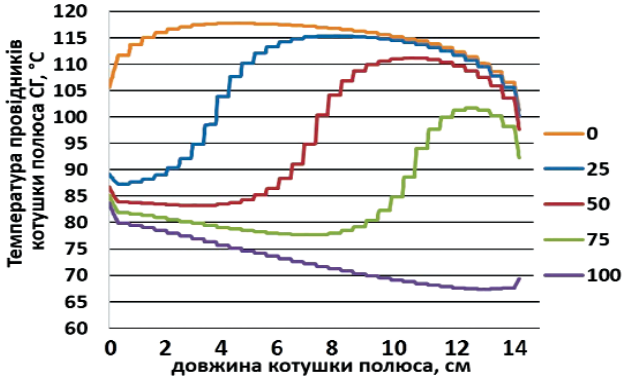

Рис. 5. **Розподіл температури провідників котушки ушкодженого полюса ротора для різної кількості короткозамкнених на ньому витків**

рі в номінальному режимі СГ було визначено, що:

1) максимальний нагрів обмотки статора СМ становить 84,38°С;

2) мінімальний нагрів елементів статора спостерігається в клинах статора (56°С);

3) виявлено нерівномірність розподілу температури обмотки статора уздовж висоти паза статора, яка складає приблизно 5°С. За рахунок тепловіддачі від статора в повітряний проміжок та через ярмо, ділянки підвищеного нагріву обмотки в пазу статора розташовані ближче до центру пазів статора СГ (Рис. 1, 4).

При дослідженні температурного поля ротора СГ визначено, що:

1) максимальна температура спостерігається в обмотці збудження (117,7°С);

2) максимальна температура осердя полюса ротора становить 103°С, тобто спостерігається суттєвий нагрів і осердя;

3) температура в обмотці збудження розподілена нерівномірно вздовж висоти котушки полюса. Найбільше нагріваються витки обмотки збудження, що розташовані на відстані 1/3 від загальної висоти котушки в напрямі від центра ротора (Рис. 2, 5). Перепад температури складає приблизно 11°С.

4) осердя полюса ротора також нагрівається нерівномірно. Температура осердя полюса зменшується при віддаленні від центра ротора зі 102,3°С до 93,7°С.

Досліджувалася величина градієнта (перепаду) температури, яка впливає на величину термомеханічних напружень в елементах конструкції СМ і тому є важливою характеристикою температурного поля машини.

При проектуванні СГ приблизне розрахункове значення градієнта температури в ізоляціїї становить 4680 К/м. Однак результати виконаних польових розрахунків показують, що реальні значення градієнта температури в ізоляції обмоток СГ значно перевищують розрахункові значення, прийняті при проектуванні.

При дослідженні температурного градієнта в ізоляції обмоток СГ (Рис. 3) було визначено, що:

1) найбільша величина градієнта температури спостерігається в витковій ізоляції обмотки збудження (38382 °С /м);

2) великі значення градієнта також спостерігаються в ізоляції обмотки статора (до 12000 °С/м) і в пазових клинах (до 24000 °С/м).

Виявлено, що підвищеними є значення температурного градієнта в сталі полюсів ротора біля полюсних наконечників.

Дослідження температурного поля в СГ при короткому замиканні обмотки збудження.

На Рис. 4, 5 зображено розподіли температури обмоток статора і ротора уздовж, відповідно, висоти паза статора і висоти котушки на полюсі ротора для різної кількості короткозамкнених витків, виражених в процентному співвідношенні до повної кількості витків на одному полюсі (32 витка).

При при повному короткому замиканні котушки на полюсі ротора виявлено, що:

1) температура провідників ушкодженого полюса зменшується на 12,1° (Рис. 5), а температура неушкоджених полюсів ротора збільшується на 11,2°С через збільшення в них струму збудження (збільшується на 9,1% при замиканні 8,3% витків обмотки ротора);

2) температура провідників обмотки статора (Рис. 4) СГ збільшується на 12°С (збільшується на 8,7% при замиканні 8,3% витків обмотки ротора).

3) максимальна температура заліза осердя статора збільшується на 11,4°С.

Висновки. При короткому замиканні частини витків обмотки збудження СМ зростає температура обмоток статора і ротора, причому у порівнянні з неушкодженою машиною у першому наближенні можна вважати, що зростання температури в процентах приблизно дорівнює кількості короткозамкнених в обмотці збудження витків.

ЛІТЕРАТУРА.

1. *Филипов И.Ф.* Теплообмен в електрических машинах, Ленинград, Энергоатомиздат ЛО, 1986. — 256 с.

2. *Федоренко Г.М.* Теплове навантаження ротора турбогенератора типу ТГВ-300, що модернізується на основі маловитратної d-q технології / Г.М. Федоренко, Ю.М. Васьковський, В.О. Саратов, В.В. Кузьмін, Ю.В. Зозулін // Новини енергетики. — 1998. — № 5. — С. 41—47.

© Васьковський Ю.М., Гераскін О.А., 2017