

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА НАГРІВУ ЕЛЕМЕНТІВ РОТОРА СИНХРОННОГО
ГЕНЕРАТОРА ЗА РІЗНИХ УМОВ ОХОЛОДЖЕННЯ

Кучинський К. А., д.т.н., ст.наук.співроб., e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com

Інститут електродинаміки НАН України

Загальна світова стратегія в галузі електромашинобудування – повністю відмовитися від виготовлення турбогенераторів (ТГ) з водневим охолодженням. Актуальність досліджень визначається необхідністю заміни вибухо- і пожежонебезпечних генераторів з водневим охолодженням на безводневі машини для досягнення високої безпеки експлуатації.

Значні успіхи в створенні таких ТГ досягнуті закордонними фірмами АВВ, Siemens/KWU, AEG-Kanis, General Electric-Alstom. Проте достовірна інформація щодо їх працездатності при стабільній активній потужності відсутня. Детальна інформація про результати випробувань в робочих режимах недоступна, тому важко оцінювати реальну ефективність машин в цілому. Розроблена в ДП «Електроважмаш» (м. Харків) понад 20 років тому серія ТГ з повним повітряним охолодженням залишається у вигляді проектів і робочих креслень, за винятком одного ТГ потужністю 120 МВт, встановленого на Миронівській ТЕС, який ніколи не працював на повну потужність. Також, вадою є більша довжина таких машин в порівнянні з аналогами із водневим охолодженням, що не дозволяє встановлювати їх на існуючі фундаменти при заміні старих генераторів. Перспективними є конструкції з повітряним охолодженням масивних вузлів та водяним охолодженням обмоток.

Метою досліджень був аналіз рівнів нагріву основних елементів роторів ТГ при номінальному режимі навантаження і різних варіантах охолодження машини.

Математична модель і методика досліджень базуються на основі чисельного рішення задачі методом скінченних елементів у двовимірній постановці [1] і зводиться до знаходження температурного поля у вузлах сітки шляхом мінімізації енергетичного функціонала

$$\left\{ \frac{\partial \chi}{\partial T_n} \right\} = \sum_e \left\{ \frac{\partial \chi}{\partial T_n} \right\}^e = [H]\{T\} - \{R\} = 0, \quad (1)$$

де $[H]$ – глобальна матриця теплопровідності; $\{T\}$ – вектор невідомих температур; $\{R\}$ – вектор теплових джерел у даній області [1].

У роботі [1] проаналізовано температурні поля в роторі генератора потужністю 250 МВт при заповненні корпусу воднем і повітрям. Оскільки зниження коефіцієнтів тепловіддачі при повітряному охолодженні більш ніж в 5 разів у порівнянні з водневим призводить до збільшення максимальних нагрівів активних і конструкційних елементів ротора приблизно не більше ніж на 50 % [1] (якщо температуру гарячого газу на виході з обмотки ротора (ОР) прийняти такою ж, як й при водневому охолодженні за даними заводу-виробника – 81 °С), параметрами сильної дії на тепловий стан об'єкта визнано величини температур гарячого газу в різних вузлах ротора. Максимальна ж температура гарячого повітря на виході з каналів ОР в номінальному режимі навантаження склала 202 °С. При цьому нагріву всіх основних вузлів ротора перевищили допустимі значення.

Далі було проведено оцінку величин нагрівань елементів ротора при заповненні корпусу машини повітрям та застосуванні так званої «діагональної схеми охолодження ОР».

Безпосереднє охолодження ОР в пазовій частині здійснюється за схемою самовентиляції з багаторазовим забором газу із зазору машини. Для зниження підігріву охолоджуючого повітря та, відповідно, нагрівань ОР до прийнятних величин були проведені розрахунки при підрозділі схеми охолодження на 6 та 7 зон впуску-випуску газу. У першому випадку максимальна температура гарячого повітря на виході дорівнює 93,4 °С, температура обмотки – 146,1 °С; для другого варіанту температура повітря на виході – 85,6 °С, температура обмотки – 138,3 °С, що нижче за допустиме значення для класу ізоляції «F» (155 °С).

ТГ потужністю 500 МВт (типу ТГВ-500) виконані з радіальною нагнітальною системою охолодження статора. Охолоджуючий ОР дистиллят підводиться і відводиться через U-подібні трубки-компенсатори та ізоляційні втулки.

Максимальне перевищення температури гарячого дистилляту на виході з провідників обмотки збудження при номінальному навантаженні дорівнює $40,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, що при температурі холодної води в $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ на вході відповідає максимальній температурі гарячого дистилляту $80,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Можливість варіанта безпосереднього повітряного охолодження провідників ОР (заміни дистилляту на повітря) при розрахункових дослідженнях ротора ТГ не розглядалася.

При теплових випробуваннях генератора у режимах недозбудження максимальне перевищення температури гарячого газу над холодним у відсіках генератора при зниженому надмірному тиску водню $0,25\text{ МПа}$ становило $22,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає максимальній температурі $62,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Середня температура водню в зазорі дорівнює $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. При заповненні корпусу повітрям температура газу підвищується за довжиною і досягає у середині $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1 відображено результати чисельних досліджень розподілу температурного поля в елементах ротора при традиційній системі охолодження генератора у номінальному режимі (1 – вздовж вісі великого зубця; 2 – вздовж вісі малого зубця; 3 – вздовж вісі паза ротора).

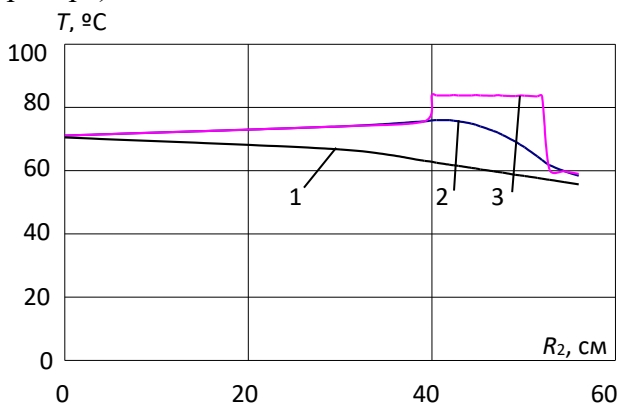


Рисунок 1 – Нагрів ротора при номінальних умовах охолодження (обмотки – дистиллятом; корпус заповнений воднем)

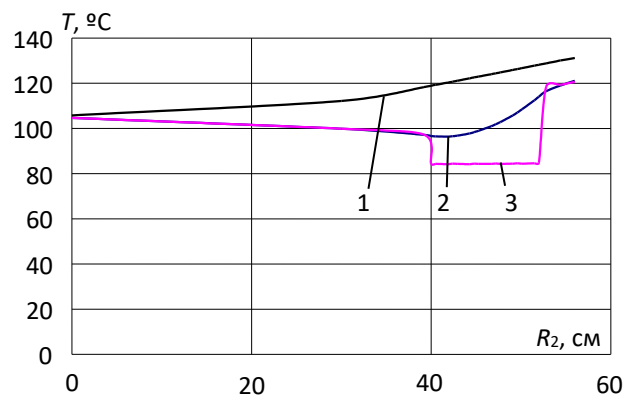


Рисунок 2 – Нагрів елементів ротора ТГ при охолодженні обмоток статора і ротора дистиллятом і заповненні корпусу повітрям

На рис. 2 представлені результати розрахунку нагрівів вузлів ротора генератора в номінальному режимі при заповненні корпусу машини повітрям. Спостерігаються підвищені нагрів області ярма ротора, поверхонь малого і особливо великого зубців, а також клина внаслідок зниженого коефіцієнта тепловіддачі з поверхні бочки, великих значень втрат на тертя і температури охолоджуючого агента в зазорі генератора. При цьому нагрів міді ОР збільшується вкрай незначно через великий коефіцієнт тепловіддачі з поверхні провідників до води при незмінних теплових втратах в котушках. Відмова від водню як вибухонебезпечного холодоагенту підвищує безпеку експлуатації і надійність генератора, дає переваги у вигляді відсутності ущільнень вала і допоміжних масляно-водневих систем, що призводить до спрощення конструкції і обслуговування машини.

Висновки. 1. Теоретично встановлено, що застосування багатоструйної схеми безпосереднього повітряного охолодження ОР (на прикладі генератора потужністю 250 МВт) може сприяти зниженню нагрівів обмотки збудження до допустимих значень для класу ізоляції «F». 2. Можлива тривала робота генератора потужністю 500 МВт при заміні водню в корпусі машини на повітря та охолодженні при цьому обмоток статора і ротора дистиллятом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кучинский К. А., Федоренко Г. М. Компьютерное моделирование и вариантный анализ тепловых процессов в роторе турбогенератора типа ТГВ-250. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ, 2013. Вип. 36. С. 51–60.