

ОЦІНКА ТЕПЛОВОГО СТАНУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА СЕРІЇ АТД2 ПРИ ВИНИКНЕННІ УШКОДЖЕНЬ ОБМОТКИ РОТОРА

Гайденко Ю.А., к.т.н., доцент, Скуратовський І.П., магістрант
КПІ імені Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

Вступ. Питання надійності функціонування електричних машин досі залишається актуальним. Особливо це стосується таких потужних машин як асинхронні двигуни серії АТД2 потужністю до 8000 кВт. Вони використовуються в якості електроприводу стаціонарних насосів, компресорів та інших швидкохідних механізмів. Зустріти їх можна на електростанціях, зокрема атомних, та в інших галузях промисловості. На електричних станціях двигуни серії АТД2 використовуються з 1970-х років для приводу потужних насосів і, зрозуміло, що від їх надійної роботи залежить безперебійне виробництво електричної енергії [1].

Розрахунковий термін експлуатації асинхронних двигунів серії АТД2 складає 20 років або 10000 пусків [1]. Двигуни є високовольтними (лінійна напруга обмотки статора становить 6 кВ), тому незважаючи на їх високе навантаження вони мають досить помірний номінальний струм і ізоляцію обмотки статора лише класу В (максимальна температура до 130 °С). Крім того, для забезпечення високих енергетичних показників та запобігання перегрівів короткозамкнений ротор виконано з **мідною** «білячою кліткою».

Двигуни серії АТД2 можуть мати як замкнений так і розімкнений цикл вентиляції. При замкненому циклі охолоджувачі повітря розташовуються або під двигуном або над двигуном. Система вентиляції двигунів проточна, аксіальна. На рис. 1 зображено схему вентиляції двигунів серії АТД2.

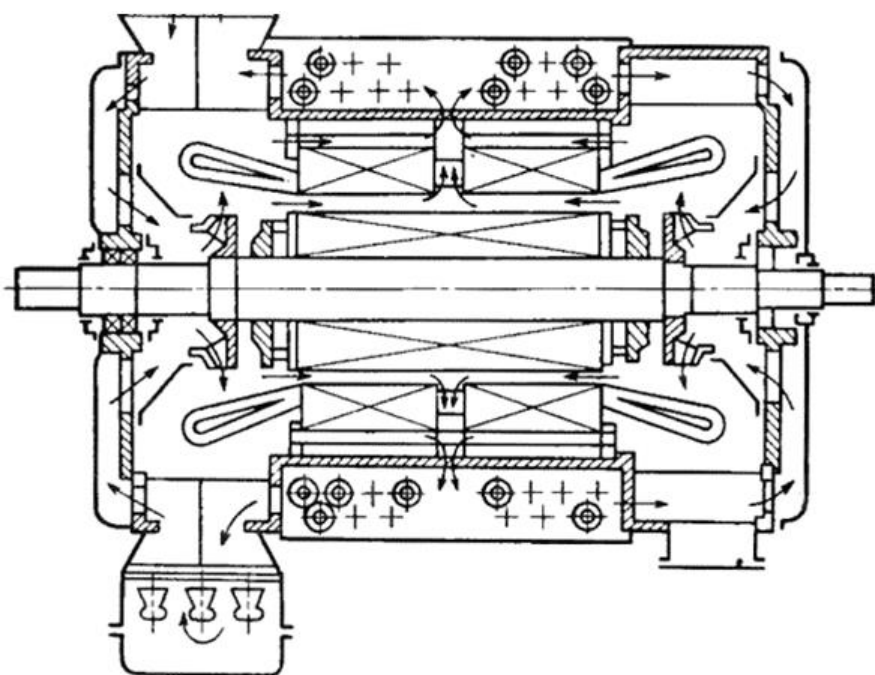


Рисунок 1 – Схема вентиляції асинхронного двигуна серії АТД2

За багато років експлуатації двигуни серії АТД2 зарекомендували себе як досить надійні. Разом з тим, досвід їх використання виявив і слабкі сторони цієї машини. Зокрема це стосується короткозамкненої обмотки ротора, де мідні стержні «білячої клітки» за допомогою спеціального припою з'єднуються з короткозамкненими кільцями. Саме це місце з'єднання є слабким, оскільки через неякісне припаювання та/або через великі відцентрові сили (швидкість обертання ротора біля 3000 об/хв) в місцях з'єднання стержнів і кілець можуть виникати тріщини та розриви. В результаті, такий асинхронний двигун може увійти в несиметричний режим з усіма негативними наслідками.

Мета роботи – аналіз теплового поля асинхронного двигуна серії АТД2 при виникненні ушкоджень короткозамкненої мідної обмотки ротора.

Об'єкт та методи дослідження. В якості досліджуваного зразка був обраний асинхронний двигун серії АТД2, що використовується для приводу насосів на вітчизняних атомних електростанціях.

Дані двигуна: потужність на валу $P_2 = 5000 \text{кВт}$; номінальна напруга $U = 6000 \text{В}$; номінальний струм $I_1 = 545 \text{А}$; номінальна швидкість обертання ротора $n_2 = 2987 \text{об/хв}$; коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,965$; коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,915$; зовнішній діаметр магнітопроводу статора $D_{a1} = 1440 \text{мм}$.

Дослідження проводилось методами теорії поля [2]. Для цього була розроблена спеціальна **мультифізична** коло-польова математична модель об'єкту дослідження в програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Модель реалізована в двовимірному (2D) наближенні в квазістатичному режимі, базується на методі скінченних елементів та поєднує в собі дві задачі: електромагнітну та теплову. Тобто результати розрахунку електромагнітного поля та електричних кіл впливають на вхідні дані для теплової задачі і навпаки. Такий підхід був реалізований вперше для розрахунку двигунів даної серії.

Результати та обговорення. Дослідження проводилось для номінального режиму (при забезпеченні номінального моменту на валу) для таких випадків:

- симетричний режим (без ушкоджень обмотки ротора);
- обрив стержнів, що розташовані поруч. Досліджено обрив 1, 2, 3 та 4 стержнів;
- обрив стержнів, що розташовані в різних місцях (під кутом 90° та 180°);
- розрив короткозамкненого кільця в одному та декількох місцях.

Для визначення вхідних даних (коефіцієнтів тепловіддачі) для теплового аналізу заздалегідь був виконаний поглиблений вентиляційний розрахунок.

Проведене моделювання дозволило визначити: розподіл магнітної індукції та струмів в обмотках статора і ротора, Джоулеві втрати які виділяються в окремих частинах машини, а також розподіл температури.

На рис. 2 представлено картини розподілу температури в поперечному перерізі активної зони АТД2 в номінальному режимі без ушкоджень обмотки ротора (симетричний режим).

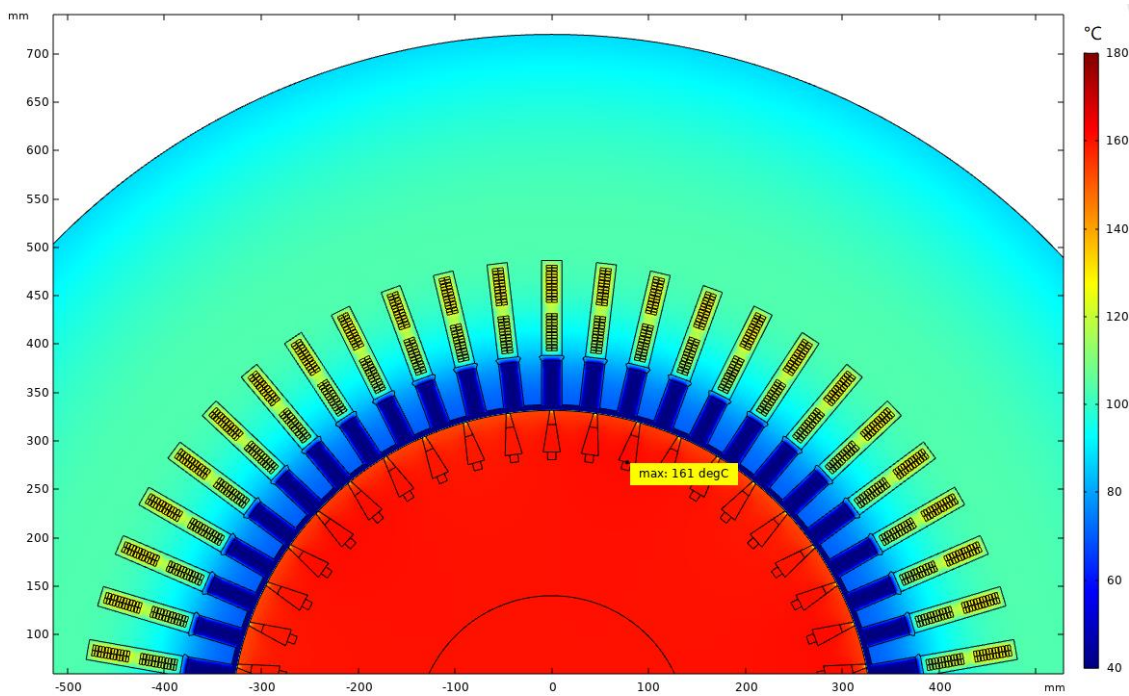


Рисунок 2 – Розподіл температури в АТД2 (симетричний режим)

Як видно з рис. 2 найбільш нагрітою частиною об'єкту дослідження є ротор, температура якого досягає 161 °С. При цьому розподіл температури є рівномірним. Максимальна температура в статорі закономірно спостерігається в провідниках обмотки і досягає значення 128 °С. Таку велику відмінність температури в статорі і роторі (більше 30 °С) можна пояснити особливостями охолодження даного двигуна. Зокрема основна частина охолоджуючого повітря проходить не над зовнішньою поверхнею статора, як в традиційних асинхронних машинах, а всередині повітряного зазору та надпазових каналах статора (на рис. 2 вони найхолодніші). Тому можна вважати, що в тепловому відношенні статор і ротор розділені. Отже далі будемо приводити лише розподіл температури в найбільш нагрітій частині двигуна – роторі.

На рис. 3 приведений розподіл температури в роторі при різних ушкодженнях його обмотки. Можна побачити, що при виникненні обривів як в стержнях, так і в КЗ кільцях виникає суттєва неоднорідність нагріву ротора. В деяких його частинах температура може бути навіть нижче ніж при симетричному режимі, в інших – набагато її перевищувати. Так, максимальна температура в роторі при обриві чотирьох стержнів (рис. 3 в) досягає 186 °С, а мінімальна 152 °С. При обриві обох КЗ кілець неоднорідність розподілу ще більша (рис. 3 з) – максимальна температура 177 °С, а мінімальна 121 °С. Такий нерівномірний нагрів зберігається при будь-якому положенні ротора і призводить до того, що більш нагріті частини ротора мають більше теплове розширення, а холодніші – менше. Це, в свою чергу, може призвести до подальшого стрімкого руйнування всієї короткозамкненої обмотки ротора в якій мідні стержні припаяні до КЗ кілець.

Отже, ушкодження обмотки ротора є досить важким режимом для асинхронних двигунів загалом і для АТД2 зокрема. Такі ушкодження можуть

привести як до значного погіршення енергетичних, віброакустичних, теплових характеристик двигуна, так і до вірогідного швидкого виходу його з ладу.

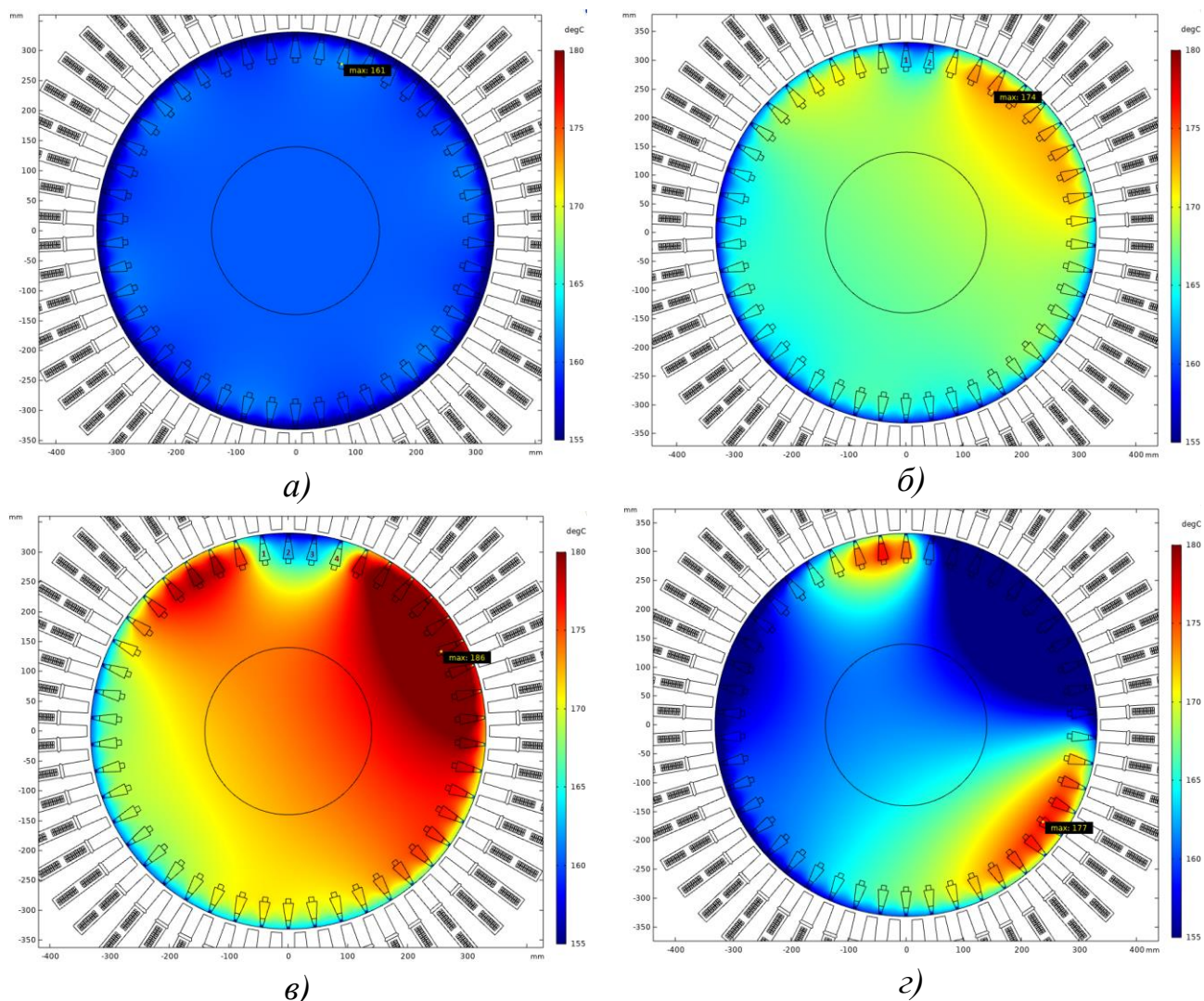


Рисунок 3 – Розподіл температури в АТД2: *а)* симетричний режим; *б)* обрив 2-х стержнів (позначені цифрами); *в)* обрив 4-х стержнів (позначені цифрами); *г)* обрив обох КЗ кілець.

Висновок. Проведене дослідження виявило надзвичайно небезпечну вразливість паяної обмотки ротора асинхронного двигуна серії АТД2 потужністю 5000 кВт. Зокрема, виникнення хоча б одного розриву в місці контакту стержень-кілець може спричинити лавиноподібне руйнування всієї КЗ обмотки ротора. На дану обставину потрібно звернути увагу як при ремонтах двигунів даної серії, так і при розробці нових серій подібних двигунів.

Перелік посилань

1. Справочник по ремонту крупных электродвигателей / под ред. Р.И. Соколова – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 272 с.
2. Гайденко Ю.А., Цивінський С.С. Моделювання теплового стану ротора турбогенератора потужністю 500 МВт в залежності від виду охолодження // Гідроенергетика України. – 2017. – №3-4. – С. 66-70.