



УДК 621.313.333.

**ГАЙДЕНКО Ю.А.**, канд. техн. наук, доцент,  
**СКУРАТОВСЬКИЙ І.П.**, магістр,  
НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"

## ТЕПЛОВИЙ СТАН АСИНХРОННОГО ДВИГУНА СЕРІЇ АТД2 ПРИ НАЯВНОСТІ УШКОДЖЕНЬ ОБМОТКИ РОТОРА

*Досліджено вплив ушкоджень короткозамкненої обмотки ротора на тепловий стан асинхронного двигуна серії АТД2 потужністю 5000 кВт для власних потреб електростанцій. На основі спеціально розробленої мультифізичної коло-польової математичної моделі були проаналізовані електромагнітні та теплові процеси при наявності дефектів в короткозамкненій обмотці ротора двигуна. Виявлено, що вплив різних ушкоджень є різним, причому деякі види ушкоджень можуть спричинити значні термомеханічні деформації окремих частин обмотки ротора та повний вихід з ладу двигуна.*

*Ключові слова: асинхронний двигун, АТД2-5000, ушкодження короткозамкненої обмотки ротора, коло-польова математична модель, температурне поле, термомеханічні процеси.*

**Вступ.** Питання надійності функціонування електричних машин досі залишається актуальним. Особливо це стосується таких потужних машин як асинхронні двигуни серії АТД2 (Рис. 1) потужністю до 8000 кВт. Вони використовуються в якості електроприводу стаціонарних насосів, компресорів та інших швидкохідних механізмів. На електростанціях 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. 2 зображено схему вентиляції двигунів 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 близько 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  $P_2 = 5000$  кВт; номінальна напруга  $U = 6000$  В; номінальний струм  $I_1 = 545$  А; номінальна швидкість обертання ротора  $n_2 = 2987$  об/хв; коефіцієнт корисної дії  $\eta = 0,965$ ; коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = 0,915$ ; зовнішній діаметр магнітопроводу статора  $D_{a1} = 1440$  мм.

Дослідження проводилось методами теорії поля [2]. Для цього була розроблена спеціальна **мультифізична** коло-польова математична модель об'єкта 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 про-



Рис. 1. Загальний вигляд асинхронного двигуна серії АТД

водилось 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 в поперечному перерізі двигуна, струмів в обмотках статора і ротора, Джоулеві втрати які виділяються в окремих частинах машини, а також розподіл температури.

На Рис. 3 представлено картини розподілу магнітної індукції (Рис. 3, а) та температури (Рис. 3, б) в поперечному перерізі активної зони АТД2-5000 в номінальному режимі без ушкоджень обмотки ротора (симетричний режим).

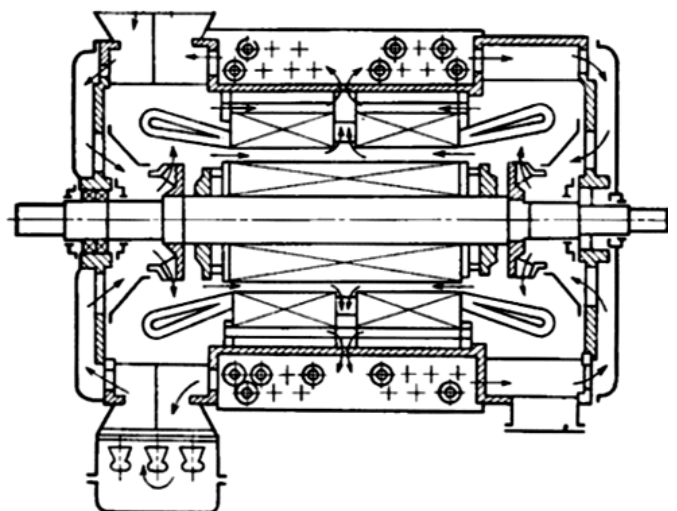


Рис. 2. Схема вентиляції асинхронного двигуна серії АТД2

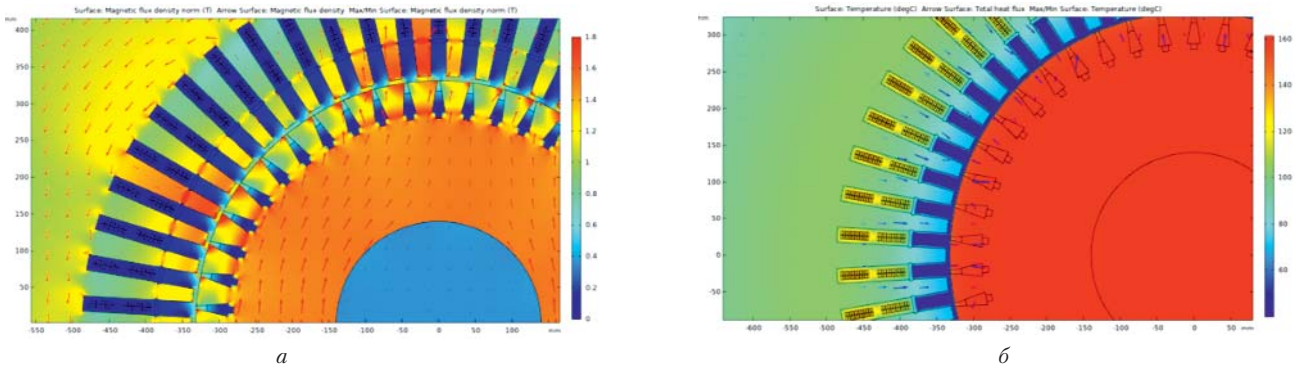


Рис. 3. Поперечний переріз АТД2-5000 (симетричний номінальний режим): а – розподіл магнітної індукції; б – розподіл температури

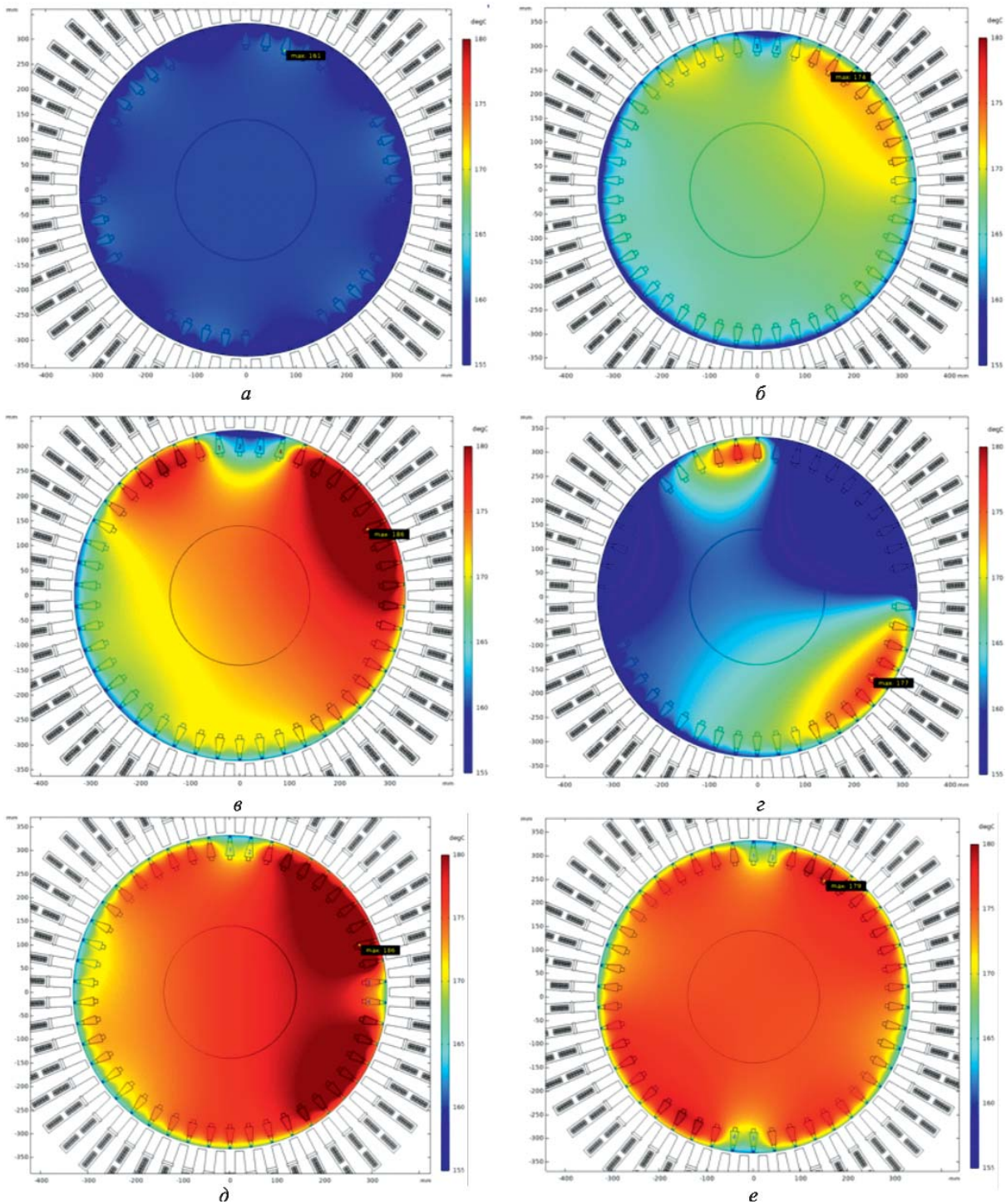


Рис. 4. Розподіл температури в АТД2: а) симетричний режим; б) обрив 2-х стержнів (позначені цифрами); в) обрив 4-х стержнів (позначені цифрами); г) обрив обох КЗ кілець; д) обрив 4-х стержнів по схемі «2 + 2» під кутом 90°; е) обрив 4-х стержнів по схемі «2 + 2» під кутом 180°





Як видно з Рис. 3 найбільша індукція зосереджена у роторі та зубцях статора. В найвужчих ділянках окремих зубців індукція досягає 1,8–1,9 Тл, що є стандартними величинами для асинхронних двигунів. Найбільш нагрітою частиною об'єкта дослідження є ротор, температура якого досягає 161 °С. При цьому розподіл температури є рівномірним. Максимальна температура в статорі очікувано 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.3 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. 4 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 а інших – набагато її перевищувати. Так, максимальна температура в роторі при обриві чотирьох стержнів (Рис. 4, в) досягає 186 °С, а мінімальна 152 °С. При обриві обох КЗ кілець під прямим кутом (мається на увазі не відокремлення КЗ кільця від стержня, а розрив кільця на ділянці між стержнями, причому такі розриви на протилежних кільцях розташовані під кутом 90° один відносно одного) неоднорідність розподілу ще більша (Рис. 4, з) – максимальна температура 177 °С, а мінімальна 121 °С. Також, важливим є не тільки кількість ушкоджених стержнів, а і місце розташування ушкоджень. Так, при обриві чотирьох стержнів, більша температура (186 °С) в роторі буде спостерігатися при розташуванні ушкоджених стержнів по схемі «2 + 2» під кутом 90° (Рис. 4, д). Якщо ж обрив стержнів буде по схемі «2 + 2» але під кутом 180° найбільша температура дещо менша – 179 °С, до того ж розподіл температури в роторі рівномірніший (Рис. 4, е).

Картина нерівномірного нагріву (Рис. 4) зберігатиметься при будь-якому положенні ротора.

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

**Висновки.** Дослідження складних фізичних процесів в електричних машинах слід проводити на основі спеціальних мультифізичних математичних моделей які враховують взаємний вплив електромагнітних і теплових процесів, в ідеалі також слід додати і механічні процеси. Подібний підхід, на прикладі асинхронного двигуна АТД2-5000 власних потреб електростанцій, дозволив виявити надзвичайно небезпечну вразливість паяної мідної короткозамкненої обмотки ротора відносно можливих термомеханічних деформацій, які можуть бути спричинені ушкодженнями в стержнях або КЗ кільцях. Зокрема, виникнення хоча б одного розриву в місці контакту стержень-кільце може спричинити лавиноподібне руйнування всієї КЗ обмотки ротора. На дану обставину потрібно звернути увагу як під час ремонтів двигунів даної серії, так і при розробці нових серій подібних двигунів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Справочник по ремонту крупных электродвигателей* / под ред. Р.И. Соколова – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 272 с.
2. *Гайденко Ю.А., Цивінський С.С.* Моделирование теплового stanu ротора турбогенератора потужністю 500 МВт в залежності від виду охолодження // Гідроенергетика України. – 2017. – №3-4. – С. 66-70.
3. *Гайденко Ю.А., Скуратовський І.П.* Аналіз можливостей покращення характеристик асинхронних двигунів серії АТД2 власних потреб електростанцій // Міжнародний науково-технічний журнал молодих вчених, аспірантів та студентів. Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматичної. – Київ: «Політехніка», 2018. – С.342-345.
4. *Васьковський Ю.Н., Гайденко Ю.А., Нацук О.В.* Дослідження методами теорії поля характеристик асинхронних двигунів при несиметрії параметрів ротора // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №3. – С. 19–22.

