

МОДЕЛЮВАННЯ НАГРІВУ І ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ ПОТУЖНІСТЮ 2500 КВт ПРИ ПОЯВІ СТАТИЧНОГО ЕКСЦЕНТРИСИТЕТА

Методами математичного моделювання досліджені температурне поле і термомеханічні напруження в роторі асинхронного двигуна при появі статичного ексцентриситету ротора. Показано, що при такому ушкодженні виникає нерівномірний розподіл струмів в його стержнях і збільшується нагрів елементів статора і ротора, що призводить до зростання в них термомеханічних напружень і сприяє подальшій прискореній руйнації не тільки стержнів ротора, а й обмотки статора внаслідок перегріву. Такі негативні фактори можуть призводити до швидкого виходу асинхронного двигуна з ладу.

Ключові слова: асинхронний двигун, стержні білячої клітки ротора, статичний ексцентриситет, нагрів ротора, термомеханічні напруження.

Актуальність теми. Асинхронні двигуни (АД) великої потужності використовуються у якості електричного приводу механізмів власних потреб — вентиляційних установок, насосно-компресорних агрегатів, кульових млинів та інших агрегатів, що широко використовуються на електростанціях, в т.ч. на гідроелектростанціях.

Одним з характерних ушкоджень, що можуть мати місце в АД, є ексцентриситет ротора, який можна розподілити на два види: ексцентриситет з паралельними осями статора і ротора (Рис. 1, а) та кутовий ексцентриситет (Рис. 1, б). В першому різновиді вісь ротора АД зміщена і не співпадає з віссю статора, однак залишається паралельною їй. В другому різновиді між осями є певний кут,

причому точка перетину осей може знаходитися не тільки по центру ротора АД, а й бути зміщеною в напрямку одного з торців ротора. Також кожен з різновидів ексцентриситету можна розподілити на статичний та динамічний (СЕ та ДЕ відповідно). При СЕ вісь ротора зміщена від осі статора на певну відстань і є нерухомою, а у випадку ДЕ вісь ротора обертається відносно осі статора. В даній статті досліджуватиметься саме СЕ.

Величину ексцентриситету зручно характеризувати коефіцієнтом відносного ексцентриситету:

$$\delta = (\delta_{\max} - \delta_{\min}) / (\delta_{\max} + \delta_{\min}),$$

де $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$ — максимальна і мінімальна величини повітряного проміжку (Рис. 2).

При появі будь-якого виду ексцентриситету виникають радіальні сили одностороннього магнітного тяжіння (Рис. 3), що погіршує енергетичні показники АД і сприяє ушкодженню підшипників і підшипникових щитів.

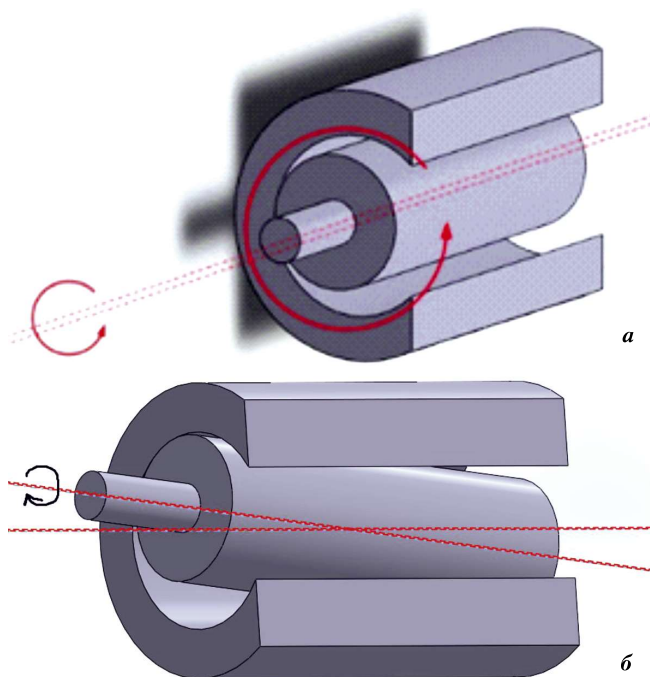


Рис. 1. Ілюстрація до ексцентриситетів: а — з паралельними осями, б — кутового.

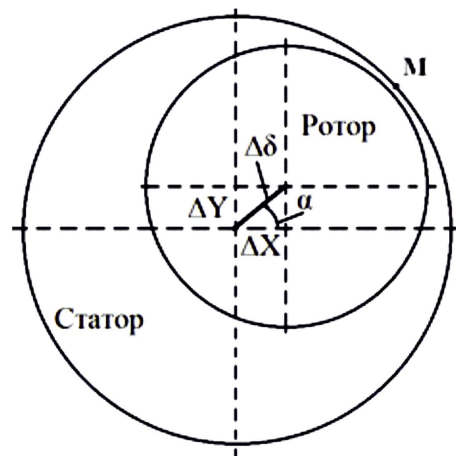


Рис. 2. Ілюстрація до формули для коефіцієнта відносного ексцентриситету.

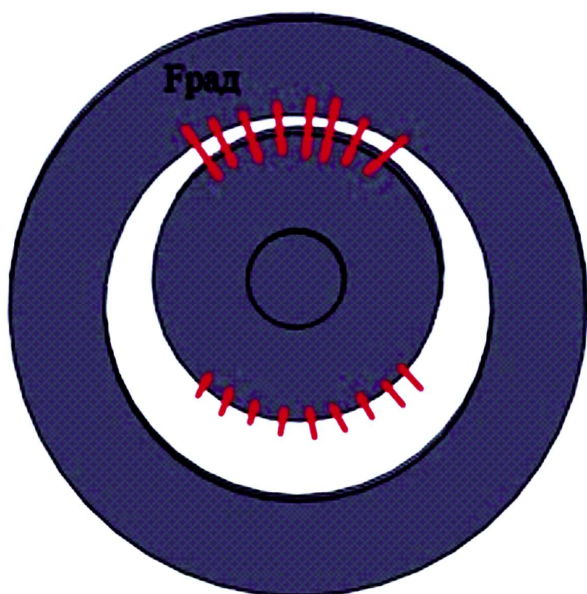
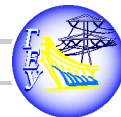


Рис. 3. Радіальні сили одностороннього магнітного тяжіння, що виникають в АД внаслідок появи ексцентриситету.

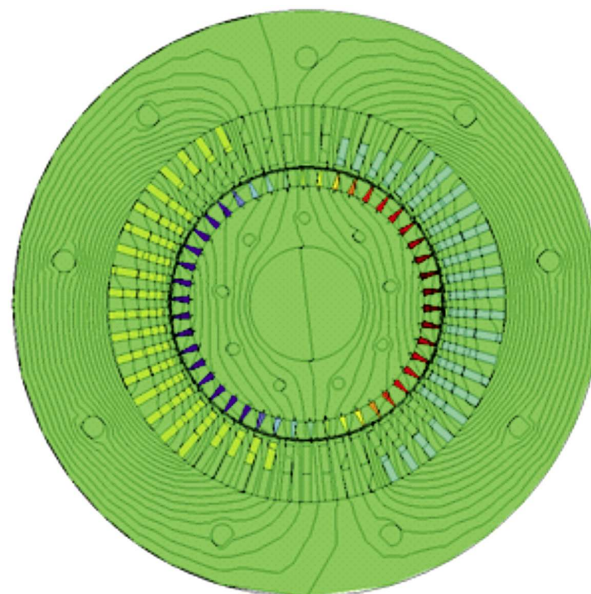


Рис. 4. Розподіл магнітного поля в АД та густини струмів в обмотках статора і ротора.

Найменш небезпечним для АД з точки зору руйнації механічних елементів, в яких обертається ротор, є СЕ. Якщо в АД присутній СЕ і обслуговуючим персоналом не вживаються ніякі заходи щодо його усунення, то з часом ротор може прискорити руйнацію підшипників в підшипникових щитах і СЕ може перетворитися в динамічний або кутовий ексцентриситет. При жорстко закріпленому на валу навантаженні і наявності будь-якого ексцентриситету створюється динамічний згин валу, що може призвести до його непружного викривлення або руйнації всього ротора. Тому є необхідність у визначенні величин термомеханічних напружень в елементах АД ще на стадії його проектування, що можливо зробити методами математичного моделювання. В статтях [1, 2] досліджується нагрів елементів ротора АД типу АТД, а статті [3 – 5] присвячені дослідженню ексцентриситету в електричних машинах.

Мета досліджень. Оцінити величини нагріву та термомеханічних напружень в елементах АД, що виникають внаслідок нерівномірного розподілу струмів в стержнях ротора при появі СЕ ротора.

Об'єкт дослідження. Дослідження проводилися на прикладі АД типу АТД2, що працює в номінальному режимі і параметри якого наступні: номінальна потужність – 2500 кВт, коефіцієнт потужності – 0,905, ККД – 96,4%, частота обертання – 2980 об/хв, номінальна напруга статора – 6 кВ, номінальний струм статора – 280 А, діаметр статора – 1115 мм, повітряний проміжок – 5 мм, число пазів статора – 48, схема з'єднання фаз обмотки статора – трикутник, діаметр ротора – 590 мм, число стержнів ротора – 38, довжина осердя ротора – 0,85 м, коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь статора і ротора в охолоджуюче повітря $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, в обмотці статора використо-

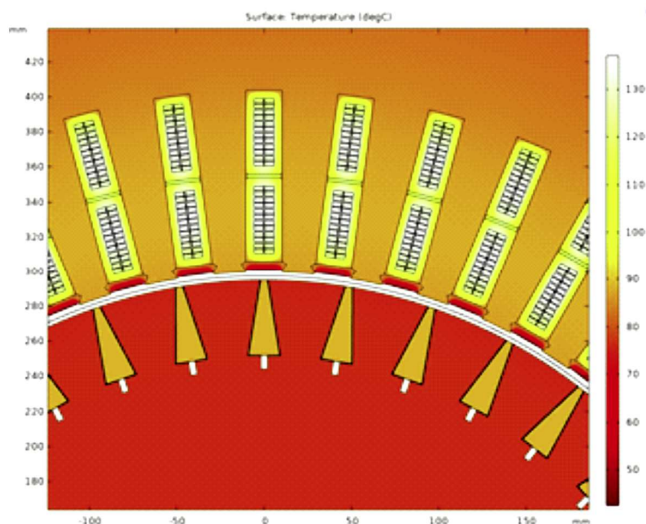


Рис. 5. Фрагмент розподілу температурного поля в поперечній площині нешкоджененого АД, °С.

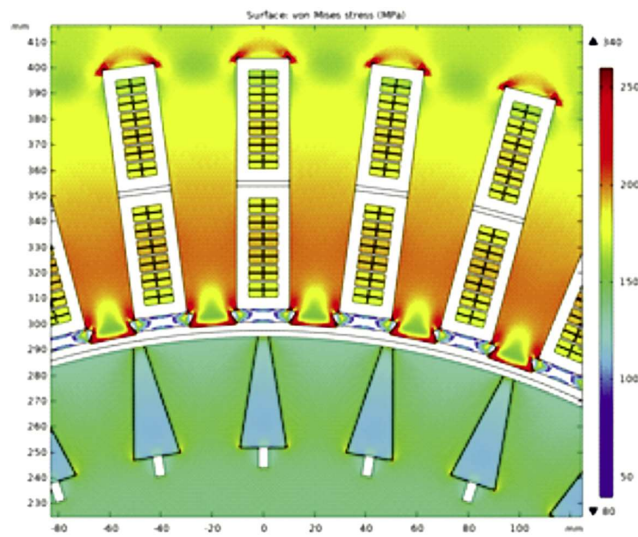


Рис. 6. Фрагмент розподілу термомеханічних напружень в поперечній площині нешкоджененого АД, МПа.

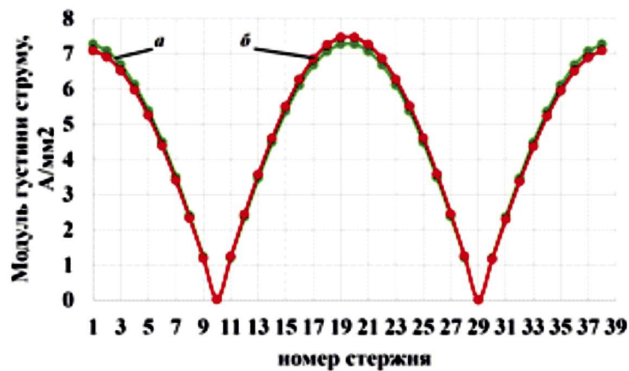


Рис. 7. Розподіл модуля густини струму в стержнях ротора: а – неушкодженого АД, б – при появі СЕ $\varepsilon = 0,96$.

вугється ізоляція типу «Моноліт-2» класу нагрівостійкості В (130 °С). Межа пластичності міді стержнів ротора становить $\sigma_{пл_Cu} = 280$ МПа, а межа міцності – $\sigma_{мц_Cu} = 390$ МПа. Межа пластичності сталі становить $\sigma_{пл_Fe} = 294$ МПа, а межа міцності – $\sigma_{мц_Fe} = 490$ МПа.

Ексцентриситет ротора моделюється шляхом зміщення осі ротора відносно осі статора на потрібну відстань. В досліджуваному АД коефіцієнт відносного ексцентриситету може варіюватися в межах від 0 ($\delta_{min} = \delta_{max}$ – відсутність ексцентриситету) до $\varepsilon = 0,96$ ($\delta_{min} = 0,2$ мм), однак дослідження виконувались для одного найбільшого ва-

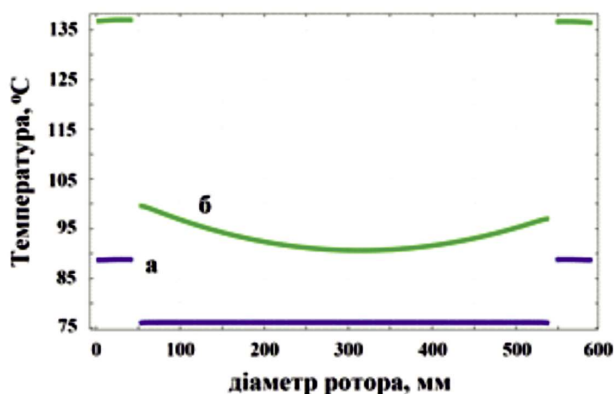


Рис. 8. Розподіл температури в поперечній площині по діаметру ротора АД: а – неушкодженого АД б – при появі СЕ $\varepsilon = 0,96$

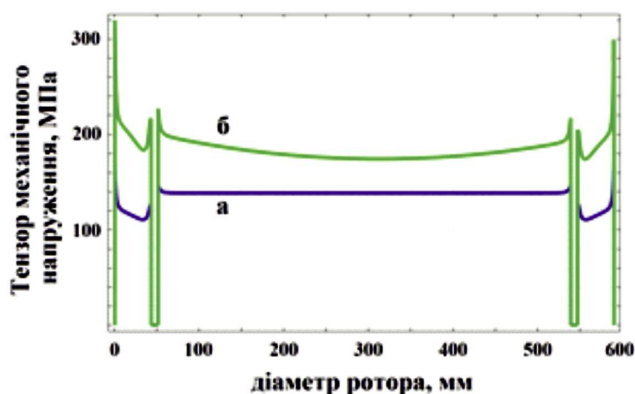


Рис. 9. Розподіл термомеханічних напружень в поперечній площині по діаметру ротора АД: а – неушкодженого АД б – при появі СЕ $\varepsilon = 0,96$

ріанту величини СЕ, при якому ротор зсунутий на 4,8 мм, що відповідає коефіцієнту СЕ $\varepsilon = 0,96$. Всі розрахунки виконувались для режиму, коли АД працює на номінальне навантаження. На Рис. 4. показаний розподіл магнітного поля в АД та густин струмів в обмотках статора і ротора в певний момент часу при роботі АД в номінальному режимі.

Математична модель базується на системі диференціальних рівнянь в часткових похідних. Чисельна реалізація математичної моделі виконана методом скінченних елементів в середовищі програмного комплексу Comsol Multiphysics. Вона представлена в статті [5] і описує електромагнітне та теплове поле і розподіл термомеханічних напружень в АД.

Результати досліджень. Методами математичного моделювання досліджені температурне поле і термомеханічні напруження в роторі АД при появі СЕ ротора.

На Рис. 5 і 6 показані фрагменти картин розподілу температурного поля і термомеханічних напружень в поперечній площині досліджуваного АД відповідно.

При появі достатньо значного СЕ $\varepsilon = 0,96$ (як приклад) змінюється розподіл струмів в стержнях ротора – на 2,5 % зростає зі сторони меншого повітряного проміжку і на таку ж величину зменшується зі сторони збільшеного повітряного проміжку (Рис. 7). Тим не менш, оскільки струми ротора змінюються з частотою ковзання по всім стержням, то ротор рівномірно прогривається до більшої температури. В неушкодженому АД залізо ротора нагрівається до температури 76 °С, а мідь стержнів – до 88 °С. При появі СЕ залізо ротора прогривається до 90...99 °С, а мідь стержнів – до 138 °С (Рис. 8).

Оскільки в АД між обмотками статора і ротора існує трансформаторний зв'язок, то при появі значних величин СЕ нерівномірний розподіл струмів ротора призводить не тільки до зростання струму в обмотці статора, а й до збільшення амплітуд вищих гармонічних складових в розподілі магніторушійної сили в повітряному проміжку, що, як наслідок, призводить до ще більшого нагріву статора. Перегрів обмотки статора АД може призводити до швидкого виходу його з ладу. З Рис. 5 видно, що обмотка статора є достатньо нагрітим елементом в АД (біля 130 °С).

З Рис. 6 видно, що найбільш механічно напруженими є зубці статора (202 МПа). При появі СЕ внаслідок вищеописаних факторів впливу ротора на статор термомеханічні напруження в зубцях статора зростають до 290 МПа. Це значення напружень є далеким від межі міцності



електротехнічної сталі, однак є близьким до межі плинності сталі. Саме тому в практиці експлуатації потужних АД внаслідок поєднання впливу знакозмінних вібрацій та таких значень термомеханічних напружень мають місце такі ушкодження електротехнічної сталі статора як відламування зубців сердечника статора.

На Рис. 9 показаний графік розподілу термомеханічних напружень, визначених в поперечній площині по лінії діаметра ротора АД, проведений по центру стержня. З цього рисунку видно, що при появі СЕ внаслідок збільшення нагріву зростають і термомеханічні напруження в залізі ротора на 27–43 % і досягають значень в 200–226 МПа. В самих же мідних стержнях термомеханічні напруження зростають в середньому зі 115 МПа до 195 МПа. Ці значення також є достатньо віддаленими від меж плинності і міцності міді. Однак в перехідних режимах роботи АД або при пуску нагрітого ротора до стержнів ротора можуть прикладатися підвищені зусилля, в результаті чого через підвищений нагрів термомеханічні зусилля можуть сягати значень більших за межі міцності міді, тому стержні обмотки ротора можуть відламуватися від короткозамикаючих кілець і виводити АД з ладу.

За $СЕ \varepsilon = 0,96$ радіальні сили одностороннього магнітного тяжіння будуть пропорційно змінюватися: в області зменшеного повітряного проміжку сила зростає на 2,5%, а в області зменшеного повітряного проміжку ця сила зменшиться на 2,5%.

Висновки.

1. В статті представлено класифікацію ексцентриситетів в електричних машинах.
2. Визначені величини нагріву та термомеханічних напружень в елементах АД, що виникають внаслідок нерівномірного розподілу струмів в стержнях ротора при появі СЕ ротора.
3. Показано, що при появі СЕ, навіть при незначній зміні величин струмів в стержнях рото-

ра, виникають значні нагрів та термомеханічні напруження як в сталях ротора і статора, так і в мідних стержнях ротора.

4. Поєднання двох факторів – поява СЕ і робота АД в перехідних режимах або при пуску нагрітого ротора – сприяє виникненню надлишкових термомеханічних напружень в елементах АД, коли до стержнів ротора можуть прикладатися підвищені зусилля, в результаті чого стержні обмотки ротора можуть відламуватися від короткозамикаючих кілець і виводити АД з ладу.

5. Наслідком появи СЕ є прискорений знос, перегрів та шум у підшипниках.

ЛІТЕРАТУРА

1. Geraskin O.A. ATD-2500 induction motor heating in case the rotor rods damage / O.A. Geraskin, A.O. Voblikova, V.S. Fetisov, O.O. Bazarov, O.A. Moroko // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики" – Київ: «Політехніка». – 2019. – № 1. – С. 320-323.
2. Geraskin O.A. Temperature gradient in stator elements of induction motor ATD-5000 in the change of load / O.A. Geraskin, A.O. Voblikova // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики" – Київ: «Політехніка». – 2018. – № 1. – С. 320-323.
3. Geraskin O.A. Vibrational diagnostics of rotor static eccentricity of induction motor ATD-5000 on the basis of vibroperturbing forces analysis / O.A. Geraskin, O.O. Krechyk // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики" – Київ: «Політехніка». – 2018. – № 1. – С. 307-308.
4. Васьковський Ю.М. Діагностика кутового ексцентриситета ротора асинхронних двигунів на основі аналізу віброзбуджуючих сил / Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін, Н.В. Беленок // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 11 (1183). – С. 30-35.
5. Васьковський Ю.М. Вплив ексцентриситета ротора на демпферну обмотку капсульного гідрогенератора потужністю 23 МВА/ Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін // Гідроенергетика України. – 2020. – № 1-2. – С. 59-64.

Geraskin O.A., Tsivinsky S.S., Dubchak E.M., Nesterenko D.S.

HEATING AND THERMOMECHANICAL STRESSES SIMULATION IN AN INDUCTION MOTOR WITH A POWER OF 2500 KW WHEN STATIC ECCENTRICITY APPEARS

The temperature field and thermomechanical stresses in the rotor of an induction motor at the appearance of static eccentricity of the rotor were studied by mathematical modeling methods. It is shown that such damage of the rotor causes uneven current distribution in the rotor rods and increases the heating of the stator and rotor elements, which leads to increasing in thermomechanical stresses and contributes to further accelerated destruction of not only the rotor rods but also the stator winding due to overheating. Such negative factors can lead to rapid failure of the induction motor.

Key words: induction motor, squirrel-cage rotor rods, static eccentricity, rotor heating, thermomechanical stresses.

© Гераскін О.А., Цивінський С.С., Дубчак Є.М., Нестеренко Д.С., 2021

