

**Ю.М.Васьковський**, докт.техн.наук (НТУУ “КПІ”, Київ), **О.І.Титко**, член-кор. НАН України (Інститут електродинаміки НАН України, Київ)

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В УШКОДЖЕНІЙ З’ЄДНУВАЛЬНІЙ ШИНІ ОБМОТКИ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА**

*Представлено математичну модель та проведено дослідження електричних та теплових процесів у з’єднувальній струмопровідній шині обмотки ротора турбогенератора потужністю 1000 МВт, яка має ушкодження у вигляді поперечної тріщини. Отримані в статті результати моделювання розкривають процеси, які виникають при розвитку тріщини в струмонесучих елементах, що може призвести до аварійних ситуацій у турбогенераторах.*

*Представлена математическая модель и проведено исследование электрических и тепловых процессов в соединительной токоведущей шине обмотки ротора турбогенератора мощностью 1000 МВт, которая имеет повреждение в виде поперечной трещины. Полученные в статье результаты моделирования раскрывают процессы, возникающие при развитии трещины в токонесущих элементах, что может привести к аварийным ситуациям в турбогенераторах.*

Більшість генеруючого обладнання електростанцій України, зокрема турбогенератори (ТГ), знаходяться в експлуатації тривалий час, який суттєво перевищує їхній розрахунковий ресурс. При тривалій експлуатації в елементах і вузлах конструкції ТГ виникають і поступово розвиваються деградаційні процеси, які зменшують надійність роботи, що спричинює виникнення непередбачених аварій з серйозними наслідками. До деградаційних процесів належать: явище втоми конструкційних матеріалів при циклічних навантаженнях з подальшим ослабленням монолітності конструкції; виникнення та розвиток тріщин в конструктивних та електропровідних елементах; руйнація шихтованих структур осердя статора; виникнення прихованих дефектів та ушкоджень в елементах конструкції ротора, які не піддаються достовірному діагностуванню; втрата конструктивними елементами первісної геометричної форми внаслідок накопичення пластичних деформацій тощо. Нагальна потреба в розробці і впровадженні технічних заходів, направлених на зменшення негативних наслідків деградаційних процесів, що відбуваються в елементах та вузлах конструкції ТГ, формує нову актуальну науково-технічну проблему по дослідженню причин і механізму цих процесів. З огляду на унікальність потужних ТГ і недостатність обсягу експериментальних та статистичних даних щодо аварійних процесів дослідження доцільно проводити також методами математичного моделювання.

У даній роботі досліджуються електромагнітні та теплові процеси у з’єднувальній струмопровідній шині обмотки ротора ТГ потужністю 1000 МВт, які виникають у зв’язку з руйнацією шини внаслідок появи у ній поперечної тріщини. Результати математичного моделювання пояснюють першопричини і елементи механізму потужної аварії ротора ТГ типу ТВВ–1000–2 енергоблоку №2 Хмельницької АЕС, яка відбулася 22.06.2008р. і на тривалий час зупинила експлуатацію зазначеного енергоблоку та призвела до необхідності повної заміни ротора [2]. Згідно з висновками Державної інспекції з експлуатації електричних станцій і мереж [2] “...ушкодження ротора відбулося через тріщину в слабкому місці механічної міцності струмопровідної шини”, що підтверджує звіт №2 ХМЕ–П05–02–05–08. Обстеження ушкодженого ротора дозволило сформулювати наступну гіпотезу щодо причини аварії та послідовності проходження відповідних аварійних електрофізичних процесів.

У з’єднувальній шині обмотки ротора ТВВ–1000–2 внаслідок недосконаlosti (або порушення) технології виготовлення вузла з’єднувальної шини виникла початкова поперечна тріщина, яка перешкождала протіканню постійного струму від збуджувача до обмотки ротора. Подальші деградаційні процеси на ушкодженій ділянці шини призвели до поступового розвитку тріщини, локального перегріву ушкодженої ділянки шини та виникнення низки взаємопов’язаних швидкоплинних процесів: динамічного руйнування металу після досягнення критичного розміру тріщини, електричного пробою тріщини, появи дуги постійного струму та утворення газоплазменної суміші. Зазначена газоплазменна суміш не лише зруйнувала бокову електричну ізоляцію шини, що призвело до короткого за-

микання шини на бочку ротора, але й по вентиляційних каналах потрапила з потоком охолоджуючого газу в зону лобових частин обмотки збудження. Лавиноподібний аварійний процес тривав біля 20 с і закінчився коротким замиканням обмотки збудження на «землю», появою потужної електричної дуги, вигоранням клинів ротора, ушкодженням внутрішньої поверхні бандажного кільця ротора та аварійною зупинкою ТГ внаслідок неприпустимої вібрації ротора.

Оцінка достовірності зазначеної гіпотези проведена за допомогою описаної нижче математичної моделі, а чисельні результати виконаного дослідження дозволили дати об'єктивну оцінку первісних причин зазначеної аварії ТГ.

**Математична модель.** Розрахункову область представлено на рис. 1. Вона містить відрізок з'єднувальної шини, що має ушкодження у вигляді поперечної тріщини глибиною  $h$ . У дослідженнях глибина тріщини варіюється. З обох боків шина відокремлена електричною ізоляцією від стінок пазу ротора, в якому вона укладена. Геометричні розміри відповідають даним турбогенератора ТВВ–1000–2, наприклад, ширина шини складає 100 мм. Товщина шини (у напрямку, перпендикулярному площині креслення) дорівнює 20 мм. Ширина тріщини в її вершині складає 0,05 мм, причому у перетині тріщина має форму тонкого трикутника.

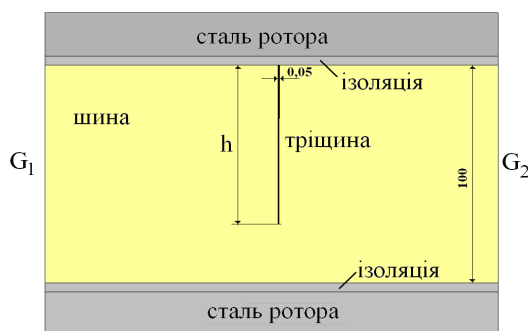


Рис. 1

де  $\gamma_0$  – електропровідність при температурі  $T_0$ ,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт (для міді  $\alpha = 0,0038$  1/град). Складові густини електричного струму знаходяться за виразами:

$$j_x = -\gamma(T) \partial \varphi / \partial x, \quad j_y = -\gamma(T) \partial \varphi / \partial y. \quad (3)$$

Граничними умовами для рівняння (1) є наступні. На границях  $G_1$  і  $G_2$  задаються відомі значення електричних потенціалів:

$$\varphi|_{G_1} = \varphi_1, \quad \varphi|_{G_2} = \varphi_2. \quad (4)$$

Наприклад, можна задати  $\varphi_1 = 0$ , а значення  $\varphi_2$  підбирається таким чином, щоб через зазначений відрізок шини протікав заданий струм  $I_N$  (в подальших розрахунках задавався номінальний струм збудження ТВВ–1000–2  $I_N = 6450$  А). Таку умову можна задати, наприклад, на границі  $G_1$ :

$$I_N = \int_{G_1} j_x dx. \quad (5)$$

Виконання умови (5) забезпечується підбором величини  $\varphi_2$  методом послідовних наближень. На інших границях розрахункової області задаються граничні умови електричної ізоляції: складова густини струму, що направлена уздовж вектора нормалі до границі області, дорівнює нулю

$$j_n|_{G-G_1-G_2} = 0. \quad (6)$$

Стационарне температурне поле у розрахунковій області описується наступним диференціальним рівнянням Пуассона:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial y} = Q, \quad (7)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $Q$  – питомі втрати в шині, які знаходяться за виразом

$$Q = (j_x^2 + j_y^2) / \gamma(T). \quad (8)$$

На границях шини  $G_1$  і  $G_2$  задається гранична умова першого роду – значення температури, яке відповідає сталій температурі неушкодженої з'єднувальної шини,

$$T|_{G_1+G_2} = \theta_0. \quad (9)$$

В подальших розрахунках приймаємо, що значення  $\theta_0 = 60$  °С. На інших границях розрахункової області в першому наближенні приймаємо умову, що товщина ізоляції шини достатня для відсутності теплообміну:

$$\frac{\partial T}{\partial n}|_G = 0 \quad (10)$$

Математична модель (1)–(10) реалізована чисельно методом скінченних елементів в програмно-обчислювальному комплексі COMSOL.

**Результати математичного моделювання.** При чисельних дослідженнях варіювалася глибина тріщини. На рис. 2, рис. 3, показано залежності густини струму  $j = \sqrt{j_x^2 + j_y^2}$  (А/мм<sup>2</sup>) і питомих втрат  $Q$  (кВт/м<sup>3</sup>) під дном тріщини від відносної глибини тріщини  $h^* = h/b$ , де  $b = 100$  мм – ширина шини. Наприклад, якщо  $h^* = 0,98$ , то ділянка під тріщиною, яка залишилася неушкодженою, має висоту лише 2 мм. Такі залежності зображено на відрізку  $h^* = 0,7 \dots 0,98$ .

При  $h^* < 0,7$  функції мають повільно зростаючий характер. Густина струму в неушкодженій шині складає 4,14 А/мм<sup>2</sup>. Як видно з наведених кривих, найбільш інтенсивні електричні процеси в ушкодженій шині відбуваються при висоті тріщини  $h^* > 0,9$ , коли спостерігається дуже інтенсивне зростання значень всіх функцій. Наприклад, при  $h^* = 0,98$  напруженість електричного поля складає  $E = 5$  кВ/м, густина струму перевищує значення 200 А/мм<sup>2</sup>, а питомі теплові втрати – 780 кВт/м<sup>3</sup>! Саме

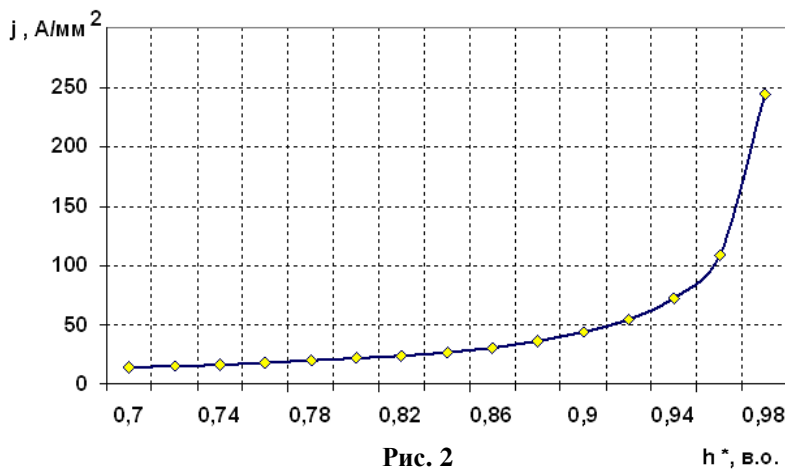


Рис. 2

$h^*$ , в.о.

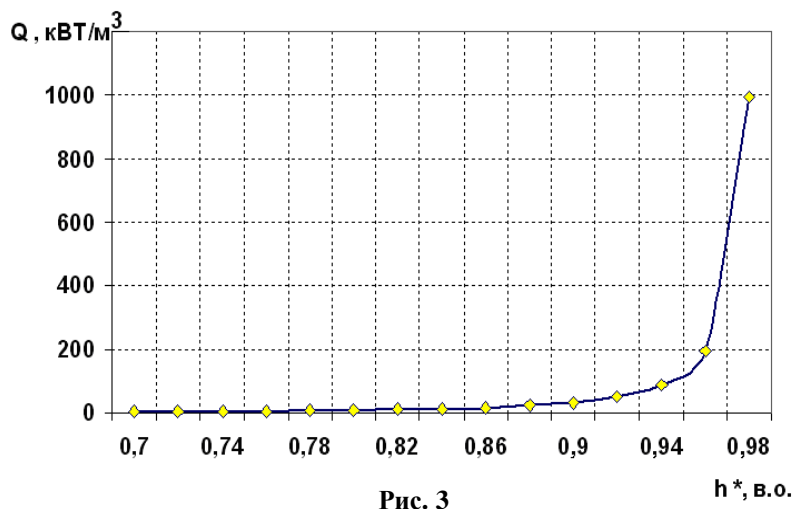


Рис. 3

$h^*$ , в.о.

на завершальній стадії розвитку тріщини (що передує повному розриву шини) з'являються умови для виникнення аварійних електрофізичних процесів: 1) величина напруженості електричного поля сягає величин, достатніх для електричного пробоя тріщини (при повному розриві шини різниця електричних потенціалів на краях тріщини дорівнює номінальній напрузі збуджувача і з огляду на малу ширину тріщини (0,05 мм) є достатньою для електричного пробоя тріщини); 2) теплові втрати, що виникають на неушкодженій ділянці під дном тріщини, є достатніми не тільки для термічного руйнування бокової електричної ізоляції шини, але й призводять до плавлення міді; 3) взаємодія двох вищезазначених факторів призводить до появи електричної дуги та газоплазменної суміші.

Для підтвердження таких висновків далі наведено розрахункові результати, отримані для завершального етапу розвитку тріщини – при глибині тріщини  $h^* = 0,98$ . На рис. 4 показано картину розподілу електричного потенціалу (фонове забарвлення) та густини струму (ізолі-

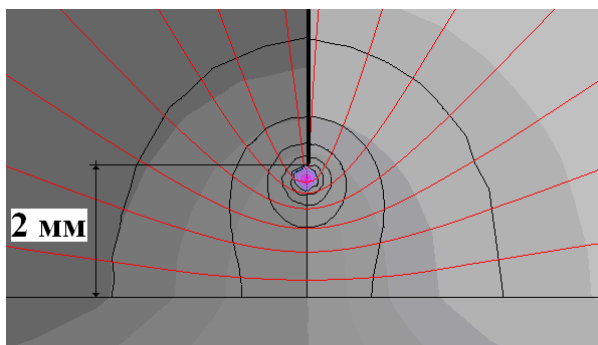


Рис. 4

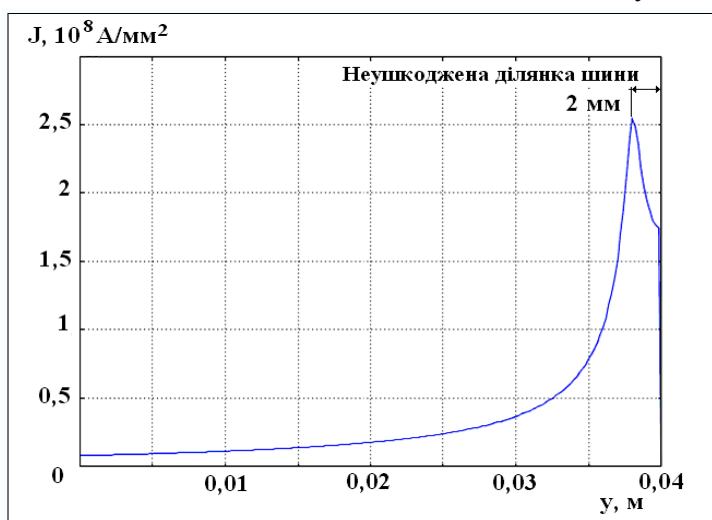


Рис. 5

міді, яка має температуру плавлення  $1083^{\circ}\text{C}$ . У цілому площа ділянки шини, де температура перевищує температуру плавлення  $1083^{\circ}\text{C}$ , може бути приблизно апроксимована полуколом з центром, розташованим під дном тріщини, і з радіусом  $\approx 20$  мм. При віддаленні від дна тріщини уздовж довжини шини спостерігається швидке зменшення температури: сумарна довжина ділянки шини, на якій температура шини перевищує допустиму для електричної ізоляції температуру, складає  $0,2 \dots 0,25$  м. Отже, зазначене явище має суттєво локальний характер.

Зрозуміло, що зазначеного нагріву цілком достатньо для руйнації бокової електричної ізоляції шини

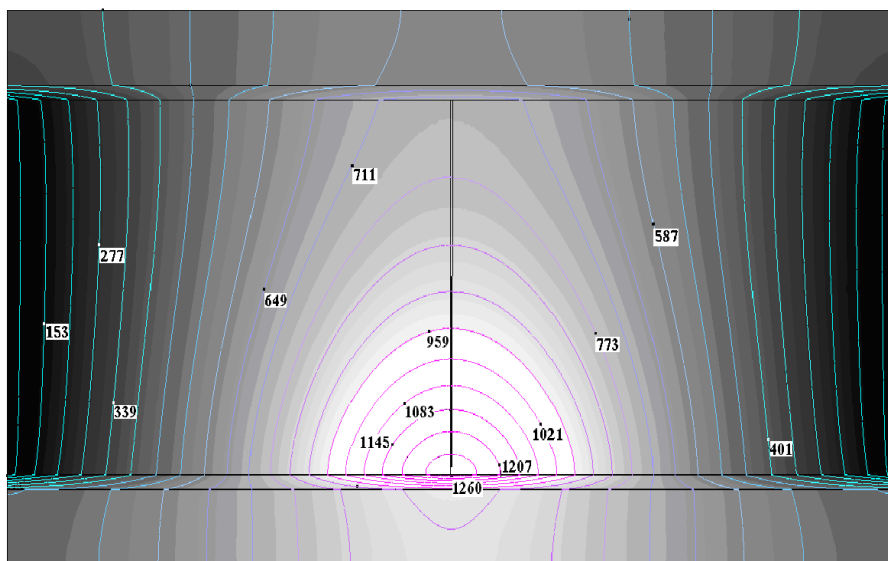


Рис. 6

ні та лінії струму) на ділянці під тріщиною, коли висота неушкодженої ділянки складає всього 2 мм.

На рис. 5 показано розподіл модуля густини струму  $J = \sqrt{j_x^2 + j_y^2}$  уздовж поперечної вертикальної лінії в шині, яка співпадає з тріщиною при відносній глибині тріщини  $h^* = 0,98$ . З рис. 5 видно, що безпосередньо перед дном тріщини на ділянці висотою приблизно 10 мм спостерігається суттєве зростання густини струму до значення, наближеного до величини  $250 \text{ A/mm}^2$ . Далі на неушкодженій ділянці шини спостерігається деяке зниження густини струму. Такі значення густини струму можуть існувати

дуже невеликий термін часу, після чого виникає остаточне руйнування шини.

На рис. 6 показано картину температурного поля в розрахунковій області при глибині тріщини  $h^* = 0,98$ , яку отримано в результаті розв'язання сформульованої задачі. Розподіл температури зображено як чорно-білим фоновим забарвленням (чим світліше забарвлення, тим вища температура), так і за допомогою ізоліній, які мають відповідні числові маркери.

З наведених результатів видно, що при  $h^* = 0,98$  температура під дном тріщини сягає максимального значення  $1260^{\circ}\text{C}$ , що цілком достатньо для розплавлення

міді, яка має температуру плавлення  $1083^{\circ}\text{C}$ . У цілому площа ділянки шини, де температура перевищує температуру плавлення  $1083^{\circ}\text{C}$ , може бути приблизно апроксимована полуколом з центром, розташованим під дном тріщини, і з радіусом  $\approx 20$  мм. При віддаленні від дна тріщини уздовж довжини шини спостерігається швидке зменшення температури: сумарна довжина ділянки шини, на якій температура шини перевищує допустиму для електричної ізоляції температуру, складає  $0,2 \dots 0,25$  м. Отже, зазначене явище має суттєво локальний характер.

Зрозуміло, що зазначеного нагріву цілком достатньо для руйнації бокової електричної ізоляції шини з подальшим замиканням струму збудження через сталю стінку каналу масивного ротора в обхід ушкодженої ділянки шини. Такий висновок підтверджується результатами огляду ушкодженої з'єднувальної шини турбогенератора ТВВ-1000-2 енергоблоку №2 Хмельницької АЕС.

При зменшенні глибини тріщини у відповідності до рис. 2 і рис. 3 різко зменшуються густина струму і втрати. Так, при  $h^* = 0,9$  (ширина неушкодженої ділянки шини дорівнює 10 мм) максимальна темпера-

тура шини під дном тріщини зменшується до значення  $202\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тобто наближується до температури, гранично допустимої для пазової ізоляції. Таким чином, при глибинах тріщини в діапазоні значень  $0 < h^* < 0,9$  хоча і спостерігається підвищений локальний нагрів шини в зоні тріщини, проте температура залишається в припустимих межах.

Тривалість, динаміка та умови процесу збільшення тріщини потребує подальших досліджень та аналізу, у тому числі в рамках теорії механіки руйнування. Унікальність зазначеної аварії полягає у тому, що спочатку незначний, на перший погляд, дефект з'єднувальної шини обмотки ротора створив передумови для аварійного викиду електричної енергії збуджувача постійного струму, направленою на руйнацію основних конструктивних вузлів ротора, у тому числі обмотки збудження, клинів ротора та бандажного кільця ротора. Було зафіксовано навіть ознаки викиду газоплазменної суміші та продуктів горіння у зону лобових частин обмотки статора. Отримані результати математичного моделювання дозволили докладно описати аварійні процеси в ушкодженій з'єднувальній шині обмотки ротора турбогенератора та зробити наступні висновки.

#### **Висновки.**

1. Підтверджена гіпотеза про те, що первісною причиною аварії ротора турбогенератора ТВВ –1000–2 на Хмельницькій АЕС є поява початкової поперечної тріщини у з'єднувальній шині обмотки ротора, яка виникла внаслідок недосконалості (або порушення) технології виготовлення вузла з'єднувальної шини заводом-виготовлювачем. Зазначений дефект з'єднувальної шини обмотки ротора створив передумови для подальшого аварійного викиду електричної енергії збуджувача постійного струму, направленою на руйнацію основних конструктивних вузлів ротора, у тому числі обмотки збудження, клинів ротора та бандажного кільця ротора.

2. Розрахунки показали, що початкові стадії утворення і росту поперечної тріщини не створювали безпосередньої аварійної загрози. При відносній висоті тріщини  $h^* < 0,9$  хоча і спостерігається збільшення напруги електричного поля між краями тріщини, густини струму і теплових втрат під дном тріщини, але з огляду на досить малий об'єм ушкодженої зони, аварійний процес не виникає. Це підтверджується тим фактом, що з'єднувальна шина тривалий час функціонувала без зауважень і висота початкової тріщини не була критичною. Слід зазначити, що умови і динаміка росту тріщини, а значить і прогноз щодо терміну можливого функціонування ушкодженої шини з тріщиною, потребують окремих досліджень.

3. Лавиноподібні швидкоплинні електрофізичні ефекти виникають при висоті  $h^* > 0,9$  на завершальній стадії розвитку тріщини, коли спостерігається остаточний розрив шини. При малій висоті неушкодженої ділянки шини теплові втрати під дном тріщини і напруга електричного поля між краями тріщини набувають дуже великих значень: густина струму сягає величини  $250\text{ А/мм}^2$ , теплові втрати  $780\text{ кВт/м}^3$ , а напруженість електричного поля перевищує  $5\text{ кВ/м}$ . В результаті максимальна температура ушкодженої ділянки шини швидко збільшується до  $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ , спостерігається плавлення міді, вигорання бокової електричної ізоляції шини і коротке замикання струму через стінку паза в масивному роторі на землю. Одночасно при розриві шини відбувається електричний пробій тріщини, виникає електрична дуга і утворюється газоплазменна суміш. Ця суміш по вентиляційній системі потрапляє в зону лобових частин обмотки ротора, що викликає її подальше ушкодження.

4. Отримані результати моделювання та дослідження процесів, що відбуваються при зародженні і розвитку тріщини в металі, є фундаментальними для всіх струмонесучих елементів електротехнічних пристроїв і електричних машин.

1. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – Київ, НТУУ «КПІ», 2007. – 191 с.

2. Державна інспекція з експлуатації електричних станцій і мереж. Інформаційні та аналітичні матеріали 1991–2009 рр. / Гутаревич О.Т. – Київ, 2009. – 510 с.

Надійшла 09.02.2010