

Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін

## НАГРІВ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ЗА НАЯВНОСТІ ДЕФЕКТІВ ОБМОТКИ РОТОРА І ФОРСУВАННІ СТРУМУ ЗБУДЖЕННЯ

*Мета.* Дослідження нагріву ротора турбогенератора типу ТГВ-200 за наявності ушкоджень обмотки ротора, які виникають внаслідок тривалої експлуатації турбогенератора, а саме – засмічення (закупорка) вентиляційних каналів обмотки ротора і виникнення коротких замикань витків обмотки ротора. Особлива увага приділяється нагріву при короткочасному форсуванні струму збудження, яке виконується для утримання генератора в синхронному режимі роботи. *Методика.* Використовуються польові математичні моделі. *Результати.* Визначено, що засмічення вентиляційних каналів обмотки ротора в більшій мірі впливає на нагрів ротора у порівнянні з коротким замиканням окремих витків обмотки ротора. Встановлено, що форсування струму збудження в межах, які регламентовані діючими стандартами експлуатації турбогенераторів, стає неможливим при засміченні невеликої кількості вентиляційних каналів обмотки ротора, що погіршує ефективність роботи турбогенератора і потребує його виводу в ремонт. *Наукова новизна.* Розроблено математичну модель нагріву ротора при наявності типових ушкоджень обмотки ротора. *Практичне значення.* Визначено ділянки в роторі, де температури і температурні градієнти досягають найбільших значень, що дозволяє рекомендувати місця оптимального розташування датчиків температури. Бібл. 10, рис. 11.

*Ключові слова:* турбогенератор, обмотка ротора, температура, градієнт температури, коротке замикання, засмічення охолоджуючих каналів, форсування збудження.

*Цель.* Исследование нагрева ротора турбогенератора типа ТГВ-200 при наличии поврежденной обмотки ротора, которые возникают в результате длительной эксплуатации турбогенератора, а именно – засорение (закупорка) вентиляционных каналов обмотки ротора и возникновения коротких замыканий витков обмотки ротора. Основное внимание уделяется нагреву при кратковременном форсировании тока возбуждения, которое выполняется для удержания генератора в синхронном режиме работы. *Методика.* Используются полевые математические модели. *Результаты.* Установлено, что засорение вентиляционных каналов обмотки ротора в большей степени влияет на нагрев ротора по сравнению с коротким замыканием отдельных витков обмотки ротора. Установлено, что форсирование тока возбуждения в пределах, которые регламентированы действующими стандартами эксплуатации турбогенераторов, становится невозможным при засорении небольшого количества вентиляционных каналов обмотки ротора, что ухудшает эффективность работы турбогенератора и требует его вывода в ремонт. *Научная новизна.* Разработана математическая модель нагрева ротора при наличии типовых поврежденной обмотки ротора. *Практическое значение.* Определены участки в роторе, где температуры и температурные градиенты достигают наибольших значений, что позволяет рекомендовать места оптимального расположения датчиков температуры. Библи. 10, рис. 11.

*Ключевые слова:* турбогенератор, обмотка ротора, температура, градиент температуры, короткое замыкание, засорение охлаждающих каналов, форсирование возбуждения.

**Вступ.** Надійність турбогенератора (ТГ) в значній мірі визначає надійність роботи електростанції в цілому. Непередбачувані ушкодження ТГ призводять до значних економічних збитків, і тому забезпечення надійної роботи енергоблоків електростанції і, зокрема, ТГ залишається актуальною науково-технічною задачею. Її актуальність особливо збільшується останнім часом внаслідок старіння існуючого парку ТГ.

Надійність роботи ТГ в значній мірі залежить від нагріву вузлів його конструкції, і, зокрема, конструкції ротора. В процесі функціонування справного ТГ значний перегрів ротора може відбуватися з різних причин: тривала робота ТГ в асинхронному або несиметричному режимах, тривале форсування струму збудження, тощо. Такий перегрів є передбачуваним і враховується в розрахунках при проектуванні ТГ. Але в процесі тривалої експлуатації ТГ внаслідок поступової деградації конструкції виникають ушкодження, які спричиняють недопустимий перегрів. Так, значні недопустимі перегріви обмотки ротора (ОР) виникають при порушеннях в системі її охолодження, при ушкодженнях електричної ізоляції обмотки та появі коротких замикань витків, тощо. Коротке замикання витків обмотки ротора ТГ може відбуватися внаслідок перегріву або поступового механічного перетирання ізоляції витків при змінних у часі її температурних розширеннях. Суттєвий перегрів ОР відбувається

внаслідок перекриття вентиляційних каналів витків ОР через їх засмічення (появу бруду) або через зсув ізоляційних прокладок між витками при пусках і зупинках ТГ. Особливо критичним стає перегрів, коли в ушкодженій ОР виконується форсування струму збудження.

Для уникнення значних економічних збитків через ушкодження ОР на зміну планово-попереджувальним ремонтам, приходять ремонти за результатами оцінки фактичного технічного стану, які базуються на використанні систем контролю і моніторингу технічного стану елементів ротора ТГ, в тому числі за показами датчиків температури. Сучасні методи неруйнівного контролю теплового стану ротора ТГ передбачають використання приладів контролю нагріву електрообладнання із застосуванням різних методів вимірювань на основі фіксації показів: термометра, омметра, термопари і рівня інфрачервоного випромінювання. Контроль та аналіз нагріву елементів ротора ТГ в режимі реального часу виконується за допомогою датчиків температури, закладених в різних точках ТГ в процесі його виробництва.

Для підвищення ефективності інтелектуального контролю теплового стану ротора необхідні результати математичного моделювання його нагріву в різних режимах роботи ТГ і різних варіантах ушкоджень ОР.

© Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін

Дослідження температурного поля в ТГ здійснювалось в роботах [1 – 10]. Зокрема, в роботі [1] досліджувався вплив засмічення охолоджуючих каналів ОР на температурне поле та локальні перегріву ротора ТГ, які залежать від кількості засмічених каналів ОР. Зазначені дослідження проводилися при номінальному значенні струму збудження. Але, як вже відмічалося, неприпустимий нагрів ОР виникає при форсуванні струму збудження, яке з метою утримання ТГ в синхронізмі при виникненні коротких замикань в мережі тимчасово виконується системою збудження. Поєднання впливу цих двох факторів – наявності засмічених охолоджуючих каналів ОР і форсування струму збудження призводить до недопустимого перегріву ОР навіть при невеликій кількості засмічених каналів. Впливає також можлива наявність короткозамкнених (к.з.) витків ОР. Дослідження в такій постановці задачі дотепер не проводилися, але актуальність такого розгляду зростає з огляду на зменшення залишкового ресурсу потужних ТГ, які у даний час експлуатуються на електростанціях України.

**Мета роботи** – дослідження температурного стану ротора ТГ при появі типових ушкоджень ОР – наявності засмічених (закупорених) охолоджуючих каналів витків ОР і короткому замиканні частини витків ОР, як в номінальному режимі роботи ТГ, так і при форсуванні його струму збудження.

**Об’єкт дослідження.** Для дослідження температурного поля був вибраний турбогенератор ТГВ-200 потужністю 200 МВт з водневим охолодженням, що має наступні параметри: зовнішній діаметр бочки ротора  $D_R = 1,075$  м, довжина бочки ротора  $L_R = 5,1$  м, кількість пазів/зубцевих поділок ротора  $Z_2/Z_Z = 36/52$ , частота обертання ротора,  $n = 3000$  об/хв, напруга збудження  $U_f = 440$  В, номінальне значення коефіцієнта потужності  $\cos\phi_n = 0,85$  (перезбудження), клас нагрівостійкості ізоляції обмотки ротора – F (155 °C).

Коефіцієнти теплопровідності матеріалів ротора ТГ приймалися наступними: а) еквівалентний коефіцієнт теплопровідності пазової ізоляції обмотки ротора (з урахуванням наявності малих проміжків між ізоляцією та стінками пазів)  $\lambda_{is} = 0,25$  Вт/(м·°C); б) коефіцієнт теплопровідності дюралюмінієвих клинів ротора  $\lambda_0 = 155$  Вт/(м·°C); в) коефіцієнт теплопровідності мідних провідників ОР  $\lambda_{Cu} = 400$  Вт/(м·°C) [4].

Коефіцієнти тепловіддачі з різних конструктивних поверхонь ротора в охолоджуюче середовище  $\alpha$ , мають різні числові значення для різних поверхонь, а саме: зовнішньої поверхні бочки ротора, поверхонь вентиляційних каналів в мідних провідниках ОР. Приймалися наступні числові значення коефіцієнтів теплообміну між зазначеними поверхнями і воднем [1, 4]: а) коефіцієнт тепловіддачі між зовнішньою поверхнею бочки ротора і охолоджуючим воднем  $\alpha = 1100$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C); б) коефіцієнт тепловіддачі між мідними провідниками витків і воднем у вентиляційних каналах ОР  $\alpha_v = 450$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

**Математична модель** температурного поля ротора ТГ в сталих режимах роботи базується на стаціонарному диференціальному рівнянні теплопровідності, яке в декартових координатах в двовимірній постановці має наступний вид [4]:

$$\lambda \left[ \frac{\partial^2 \theta(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y)}{\partial y^2} \right] = Q(x, y), \quad (1)$$

де  $\theta(x, y)$  – невідома функція розподілу температури;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $Q(x, y)$  – об’ємні питомі джерела теплового поля, Вт/м<sup>3</sup>, якими є втрати потужності в елементах ротора ТГ при роботі в номінальному синхронному режимі і при форсуванні збудження. Зокрема враховувалися наступні джерела тепловідлення: а) джоулеві втрати потужності в міді ОР  $Q_{RW} = i_{RW}^2 \cdot r_{RW}$ , де  $i_{RW}$  і  $r_{RW}$  – струм і активний опір ОР відповідно; б) вентиляційні втрати на поверхні ротора при його обертанні, які визначалися за відомими формулами в посібниках по проектуванню ТГ.

На зовнішній поверхні ротора і на внутрішніх поверхнях вентиляційних каналів обмотки ротора задавалися граничні умови третього роду:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\alpha(\theta - \theta_M), \quad (2)$$

де  $\alpha$  – зазначений вище коефіцієнт тепловіддачі;  $\theta_M$  – температура охолоджуючого холодоагенту (водню). Середня температура водню приймалася  $\theta_M = 45$  °C з урахуванням його підігріву при проходженні довгих вентиляційних каналів витків ОР.

Знайдений стаціонарний розподіл температури використовується як початковий розподіл температури при вирішенні задачі нестационарної теплопровідності в режимах форсування струму збудження, яке описується наступним рівнянням [4]:

$$\lambda \left[ \frac{\partial^2 \theta(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, t)}{\partial y^2} \right] - c\rho \frac{\partial \theta(x, y, t)}{\partial t} = -Q(x, y, t), \quad (3)$$

де  $Q(x, y, t)$  – об’ємні питомі втрати потужності для задачі нестационарної теплопровідності, Вт/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоємність,  $\rho$  – питома густина матеріалу,  $t$  – час. Рівняння (3) розв’язується разом з умовами (2).

Моделювання ушкоджень ОР відбувалося наступним чином. При короткому замиканні витків ОР питомі втрати в к.з. витках дорівнюють нулю внаслідок відсутності в них струму збудження. Наявність засмічених вентиляційних каналів у витках ОР моделювалась відсутністю тепловіддачі з внутрішньої поверхні вентиляційних каналів – коефіцієнт тепловіддачі між провідниками витків в пазу ротора і засміченим вентиляційним каналом приймався  $\alpha_v = 0$ .

**Результати дослідження.** З метою порівняльного аналізу надалі наведено результати моделювання та дослідження температурного поля в роторі при різному технічному стані та режиму роботи ТГ.

**1. Нагрів неушкодженого ротора в номінальному режимі роботи ТГ.** Результати моделювання отримані в програмі Comsol Multiphysics 5.4 і відображають температурне поле ротора ТГ в номінальному режимі. Картина поля зображена на рис. 1.

За результатами аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Максимальна температура міді ОР спостерігається в пазах ротора, які розташовані навколо осі ротора. Зокрема, максимальна температура провідни-

ків дорівнює  $87,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  і спостерігається в 3-му витку ОР від дна паза, який розташований біля осі  $q$ .

2. Найбільший нагрів в сталі ротора ТГ спостерігається в середніх зубцях на осі  $q$  і в ярмі ротора. На рис. 2. показано розподіл температури в сталі ротора вздовж діаметра по осях  $q$  і  $d$ .

3. Найменш нагрітими є дюралюмінієві клини та великі зубці ротора ( $45,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), що обумовлено умовами їх охолодження.

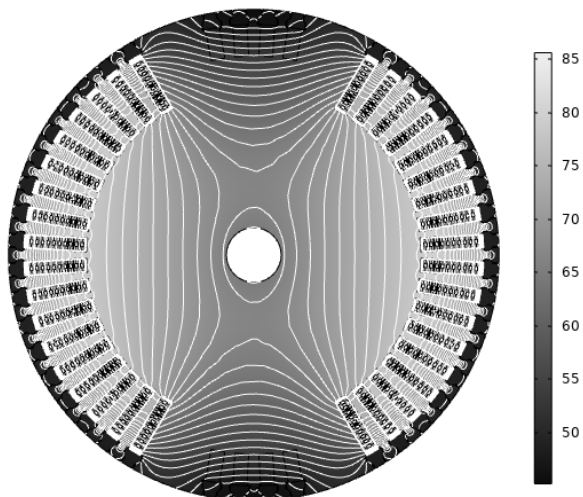


Рис. 1. Розподіл температури в роторі неушкодженого ТГ

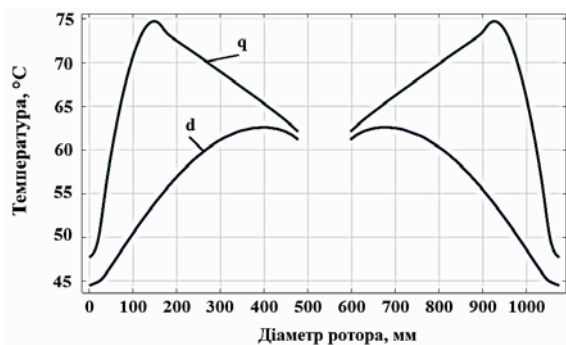


Рис. 2. Розподіл температури в сталі ротора неушкодженого ТГ вздовж радіуса по осям  $d$  і  $q$

Дослідження розподілу градієнта температури в роторі ТГ дозволяє визначити ділянки, в яких виникають найбільші термомеханічні напруження. Встановлено, що:

1. Температурні градієнти на ділянках сталі біля дна пазів, що межують з великими зубцями, є більшими ( $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ) у порівнянні з температурними градієнтами на ділянках сталі ротора, які розташовані біля дна пазів навколо осі  $q$  ( $126\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ).

2. Порівняно великі значення температурних градієнтів в сталі спостерігаються в верхній частині зубців біля клинів ротора ( $565\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ).

3. Значно більших значень досягають температурні градієнти в електричній ізоляції пазів, зокрема: в склотекстолітовій ізоляції під клинами ( $11627\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ); в склотекстолітовій ізоляції в основі пазів ( $9913\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ); в склотекстолітовій ізоляції, що примикає до стінок великого зубця ( $17006\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ); в склотекстолітовій ізоляції, що примикає до стінок решти пазів ( $18542\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ).

Це пояснюється тим, що витки ОР є найбільш нагрітими елементами, а дюралюмінієві клини і сталь

ротора – найбільш охолодженими. Тому при виборі матеріалу ізоляційних прокладок під клином та в основі паза для запобігання значних термомеханічних напружень доцільно надавати перевагу матеріалам, які мають менший коефіцієнт температурного розширення.

Окреме питання виникає при виборі теплофізичних параметрів ізоляції ОР ТГ. Були досліджені температурні поля в роторі при заміні існуючої штатної ізоляції ОР, яка має коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{is} = 0,25\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ , на більш теплопровідну ізоляцію типу Місаdur з коефіцієнтом  $\lambda_{is} = 0,58\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ , яка була запропонована в роботі [2].

За результатами проведених чисельних розрахунків встановлено, що значення градієнта температури в склотекстолітовій ізоляції, що межує зі стінками малого зубця біля осі  $q$ , зменшилось на  $16,8\%$ , а в підклиновій прокладці паза, розташованого біля великого зубця ТГ, зменшилось на  $36,2\%$ . Але у цілому максимальна температура в неушкодженому роторі зменшилась всього на  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (на  $1,7\%$ ) і становить  $85,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такий результат пояснюється тим, що  $85\text{ } \dots\text{ } 90\%$  тепловиділення в ОР відводиться через вентиляційні канали у витках і лише  $10\text{ } \dots\text{ } 15\%$  тепловиділення проходить через ізоляцію і віддається з поверхні ротора.

**2. Нагрів ротора при короткому замиканні витків ОР.** При короткому замиканні частини витків ОР струм збудження оминає к.з. витки. Тому електричний опір ОР зменшується, а струм збудження зростає, що збільшує нагрів інших витків ОР. На рис. 3 показано залежності температури ОР від кількості к.з. витків, які знаходяться в одній котушці в одному пазу ротора.

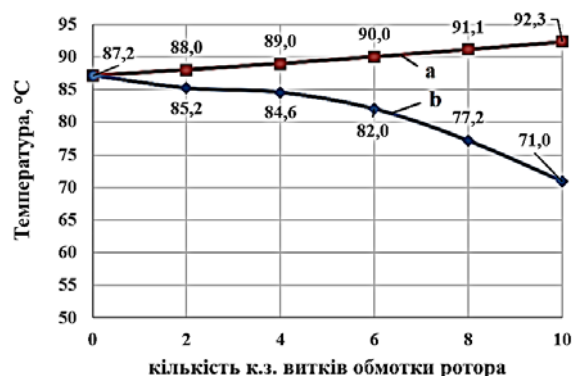


Рис. 3. Максимальна температура в залежності від кількості к.з. витків в пазу ОР: а) по всій площі ротора; б) в ушкодженому пазу ротора на осі  $q$  ротора

Наприклад, при замиканні всіх 10 витків котушки ОР, яка розташована в одному пазу, максимальна температура інших витків ОР зростає всього на  $6\%$  (рис. 3,а). При цьому температура в пазу з к.з. витками дещо зменшується, оскільки ушкоджені витки не навантажені струмом (рис. 3,б). З рис. 3 можна зробити висновок, що при короткому замиканні навіть 10 витків ОР ( $5,56\%$  від загальної кількості витків ОР) нагрів ротора збільшується в незначній мірі.

Нагрів ротора призводить до зростання градієнта температури в ізоляції ОР ТГ (рис. 4).

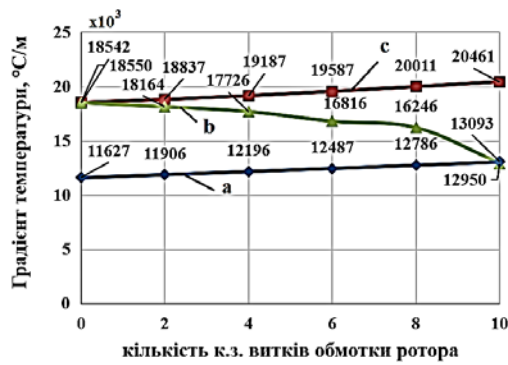


Рис. 4. Максимальні значення градієнта температури в залежності від кількості к.з. витків ОР: а) в підклиновій прокладці паза; б) в склотекстолітовій ізоляції, що примикає до стінок малого зубця; с) по всій площі ротора

**3. Нагрів ротора при засміченні охолоджуючих каналів витків ОР.** На рис. 5 показано максимальну температуру в ОР при наявності засмічених охолоджуючих каналів витків ОР, розташованих в одному пазу.



Рис. 5. Максимальна температура в пазу ротора в залежності від кількості засмічених каналів ОР

З рис. 5 видно, що при закупорці в пазу 4-х з 10-ти існуючих вентиляційних каналів максимальна температура в цьому пазу зростає на 56 % і наближається до критично допустимої температури ізоляції класу F, а при більшій кількості засмічених каналів – перевищує допустиму температуру. На рис. 6 показано зростання градієнта температури в ізоляції ОР при засміченні охолоджуючих каналів. З рис. 6 видно, що при засміченні 4-х каналів градієнт температури в ізоляції ОР зростає в 2,2 рази. Таким чином, на відміну від коротких замикань витків закупорка їх вентиляційних каналів викликає суттєво небезпечні перегриви ОР.



Рис. 6. Максимальні значення градієнта температури в склотекстолітовій ізоляції в залежності від кількості засмічених каналів ОР

**4. Нагрів ротора при форсуванні струму збудження.** Згідно з вимогами п.4.17 ГОСТ 21558-2000 системи збудження ТГ з безпосереднім охолодженням повинні витримувати дворазовий номінальний струм збудження протягом не менше 20 с. Розглядався розрахунковий нагрів ротора при наступному процесі форсування струму збудження: за час тривалістю 1 с струм збудження по лінійному закону зростає від номінального значення до форсованого значення, яке визначається коефіцієнтом форсування

$$k_f = \frac{i_{ff}}{i_{fn}}$$

де  $i_{ff}$ ,  $i_{fn}$  – відповідно форсоване і номінальне значення струму збудження (в розрахунках коефіцієнт варіюється в межах 1,25 ... 2). Надалі впродовж 19 с форсоване значення струму утримується незмінним. Далі приведено температури, набуті ротором вкінці зазначеного процесу форсування.

Залежності максимальних значень температури і градієнту температур в роторі від величини коефіцієнту форсування  $k_f$  показано, відповідно, на рис. 7 і рис. 8. Для порівняння на рис. 7 також показана лінія допустимого значення температури.



Рис. 7. Максимальна температура в пазу ротора нешкоджененого ТГ в залежності від коефіцієнта форсування струму збудження

З рис. 7 видно, що вже при  $k_f = 1,75$  максимальна температура в роторі сягає гранично допустимого значення. Також виникають значні градієнти температури в ізоляції ОР (рис. 8), які в 3,1 рази перевищують їх значення в номінальному режимі, що уможливило ушкодження ізоляції ОР не тільки від перегріву, а й через значні термомеханічні деформації.

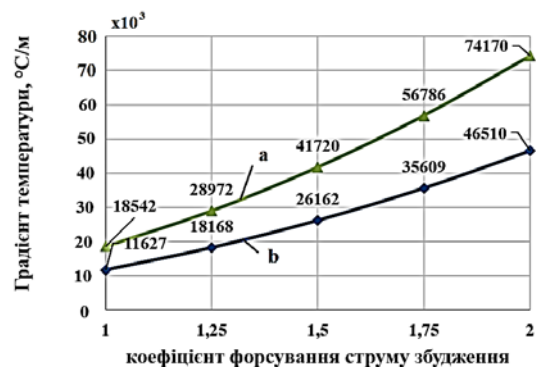


Рис. 8. Максимальні значення градієнта температури в залежності від коефіцієнта  $k_f$ : а) в склотекстолітовій пазовій ізоляції; б) в під клиновій ізоляції

**5. Нагрів ротора при засміченні вентиляційних каналів ОР, форсуванні струму збудження і коротких замиканнях витків ОР.** Недопустимим стає нагрів у разі форсування струму збудження, якщо ОР містить розглянуті вище ушкодження. На рис. 9 зображено залежності температури від коефіцієнту форсування струму збудження при різній кількості к.з. витків ОР і при відсутності закупорених вентиляційних каналів. На рис. 10 показано залежності температури ротора від коефіцієнту форсування струму збудження при різній кількості засмічених вентиляційних каналів (змінюється від 0 до 3) і при відсутності к.з. витків ОР. На рис. 9 і 10 нижній графік відповідає неушкодженому ротору, а при зростанні кількості ушкоджених витків графіки проходять вище. З рис. 9 видно в якій мірі в залежності від кількості к.з. витків зменшується допустиме значення коефіцієнта  $k_f$ .

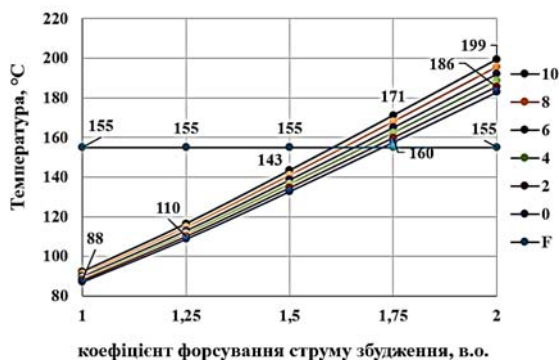


Рис. 9. Максимальна температура в роторі ТГ в залежності від коефіцієнта форсування струму збудження і різній кількості к.з. витків ОР (при відсутності засмічених каналів)

З рис. 10 видно, що при закупорці 3-х каналів при двократному форсуванні струму збудження максимальна температура зростає до 337 °С, що є неприпустимим. Таким чином, ушкодження системи охолодження ОР при засміченні вентиляційних каналів суттєво впливає на можливість форсування струму збудження за умови збереження допустимого нагріву ОР. Регламентоване форсування стає неможливим, оскільки вже при 1-му засміченому каналі допустиме значення  $k_f$  складає всього 1,35, що не задовольняє вимогам існуючих стандартів експлуатації ТГ.



Рис. 10. Максимальна температура в роторі ТГ в залежності від коефіцієнта  $k_f$  при різній кількості засмічених каналів і відсутності к.з. витків ОР

На рис. 11 зображено аналогічні залежності для одного з вірогідних варіантів комбінованого ушкодження: при 1-му закупореному каналі і 2-х к.з. вит-

ках ОР при форсуванні збудження. З рис. 11 видно, що таке комбіноване ушкодження також є небезпечним для ТГ.

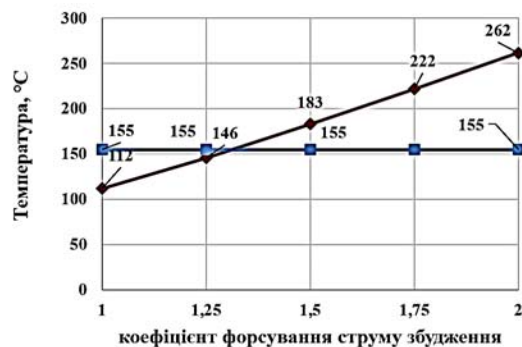


Рис. 11. Максимальна температура в роторі при 1-му засміченому каналі і 2-х к.з. витках ОР в залежності від коефіцієнта форсування струму збудження

### Висновки.

1. При тривалій експлуатації потужних ТГ в ОР виникають ушкодження – засмічення (закупорка) вентиляційних каналів і короткі замикання витків ОР, внаслідок чого суттєво збільшується нагрів ОР як в сталому номінальному режимі роботи, так і, особливо, при форсуванні струму збудження, в динамічних режимах.

2. Особливу небезпеку являє засмічення вентиляційних каналів. Навіть при 1-му закупореному каналі тривале форсування струму збудження може відбуватися з коефіцієнтом не більше 1,4, (або потрібно суттєво зменшити час форсування), а при 3-х і більше закупорених каналах форсування стає практично неможливим і ТГ потрібно виводити в ремонт. Тому важливе значення набуває розробка достовірних методів і засобів діагностування та своєчасного усунення засмічення вентиляційних каналів витків ОР ТГ.

3. Встановлено ділянки з найбільшими значеннями температури і температурного градієнта, що дозволяє обґрунтовано розміщувати датчики температури.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучинский К.А. Анализ температурного поля ротора турбогенератора мощностью 300 МВт при асимметрии охлаждения пазовой зоны // Технічна електродинаміка. – 2013. – №4. – С. 59-66.
2. Федоренко Г.М., Колесник Г.А. Высоковольтная система изоляции с повышенной теплопроводностью для турбогенераторов // Праці інституту електродинаміки НАН України. – 2010. – №25. – С. 38-41.
3. Федоренко Г.М., Васильковський Ю.М., Саратов В.О. Розподіл температури в роторі при форсуванні струму збудження в Q-обмотці турбогенератора ТГВ-300, що модернізується // Новини енергетики. – 1998. – №4. – С. 33-39.
4. Филиппов И.В. Теплообмен в электрических машинах. – Л.: Энергоиздат, Л.О., 1986. – 256 с.
5. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Протасова Т.В. Влияние неравномерности тепловыделения в роторе генератора на его термонапряженное состояние // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №8(44). – С. 135-139.
6. Lu Y., Li W., Ma X., Jin H.Y. Numerical simulation of temperature field in rotor of large turbogenerator with air-coolant // Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2007, vol.27, no.12, pp. 7-13.

7. Weili L., Xuefeng Y., Debao G., Yongli F. Calculation and analysis of fluid flow and heat transfer of air cooled turbogenerator with multipath ventilation // Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, vol.24, no.12, pp. 24-31.
8. Singh A.N., Doorsamy W., Cronje W. Thermographical analysis of turbogenerator rotor // Electric Power Systems Research, 2018, vol.163, pp. 252-260. doi: 10.1016/j.epsr.2018.06.019.
9. Irwanto B., Eckert L., Prothmann T. Thermal unbalance behaviour of turbogenerator rotors // Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. – Springer, Cham, 2015, pp. 2231-2242. doi: 10.1007/978-3-319-06590-8\_183.
10. Weili L., Chunwei G., Ping Z. Calculation of a complex 3-D model of a turbogenerator with end region regarding electrical losses, cooling, and heating // IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, vol.26, no.4, pp. 1073-1080. doi: 10.1109/tec.2011.2161610.

#### REFERENCES

1. Kuchinskiy K.A. Analysis of the temperature field of the of 300 MW turbogenerator rotor with asymmetry in the cooling of the slot zone. *Technical electrodynamics*, 2013, vol.4, pp. 59-66. (Rus).
2. Fedorenko G.M., Kolesnik G.A. High-voltage insulation system with increased thermal conductivity for turbogenerators. *Works of institute of electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine*, 2010, no.25, pp. 38-41. (Rus).
3. Fedorenko H.M., Vaskovskyi Yu.M., Saratov V.O. Temperature distribution in the rotor in case of excitation current forcing in the Q-winding of the modernizing TGV-300 turbogenerator. *News of power engineering*, 1998, no.4, pp. 33-39. (Ukr).
4. Filippov I.V. *Teploobmen v elektrisnyh masynah* [Heat transfer in electric machines]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1986. 256 p. (Rus).
5. Shulzhenko N.G., Gontarovskiy P.P., Protasova T.V. Influence of non-uniformity of heat dissipation in the generator rotor on its thermal stress state. *Aerospace Engineering and Technology*, 2007, no.8(44), pp. 135-139. (Rus).
6. Lu Y., Li W., Ma X., Jin H.Y. Numerical simulation of temperature field in rotor of large turbogenerator with air-coolant. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2007, vol.27, no.12, pp. 7-13.
7. Weili L., Xuefeng Y., Debao G., Yongli F. Calculation and analysis of fluid flow and heat transfer of air cooled turbogenerator with multipath ventilation. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, vol.24, no.12, pp. 24-31.
8. Singh A.N., Doorsamy W., Cronje W. Thermographical analysis of turbogenerator rotor. *Electric Power Systems Research*, 2018, vol.163, pp. 252-260. doi: 10.1016/j.epsr.2018.06.019.
9. Irwanto B., Eckert L., Prothmann T. Thermal unbalance behaviour of turbogenerator rotors. *Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics*. Springer, Cham, 2015, pp. 2231-2242. doi: 10.1007/978-3-319-06590-8\_183.
10. Weili L., Chunwei G., Ping Z. Calculation of a complex 3-D model of a turbogenerator with end region regarding electrical losses, cooling, and heating. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, vol.26, no.4, pp. 1073-1080. doi: 10.1109/tec.2011.2161610.

Надійшла (received) 11.11.2019

Васьковський Юрій Миколайович<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Гераскін Олександр Анатолійович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 03056, Київ, пр. Перемоги, 37, e-mail: vun157@gmail.com

Yu.M. Vaskovskyi<sup>1</sup>, O.A. Geraskin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

#### Turbogenerator rotor heating in presence of rotor winding defects and excitation current forcing.

**Purpose.** Research of the TGV-200 turbogenerator rotor heating in case of rotor winding damages, which occur as a result of prolonged operation of the turbogenerator, namely - clogging of the ventilation channels of the rotor winding and the occurrence of short circuits of the rotor windings. Particular attention is paid to heating during short-term increasing of the excitation current, which is performed to keep the generator in synchronous mode of operation. **Methods.** Field mathematical models are used. **Results.** It is determined that the clogging of the rotor winding ducts has a greater effect on the rotor heating compared to the short circuits of the individual windings of the rotor winding. It was defined that increasing of the excitation current within the limits regulated by the current standards of the turbogenerators operation becomes impossible with clogging of a small number of ventilation channels of the rotor winding, which impairs the efficiency of the turbogenerator and requires its output to repair. **Scientific novelty.** A mathematical model of rotor heating is developed in case of typical damages of the rotor winding. **Practical value.** The areas in the rotor where the temperatures and temperature gradients reach the highest values was determined, which allows to recommend the locations of the optimal temperature sensors placements. References 10, figures 11.

**Key words:** turbogenerator, rotor winding, temperature, temperature gradient, short circuit, clogging of cooling channels, excitation forcing.