

DIAGNOSIS AND CONTROL OF HEAT DISTORTIONS OF APPLICABLE TURBO-GENERATOR

O. Mazurenko, V. Samsonov

National University of Food Technologies

Key words:

*Turb- generator
Defect
Failure
Control
Diagnostics
Heating*

ABSTRACT

The unique design of each turbine generator hampers early detection of defect in case of emergency, and the individual operating conditions can swap the detected non-emergency defect into gradual breakdown. Therefore, for effective management of the machine, it is necessary to use a complex system control and diagnostics that provide information about the actual state of the turbine generator and its operational reliability. Based on this information, the conditions should be created under which the defect of turbo-generator will not progress or will progress at the lowest rates. This will allow timely detection of defects and managing their development with the aim to avoid and prevent accidents and improve technical and economic efficiency of operation.

Article history:

Received 20.04.2014

Received in revised form
07.05.2014

Accepted 15.05.2014

Corresponding author:

O. Mazurenko

Email:

npnuht@ukr.net

ДІАГНОСТИКА І УПРАВЛІННЯ РОЗВИТКОМ ТЕПЛОВИХ ДЕФЕКТІВ ДІЮЧОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

О.О. Мазуренко, В.В. Самсонов

Національний університет харчових технологій

Унікальність конструкції кожного окремого турбогенератора ускладнює своєчасне виявлення аварійного дефекту, а індивідуальні умови експлуатації можуть змінити виявлений неаварійний дефект у поступовий аварійний. Для ефективного управління роботою машини необхідно комплексно використовувати системи контролю й діагностування, які надаватимуть інформацію про реальний стан турбогенератора та його експлуатаційну надійність. На основі цієї інформації обґрунтовано прийматимуться рішення щодо створення умов експлуатації турбогенератора, при яких дефект не розвиватиметься, розвиватиметься з мінімальною швидкістю або усунеться. Це дозволить своєчасно виявляти дефекти й управляти їх розвитком з метою уникнення та запобігання аварійних ситуацій, підвищить технічну й економічну ефективність експлуатації.

Ключові слова: турбогенератор, дефект, відмови, контроль, діагностика, нагрів.

Виробництво більшої частки електричної енергії у будь-якій країні здійснюється на теплових і атомних електростанціях, важливою складовою яких є синхронні генератори потужністю до 1200 МВт. У цих машинах відбувається перетворення механічної енергії турбіни в електричну енергію, тому їх називають турбогенераторами (ТГ).

Протягом тривалого часу основним завданням енергетичної промисловості було забезпечення виробництва більшої кількості електричної енергії, для чого розроблялися і впроваджувалися нові, більш потужні зразки ТГ. За таких обставин створення систем управління роботою ТГ, більшість з яких працюють до теперішнього часу, також було орієнтовано на виконання цього завдання.

На даний час в Україні експлуатується більше ста потужних ТГ, значна частина з яких уже відпрацювали свій термін (30 років або 250000 годин), визначений заводом-виробником. Придбання нових і заміна ТГ, які вже відпрацювали свій термін, є доволі дорогим заходом.

Конструктивно ТГ являє собою унікальну ієрархічну систему, яка складається з множини впорядкованих і взаємопов'язаних між собою елементів, підсистем, ланок, деталей вузлів та агрегатів. Усі складові ТГ функціонально пов'язані між собою, зі значною кількістю елементів і підсистем машини, а також із вхідними і вихідними потоками зв'язку, тому перехід у непрацездатний стан хоча б одного з елементів системи може призвести до погіршення стану або навіть до припинення роботи всієї машини.

Властивість ТГ не є простою сумою властивостей його складових, тому що при виготовленні ТГ з метою збільшення показників його надійності використовуються різні види надлишковості (структурна, часова, функціональна та інші). Разом з тим відомо, що незалежно від закладеного запасу міцності кінцевим результатом роботи будь-якої складової, як і будь-якого технічного об'єкта, є виникнення дефекту, що призводить до порушення їх працездатності.

Залежно від причини виникнення дефекти поділяють на: конструкційні — виникають унаслідок помилок при проектуванні об'єкта; виробничі — виникають унаслідок порушень при виготовленні, монтажу, наладці або при виконанні ремонтних робіт; експлуатаційні — виникають унаслідок порушення правил або умов експлуатації об'єкта [1].

За результатами аналізу інформації, отриманої більш ніж за 6000 генератор-літ спостережень за роботою ТГ потужністю від 100 до 1000 МВт, був складений перелік так званих ключових дефектів і розроблені рекомендації щодо запобігання виникненню, виявлення та усунення цих дефектів [2].

Завдяки надійності конструкції, яка закладена при проектуванні та виготовленні ТГ, незначна частка дефектів може викликати повну зупинку машини. Слід мати на увазі, що будь-який із ключових дефектів відразу після його виникнення може і не обумовлювати зупинку ТГ. У той же час, внаслідок індивідуальності конструкції та перебігу енергетичних процесів у машині, а також непередбачуваності виникнення зовнішніх факторів і комбінацій їх впливу на стан ТГ, цей дефект у будь-який момент може перетворитися у такий, що розвивається і навіть стати аварійно небезпечним.

Слід також враховувати, що завдяки високій конструктивній надійності ТГ і щільній взаємодії його складових виникнення ключового дефекту може спровокувати появу й розвиток іншого або одразу кількох інших дефектів.

Згідно з даними статистики, за весь період експлуатації ТГ серії ТВВ потужністю 165-1000 МВт 75-80% дефектів припадає на основні вузли машини (табл. 1), більша частина яких викликана порушенням їх теплового стану [3].

Таблиця 1. Розподілення ключових дефектів між вузлами ТГ

Вузли ТГ серії ТВВ	Кількість ключових дефектів на вузол	Кількість причин виникнення відмов
Осердя і обмотка статора	15	21
Осердя та обмотка ротора	11	15
Щітко-контактний пристрій	9	10
Система вентиляції та охолодження	3	4

Дефекти, які виникають при роботі ТГ, у свою чергу, викликають відмови у роботі вузлів або машини в цілому. Залежно від ознак прояву, відмови поділяють на переміжні, раптові та поступові. Таким чином, дефект, появу якого викликає той або інший вид відмови, є ланкою, що поєднує між собою різні стани, у яких може перебувати ТГ.

Переміжні — це відмови, які викликають перехід об'єкта зі справного стану у працездатний стан (ТГ має незначні експлуатаційні обмеження), а з часом, унаслідок самоусунення цих відмов, має місце зворотний перехід об'єкта з працездатного стану у справний (рис. 1).

Раптові відмови викликають перехід ТГ зі справного стану у непрацездатний (ТГ має суттєві експлуатаційні обмеження) або граничний стан (перед аварійний). Усунення цього виду відмов, тобто повернення об'єкта у початковий стан, може відбутися тільки внаслідок виконання відповідних ремонтних робіт.

Запобігти виникненню переміжних і раптових відмов ТГ, не кажучи вже про уповільнення їх розвитку, складно, а іноді просто неможливо.

У разі виникнення поступової відмови, завдяки відносно уповільненій зміні значення одного чи кількох режимних параметрів ТГ, протягом певного часу відбувається перехід об'єкта зі справного чи працездатного стану у непрацездатний або граничний стан. Уповільнена зміна стану об'єкта дозволяє вжити відповідних заходів щодо фіксації, гальмування розвитку і

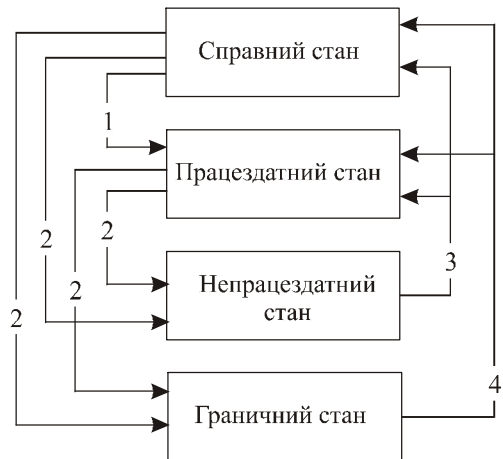


Рис.1. Схема зміни технічного стану ТГ:

1 – пошкодження (дефект); 2 – відмова; 3 – відновлення; 4 – ремонт

навіть усунення дефекту, тобто надає можливість запобігти або відтермінувати зупинку ТГ.

Залежно від частоти і причин виникнення відмов весь термін роботи ТГ умовно можна поділити на три періоди (рис. 2).

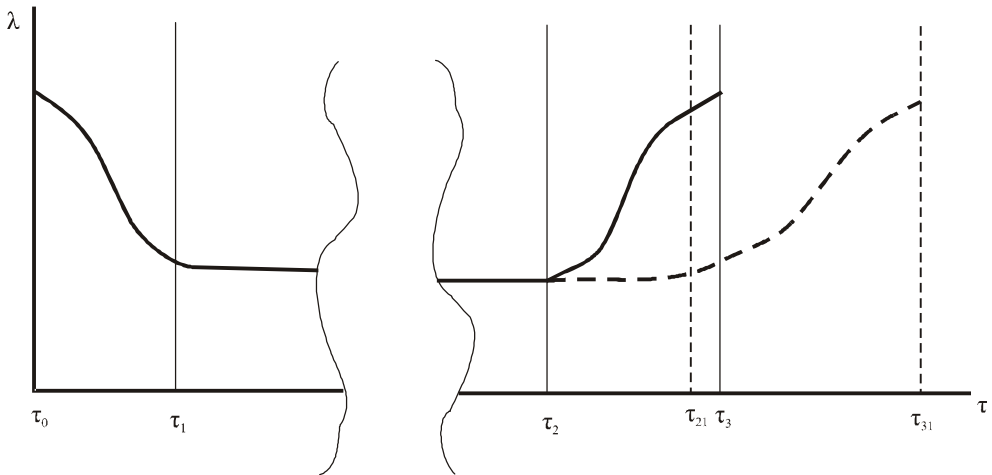


Рис. 2. Інтенсивність відмов за періодами роботи ТГ

Протягом першого періоду, тривалістю $\tau_1 - \tau_0$, здійснюють випробування, наладку та пробні пуски ТГ, виявляють і усувають конструктивні та виробничі дефекти. Для цього періоду характерні більша кількість раптових (майже 80%) і незначна кількість поступових відмов у роботі ТГ.

У другому періоді ($\tau_2 - \tau_1$), періоді безпосередньої експлуатації ТГ, кількість виникнення відмов мінімальна. В основному тут можливі поступові відмови (майже 90%), які викликають експлуатаційні дефекти. Переміжні і раптові відмови протягом другого періоду виникають унаслідок випадкових поєднань внутрішніх і зовнішніх факторів.

У третьому періоді ($\tau_3 - \tau_2$) — виробітки, інтенсивність відмов знову збільшується. Для цього періоду характерні поступові (майже 55%) та раптові відмови. Потрібно відзначити, що у цьому періоді досить складно виконувати вимоги нормативних документів з експлуатації ТГ.

Згідно з [4], причини, які викликають відмови вузлів і систем ТГ, такі:

- електричні (зменшення опору та пробі ізоляції, корпусні та виткові замикання у колах статора й ротора тощо);
- термічні (нагрів обмоток та осердь статора і ротора ТГ, охолоджуючих середовищ тощо);
- механічні (порушення міцності вузлів, кріплень, вібрація тощо);
- порушення у роботі допоміжних систем ТГ: газової, масляної, водяної систем ТГ.

Названі групи причин у загальній кількості причин відмов для ТГ серії ТВВ наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Розподілення відмов у роботі ТГ серії ТВВ залежно від причини

Відмова	Електричні	Теплові	Механічні	Допоміжні системи	Інші
%	12,5	15,6	10,6	41,3	20

Як випливає з результату аналізу даних, наведених у табл. 2, найбільш значущим серед факторів, які впливають на стан ТГ, є якість виконання проведення ремонтних робіт, особливо забезпечення тривалої герметичності газової, масляної та водяної систем ТГ.

Зрозуміло, що для збереження або збільшення обсягів виробництва електроенергії, відновлення або підвищення надійності й безпеки експлуатації ТГ обов'язково доводиться виконувати ремонтні роботи, а також роботи з модернізації машини і систем забезпечення її експлуатації. Навіть у разі відсутності впливу людського фактора на конструкцію і технологію виготовлення нової деталі (вузла), якість монтажу деталей і проведення ремонтних робіт, після їх виконання індивідуальні показники машини, а отже, і характеристики енергетичних процесів машини зазнають змін. Відповідно, це впливає на інтенсивність старіння незамінних вузлів ТГ.

Збільшення терміну експлуатації за рахунок другого й третього періодів роботи ТГ $(\tau_{21}-\tau_2)+(\tau_{31}-\tau_3)$ може призвести до непропорційного збільшення кількості відмов окремих вузлів ТГ і, відповідно, кількості ремонтно-профілактичних робіт (рис.2). Так, збільшення терміну експлуатації ТГ в окремих випадках викликає збільшення кількості відмов майже втричі. При цьому потрібно враховувати, що якість і кількість виконаних ремонтних робіт, як і якість додержання умов експлуатації ТГ, значною мірою будуть залежати від кваліфікації обслуговуючого персоналу. Адже саме при виконанні ремонтних робіт може мати місце недостатньо якісний монтаж різного роду прокладок та ущільнювачів, що призводить до порушення працездатності систем охолодження машини, закупорювання каналів руху охолоджуючих середовищ і, як наслідок, зміни параметрів термічних процесів у ТГ.

Зовнішні фактори разом із фізичними процесами, які відбуваються у ТГ, створюють непередбачуваність результату оцінки стану машини [5]. Внаслідок комплексного впливу зовнішніх факторів і процесів, що відбуваються у ТГ, наприкінці другого і весь третій період його експлуатації (рис.2) значна кількість з відомих причинно-наслідкових зв'язків виникнення дефектів може стати недійсною. Дефект може виникнути на будь-якій ланці ланцюга його розвитку або навіть у ланцюгу розвитку іншого дефекту.

Так, на перебіг електромагнітних процесів, які відбуваються у ТГ, і, відповідно, на інтенсивність виникнення дефектів впливає змінний графік електричного навантаження машини. У свою чергу, зміна електричного навантаження ТГ супроводжується зміною параметрів теплових і механічних процесів. Таким чином, крім дефектів, які можуть бути викликані суто зміною параметрів електромагнітних процесів, існує ймовірність виникнення ланцюга дефектів, обумовлених перебігом теплових процесів. Це підтверджують дані, наведені у табл. 2, які свідчать, що серед фізичних процесів, які відбуваються у ТГ, більша кількість відмов пов'язана саме з тепловими процесами.

Відомо, що навантажувальна здатність електричних машин, зокрема ТГ, в основному визначається умовами нагрівання їх основних вузлів, а тому підвищення температури є головною причиною обмеження потужності машини. Навіть короточасний перегрів електричної машини, наприклад, унаслідок перевантаження, суттєво зменшує ресурс її працездатності. Перегрів відбувається на властивостях ізоляції обмоток ротора та статора, де можуть виникнути виткові замикання. Все це дає підстави наприкінці другого і протягом третього періодів експлуатації ТГ особливу увагу приділити дефектам, які викликані саме термічними процесами.

Дефекти, які викликані або які викликають зміни теплового стану ТГ, у підсумку призводять до виникнення поступових відмов у роботі вузлів або ТГ у цілому. Таке можна пояснити певною інерційністю теплових процесів, яка значно перевищує тривалість перехідних електричних процесів, що відбуваються у ТГ.

З викладеного випливає висновок, що найбільш дієвим та економічно доцільним заходом щодо запобігання та мінімізації наслідків дії різноманітних факторів на стан працездатності ТГ, а також продовження терміну надійної роботи ТГ є застосування систем контролю й діагностики стану машини. Названі системи повинні надавати можливість своєчасно виявляти дефекти, приймати вірні рішення стосовно запобігання відмов у роботі ТГ (вузла ТГ) та умов подальшої експлуатації машини, якісно планувати час, об'єми і тривалість проведення різного виду ремонтних робіт. Такий комплекс дій отримав назву «управління розвитком дефекту» [6].

Управління розвитком виявленого дефекту може бути реалізовано шляхом визначення й створення умов експлуатації ТГ, при яких дефект не розвивається, розвивається з мінімальною швидкістю або усувається зовсім унаслідок реалізації своєчасно й обґрунтовано прийнятого рішення щодо проведення ремонтних робіт.

Отже, для здійснення управління розвитком дефекту методами діагностики потрібно своєчасно і вірно виявити цей дефект. Потім необхідно з'ясувати причину виникнення дефекту, розробити і реалізувати алгоритм управління його розвитком. Інакше кажучи, потрібно розробити і вжити заходів, які б запобігли розвитку дефекту до межі, за якою слідує відмова працездатності й аварійне відключення або руйнування ТГ.

Зрозуміло, що технічна діагностика стану ТГ не може бути здійснена без використання інформації, яку надає система контролю режимних параметрів і управління роботою ТГ. З іншого боку, не маючи інформації про реальний стан ТГ і впевненості у його надійності, тобто без знання результатів діагностики ТГ, не можна ефективно управляти роботою машини.

Управління розвитком виявлених дефектів є ланкою, яка поєднує технічну діагностику й управління роботою ТГ. У свою чергу, поєднання роботи програмного комплексу діагностики і системи управління роботою ТГ створює умови для підвищення їх технічної й економічної ефективності.

Вище було проаналізовано вплив теплових процесів, які відбуваються у ТГ, на загальний технічний стан машини. Діагностика теплового стану основних

вузлів ТГ і своєчасне виявлення дефектів, які викликають поступові відмови у роботі, надає можливість управляти розвитком таких дефектів і продовжити термін міжремонтного періоду й загальний термін експлуатації машини.

Після завершення налагоджувальних робіт при впровадженні нового ТГ або при випробовуваннях після завершення ремонтних робіт, тобто коли ТГ фактично знаходиться у найкращому технічному стану, для кожного з n стержнів обмотки статора, обмотки ротора, а також осердь статора і ротора дослідним шляхом визначають «базові» залежності їхніх температур від величини фазного струму I_1 ТГ.

З метою отримання «базових» температурних залежностей, наприклад, для кожного n стержнів обмотки статора, при номінальних (фіксованих) значеннях електричних характеристик ТГ: величини і частоти $f = const$ фазної напруги $U_1 = const$, а також коефіцієнта використання електричної потужності $\cos\varphi_1 = const$, характеристик системи охолодження: температури дистильованої води на вході $T_{вх} = const$ і виході $T_{вих} = const$ з ТГ, витрат $G_B = const$ або тиску води, яка подається до ТГ для охолодження обмотки статора; змінюючи активну потужність P_1 у фазах ТГ ($P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$) за рахунок зміни фазного струму I_1 у діапазоні від 0 до номінального значення $I_{1ном}$, вимірюють температури $T_{ст}$ стержнів обмотки статора. За результатами вимірювань для кожного стержня обмотки статора будують залежність $T_{ст} = f(I_1^2)$

У ряді модернізованих ТГ замість температури стержнів вимірюють температуру охолоджуючої води на виході з кожного стержня обмотки статора $T_{вих.i}$. Для таких ТГ базові залежності будують у координатах $T_{вих.i}$ від I_1^2 . В обох випадках теоретичним обґрунтуванням для побудови базових залежностей є результат рішення відповідного рівняння теплового балансу.

Вважаючи, що кількість теплоти Q_1 , яка виділяється у стержні обмотки статора ТГ внаслідок дії електричного струму I_1 і відводиться від стержня, дорівнює кількості теплоти сприйнятої водою, яка охолоджує стержень Q_B , рівняння теплового балансу можна записати таким чином:

$$Q_1 = I_1^2 \cdot r_1 \cdot \tau = c_B \cdot m_B \cdot (T_{вих} - T_{вх}) = Q_B, \quad (1)$$

або так:

$$Q_1 = \alpha \cdot F \cdot DT_L = c_B \cdot m_B \cdot (T_{вих} - T_{вх}) = Q_B, \quad (2)$$

де r_1 та τ — активний опір обмотки статора та час, протягом якого в обмотці статора діє електричний струм; c_B та m_B — теплоємність і маса охолоджуючої води, що подається у ТГ; α та F — коефіцієнт тепловіддачі та площа поверхні теплообміну; $\Delta T_L = (\Delta T_6 - \Delta T_M) / \ln(\Delta T_6 / \Delta T_M)$ — середньологарифмічний (середньоінтегральний) температурний напір; $\Delta T_6 = (T_{ст} - T_{вх})$ та $\Delta T_M = (T_{ст} - T_{вих})$ — більший і менший температурні напори (різниця температури стержня обмотки статора $T_{ст}$ та, відповідно, температури води на виході $T_{вих}$ і температури води на вході $T_{вх}$ до ТГ).

У результаті вирішення рівняння (2) для визначення температури охолоджуючої води на виході з ТГ одержимо вираз:

$$T_{вих} = [r_1 / (c_B \cdot G_B)] \cdot I_1^2 + T_{вх}. \quad (3)$$

Після перетворення рівняння (3), підстановки виразів $\Delta T_{li} = (\Delta T_{\sigma} - \Delta T_{\mu}) / \ln(\Delta T_{\sigma} / \Delta T_{\mu})$ і $\Delta T_{\mu} = \Delta T_{\sigma} - I_i^2 \cdot r_1 / (c_b \cdot G_b)$ отримаємо рівняння:

$$T_{\text{ст}} = \{[\eta / (c_b \cdot G_b)]' (1 - e^{-\alpha \cdot F / (c_b \cdot G_b)})^{-1}\}' I_i^2 + T_{\text{вх}}. \quad (4)$$

Оскільки відносно збільшення значень ряду величин, які входять до рівнянь (4) та (5), зі збільшенням температури, а саме: активного опору стержня й теплоємності води (r_1/c_b), а також коефіцієнта тепловіддачі й теплоємності води (α/c_b) приблизно однакові між собою, то значення комплексів величин, які у рівняннях множаться на I_i^2 , можна вважати сталими: $\eta / (c_b \cdot G_b) = \text{const}$ і $[\eta / (c_b \cdot G_b)]' (1 - e^{-\alpha \cdot F / (c_b \cdot G_b)})^{-1} = \text{const}$.

Отже, результати експериментального визначення залежності температури води на виході зі стержня й температури кожного стержня обмотки статора ($T_{\text{вих},i}$ $T_{\text{ст},i}$) сили діючого струму I_i , у координатах $T_{\text{вих}}$ від I_i^2 та $T_{\text{ст}}$ від I_i^2 , можуть бути апроксимовані прямими і з похибками Δ_i , описані рівняннями виду [7]:

$$T_{\text{вих},i} = \text{tg}\beta_i^* \cdot I_i^2 + T_{0i} \pm D_i; \quad (5)$$

$$T_{\text{ст},i} = \text{tg}\beta_i \cdot I_i^2 + T_{0i} \pm D_i, \quad (6)$$

де $\text{tg}\beta_i^*$, $\text{tg}\beta_i$ та T_{0i} — тангенси кутів нахилу прямих $T_{\text{вих},i} = f(I_i^2)$ $T_{\text{ст},i} = f(I_i^2)$ до вісі абсцис та координата перетину прямих з віссю ординат графіків.

Незважаючи на те, що на практиці $T_{\text{вих},i}$ — це температура поверхні трубопроводу, а не температура води ($T_{\text{ст},i}$ — це температура електричної ізоляції стержня) і не температура стержня, вважається, що рівняння (5) і (6) описують залежність температури саме стержня обмотки статора від струму навантаження. Таке припущення дає підстави залежність температури обмотки статора T_i та різницю ΔT_{li} між температурами кожного з n стержнів обмотки T_i та T_1 , у діапазоні дії струму навантаження $0 \leq I_i \leq I_{\text{ном}}$, з відповідними похибками Δ_i , описувати рівняннями виду:

$$T_i = \left(\sum_{i=1}^n T_i \right) / n = \text{tg}\beta \cdot I_i^2 + T_{0i} \pm D_i, \quad (7)$$

$$\Delta T_{li} = T_i - T_1 \pm D_i. \quad (8)$$

При цьому слід відмітити, що експериментально визначені залежності $T_{\text{вих},i} = f(I_i^2)$ $T_{\text{ст},i} = f(I_i^2)$ для кожного з n стержнів обмотки статора являють собою набір прямих, які не укладаються в одну пряму. Залежно від якості виготовлення каналів стержня для проходження води, а також кількості води, що надходить у стержень, прямі $T_i = f(I_i^2)$ можуть відрізнятись між собою за кутом нахилу до осі абсцис, а також координатою точки перетину прямої з віссю ординат.

Оскільки за прийнятими умовами залежності $T_{\text{вих},i} = f(I_i^2)$ і $T_{\text{ст},i} = f(I_i^2)$ встановлюють зв'язок між температурою стержня обмотки (обмоткою) статора та струмом навантаження ТГ, то у сукупності зі значенням допустимої температури T_d нагрівання вони надають можливість визначити потужність, яку не переграваючись, може розвивати ТГ.

Так, згідно з (3), (5) та (4), (6) при $T_{\text{вих.і}} \leq T_d$ або $T_{\text{ст.і}} \leq T_d$, щоб запобігти перегріву обмотки статора, струм навантаження (навантаження) ТГ має бути:

$$I_1 \leq \sqrt{(T_d - T_{0i} \pm D_i) / [r_1 / (c_b \cdot G_b)]}, \quad (9)$$

$$I_1 \leq \sqrt{(T_d - T_{0i} \pm D_i) / \{ [r_1 / (c_b \cdot G_b)] \cdot (1 - e^{-a \cdot F / (c_b \cdot G_b)})^{-1} \}}. \quad (10)$$

З результатів аналізу рівнянь (3), (5) та (4), (6) випливає, що зі збільшенням струму I_1 , (збільшенням навантаження ТГ) збільшуються температури води на виході з ТГ і стержнів обмотки статора. При цьому $T_{\text{вих.і}} \rightarrow T_{\text{ст.і}}$ та $T_{\text{вих.і}} \rightarrow T_1$, $T_{\text{вих.і}} = T_{\text{ст.і}} = T_1$, або ж $T_{\text{ст.і}} - T_{\text{вих.і}} = T_1 - T_{\text{вих.і}} = 0$, коли $e^{-a \cdot F / (c_b \cdot G_b)} = 0$, тобто коли $G_b = 0$. Це означає, що у справного ТГ температура охолоджуючої води на виході з ТГ не може дорівнювати температурі стержнів обмотки статора машини і рівність цих двох температур свідчить про наявність дефекту у системі охолодження ТГ.

За нашими даними, температура стержнів обмотки статора справного ТГ може майже на 10К перебільшувати температуру води, яка виходить з ТГ.

Узгодити рівняння (9) і (10) між собою можна шляхом введення відповідного коефіцієнта K , що, загалом, є корегуванням у названих рівняннях чисельних значень допустимої температури обмотки статора. Крім цього, залежно від місця, де здійснюється контроль теплового стану вузла ТГ, характеристик первинних датчиків температури, а також характеристик приладів контролю й управління, у програмах діагностики, відповідно до характеристик засобів захисту ТГ, мають бути визначені параметри допустимої смуги існування дефектів, які викликають поступову відмову працездатності ТГ.

При аналізі теплових процесів, які відбуваються в електричних машинах і для побудови базових температурних залежностей виду (5) - (7) використовують не «абсолютну» температуру певного вузла машини, а так звану температуру перегріву $\Delta T_{\text{пр}}$. При цьому рівняння (5) та (6) можуть бути записані, наприклад, так:

$$DT_{\text{пр}}^* = T_{\text{вих.і}} - T_{\text{вх}} = tgb_i^* \cdot I_1^2 + D_i \text{ або } DT_{\text{пр}} = T_{\text{ст.і}} - T_{\text{вх}} = tgb_i \cdot I_1^2 \pm D_i.$$

Відповідно до вимог експлуатації ТГ, температура охолоджуючого середовища (води, газу) на вході у ТГ повинна дорівнювати 40°C. На практиці, температура, наприклад, води на вході до ТГ може знаходитися у діапазоні від 30 до 45°C. Враховуючи значний діапазон коливання $T_{\text{вх}}$, а також те, що відхилення від 40°C може бути викликане наявністю дефекту у системі охолодження ТГ, використання поняття «температура перегріву» у базових температурних рівняннях діагностики теплового стану ТГ вважаємо недоцільним.

Як приклад діагностики теплового стану ТГ розглянемо випадок, коли у певний момент часу температура i -го стержня обмотки статора внаслідок дії струму I_{1A} збільшилась до рівня T_A (рис.3) і вже не укладається на базову пряму 1 для даного стержня. Тобто

$$T_A > T_{\text{ст.і}} = tgb_i \cdot I_{1A}^2 - T_{0i} \pm D_i.$$

Прийmemo, що коли різниця між допустимою температурою $T_{1д}$ обмотки статора і T_A менша за K похибки визначення температури стержня $\Delta T_{1дA} = (T_{1д} - T_A) \leq K\Delta_i$, то в ТГ наявний дефект, без з'ясування причин виникнення якого має бути прийняте одне з двох рішень: зупинити роботу або зменшити навантаження ТГ до рівня, за якого б виконувалась нерівність (10).

При $T_{1дA} > K\Delta_i$, але якщо різниця між T_A і базовою температурою стержня $T_{ст.i}$ при дії струму I_{1A} більша у K разів відповідної похибки визначення величини, тобто $\Delta T_{Аст.i} = (T_A - T_{ст.i}) > K\Delta_i$, вважаємо, що у ТГ утворився дефект. За таких умов потрібно з'ясувати причини виникнення дефекту, розробити та вжити заходів щодо запобігання його розвитку.

За результатами аналізу (рис. 3), збільшення температури стержня призводить до утворення нової прямої $T_{ст}$ (I_1^2), яка знаходиться вище за базову прямої і проходить через точку A . При цьому може бути два варіанти розташування цієї прямої. За першим варіантом — пряма 2 (рис. 3) проходить через точку A без зміни координати T_{0i} перегину з віссю ординат, за другим варіантом — пряма 3 проходить через точку A та має іншу T_{0A} координату перегину з віссю ординат графіка $T_{ст} = f(I_1^2)$.

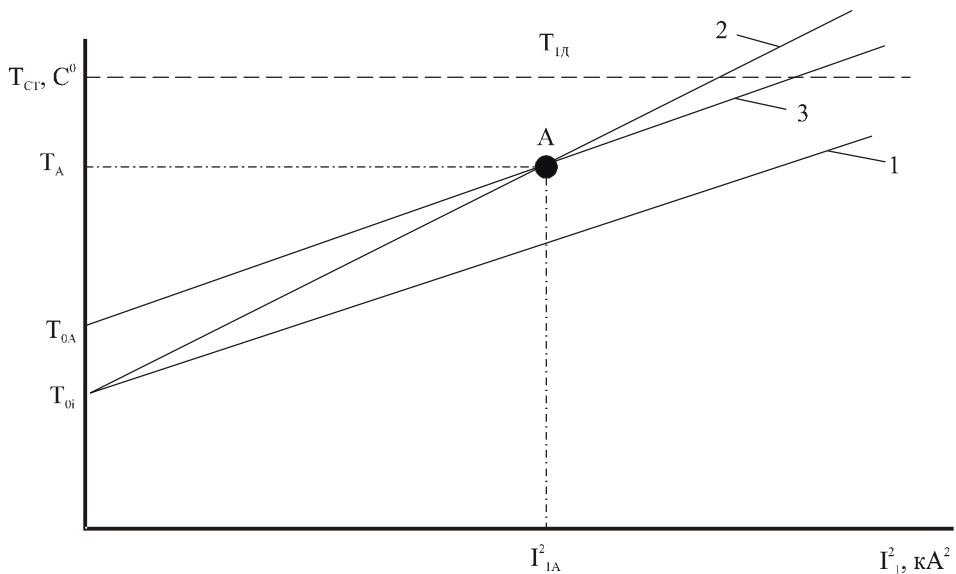


Рис. 3. Зміни прямої еталонних температур стержнів статора

Згідно з результатами аналізу рівняння (3) та рис. 3, збільшення температури стержня обмотки статора може бути наслідком:

1. Збільшенням температури дистильованої води, що подається до ТГ. При цьому відхилення температури води на вході у ТГ від нормативного значення може бути виявлене за показами відповідного датчика температури.

2. Зменшення витрат дистильованої води, що надходить у канали стержня, викликане їх забрудненням. У разі підвищення температури групи стержнів обмотки статора відхилення витрат води, що надходить до ТГ, від

нормативного значення може бути виявлене за показами витратоміра чи манометра, що знаходиться у трубопроводі системи охолодження ТГ, або за рахунок збільшення температури води на виході з ТГ. У той же час, зменшення потоку води тільки у одному стержні обмотки статора може і не відбитися на показах названих приладів.

3. Збільшенням електричного опору стержня обмотки статора, який, наприклад, відноситься до фази С. При цьому відхилення значення опору стержня від номінального значення може бути виявлено за показами приладів вимірювання фазних напруг $U_A=U_B \neq U_C$ і струмів $I_A=I_B \neq I_C$ ТГ.

Варто зауважити, що інформація про збільшення температури стержня може виявитися хибною через недостовірні покази відповідного датчика температури. Повірка вимірювальних приладів виконується за стандартними методиками.

Якщо після досягнення значення T_A подальше збільшення температури стержня припинилося, результати діагностики заносяться у базу даних. Враховуючи, що температура T_A стержня нижче за допустиму температуру $T_{1д}$, за результатами діагностики може бути прийняте одне з двох рішень: залишити існуюче навантаження ТГ без зміни або, з метою уповільнити розвиток дефекту, зменшити навантаження машини.

У випадку, якщо температура стержня продовжує збільшуватися, потрібно вжити заходів щодо мінімізації наслідків розвитку дефекту.

У випадку, який розглядається, потрібно якомога швидше визначити час досягнення та значення нової усталеної температури, тобто температури, до якої буде нагріватися стержень і яка буде визначати новий стан теплової рівноваги стержня. Це можна зробити, застосувавши стандартні методики розрахунку нестационарного процесу нагрівання електричних машин [8, 9]. Рішення щодо умов подальшої експлуатації приймаються залежно від результату розрахунку.

Висновки

1. Значна кількість турбогенераторів, які працюють на електростанціях України, відпрацювали ресурс, встановлений заводом-виробником. У зв'язку з цим впровадження систем технічної діагностики сприяє підвищенню надійності, а отже, продовженню терміну служби машин.

2. Навантажувальна здатність турбогенератора у більшості випадків визначається умовами нагрівання його основних вузлів, тому підвищення температури є головною причиною обмеження потужності машини.

3. Діагностика термічного стану основних вузлів турбогенератора надає можливість управляти виявленими дефектами, які мають поступовий характер розвитку, дозволяє визначити та підвищувати ресурс працездатності вузлів і турбогенератора в цілому.

4. У програмах діагностики, відповідно до характеристик засобів захисту машини, параметри допустимої смуги існування дефектів, які викликають поступову відмову працездатності турбогенератора, а також чисельне значення допустимої температури нагрівання вузлів машини, мають бути визначені з урахуванням місця, за яким здійснюється контроль теплового

стану вузла, характеристик первинних датчиків температури, а також характеристик приладів контролю й управління роботою генератора.

5. Управління розвитком виявлених дефектів є самостійною ланкою, яка поєднує технічну діагностику й управління роботою турбогенератора та підвищує їхню технічну й економічну ефективність.

Література

1. *Яхьяев Н.Я.* Основы теории надежности и диагностика: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Н.Я. Яхьяев, А.В. Кораблин. — М.:Издательский центр «Академия», 2009. — 256 с.

2. *Гемке Р.Г.* Неисправности электрических машин. 9-е изд., перераб. и доп. / Р.Г. Гемке. — Л.:Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. — 336 с.

3. *Извеков В.И.* Проектирование турбогенераторов: учеб. пособие для вузов - 2-е изд., переаб. и доп. / В.И. Извеков, Н.А. Серихин, А.И. Абрамов. — М.: Издательство МЭИ, 2005. — 440с.

4. *Назарычев А.Н.* Расчет и анализ надежности высоковольтных электродвигателей электростанций с учетом влияния режимов и условий эксплуатации / А.Н. Назарычев // Энергетика: экономика, технологии, экология. Киев: НТУУ «КНИУ». — 2001. — № 1. — С.32-38.

5. *Голодновья О.С.* Основные причины отказов турбогенераторов и пути их предупреждения: Учебно-методическое пособие / О.С. Голодновья. — М.:ИПКГосслужбы, 2005. — 92 с.

6. *Назолин А.Л., Поляков В.И.* Управление развитием дефектов на работающет турбогенераторе // Электрические станции. — 2006. — №1. — С. 49—52.

7. *Езовит Г.П.* Об эксплуатации ТГ мощностью 220 МВт типа ТВВ-220-2АУЗ сверх назначенного срока службы / Г.П. Езовит, Н.И. Власенко, С.И. Бурлака, И.И. Баламаджи, В.Н. Комарица, С.Ю. Семенов, О.А. Мазуренко // Энергетика и Электрификация. — 2012. — №12 (352). — С. 11—15.

8. *Юрьева Е.Ю.* Проверка адекватности графического метода определения конечной температуры нагрева асинхронных двигателей / Е.Ю. Юрьева, В.П. Шайда, А.Ф. Пацула // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2011. — Том 3, №8 (51). — С. 58—61.

9. *Филиппов И.Ф.* Теплообмен в электрических машинах / И.Ф. Филиппов — Л.:Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1986. — 256 с.

ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ ТЕПЛОВЫХ ДЕФЕКТОВ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

О.О. Мазуренко, В.В.Самсонов

Национальный университет пищевых технологий

Уникальность конструкции каждого отдельного турбогенератора затрудняет своевременное выявление аварийного дефекта, а индивидуальные условия эксплуатации могут изменить ранее обнаруженный неаварийный

ТЕПЛО- I ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

дефект на развивающийся аварийный. Для эффективного управления работой машины необходимо комплексно использовать системы контроля и диагностирования, которые будут предоставлять информацию о реальном состоянии турбогенератора и его эксплуатационной надежности. На основе этой информации обоснованно будут приниматься решения по созданию условий эксплуатации турбогенератора, при которых дефект не будет развиваться, развиваться с минимальной скоростью или устранится. Это позволит своевременно выявлять дефекты и управлять их развитием с целью предотвращения и предупреждения аварийных ситуаций, повысит техническую и экономическую эффективность эксплуатации.

Ключевые слова: турбогенератор, дефект, отказ, контроль, диагностика, нагрев.
