

О. Г. Кенсницький¹, Д. І. Хвалін²

¹Інститут електродинаміки НАН України, просп. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

²Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

НАГРІВ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ ПОРУШЕННІ ЦИРКУЛЯЦІЇ ХОЛОДОАГЕНТУ

Розроблено математичну модель перебігу теплообмінних процесів у стержні обмотки статора потужного турбогенератора при порушенні циркуляції холодоагенту. Визначено рівні нагрівів елементарних провідників стержня при різних кількості та розташуванні у стержні порожнистих провідників, циркуляція холодоагенту в яких порушена або відсутня. Доведено, що у випадку, коли в одному стовпчику кількість поруч розташованих порожнистих провідників, циркуляція у яких відсутня, не перевищує трьох, турбогенератор типу ТГВ-250-ПТЗ може експлуатуватися без будь-яких обмежень по активному навантаженню. При розташованих поряд чотирьох закупорених порожнистих провідниках активне навантаження має бути знижене до 85 % від номінального навантаження, а при п'яти – до 75 %.

Ключові слова: турбогенератор, статор, обмотка, стержень, холодоагент.

Створення турбогенераторів великої потужності було б неможливим без застосування сучасних систем охолодження найбільш навантажених в електромагнітному відношенні вузлів. Перш за все це стосується обмотки статора. Впровадження безпосереднього рідинного охолодження стержнів обмотки статора дало змогу підвищити лінійне навантаження турбогенераторів до 3000 А/см і, як наслідок, збільшити одиничну потужність енергоблоків, зокрема й атомних електростанцій. Сьогодні одинична потужність більшості енергоблоків атомних електростанцій у 1000 - 1300 МВт є звичайним явищем.

Разом з тим зрозуміло, що впровадження безпосереднього рідинного охолодження обмотки статора пов'язане із створенням додаткових систем забезпечення підготовки та циркуляції дистилляту, контролю й підтримки його діелектричних показників тощо. І від надійності всіх елементів системи охолодження обмотки статора залежить надійність турбогенератора в експлуатації в цілому.

Необхідною передумовою надійності турбогенератора в експлуатації є забезпечення щільності рідинної системи охолодження, особливо всередині корпусу. Кожен стержень обмотки статора складається із транспонованих елементарних провідників, частина з яких порожнисті і мають канали, по яких власне і циркулює дистиллят. Порушення щільності порожнистих провідників призводить до витоку дистилляту, зволоженню головної ізоляції, зниженню її електричної стійкості і, насамкінець, до її електричного пробою.

При виявленні течі дистилляту всередині корпусу турбогенератор повинен бути негайно зупинений, ремонтним персоналом виконується обстеження стану системи охолодження з метою локалізації та можливого усунення ушкоджень. Якщо причиною течі є ушкодження елементарного порожнистого провідника (або декількох) агрегат зазвичай виводиться в довготривалий ремонт, пов'язаний із заміною ушкодженого стержня.

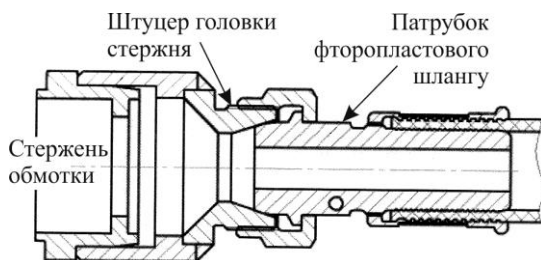


Рис. 1. З'єднання головки стержня і шлангу підводу дистилляту турбогенератора ТГВ-250-ПТЗ.

У турбогенераторах деяких виробників (наприклад, ДП «Завод «Електроважмаш», Харків) конструкція підводу дистилляту до лобових частин виконана розбірною (рис. 1 [1]). При виявленні порушення щільності порожнистих елементарних провідників у стержні шланг підводу дистилляту від'єднується, головка розкривається і з'являється доступ до входів дистилляту в порожнисті провідники. Якщо відомо, які саме порожнисті провідники мають тріщини у стінках, вони заглушуються (запаюються) зі сторони входу дистилляту (сторона турбіни). Тим самим

виключається необхідність негайного проведення ремонту, і роботи із заміни ушкодженого стержня можуть бути виконані під час найближчого середнього або капітального планово-попереджувального ремонту. Звичайно кількість заглушених порожнистих провідників повинна бути обмеженою, температура стержня при цьому не повинна перевищувати граничних значень, що відповідають класу на-

© О. Г. Кенсницький, Д. І. Хвалін, 2018

грівостійкості ізоляції обмотки. Так, в інструкції з експлуатації турбогенераторів виробництва ДП «Завод «Електроважмаш» кількість заглушених поруч розташованих порожнистих провідників не повинна перевищувати двох. Разом з тим незрозуміло, а що робити, якщо кількість заглушених провідників більша і вони розташовані у стержні окремо один від одного.

Метою виконаного дослідження є визначення максимальних температур стержня обмотки статора при різних варіантах кількості та розташування по перетину заглушених порожнистих провідників. Це дає змогу сформулювати обґрунтовані висновки щодо можливості експлуатації турбогенератора в основних режимах без обмежень або необхідності зниження навантаження залежно від кількості та розташування у стержні заглушених порожнистих провідників.

Перебіг теплових процесів досліджується на математичній моделі стержня обмотки статора турбогенератора типу ТГВ-250-2ПТЗ. Турбогенератори цього типу експлуатуються у складі енергоблоків № 3 і № 4 АЕС «Kaiga» і енергоблоків № 5 і № 6 АЕС «Rajasthan» (обидва блоки, Індія).

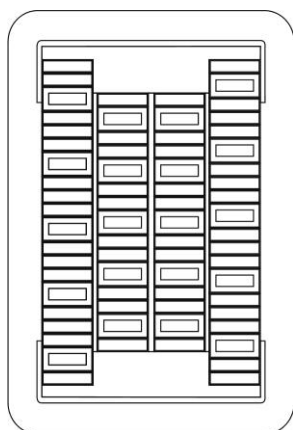


Рис. 2. Перетин стержня обмотки статора турбогенератора ТГВ-250-ПТЗ.

Особливістю конструкції стержнів є їхнє виготовлення за принципом «робель у робелі», коли їхній перетин (рис. 2) містить два транспоновані стержні, один з яких розташований усередині іншого. Для внутрішнього стержня на один порожнистий провідник припадає два суцільних, для зовнішнього – три. Така конструкція забезпечує ефективний відвід теплових втрат від елементарних провідників навіть при часткових порушеннях циркуляції холодоагенту в окремих порожнистих провідниках.

При створенні розрахункової математичної моделі перебігу теплообмінних процесів прийнята низка припущень, які спрощують розрахунок і разом з тим не впливають на їхню достовірність реальним фізичним процесам моделі:

враховуючи наявність транспозиції елементарних провідників, прийнято, що тепловиділення в міді розподілені рівномірно;

теплові втрати у сталі осердя статора в радіальному напрямку задані за результатами експериментальних досліджень для турбогенератора аналогічної потужності [2];

елементи розрахункової області розглядаються як однорідні анізотропні тіла з усередненими теплофізичними характеристиками матеріалів по відповідному напрямку в межах елементарних розрахункових об'ємів;

коефіцієнти тепловіддачі з охолоджуючих поверхонь визначаються за відповідними критеріальними залежностями та експериментальними даними [2 - 4];

залежність теплофізичних параметрів (коефіцієнтів теплопровідності, питомої густини, теплоємності) матеріалів обмотки і осердя статора від температури не враховується;

при виборі розрахункової області враховується симетрія і періодична повторюваність елементів конструкції обмотки та осердя статора, умов охолодження й тепловиділень по колу статора;

втрати в міді стержня та у сталі осердя статора, а також теплофізичні параметри (коефіцієнти теплопровідності, питомої густини та теплоємності) задаються для очікуваної розрахункової температури.

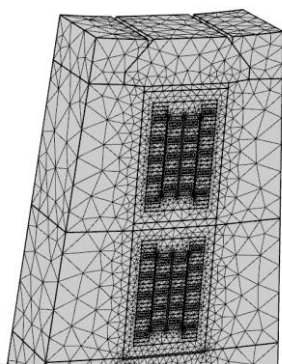


Рис. 3. Розрахункова схема сектора зубцевого ділення статора.

З огляду на наведені припущення, конструктивні особливості турбогенератора та наявну схему циркуляції холодоагентів розглядається польова задача спільного розрахунку тривимірного температурного поля для сектора пакета осердя та обмотки статора. Розрахункова схема охоплює зубцеве (пазове) ділення статора (рис. 3). Для пазової частини обмотки математично коректно описано тепловий зв'язок із осердям (сталлю) статора. Аналогічно описано тепловий зв'язок поверхонь пакета з охолоджуючим воднем.

Опис температурного поля виконаний за допомогою системи диференціальних рівнянь теплопровідності

$$c(\theta, l)\rho(\theta, l)\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(\lambda(\theta, l) \cdot \text{grad}\theta) + q_v(\theta, l)$$

з такими граничними умовами:

$$\theta_{xi} = \pm \frac{\lambda_M}{\alpha_{xi}} \frac{\partial \theta}{\partial l_i} \text{ – для охолоджуючих каналів порожнистих провідників};$$

$$\theta_{xi} = \pm \frac{\lambda_3}{\alpha_{xi}} \frac{\partial \theta}{\partial l_i} \text{ – для зовнішніх теплообмінних поверхонь пакета осердя статора};$$

$$\pm \lambda_i \frac{\partial \theta_i}{\partial n} (\xi - 0) = \Lambda_k [\theta_i (\xi + 0) - \theta_j (\xi - 0)] \text{ і } \Lambda_k [\theta_i (\xi + 0) - \theta_j (\xi - 0)] = \pm \lambda_j \frac{\partial \theta_j}{\partial n} (\xi + 0) \text{ – на межі}$$

дотичних поверхонь елементів розрахункової області.

У загальному вигляді задача є нелінійною, її вирішення здійснюється методом скінчених елементів у тривимірній (просторовій) постановці [5]. Передбачається, що розглянута крайова задача є коректною, тобто вона має тільки одне рішення, яке безпосередньо залежить від вхідних даних. Процес поширення тепла в загальному вигляді описується законом збереження енергії (рівнянням теплового балансу).

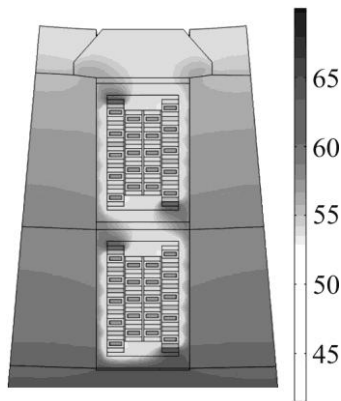


Рис. 4. Розподіл температури (°C) у розрахунковій області при номінальному навантаженні без порушення циркуляції холодоагенту.

Достовірність створеної математичної моделі перебігу теплообмінних процесів у стержні обмотки статора при порушенні циркуляції холодоагенту перевірена шляхом співставлення результатів тестових розрахунків із даними штатної системи теплового контролю для номінального режиму навантаження турбогенератора (рис. 4). Максимальний нагрів у номінальному режимі навантаження становив 70 °C (сталь пакета в зоні дна паза). Розбіжність між отриманими на математичній моделі температурами активних елементів (мідь стержнів, залізо пакетів) та експлуатаційними даними була не більше 10 %, що свідчить про відповідність моделі реальним теплофізичним процесам.

У результаті моделювання порушення охолодження (припинення циркуляції холодоагенту) в окремих елементарних провідниках встановлено, що при номінальному навантаженні й припиненні циркуляції дистилату у двох розташованих поруч порожнистих елементарних провідниках максимальна температура міді стержня не перевищує припустимих значень (140 °C) і при температурі дистилату 40 °C становить 111 °C (рис. 5, а). Якщо циркуляція дистилату відсутня у трьох елементарних порожнистих провідниках, то максимум температури міді залежить від їхнього взаємного розташування. Якщо закупорені провідники розташовані в одному стовпчику, температура досягає 113 °C (рис. 5, б). Коли ж ці провідники зосереджені в кутовій зоні перетину стержня, максимум температури може сягати гранично припустимих значень (рис. 5, в).

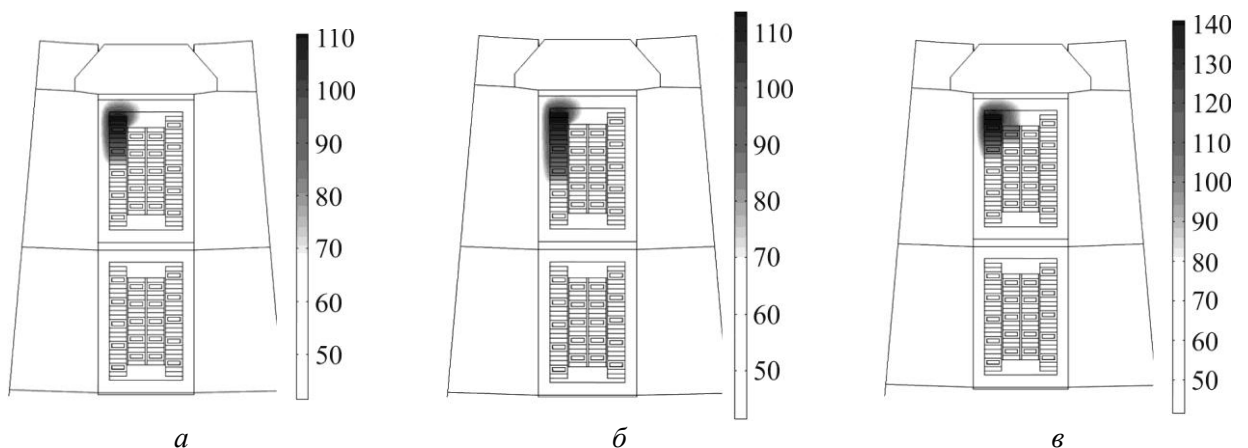


Рис. 5. Розподіл температури (°C) у розрахунковій області при номінальному навантаженні при різних варіантах порушення циркуляції холодоагенту.

Тобто у випадку, коли в одному стовпчику кількість поруч розташованих порожнистих провідників, циркуляція у яких відсутня, не перевищує трьох, турбогенератор може експлуатуватися без будь-яких обмежень по активному навантаженню. Такий же висновок можна зробити для випадку чотирьох закупорених провідників, якщо вони розташовані у внутрішньому стержні. Максимальні

температури міді в цих випадках становлять 113 і 105 °С відповідно, і відведення надлишкових втрат здійснюється за рахунок теплового зв'язку між внутрішнім і зовнішнім стержнями.

Якщо три закупорених провідника зосереджені в одному місці (наприклад, один у зовнішньому стержні, а 2 у внутрішньому або навпаки), максимальні температури досягають граничного рівня (140 °С). Це потребує посилення контролю штатними засобами – термометрами опору, що розташовані між стержнями, а також на виході дистилату із стержня. Якщо у першому випадку через наявність транспозиції ймовірність фіксації порушення становить не більше 5 %, то на виході дистилату підвищення температури в порівнянні з нормальним станом становить майже 3 °С, що може бути зафіксовано і слугувати ознакою порушення охолодження.

При більшій кількості порожнистих провідників, циркуляція холодоагенту в яких відсутня, максимум температури залежить від їхнього взаємного розташування. І при їхній концентрації в одній зоні максимальні температури перевищують припустимі значення. Так, при чотирьох провідниках в одній зоні максимум становить 160 °С, а при п'яти 170 °С. Подальша експлуатація турбогенератора в таких випадках можлива лише при обмеженні активного навантаження. Так, при розташованих поряд чотирьох закупорених порожнистих провідниках активне навантаження має бути знижене до 85 % від номінального, а при п'яти – до 75 %.

Для випадків інших комбінацій порушення циркуляції (розкидання закупорених провідників по перетину стержня) необхідне проведення додаткових досліджень за вказаними напрямками. При необхідності тимчасової експлуатації турбогенератора з наявністю закупорених провідників у стержні обмотки статора повинні бути визначені критерії, які б визначали припустиму кількість ушкоджених провідників та їхнє можливе взаємне розташування у стержні. Тут має бути визначений припустимий рівень навантаження турбогенератора з ушкодженою обмоткою.

Висновки

Впровадження безпосереднього рідинного охолодження стержнів обмотки статора дало змогу підвищити лінійне навантаження турбогенераторів і, як наслідок, збільшити одиничну потужність енергоблоків, зокрема й атомних електростанцій, але така система охолодження обмотки статора пов'язана із створенням додаткових систем забезпечення підготовки та циркуляції дистилату, контролю й підтримки його діелектричних показників тощо, що знижує надійність експлуатації турбогенератора в цілому.

За допомогою розробленої польової тривимірної математичної моделі перебігу теплообмінних процесів у стержні обмотки статора потужного турбогенератора досліджено максимальні температури стержня обмотки статора при порушенні циркуляції холодоагенту. Установлено, що у випадку, коли в одному стовпчику кількість поруч розташованих порожнистих провідників, циркуляція у яких відсутня, не перевищує трьох, турбогенератор типу ТГВ-250-ПТЗ може експлуатуватися без обмежень по активному навантаженню. Аналогічно і для випадку чотирьох закупорених провідників, якщо вони розташовані у внутрішньому стержні. Якщо ж три закупорених провідника зосереджені в одному місці, це потребує посилення контролю штатними засобами. При більшій кількості порожнистих провідників, циркуляція холодоагенту в яких відсутня, максимум температури залежить від їхнього взаємного розташування. При розташованих поряд чотирьох закупорених порожнистих провідниках активне навантаження має бути знижене до 85 % від номінального, а при п'яти – до 75 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зозулін Ю. В. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій / Ю. В. Зозулін, О. Є. Антонов, В. М. Бичік. – Харків : ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.
2. Счастливы Г. Г. Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки / Г. Г. Счастливы, Г. М. Федоренко, В. И. Выговский. – Киев : Наук. думка, 1985. – 208 с.
3. Электрические машины с жидкостным охлаждением / Г. Г. Счастливы, Г. М. Федоренко, В. А. Терешонков, В. И. Выговский. – Киев : Наук. думка. – 1989. – 288 с.
4. Хуторецкий Г. М. Проектирование турбогенераторов / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1987. – 256 с.
5. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>

О. Г. Кенсіцкий¹, Д. И. Хвалин²¹Институт электродинамики НАН Украины, просп. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина²Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина**НАГРЕВ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА
ПРИ НАРУШЕНИИ ЦИРКУЛЯЦИИ ХЛАДАГЕНТА**

Разработана математическая модель протекания теплообменных процессов в стержне обмотки статора мощного турбогенератора при нарушении циркуляции хладагента. Определены уровни нагревов элементарных проводников стержня при разном количестве и расположении в стержне полых проводников, циркуляция хладагента в которых нарушена или отсутствует. Доказано, что в случае, когда в одном столбце количество рядом расположенных полых проводников, циркуляция в которых отсутствует, не превышает трех, турбогенератор типа ТГВ-250-ПТЗ может эксплуатироваться без каких-либо ограничений по активной нагрузке. При расположенных рядом четырех закупоренных полых проводниках активная нагрузка должна быть снижена до 85 % от номинальной нагрузки, а при пяти - до 75 %.

Ключевые слова: турбогенератор, статор, обмотка, стержень, хладагент.

O. G. Kentsytskiy¹, D. I. Hvalin²¹Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, Peremogy prospect, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine²Institute for Safety of Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Lysogirska str. 12, Kyiv, 03028, Ukraine**A HEATING OF STATOR WINDING TURBOGENERATOR
FOR FAILURE THE CIRCULATION OF REFRIGERANT**

The introduction of direct liquid cooling of a stator winding bars allowed to increase the linear load of a turbo-generators and, consequently, increase the capacity of power units, including nuclear power plants, but such a cooling system of a stator winding is relation with building the additional systems ensure of preparation and circulation distillate, control and support of its dielectric factors etc., which in general reduces the reliability of turbogenerator operation. For this reason is relevant to study the maximum temperatures of a stator winding bar at various variants of number and location on section the stopple hollow conductors. Such a study will formulate reasonable conclusions about the possibility of turbogenerator operation in the main modes without restrictions or the need to reduce the load depending on the number and location stopple hollow conductors in bar. To solve this problem was developed field three-dimensional mathematical model of heat transfer processes in a stator winding bar of powerful turbogenerator. The accuracy of a mathematical model verified by comparing the results of test calculations with the data of thermal control staff system under rated load conditions of turbogenerator. Difference between temperatures of active elements (copper bars, iron packets) obtained with help a mathematical model and operational data was not more than 10 %, which indicates the model corresponds to the real thermophysical processes. It has been numerically estimated that when in a single column the number of adjacent hollow conductors, the circulation of which is absent, does not exceed three, the turbogenerator TGV-250-PT3 can be operated without any restrictions on active load. When located close to four enclosed hollow conductors, the active load should be reduced to 85 % of the nominal, and at the heel - up to 75 %. With help the numerical calculation determined when in single column the number of adjacent no-circulation hollow conductors not exceed three the turbogenerator TGV-250-PT3 can be operated without any restrictions on the active load. When located close up the four stopple hollow conductors, the active load should be reduced to 85 % from the nominal load, and at the five - down to 75 % from the nominal load.

Keywords: turbogenerator, stator, winding, bar, refrigerant.

REFERENCES

1. Zozulin Yu. V. The creation of new types and modernization of existing turbogenerators for thermal power station / Yu. V. Zozulin, O. Ie. Antonov, V. M. Bychik, A.M. Borichevsky et al. – Kharkiv : PF «Kolehium», 2011. – 228 p. (Ukr)
2. Schastliviyi G. G. Turbo- and hydrogenerators at the variable loading graphics / G. G. Schastliviyi, G. M. Fedorenko, V. I. Vygovskiy. – Kyiv : Naukova dumka, 1985. – 208 p. (Rus)
3. Electric machines with a liquid cooling / G. G. Schastliviyi, G. M. Fedorenko, V. A. Tereshonkov, V. I. Vygovskiy. – Kyiv : Naukova dumka, 1985. – 208 p. (Rus)
4. Khutoretskiy G. M. Turbogenerators design / G. M. Khutoretskiy, M.I. Tokov, Y.V. Tolvinskaya. – Leningrad : Energoatomizdat. Leningrad. otdeleniye, 1987. – 256 p. (Rus)
5. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>

Надійшла 21.06.2018

Received 21.06.2018