

## ОГЛЯД ДЕЯКИХ СХЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ І КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОГО ВОДНЮ

**А.С. Левицький**, докт. техн. наук, **А.І. Новік**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03380, Україна

*Наведено результати огляду й аналізу деяких схем водневого охолодження турбогенераторів. Розглянуто особливості підключення сенсорів відносної вологості водню в турбогенераторах у випадку застосування різних схем охолодження. Показано, що найкраща достовірність контролю вологості досягається в схемах, де сенсори вологості водню розміщені всередині машини у потенційно небезпечних зонах. Зазначено, що при такому розміщенні сенсорів вони мають бути стійкими до впливу потужних електромагнітних полів і високої температури, а також забезпечувати надійність і стабільність функціонування впродовж усього періоду безупинної роботи машини. Бібл. 12, рис. 4.*

**Ключові слова:** турбогенератор, охолодження, водень, вологість, точка роси, вимірювання, сенсор.

При створенні й експлуатації електрогенеруючих установок існують дві найважливіші проблеми, що вимагають постійного вдосконалення устаткування: безпека в широкому сенсі (електрична безпека, радіаційна, пожежна та ін.) й ефективність (підвищення ККД, зниження витрат виробництва і транспортування енергоносіїв). Причому вказані проблеми взаємопов'язані – підвищення ККД призводить до більш напружених режимів функціонування устаткування, що створює додаткові небезпеки, які вимагають уваги і технічних заходів захисту. До того ж у потужних турбогенераторах відбувається інтенсивне тепловиділення (понад 250 кВт теплової потужності на 1 м<sup>3</sup> об'єму генератора). Тому правильній організації інтенсивного відведення тепла в турбогенераторах приділяється велика увага [2, 6].

Для створення прийняттого теплового режиму в генераторі доводиться використовувати обмотки статора і ротора у вигляді порожнистих провідників, у метал статора запресовувати трубки і через усі елементи (обмотки статора, ротора і запресовані трубки заліза статора) прокачувати охолоджувальну воду, а вільний об'єм продувати спеціально осушеним газом (повітрям або воднем). Водень в якості холодоагенту має в порівнянні з повітрям такі переваги:

- щільність водню в 14,3 разу менша щільності повітря (при 3 %-вій домішці повітря – у 10 разів), тому втрати на тертя ротора, що обертається, генератора у водні в 10 разів менші, ніж у повітрі;

- теплоємність водню в 14 разів більша теплоємності повітря;
- тепловіддача водню в 3,6 разу більша тепловіддачі повітря;
- коефіцієнт корисної дії (ККД) машини з водневим охолодженням на 1 % більший, ніж з повітряним (дані для надмірного тиску водню 0,294 МПа (3 кгс/см<sup>2</sup>)[7]).

Проте водневе охолодження створює і ряд труднощів. По-перше, при водневому охолодженні виникає можливість утворення вибухо- і вогнебезпечної суміші з повітрям. Тому для уникнення потрапляння повітря в корпус генератора, тиск водню в генераторі підтримується вищим за атмосферний, а вимірювальну апаратуру, контролюючу чистоту водню, виконують в іскро- і вибухобезпечному виконанні. По-друге, під час роботи турбогенераторів може відбуватися зволоження охолоджувального водню, що шкідливо позначається на ізоляції обмоток і механічній міцності бандажів ротора, викликає конденсацію вологи на конструктивних елементах усередині корпусу генератора, а також стимулює корозію сталі. Конденсація вологи викликається підвищенням вологовмісту при сталій температурі водню або з пониженням його температури при сталому вологовмісті. При цьому пари підходять до стану насичення (точки роси).

Підвищення вологості водню в корпусі турбогенераторів спричинюється потраплянням водяної пари через ущільнення валу зі зволоженого турбінного мастила, а також при ви-

никненні течі в газоохолоджувачах і вузлах водопідведення обмоток турбогенераторів. Можливе також заповнення корпусів воднем підвищеної вологості.

Рекомендується підтримувати вологість водню в корпусі машини не вищою ніж 12–13 г/м<sup>3</sup> (за робочих значень тиску і температури холодного газу), що приблизно відповідає відносній вологості на рівні 30...40 %. Температура точки роси водню при робочому тиску в корпусі турбогенератора має бути не вищою 15 °С.

Аналіз аварій, що сталися на турбогенераторах Російської Федерації, показав, що причинами їх в основному є внутрішні ушкодження (порушення електроізоляції ротора або статора генератора та руйнування торцевих бандажних кілець обмотки ротора [3, 4]). Ці дефекти були пов'язані з високим вмістом води в охолоджувальному водні, що сягав до 25...30 г/м<sup>3</sup>. Розслідування причин аварій галузевими комісіями показало, що вони сталися на тих генераторах, де не проводилися постійне осушення водню та постійний контроль його вологості, а також регулярне продування генератора сухим і чистим воднем з електролізної установки.

Слід зазначити, що будь-які домішки у водні (у тому числі волога) є причиною збільшення вентиляційних втрат у генераторі й зниження його ККД [1]. Так, розрахунок для турбогенератора потужністю 400 МВт типу 334НА923 компанії *General Electric* показує, що додавання 1 % домішок (повітря, пари, води) у водень збільшує вентиляційні втрати на 180 кВт і рівноцінно додатковим витратам 220 \$/добу.

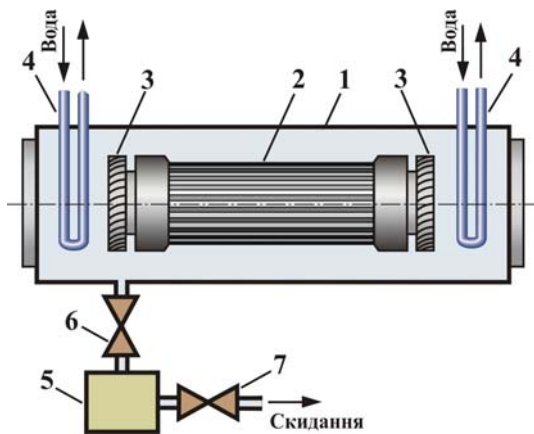


Рис. 1

постійний об'єм водню. Для контролю вологості водню служить гігмометр 5, що періодично підключається до газового об'єму генератора через вентиль 6.

На рис. 2 показана більш детальна схема підключення гігмометра типу ТОРОС-3-1ВМ, розробленого Інститутом газу Національної академії наук України [7], де позначено:

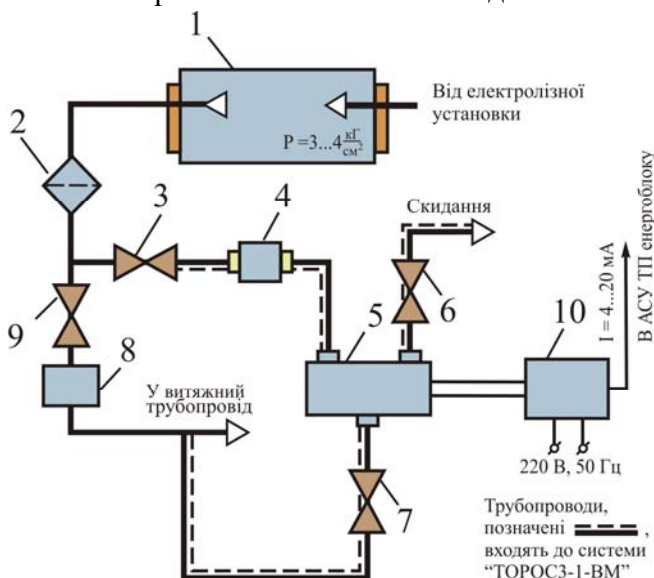


Рис. 2

Розглянемо декілька відомих схем побудови водневого охолодження турбогенераторів і розміщення в них сенсорів вологості охолоджувального газу (водню).

Найпростіша схема циркуляції водню всередині корпусу турбогенератора 1 при охолодженні показана на рис. 1 [2].

Гарячий водень під тиском вентиляторів 3, встановлених на роторі 2, надходить в міжтрубний простір газоохолоджувачів 4, де віддає воді своє тепло, і потім, потрапляючи в корпус турбогенератора 1, охолоджує його роторну і статорну обмотки, а також залізо статора і ротора. Таким чином, усередині корпусу машини циркулює практично

постійний об'єм водню. Для контролю вологості водню служить гігмометр 5, що періодично підключається до газового об'єму генератора через вентиль 6.

На рис. 2 показана більш детальна схема підключення гігмометра типу ТОРОС-3-1ВМ, розробленого Інститутом газу Національної академії наук України [7], де позначено: 1 – турбогенератор з водневим охолодженням; 2 – фільтр; 3, 6, 7, 9 – вентилі; 4 – сепаратор газовий тонкого очищення від домішок (капель олії і механічних домішок); 5 – гігмометр ТОРОС-3-1ВМ; 8 – газоаналізатор; 10 – електронний блок живлення і обробки сигналів.

За застосування такої схеми охолодження у разі критичного перезволоження водню він замінюється свіжим з електролізної установки або з балонів, що є у багатьох випадках економічно недоцільним. Тому для уникнення надмірного витрачання водню і збільшення ефектив-

ності його охолодження, застосовують схему циркуляції водню через зовнішню петлю, в якій передбачено як додаткове охолодження водню, так і його осушення. Для осушення широко використовуються адсорбційні установки (з цеолітом, силікагелем), в яких потрібно періодично проводити регенерацію сорбенту. Також застосовуються повітряно-випарні, вихрові, аміачні та інші осушувачі водню, пов'язані з технологічним процесом на електростанції (на-явність пари, технічного повітря) і екологічно небезпечними холодоагентами [2].

У роботах [2, 3] описано термоелектричний осушувач, принцип дії якого ґрунтується на використанні ефекту Пельтьє, коли при охолодженні відбувається конденсація пари вологи, розчиненої в газі. Використання такого осушувача дає можливість підвищити чистоту водню до 99,9 %.

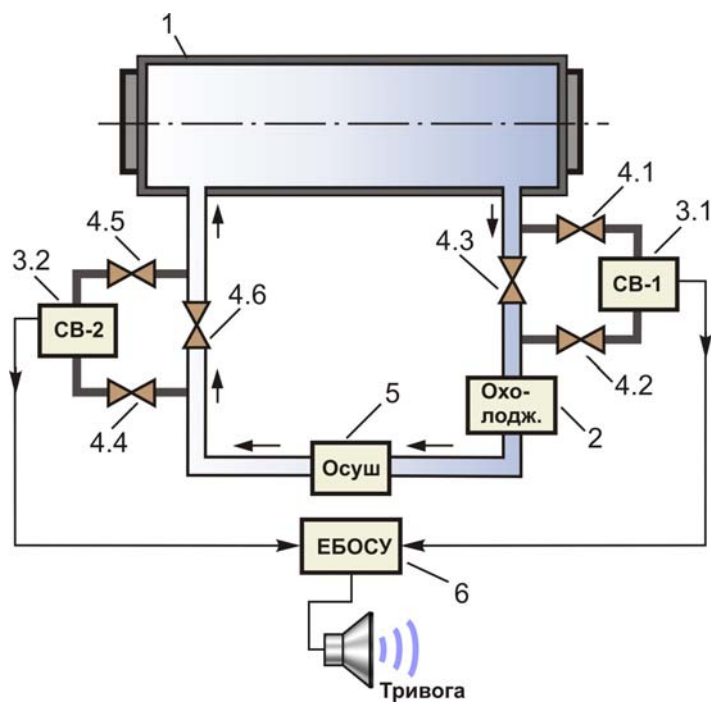


Рис. 3

На рис. 3 показана схема охолодження і осушення водню в турбогенераторах (яка застосовується на електростанціях США) з використанням циркуляції водню через зовнішню петлю [10]. Зволожений і гарячий водень від турбогенератора 1 прокачується через охолоджувач водню 2 і осушувач водню 5. В осушувачі 5 використовується молекулярне сито. Контроль вологості водню здійснюється двома сенсорами: перший сенсор 3.1 встановлюється перед охолоджувачем 2, а другий 3.2 – після осушувача 5 для контролю його роботи. Для точки роси нижче  $0^{\circ}\text{C}$  (перед осушувачем) використовуються сенсори серії *DY* [9, 12], а вище  $0^{\circ}\text{C}$  – серії *MDR* [11] фірми *General Eastern Instruments*. Сенсори відповідають за вибухобезпечність *Group B (Class 1, Division 1&2)*, а їх

вимірвальний ланцюг задовольняє вимогам іскробезпеки [8]. Обробка інформації від сенсорів 3.1 та 3.2, а також видача сигналів «Тривога» відбуваються в електронному блоці обробки сигналів і управління 6 (ЕБОСУ).

Для приєднання сенсорів вологості до трубопроводів петлі використовуються вентилі 4.1 – 4.6.

У роботах [2, 3] представлено схему охолодження і осушення водню для генераторів Заїнської ГРЕС (Росія, Татарстан), розроблену в Казанському державному енергетичному університеті (рис. 4).

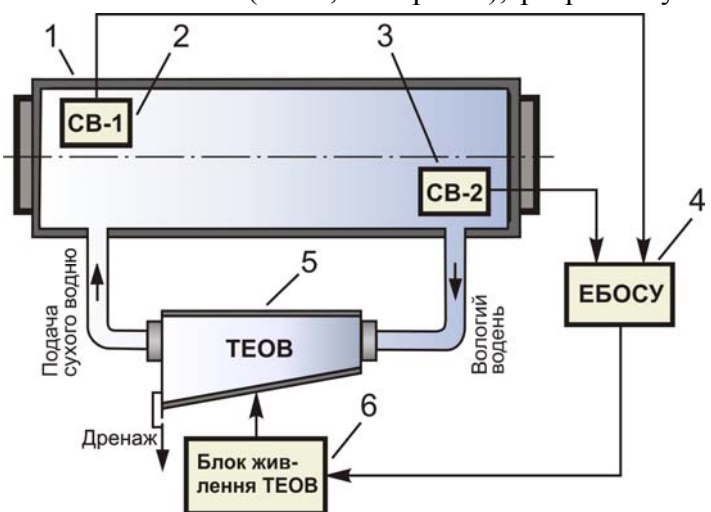


Рис. 4

Особливістю схеми є те, що в зовнішній петлі охолодження використовується термоелектричний осушувач водню, а сенсори вологості встановлюються усередині турбогенератора в зонах максимального вмісту домішок (у тому числі й вологи), які утворюються за рахунок відцентрового ефекту при обертанні ротора і вентиляційної дії встановлених на роторі вентиляторів.

На рис. 4 зображені: 1 – турбогенератор; 2, 3 – пробовідбірні пристрої з сенсорами вологості СВ-1 і СВ-2; 4 –

електронний блок обробки сигналів і уставки (ЕБОСУ); 5 – термоелектричний осушувач водню (ТЕОВ); 6 – блок живлення ТЕОВ. Під час осушування в робочу камеру ТЕОВ надходить вологий (абсолютна вологість  $20...30 \text{ г/м}^3$ ) і гарячий ( $45...50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) водень під надмірним тиском  $0,15...0,4 \text{ МПа}$ , з якого при контакті з холодною поверхнею ( $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) конденсується вода, що виводиться через дренажну лінію. Водень циркулює через ТЕОВ до того часу, поки увесь об'єм початкового водню не пройде осушення.

Сенсори СВ-1 і СВ-2 незалежні один від одного і безперервно вимірюють вологість водню всередині турбогенератора в потенційно небезпечних зонах. Вони видають сигнал на компаратор ЕБОСУ, де опорним сигналом є уставка вологості водню, рівна  $3,0 \text{ г/м}^3$ . При встановленні вказаної вологості компаратор дає команду на включення ТЕОВ через його блок живлення 6. Осушувач працює доти, поки вологість водню не досягне значення, рівного  $1,0 \text{ г/м}^3$ , після чого він відключається. Аналоговий електронний компаратор функціонує за логікою автоматики ТЕОВ "АБО", тобто досить надійти в нього одному з двох сигналів від СВ-1 або СВ-2 про досягнення вологості водню рівня уставки опорного сигналу  $3,0 \text{ г/м}^3$ , як ТЕОВ включається в роботу. Така логіка управління ТЕОВ необхідна, бо виникнення вологи в одній з потенційно небезпечних зон у газовому об'ємі турбогенератора призводить до лавиноподібного зволоження усього об'єму водню. Це пов'язано з високою турбулентністю водню в замкнутому газовому об'ємі за рахунок роботи вентиляторів, встановлених на роторі турбогенератора.

Очевидно, що розміщення гігрометрів усередині турбогенератора в потенційно небезпечних зонах дає актуальнішу інформацію про вологість охолоджувального водню, а значить, і підвищує надійність експлуатації машини. Але, з іншого боку, враховуючи тривалість періодів безупинної роботи турбогенератора, при цьому різко зростають вимоги до надійності й довговічності сенсорів, а також до довготривалої стабільності їх метрологічних характеристик. Особливо актуальним є забезпечення їх роботи в умовах потужних електромагнітних полів, які є усередині працюючого генератора. Паспортні дані значень параметрів електромагнітних полів, при яких можуть функціонувати сенсори відносної вологості й температури точки роси, що випускаються різними фірмами, відсутні. Отже, перед використанням сенсорів вологості усередині машини вони мають бути випробувані на працездатність в умовах електромагнітних полів, що мають такі ж параметри, як поля в місцях встановлення.

З наведеного огляду можна зробити наступні висновки:

1. Для підвищення ефективності охолодження турбогенераторів прийнятніше використовувати схеми, в яких реалізуються як циркуляція охолоджувального газу в замкнутому контурі, так і його осушення при постійному контролі вологості.

2. Найкраща достовірність контролю досягається в схемах, де сенсори вологості охолоджувального газу розташовані безпосередньо усередині електромашини. При цьому необхідно враховувати, що реалізація таких схем пов'язана з труднощами по розміщенню сенсорів усередині турбогенератора і забезпеченню їх захисту від несприятливих впливів (сильних магнітних і електричних полів, механічних вібрацій, теплових навантажень).

3. У разі розміщення сенсорів усередині турбогенератора необхідно забезпечити надійність і стабільність (у тому числі метрологічну) їх функціонування як мінімум впродовж усього періоду безупинної експлуатації машини.

1. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
2. *Груздев В.Б.* Повышение эффективности осушки водорода в турбогенераторах // Энергетик. – 2006. – №7. – С. 27–28.
3. *Груздев В.Б.* Разработка комплексной системы мониторинга осушки водорода в электроэнергетике: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». – Казань, 2008. – 16 с.
4. *Неуймин В.М., Певцов В.Г., Бельх А.Ф., Семенов А.В., Валитов В.А., Тищенко Б.А.* Новые приборы для контроля концентрации горючих и токсичных газов и влажности газообразных сред для электроэнергетики / Новое в российской электроэнергетике. – 2003. – № 11. – С. 46–50. Режим доступа: <http://www.energo-press.info/nre/body/arch/2003/11-nre.pdf>.

5. *Гигрометры* конденсационно-термометрические «ТОРОС-3». Гигрометр «ТОРОС-3-1ВМ». Руководство по эксплуатации ТОР.413326.004 РЭ.
6. *Объем и нормы* испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – 6 изд. – М.: НИЦ СНАС, 1998. – 256 с.
7. *Эксплуатация генераторов*, синхронных компенсаторов. Режим доступа: <http://forca.ru/instrukcii-po-ekspluatacii/raznoe/ekspluaciya-generatorov-sinhronnyh-kompensatorov.html>.
8. *Approval Standard* for Intrinsically Safe Apparatus and Associated Apparatus for Use in Class I, II, and III, Division 1, Hazardous (Classified) Locations. Режим доступа: <https://www.fmglobal.com/assets/pdf/fmapprovals/3610.pdf>.
9. *GE General Eastern DY55 Moisture Sensor*. Режим доступа: <http://www.instrumart.com/products/19751/ge-general-eastern-dy55-moisture-sensor>.
10. *Cooling gas* for power generators. Trace moisture measurement in hydrogen cooled electrical generators. Режим доступа: [http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CD8QFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.supertron.com.sg%2Fdownload%2Fappnotes%2F01H2cool%2520new.doc&ei=UwpZU6D\\_JMO84ATu3ICAAQ&usq=AFQjCNG0LC0CxFwtG1IA\\_o5ZoZudnkS98g&bvm=bv.65397613,d.bGE](http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CD8QFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.supertron.com.sg%2Fdownload%2Fappnotes%2F01H2cool%2520new.doc&ei=UwpZU6D_JMO84ATu3ICAAQ&usq=AFQjCNG0LC0CxFwtG1IA_o5ZoZudnkS98g&bvm=bv.65397613,d.bGE).
11. *DewPro MDR3 Relative Humidity Probe*. Режим доступа: [http://www.scco.com.tw/General\\_Eastern/DewPro\\_MDR3/DewPro%20MDR3%20probe.htm](http://www.scco.com.tw/General_Eastern/DewPro_MDR3/DewPro%20MDR3%20probe.htm)
12. *Trace Moisture probe Hydrotec™ DY 55*. Режим доступа: <http://www.ppatrade.sk/images/mmy150.pdf>

УДК 621.313.322

**А.С. Левицкий**, докт. техн. наук, **А.И. Новик**, докт. техн. наук.

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03380, Украина

**Обзор некоторых схем охлаждения турбогенераторов и контроля влажности охлаждающего водорода**

*Приведены результаты обзора и анализа некоторых схем водородного охлаждения турбогенераторов. Рассмотрены особенности подключения сенсоров относительной влажности водорода в турбогенераторах в случае применения разных схем охлаждения. Показано, что наилучшая достоверность контроля влажности достигается в схемах, где сенсоры влажности водорода размещены внутри машины в потенциально опасных зонах. Отмечено, что при таком размещении сенсоров они должны быть стойкими к влиянию мощных электромагнитных полей и высокой температуры, а также обеспечить надежность и стабильность функционирования на протяжении всего периода непрерывной работы машины. Библи. 12, рис. 4.*

**Ключевые слова:** турбогенератор, охлаждение, водород, влажность, точка росы, измерение, сенсор.

**A.S. Levytskyi, A.I. Novik**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Review of some schemes of cooling of turbogenerators and control of humidity of cooling hydrogen.**

*Results of review and analysis of some schemes of the hydrogen cooling of turbogenerators are given. The features of placing of sensors of relative humidity of hydrogen in different schemes of cooling are considered. It is shown that the best trustworthiness of control of humidity is achieved in schemes, where sensors of control of humidity of hydrogen are placed into a machine in potentially dangerous areas. It is marked that at such placing of sensors they must be steadfast to influence of the powerful electromagnetic fields and high temperature, and also to secure reliability and stability of functioning during all period of continuous work of machine. References 12, figures 4.*

**Key words:** turbogenerator, cooling, hydrogen, humidity, dew point, measuring, sensor.

Надійшла 4.08.2014

Received 4.08.2014