



ЛИТЕРАТУРА

1. Васьковський Ю.Н., Гайденко Ю.А., Цывинський С.С. Определение интегральных характеристик электрических машин методами теории электромагнитного поля // *Електротехніка і електромеханіка*. — 2006. — № 1. — С. 28–32.
2. Троицкий В.А., Ролик И.И., Яковлев А.И. Магнитодиагностика в силовой электротехнике // *Техника*. — К.: — 1983. — 207 с.
3. Поташич С.І., Васьковський Ю.М., Федоренко Г.М. Підвищення надійності, рівня безпеки та ефективності

функціонування демпферних систем потужних гідрогенераторів // *Гідроенергетика України*. — 2009. — № 4. — С. 28–34.

4. Milojkovic Z., Ban D., Petrinic M., Studir J., Polak J. Application of magnetic wedges for stator slots of hydrogenerators // 2010 CIGRE SESSION, SCA1, A1-101, Croatia

5. Васьковський Ю.Н., Гайденко Ю.А. Применение полевого анализа для усовершенствования конструкции тяговых асинхронных двигателей // *Електромашинобудування та електрообладнання*. — 2006. — Вип.67. — С. 88–94.

© Чумак В.В., Федоренко Г.М., Гайденко Ю.А., 2010



УДК 621.313.322

ЛЕВИЦЬКИЙ А.С., канд. техн. наук,
Ін-т електродинаміки НАН України, м. Київ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ ЄМНІСНИХ ВИМІРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНИХ ДЕФЕКТІВ

Обґрунтовано переваги ємнісних сенсорів при застосуванні їх для контролю та діагностики потужних гідрогенераторів. Показано, що сенсори даного типу є перспективними пристроями, які широко застосовуються провідними світовими компаніями (зокрема VibrosytM, Канада). Наведено матеріали про розробки таких сенсорів в Інституті електродинаміки Національної академії наук України.

Своєчасне виявлення дефектів у процесі роботи гідрогенератора дозволяє значно підвищити надійність його роботи, знизити час простоїв і зменшити витрати, пов'язані з ремонтом. За високої ефективності контролю стає можливим перехід від планових ремонтів до ремонтів згідно фактичного стану генератора, що все частіше застосовується за кордоном. Потрібно враховувати, що задача вибору оптимального комплексу параметрів для контролю стану машини під час роботи досить складна. З одного боку, необхідно виявити якомога більшу кількість імовірних дефектів, а з іншого боку — вибрати найбільш ефективні методи контролю з багатьох, що застосовуються, керуючись економічно доцільними витратами.

Мета даної роботи — привернути увагу зацікавлених організацій і підприємств до ємнісного методу вимірювання параметрів механічних дефектів у великих електричних машинах, який є одним із найбільш перспективних на сьогоднішній день.

Як відомо, особливе місце серед більшості дефектів генераторів (машин) займає контроль вібрації основних вузлів. Вимірювання вібрації і похідних від неї величин входить в усі сучасні системи контролю стану і програми обстеження. Однак контроль лише вібраційних параметрів дозволяє виявити далеко не всі можливі дефекти

різних вузлів гідрогенератора [1, 2]. У роботі [1] наводиться оцінка ефективності вимірювання параметрів вібрації для виявлення механічних дефектів, відшукування їхнього місця та прогнозування розвитку в часі (Табл. 1). Як видно з таблиці, ефективність практично ніколи не буває рівною 100 % і коливається в межах (залежно від типу дефекту) від 20 до 80 %.

Тому для одержання вищої вірогідності у виявленні механічних дефектів в сучасні універсальні системи вібраційного контролю включають спеціальні сенсори, за допомогою яких одержують додаткову інформацію про параметри дефектів.

Взагалі слід зазначити, що зазначені в Табл. 1 механічні дефекти не є єдиними, що можуть бути виявлені вібраційним контролем. Крім дефектів конструкції за допомогою вимірювання параметрів вібрації виявляються виткові замикання в обмотці ротора, несиметричність в схемі обмоток, зменшення спресованості осердя, ослаблення кріплення обмоток у пазу і лобових частинах та інші.

Однією з перших універсальних систем вібраційного контролю стану гідроагрегату з додатковими сенсорами є система V1MOS (Vibration Monitoring System), розроблена в 90-х роках минулого століття у шведському відділенні компанії



ABB (ASEA-Brown Boveri Ltd.) для ГЕС Швеції. Система поряд з сенсорами вібрацій містить безконтактні сенсори переміщення напрямних підшипників по осях X і Y, сенсори переміщення підп'ятників, а також сенсори контролю повітряного зазору між статором і ротором [1].

Для контролю генераторів певного типу, що використовуються на ГЕС Itaipu (границя Бразилії й Парагваю), швейцарським відділенням того ж концерну ABB розроблена система MONDIG (Monitoring and Diagnose). Використання системи дає можливість ефективно визначати дефекти на ранній стадії їх розвитку за допомогою сенсорів, які контролюють механічні величини в різних місцях агрегата. Поряд з сенсорами вимірювачів параметрів вібрації це є сенсори переміщення вала, сенсори переміщення корпусу статора, сенсори переміщення підшипників, сенсори кліренсу турбіни [1, 3].

У Російській Федерації найбільш відомою є "Стационарная система виброконтроля, мониторинга и диагностики гидроагрегатов "АЛМАЗ-7010-ГЭС", розроблена ООО "ДИАМЕХ 2000" (м. Москва). Система містить високочутливі сенсори абсолютного вібропереміщення типу РА-059, струмовихрові сенсори биття вала типу СИЭЛ 1662, ємнісні сенсори повітряного зазору та магнітострикційні сенсори ослаблення пресування осердя статора [4, 5].

Найбільш універсальним комплексом безперервного контролю на сьогоднішній день є система моніторингу стану вузлів гідрогенератора ZOOM (Zero Outage On-line Monitor), розроблена компанією VibroSystM Inc. (Канада) [6]. Компанія VibroSyst є світовим лідером у сфері розробок і виробництва унікальних технологій (включаючи широкий вибір спеціальних сенсорів) для діагностики і моніторингу великих обертових електричних машин. Діагностичне устаткування компанії використовується на багатьох ГЕС десятків країн світу.

Параметри механічних дефектів в ZOOM вимірюються з використанням:

- системи вібраційного контролю Vibration Watch_{TM} (Vibration Monitoring System) [7];

Таблиця 1. Експертна оцінка можливості виявлення різних дефектів гідроагрегата за допомогою вимірювання параметрів вібрації

Дефекти	Можливість виявлення дефекту за допомогою вимірювання вібрацій, %	Можливість визначення місця дефекту, %	Можливість прогнозування часу розвитку дефекту, %
Розбалансування	100	75	75
Неспіввісність вала	90	90	65
Нестабільність осі	100	75	75
Дефекти напрямних підшипників	75	75	50
Нерівномірність повітряного зазору	80	80	50
Дефекти ущільнень	80	30	25
Незакріплені частини ротора	70	50	50
Ушкодження редуктора	80	80	30
Кавітація в турбіні	50	100	20
Несиметрія турбіни	80	80	30
Відхилення форми ротора	80	80	60
Структурні резонанси	60	30	20
Ослаблення опірних болтів	70	60	30
Порушення у водопідведенні	30	20	20
Тріщини в роторі	50	50	20
Забруднення лопаток турбіни	30	25	25
Дефекти опорних підшипників	70	60	40
Крутильні резонанси	65	45	40
Гідравлічні пульсації	70	50	30

- системи контролю повітряного зазору AGMS_R (Air Gap Monitoring System) [8];

- системи вимірювання параметрів вібрації статора FOASBV (End-winding Vibration Monitoring System and Stator Vibration Monitoring System) [9];

- приладу для вимірювання кліренсу турбіни BTC_{TM} (Turbine Blade Clearance) [10].

Особливістю вимірювання параметрів механічних дефектів в ZOOM є те, що первинні перетворювачі (сенсори), які використовуються під час вимірювання, розроблені спеціально для застосування у великогабаритному потужному обертовому устаткуванні (гідрогенераторах, турбогенераторах та електродвигунах). Як правило, це сенсори, розроблені з використанням оптичного, ємнісного і струмовихрового методів вимірювання.

Слід зазначити, що особлива увага в компанії VibroSystM приділяється впровадженню ємнісних технологій вимірювання, що беруть початок з 1986 р., коли була розроблена і впроваджена перша система вимірювання повітряного зазору AGMS з ємнісним сенсором. Надалі модельний ряд ємнісних сенсорів зазору компанії VibroSystM

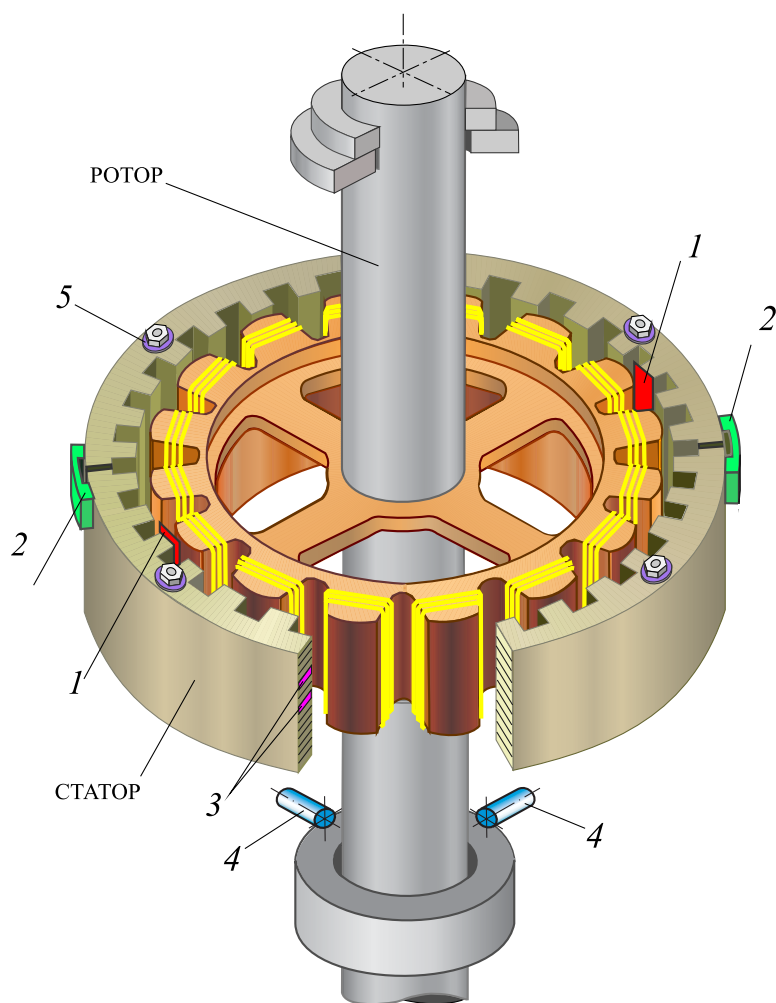


Рис. 1. Схема розміщення на вертикальному гідрогенераторі ємнісних сенсорів для вимірювання параметрів механічних дефектів: 1 – сенсори повітряного зазору між ротором і статором; 2 – сенсори контролю стану стиків складеного статора; 3 – двопараметрові сенсори вимірювання зусилля пресування, які встановлюються всередині осердя; 4 – сенсори радіального биття вала; 5 – сенсори вимірювання зусилля пресування, які встановлюються під стяжні гайки осердя.

був розширений, і зараз серійно випускаються сенсори типів VM 3.2, VM 3.1, VM5.0, VM 6.0 [8]. Перші три відрізняються діапазоном вимірювання, а останній тип – VM6.0 – має зменшені габарити.

В 1991 р. компанією VibroSystM була розроблена і впроваджена система вимірювання вібрації стрижня статора в пазу, в якій використано ємнісний сенсор типу SBV-3.14 [9].

В останні роки в компанії було проведено комплекс досліджень зі створення ємнісного сенсора радіального биття вала гідрогенератора, у результаті чого були розроблені сенсори типу PCS-102, PCS-202-R, PCS-200E, PCS-302, PCS-304, конструкція яких і метод перетворення вимірювального сигналу дає можливість їхнього використання під час роботи генератора.

Всі ємнісні сенсори, які розробила та застосовує компанія VibroSystM, захищені патентами.

Увага, яка приділяється ємнісним сенсорам в

компанії VibroSystM, пояснюється тим, що такі сенсори мають ряд істотних переваг у порівнянні з іншими типами сенсорів. Ці сенсори не сприйнятливі до впливу потужних електромагнітних полів, а діапазон їхніх робочих температур визначається лише стійкістю матеріалів, що застосовуються. Сенсори легко піддаються розрахунку та відтворенню (в тому числі у масовому і серійному виробництві), нескладні у виготовленні і налагодженні. Крім цього, сенсори прості за конструкцією, виготовляються з недорогих матеріалів. Різноманіття конструктивних особливостей, форм і розмірів ємнісних сенсорів дозволяє пристосувати їх до використання в різних місцях електричної машини.

Ємнісні вимірювачі мають принципово лінійну залежність "вхід–вихід". Вторинні перетворювачі для сенсорів можуть бути в достатньому ступені уніфіковані і розроблені на базі сучасних інтегральних мікросхем.

Роботи зі створення ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів великих електричних машин ведуться і в Україні. Одне із провідних місць у цьому напрямку займає Інститут електродинаміки Національної академії наук України. У відділі електричних і магнітних вимірювань Інституту в результаті багаторічних досліджень були досягнуті значні успіхи в галузі точного вимірювання комплексних величин, у тому числі малих і надмалих ємностей на тлі значних паразитних ємностей. Були також проведені глибокі дослідження впливу на точність вимірювання основних похибок, які викликані неточністю виготовлення та складання сенсорів. Все це дало можливість створити сучасні, конкурентоспроможні ємнісні вимірювачі параметрів механічних дефектів в потужних електричних машинах.

Науково-дослідні роботи в галузі вищезазначених вимірювачів виконувались в Інституті в рамках виконання державних програм і договорів з підприємствами в напрямку створення:

- ємнісного вимірювача повітряного зазору між ротором і статором;
- ємнісних сенсорів для контролю стану спресованості осердя статора;
- ємнісних сенсорів стану стиків складеного статора;



- ємнісного вимірювача радіального биття вала;

Результати досліджень були опубліковані в багатьох роботах, основними з яких є [11 — 15]. Декілька вимірювачів захищені патентами України. Використовуючи результати досліджень, можна створювати як універсальні вимірювачі, так і прилади, призначені для машин конкретного типу. Прикладами впровадження можуть служити експериментальні зразки ємнісного вимірювача повітряного зазору для капсульних гідрогенераторів типу SGK 538/160 — 70М Київської ГЕС [11, 12], а також ємнісного вимірювача зусиль у стяжних ребрах статора генератора типу ТВВ-220-2АУЗ Кольської АЕС [13].

На Рис. 1 показана схема вертикального гідрогенератора, де позначено місця встановлення деяких ємнісних сенсорів контролю параметрів дефектів машини.

Крім використання в складі систем безперервного віброконтролю, запропоновані ємнісні вимірювачі можна використати як окремі контролюючі пристрої, що містять первинні вимірювальні перетворювачі і електронний блок обробки та індикації сигналів. Під час періодичного контролю стану машини можна за допомогою одного переносного електронного блока вимірювати параметри сенсорів одного типу, що встановлені на ряді однакових машин.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. — 144 с.
2. *А.Е. Александров, Е.В. Гуцин, В.Б. Кулаковский и др.* Обнаружение дефектов гидрогенераторов /Под ред. Л.Г. Мамиконянца и Ю.М. Элькинда. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 232 с.

3. *ГЭС Итапу* на границе Бразилии и Парагвая. http://phoenixcontact.ru/signal-level-matching/246_7819.htm.

4. *Стационарная* система виброконтроля, мониторинга и диагностики гидроагрегатов "АЛМАЗ-7010-ГЭС". http://www.diamech.ru/almaz_ges.html.

5. *Трунин Е.С., Скворцов Е.Б.* Эксплуатационный контроль технического состояния агрегатов // Электрические станции. — 2010. — № 6. — С. 38 — 45.

6. *On-line Monitoring of Hydro Generating Units for Optimized Operation and Maintenance.* http://www.vibrosystem.com/pdf/ZOOM_E.PDF.

7. *VibraWatch_{TM}* — Vibration Monitoring System. http://www.vibrosystem.com/en/vibra_e.html.

8. *AGMS_R* — Air Gap Monitoring System. http://www.vibrosystem.com/en/agmm_e.html.

9. *Системы* измерения вибрации обмотки статора. http://www.vibrosystem.com/pdf/FOASBV_R.pdf.

10. *Turbine clearance Measurement. Underwater Proximity Probe.* http://www.vibrosystem.com/en/btc_e.html.

11. *Патент* на винахід №86524 Україна, МПК G01B 7/14, G01R 27/26. Спосіб вимірювання повітряного зазору між статором і ротором в гідрогенераторі та пристрій для його реалізації / Поташник С.І., Воцинський К.В., Грубой О.П., Левицький А.С., Неболюбов Є.Ю., Новік А.І., Федоренко Г.М., Шофул А.К.. — 2007 12431; заяв. 09.11.2007; опубл. 27.04.2009, Бюл. №8.

12. *Левицький А.С., Новік А.І., Неболюбов Є.Ю.* Створення ємнісного вимірювача повітряного зазору між ротором та статором в потужних гідрогенераторах // Праці ІЕД НАНУ. — Збірник наук. праць. — Вип. № 26. — 2010. — С. 54—62.

13. *Левицький А.С., Федоренко Г.М.* Датчики для вимірювання зусилля пресування осердя статорів гідро-і турбогенераторів // Гідроенергетика України. — 2009. — № 4. — С. 35 — 39.

14. *Левицький А.С., Архінова Л.В.* Ємнісний датчик для контролю стиків активної сталі статора гідрогенераторів // Гідроенергетика України. — 2008. — № 4. — С. 8 — 11.

15. *Левицький А.С., Новік А.І.* Оценка погрешности измерения емкостными датчиками биений валов электрических машин // Техн. электродинамика. — 2010. — № 4. — С. 66 — 70.

© Левицький А.С., 2010

