

УДК 621.3

## АДАПТИВНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОЩНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

*Е. А. ЗАЙЦЕВ, А. С. ЛЕВИЦКИЙ, В. А. БЕРЕЗНИЧЕНКО,  
А. Е. СУХОРУКОВА*

Институт электродинамики НАН Украины  
Киев, Украина

UDC 621.3

## ADAPTIVE INFORMATION-MEASURING CONTROL SYSTEM POWERFUL HYDROGENERATORS MECHANICAL CONDITION

*I. O. ZAITSEV, A. S. LEVYTSKYI, V. O. BEREZNYCHENKO,  
O. E. SUKHORUKOVA*

**Аннотация.** Представлены результаты разработки, испытаний и применения информационно-измерительной системы, предназначенной для контроля механического состояния мощных гидрогенераторов. Особенностью разработанной системы является использование алгоритмов квазиоптимальной фильтрации данных. Для реализации алгоритма используется информация с дополнительных датчиков, что позволяет компенсировать воздействие внешних и внутренних факторов на результат измерения. Представлены полученные характеристики разработанной системы при её испытании на испытательно-демонстрационном стенде.

**Ключевые слова:** гидрогенератор, емкостный датчик, воздушный зазор, система, информационно-измерительная система, мониторинг, контроль, механические дефекты.

**Abstract.** In this paper was presented results of the development, testing and application of an information-measuring system designed to control the mechanical state of powerful hydrogenerators. A feature of the developed system is the use of algorithms for quasi-optimal data filtering. To implement the algorithm, information from additional sensors is used, which makes it possible to compensate for the influence of external and internal factors on the measurement result. The obtained characteristics of the developed system are presented during its testing at the test-demonstration stand.

**Key words:** hydrogenerator, capacitive sensor, air gap, system, information-measuring system, monitoring, control, mechanical defects.

### *Введение*

В электроэнергетике большинства стран постсоветского пространства изношенность мощного электрооборудования (ЭО) достигает 80 %, поэтому чрезвычайно важным есть оценка его фактического технического состояния. Причем из-за длительной безостановочной эксплуатации ЭО требуется непрерывный контроль и/или мониторинг за изменением его эксплуатационных характеристик [1]. В свою очередь, как указывалось в [2], 24 % всех неисправностей связаны с механическими дефектами

машины, которые непосредственно влияют на эксплуатационные характеристики ЭО.

Для решения задачи непрерывного контроля и/или мониторинга в настоящее время используются различные средства измерения механического состояния гидрогенераторов (ГГ), которые по ряду причин не удовлетворяют современным требованиям к системам проведения непрерывного контроля и мониторинга состояния сложных и дорогостоящих ГГ в ходе их эксплуатации, а именно:

- морально устарели и не отвечают требованиям, которые регламентируются государственными и международными стандартами [3–5];
- требуют значительной адаптации к техническим характеристикам ГГ и условиям эксплуатации информационно-измерительных каналов системы технической диагностики ГГ.

### *Актуальность исследований*

Перечисленные проблемы в значительной степени определяют необходимость разработки специализированных средств измерения параметров механических дефектов с учетом технических характеристик эксплуатируемых на постсоветском пространстве ГГ, значительная часть которых спроектирована и выпущена в эксплуатацию коллективами заводов ГП «Электротяжмаш» (г. Харьков, Украина), «Завод «Электросила» (г. Санкт-Петербург, РФ), НПО «ЭЛСИБ» (г. Новосибирск, РФ) и др.

Учитывая, что одним из основных параметров мощных ГГ является воздушный зазор между статором и ротором машины, в котором механическая энергия вращения преобразуется в электрическую энергию, актуальна разработка системы контроля механических параметров мощных гидрогенераторов.

### *Результаты исследований*

В Институте электродинамики НАН Украины авторами предложена информационно-измерительная система контроля механических параметров мощных ГГ, для которой разработаны, изготовлены и испытаны образцы специализированных датчиков, измерительных каналов и программного обеспечения, входящих в состав системы. Разработанная система позволяет контролировать параметры: воздушного зазора от двух до 24-х точек в зависимости от типа ГГ; скорость вращения ротора; параметры вибраций вблизи точки установки датчика воздушного зазора (при необходимости); параметры теплового поля; напряженности переменного магнитного поля. Практическая отработка элементов программно-аппаратного комплекса с целью исследования возможностей контроля и мониторинга технического состояния ГГ при различных режимах работы

проводилась на разработанном масштабном испытательно-демонстрационном стенде (рис. 1).

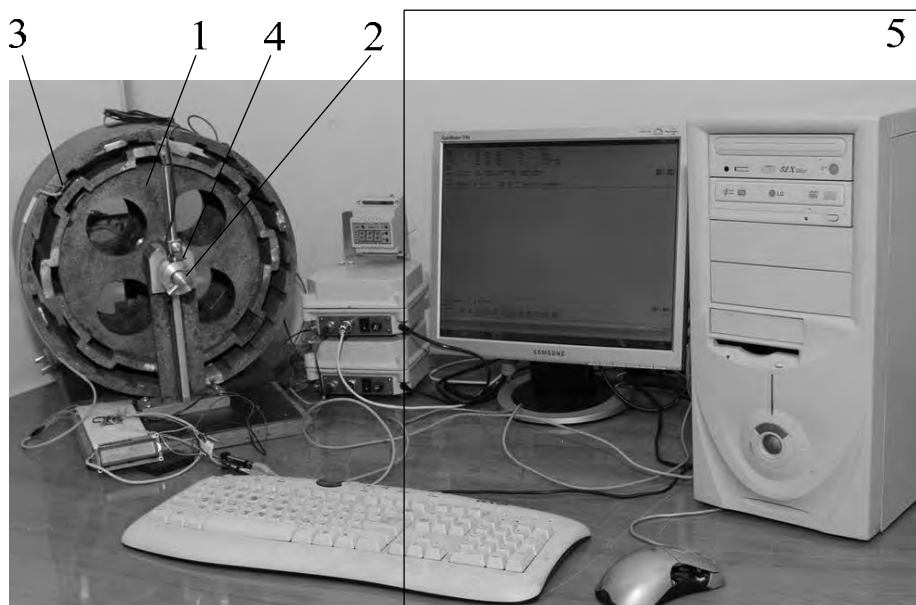


Рис. 1. Общий вид испытательно-демонстрационного стенда: 1 – макет генератора; 2 – вал; 3 – датчики воздушного зазора, температуры и теплового поля; 4 – датчик метки вала; 5 – система контроля механических параметров

Практическая разработка и наладка работы измерительных каналов системы осуществлялась с учетом характеристик капсульного гидрогенератора СГК638-160/70М, эксплуатируемого на Киевской и Каневской ГЭС. Система имеет четыре идентичных измерительных канала со следующими характеристиками:

- диапазон измерения значения воздушного зазора от 2 до 10 мм;
- нечувствительность к воздействию магнитного поля в пределах до 0,68 Т;
- диапазон рабочих температур от -40 до +125 °С;
- погрешность измерения воздушного зазора с учётом программного алгоритма адаптивного подавления неинформативных параметров не более 1 %.

Проведенные исследования емкостного датчика воздушного зазора с планарным размещением электродов представлены в [6–10].

Особенностью системы является то, что её работа основана на использовании алгоритмов квазиоптимальной фильтрации данных. Такой подход позволяет обеспечить точность определения значения воздушного зазора в динамическом или статическом режиме эксплуатации ГГ, а также характеристики, которые могут быть получены как производные с учетом пространственно-временной привязки полученных данных (годограф [11], эксцентриситет [12], форма ротора и статора [9, 13] и т. д.). Для реализации

алгоритма была разработана блочно-модульная архитектура системы (рис. 2), что позволяет обеспечить гибкость, взаимозаменяемость и возможность адаптации системы под различные типы ГГ.

Система состоит из измерительного модуля (количество модулей варьирует в зависимости от типа ГГ), датчика метки вала 6, коммутатора 7, рабочей станции 8, содержащей в себе операционную систему 9, специализированное программное обеспечение обработки данных 10 и базу данных 11. Для удобства работы оператора 12 рабочая станция может быть дополнена программным обеспечением для визуализации данных с интерфейсом типа Human Machine Interface.

Измерительный модуль состоит из измерителя воздушного зазора 5, который содержит емкостный датчик воздушного зазора 1 и датчик температуры 2, а также модуль имеет датчик напряженности переменного магнитного поля 3 и микроконтроллер 4.

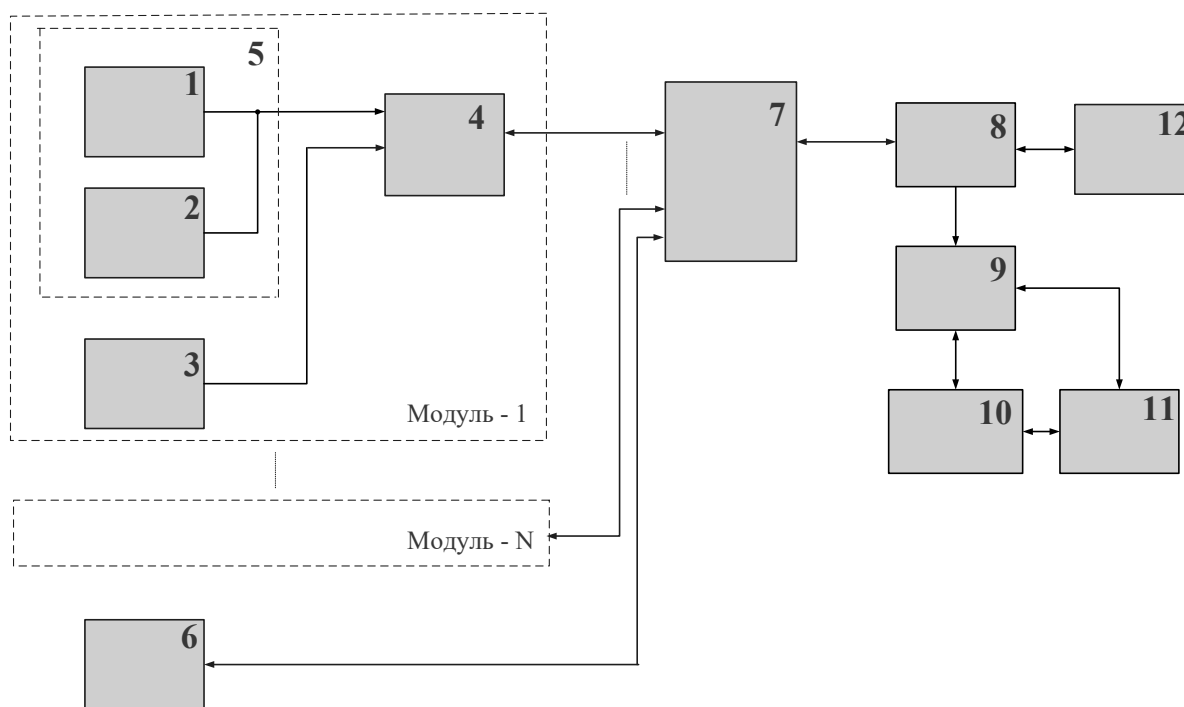


Рис. 2. Блочно-модульная архитектура системы

Рассмотрим более детально работу элементов системы. В динамике для точного определения значения воздушного зазора над каждым из полюсов система использует дополнительные компоненты, среди них основными являются датчик метки вала 6 и датчик напряженности переменного магнитного поля 3. Датчики используются для синхронизации работы системы контроля и диагностики воздушного зазора с другими системами технической диагностики мощных генераторов, а также для пространственной привязки полученных данных к полюсам. Другим вариантом является использование сигнала с емкостного сенсора в качестве генератора

метки полюса вала. В этом случае в схему (см. рис. 2) дополнительно включается компаратор. На один из входов компаратора подается выходное напряжение вторичного измерительного преобразователя, на другой вход – предельно установленное напряжение с опорного источника питания. Когда на входе компаратора напряжения становятся равными, на выходе компаратора формируется логическая единица, которая запускает аналого-цифровой преобразователь, содержащийся в микроконтроллере 4, предназначенный для формирования цифровых отсчетов о значении воздушного зазора [14].

На генераторах, работающих в маневренных режимах или когда использование собственного синусоидального напряжения невозможно (например, при отсутствии возбуждения ротора, когда в обмотках статора практически отсутствует напряжение), как генератор метки полюса вала используется сенсор метки вала. В этом случае частота его импульсов в  $n$  раз меньше частоты следования полюсов возле емкостного датчика воздушного зазора. Для формирования сигнала необходимой частоты, жестко привязанного по фазе к временному положению метки вала, может быть применен известный принцип фазовой автоподстройки частоты.

Для компенсации погрешности от воздействия на результат измерения вихревых токов, создаваемых на поверхности датчика воздушного зазора тангенциальной составляющей переменного магнитного поля, используется датчик напряженности переменного магнитного поля, который в опытном образце был выполнен в виде витка катушки и размещен непосредственно возле датчика воздушного зазора. Также дополнительно с целью минимизации погрешности от воздействия внешних факторов на результат измерения воздушного зазора могут использоваться вибродатчики, устраняющие погрешности, которые обусловлены вибрациями статора относительно ротора.

Использование полученных таким образом данных позволит:

- повысить надежность работы и эксплуатации ГГ;
- повысить точность определения и анализа причин, вызывающих появление дефектов [9, 15–17];
- обеспечить выполнение норм, заложенных в стандарте документа ISO 20816-5 «Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants», который разрабатывается на замену действующему сегодня стандарту ISO 7919-5:2005 [3].

Основным отличием нового стандарта от существующего является требование в отслеживании тренда изменения амплитуды и фазы измеряемых сигналов во времени. Использование тренда как информационного параметра позволяет контролировать изменение состояния ЭО, в том числе и ГГ в низкочастотной полосе, что невозможно при применении штатных средств контроля – акселерометров.

## *Заключення*

Испытания лабораторного образца разработанной информационно-измерительной системы контроля механического состояния мощных гидрогенераторов показали высокую эффективность применения разработанного экспериментального образца и его возможность использования в составе комплекса средств технической диагностики ГГ. Использование предлагаемой системы позволяет существенно уменьшить трудоемкость выполнения операций контроля фактического технического состояния ГГ посредством измерения воздушного зазора на остановленном ГГ, а также в различных режимах его эксплуатации, что в свою очередь повысит надежность работы и эксплуатации генерирующего оборудования гидроэлектростанций стран постсоветского пространства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. Кн. 2: Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2005. – 485 с.
2. Insulation Failure Mechanisms of Power Generators / R. Brutsch [et al.] // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2008. – № 24 (4). – С. 17–25.
3. **ISO 7919-5:2005**. Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants.
4. **ДСТУ ISO 7919-5:2014**. Вібрація механічна. Оцінювання стану машин за результатами вимірювання вібрації на обертальних валах. Ч. 5: Агрегати гідроелектростанцій та насосних станцій (ISO 7919-5:2005, IDT). – [Чинний від 2015-07-01]. – 2016. – 15 с.
5. **ISO 10817-1: 1998 (E)**. Rotation shaft vibration measuring systems. – Part 1: Relative and absolute sensing of radial vibration.
6. **Зайцев, Є. О.** Експериментально-теоретичні дослідження ємнісного сенсора повітряного зазору для гідрогенераторів методами регресійного аналізу / Є. О. Зайцев, А. С. Левицький // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 2. – С. 35–40.
7. Розробка апаратно-програмного забезпечення системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів / Є. О. Зайцев [и др.] // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2017. – № 24 (100). – С. 151–161.
8. **Zaitsev, Ie. O.** Characteristic of capacitive sensor for the air gap control system in the hydrogenator / Ie. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, B. A. Kromplyas // First Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON): Proceedings of the 2017 IEEE, May 29 – June 2 2017 Kiev. – 2017. – P. 390–394.

9. **Зайцев, Е. А.** Система контроля воздушного зазора гидрогенераторов / Е. А. Зайцев, А. С. Левицкий, В. Е. Сидорчук // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 8 (2). – С. 122–130.
10. **Zaitsev, Ie.** Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. Clean Generators – Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators / Ie. Zaitsev, A. Levytskyi // Intechopen. – 2020. – P. 25–42.
11. **Левицький, А. С.** Спосіб визначення деяких механічних дефектів потужних генераторів за результатами вимірювання повітряного зазору / А. С. Левицький, Є. О. Зайцев, С. А. Закусило // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси ПРТК-2018: тези доповіді X Міжнар. наук.-практ. конф. 22–23 травня 2018 м. – Київ: НАУ, 2018. – С. 111–113.
12. **Зайцев, Є. О.** Програмно-математичне забезпечення систем ідентифікації ексцентриситету ротора гідрогенератора за даними сенсорів повітряного зазору / Є. О. Зайцев // Гідроенергетика України. – 2018. – № 3–4. – С. 50–56.
13. **Зайцев, Є. О.** Аналітичне визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора гідро-генератора за даними сенсорів повітряного зазору / Є. О. Зайцев, А. С. Левицький // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2018. – № 50. – С. 62–70.
14. **Левицький, А. С.** Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія / А. С. Левицький, Г. М. Федоренко, О. П. Грубой. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.
15. **Зайцев, Є. О.** Комп'ютеризована система контролю механічних параметрів електрообладнання / Є. О. Зайцев // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016): матеріали XIII Міжнар. конф., 3–6 жовтня 2016 р. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – С. 116–118.
16. **Зайцев, Є. О.** Програмно-математичне забезпечення систем ідентифікації ексцентриситету ротора гідрогенератора за даними сенсорів повітряного зазору / Є. О. Зайцев // Гідроенергетика України. – 2018. – № 3–4. – С. 50–56.
17. **Муравлев, О. П.** Определение неравномерности воздушного зазора в асинхронных двигателях по данным ОТК о числе задеваний ротора за статор / О. П. Муравлев, Э. К. Стрельбицкий // Изв. Томского политехн. ин-та [Известия ТПИ]. – 1966. – Т. 145. – С. 121–127.

E-mail авторов: zaitsev@i.ua.