



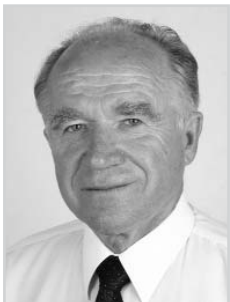
УДК 621.313.322

ЛЕВИЦКИЙ А.С., канд. техн. наук,
ФЕДОРЕНКО Г.М., докт. техн. наук,
Ин-т электродинамики НАН Украины, м. Київ

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОЩНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

ЛЕВИЦКИЙ А.С.

Рассмотрены перспективы применения волоконно-оптических информационно-измерительных и гибридных волоконно-оптических информационно-измерительных систем в системах контроля, диагностики и управления техническим состоянием мощных гидрогенераторов.



ФЕДОРЕНКО Г.М.

Работоспособность и надежность современных крупных гидрогенераторов во многом обеспечивается надежностью и метрологическими характеристиками измерителей диагностических параметров, являющихся составными частями систем контроля и диагностики. В большинстве случаев в этих измерителях применяются электронные технологии, когда измеренный параметр в виде электрического сигнала от сенсора передается с помощью линий связи к устройствам обработки сигналов. Учитывая большое количество сенсоров на машине, линии связи при этом представляют собой экранированные кабели, которые на машине собираются в многопроводные жгуты, что вносит элемент ненадежности из-за перекрестных помех каналов измерения, электромагнитных наводок в экранах и необходимости создания специальных контуров заземления.

Использование для измерения диагностических параметров *волоконно-оптических информационно-измерительных систем* (ВОИИС) и *гибридных волоконно-оптических информационно-измерительных систем* (ГВОИИС) позволит устранить недостатки, присущие традиционным электронным системам измерения [1–3, 4–6]

В ВОИИС параметр измеряется и преобразуется в оптический сигнал с помощью волоконно-оптического сенсора (ВОС) и передается для регистрации и обработки с помощью волоконно-оптического кабеля (ВОК). Отличительной особенностью ГВОИИС от ВОИИС является то, что в ней в качестве чувствительных элементов используются традиционные электронные сенсоры,

а измерительная информация передается по ВОК.

Интенсивные разработки в области создания ВОИИС и ГВОИИС различных объектов, обеспечивающих более эффективную передачу информации о состоянии объекта в сравнении с традиционными системами сбора, ведутся во многих странах мира. Происходит совершенствование существующих и создание новых волоконно-оптических устройств, систем, их компонентов и технологии изготовления самих оптических волокон. Первые попытки создания сенсоров на основе оптических волокон можно отнести к середине 70-х годов XX в. Публикации о более или менее приемлемых разработках и экспериментальных образцах подобных сенсоров появились во второй половине 70-х годов. Однако считается, что этот тип сенсоров сформировался как одно из направлений техники только в начале 80-х годов. Тогда же и появился и термин "волоконно-оптические сенсоры" (optical-fiber sensors) [3].

Общая структурная схема волоконно-оптического измерителя (системы) показана на Рис. 1. В его состав входят оптический источник света (ла-

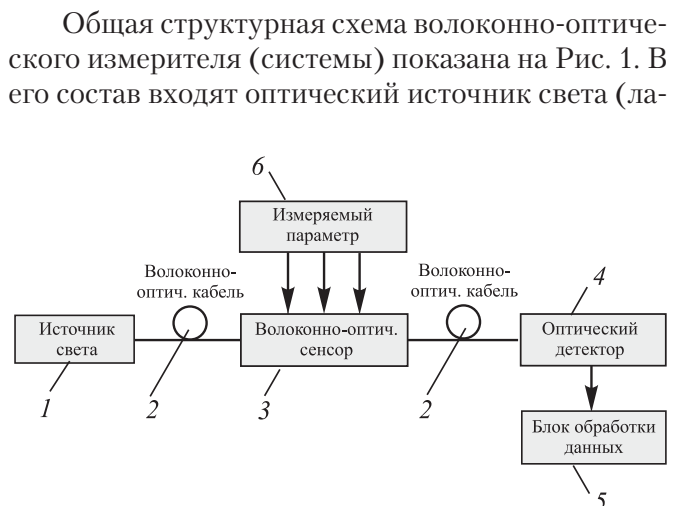


Рис. 1. Общая структурная схема волоконно-оптического измерителя



зер или светоизлучающий диод) 1, волоконно-оптический кабель 2, волоконно-оптический сенсор 3, оптический детектор 4 и электронный блок обработки данных 5. Измеряемый параметр 6, воздействует на сенсор 3, в котором луч света, поступающий через волоконно-оптический кабель 2 от источника света 1, изменяет свои характеристики. По другому волоконно-оптическому кабелю 2 луч света с измененными параметрами попадает в детектор, где эти изменения измеряются. Дальнейшая регистрация данных и их обработка производится процессором в блоке 5.

Для измерения деформаций, температуры и параметров вибрации во многих ВОИИС используются ВОС типа FBGs (Fiber Bragg grating sensor). Принцип действия таких ВОС основан на так называемой решетке Брегга. Решетка Брегга – это структура, расположенная внутри оптоволокна и включающая большое количество точек отражения, расположенных с определенным интервалом. При прохождении лазерного излучения через волокно часть его на определенной длине волны отражается от решетки. Этот пик отраженного излучения регистрируется измерительной аппаратурой. Если волокно деформируется при от внешнего воздействия, то интервал между узлами решетки изменяется. Соответственно изменяется длина волны излучения, отраженного от решетки. По изменению длины волны определяется величина деформации волокна и соответственно величина измеряемого параметра [1–3].

Классификация, приведенная в работе [2], все ВОС условно разделяет на три типа: точечные, распределенные и квазираспределенные. Точечные сенсоры позволяют проводить измерения и контролировать параметры в определенной точке, как большинство других типов не волоконных сенсоров. Как правило, такие сенсоры обладают малым размером и высокой точностью измерения. Они могут быть использованы в качестве локальных термометров, тензометров, сенсоров давления, акселерометров и т.п. В зависимости от типа сенсорного элемента локализация сенсоров может достигать 0,1 см², как в случае чувствительного элемента на основе решетки Брегга.

Бесспорным преимуществом распределенных сенсоров является осуществление непрерывного контроля параметров по длине (объему) объекта в любой его точке, где установлен сенсорный световод. Принцип действия таких сенсорных систем основан на анализе изменения параметров по длине световода и на нелинейных эффектах. Недостатком распределения измеряемого параметра по длине является относительно невысокая точность измерения. Распределенные сен-

соры могут быть использованы для контроля больших объектов и больших территорий в качестве сенсоров радиации и температуры. Они позволяют анализировать градиенты температур.

Система из квазираспределенных сенсоров объединяет преимущества точечной и распределенной систем. Квазираспределенный сенсорный измеритель представляет собой массив точечных сенсорных элементов, как правило, на основе внутриволоконных решеток Брегга, объединенных одним общим световодом. Каждый элемент обладает своими уникальными характеристиками, что позволяет проанализировать его состояние независимо от других сенсорных элементов. Точность таких систем определяется точностью отдельных сенсоров, а массив может объединять до 100 и более элементов. Сенсорные массивы позволяют проводить мониторинг сложных объектов, например, мощных гидрогенераторов, анализировать градиент распределения температуры, механических нагрузок, давления, контролировать до 100 и более точечных объектов. Причем для этого используется только один световод и анализатор. Именно квазираспределенные системы по сравнению с электрическими аналогами обладают малой массой и размерами.

В общем можно отметить, что применение ВОИИС для измерения физических величин в мощных генераторах позволит [2]:

- 1) исключить влияния на результат измерения электромагнитных полей;
- 2) исключить побочные электромагнитные излучения;
- 3) исключить перекрестные помехи каналов;
- 4) исключить проблемы, связанные с контурами заземления и с напряжениями смещения в местах соединения разнородных проводников;
- 5) исключить проблемы дугообразования и искрения;
- 6) обеспечить высокую стойкость к вредным воздействиям среды, в том числе и радиации;
- 7) применить более тонкий, более легкий (в 2 раза) и более прочный, чем электрический, многожильный кабель;
- 8) обеспечить простоту мультиплексирования сигналов;
- 9) обеспечить высокую скорость передачи данных.

Сами ВОС, кроме этого:

- 1) могут использоваться во взрывоопасной среде ввиду абсолютной взрывобезопасности;
- 2) имеют высокую механическую прочность, малые габариты, простую конструкцию и, соот-

ветственно, высокую надежность;

3) химически инертны;

4) изготавливаются из диэлектрических материалов, чем обеспечивается отсутствие путей прохождения через них электрического тока;

5) имеют высокую стойкость к повышенным температурам, механическим ударам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды;

6) позволяют производить бесконтактные и дистанционные измерения.

Это даст возможность использовать некоторые ВОС в ситуациях, в которых электронные устройства либо вообще нельзя применить, либо такое использование сопровождается значительными трудностями и расходами.

К сожалению, сдерживающим фактором создания и внедрения ВОИИС в системах контроля и диагностики генераторов АЭС, ТЭС и ГЭС является отсутствие широкой номенклатуры промышленно выпускаемых ВОС, которые можно было бы использовать для измерения диагностических параметров. Сравнительно медленное расширение номенклатуры промышленных сенсоров объясняется тем, что разработка специализированных ВОС стоит очень дорого.

Указанные сложности внедрения ВОИИС для систем контроля и диагностики сложных и

крупных инженерных объектов заставили специалистов в последние 10 лет форсировать разработки в области ГВОИИС [4 – 6]. Созданы основные компоненты ГВОИИС и проведены их испытания для измерения различных физических величин.

Как было указано выше, ГВОИИС (общая принципиальная схема показана на Рис. 2) в основе устройства содержат волоконно-оптический кабель в качестве среды передачи измерительной информации, и традиционные сенсоры в качестве чувствительных элементов (первичных преобразователей). Питание таких сенсоров может осуществляться двумя способами: а) при помощи электропитания от источников, расположенных рядом с сенсором (см. Рис. 2, а), б) при помощи энергии, передаваемой через световод (см. Рис. 2, б).

Световая энергия может преобразовываться в электрическую энергию, необходимую для питания электрических сенсоров, при помощи *фотовольтаического преобразователя*. Последние представляют собой сложную в технологическом плане структуру и поэтому (в силу начальной стадии разработок) имеют высокую стоимость. В [4] описан такой преобразователь, созданный на основе двойных гетероструктур AlGaAs-GaAs, который в диапазоне $\lambda = 790...830$ нм обеспечивает преобразование энергии оптического излучения в электрическую энергию с эффективностью до 45 %, что может являться основой создания источников питания ГВОИИС с выходным напряжением 3–5 В и мощностью до 30 мВт. По этим результатам можно сделать вывод, что в ближайшее время следует ожидать появления ряда серийных фотовольтаических преобразователей. Их можно будет использовать при создании ГВОИИС для систем контроля и диагностики генераторов, например, при измерении физических величин, определяющих параметры механических дефектов в мощных генераторах (зазор между ротором и статором, биение вала, вибрация обмотки статора и т.д.), используя в качестве первичных преобразователей емкостные сенсоры.

Исследования и опыт использования таких сенсоров сотрудниками ИЭД НАНУ, а также данные зарубежных фирм, показывают, что они имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими типами сенсоров при использовании в системах контроля и диагностики мощных гидрогенераторов [7]. Сенсоры невосприимчивы к воздействию мощных электромагнитных полей, а также инвариантны к влиянию других неблагоприятных внешних воздействий. Диапазон рабочих температур определяется только стойкостью применяемых материалов. Сенсоры

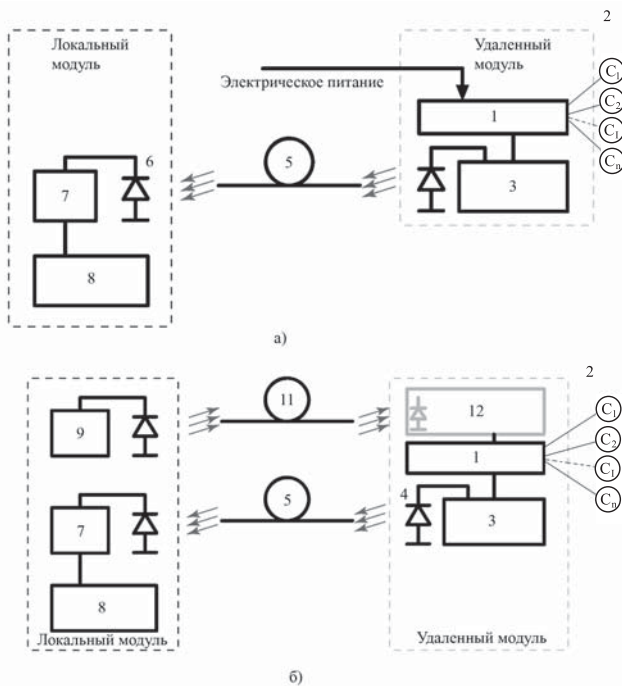


Рис. 2. Принципиальная схема ГВОИИС: а – с электропитанием; б – с питанием оптическим излучением:

- 1 – измерительный блок; 2 – сенсоры физических величин;
- 3 – блок кодирования и передачи измерительной информации;
- 4 – полупроводниковый лазер; 5 – волоконно-оптический кабель;
- 6 – фотодиод; 7 – декодер; 8 – блок отображения;
- 9 – блок накачки лазера; 10 – полупроводниковый лазер;
- 11 – волоконно-оптический кабель; 12 – блок фотовольтаического преобразователя.



легко поддаются расчету и воспроизведению, в том числе при массовом и серийном производстве, несложны в изготовлении, наладке и настройке. Кроме этого, сенсоры просты по конструкции и изготовлены из недорогих материалов, а, следовательно, недорогие. Многообразие конструктивных особенностей, форм и размеров емкостных сенсоров позволяет приспособить их к установке в различных местах генераторов. Энергопотребление измерителей с емкостными сенсорами также небольшое. Последнее очень важно, если использовать сенсоры в ГВОИИС.

Примером ГВОИИС для гидрогенераторов является система мониторинга гидрогенераторов, разработанная бразильской компанией *Electronorte* совместно с бразильским центром исследований и разработок в системах телекоммуникаций CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicacoes). Описание системы было представлено на сессии CIGRE-2010 [8].

В системе контролируются: а) на роторе – деформация обода и температура полюсов; б) на статоре – температура обмотки, вибрация сердечника и частичные разряды; в) для подшипников – температура и вибрация корпуса, биение вала. Для измерения деформации, температуры и вибрации были использованные серийно выпускаемые промышленностью ВОС на основе решетки Брегга, которые применяются в робототехнике и авионавтике, а для измерения биений вала и частичных разрядов были разработаны специальные сенсоры.

Схема измерения температуры полюсов и деформации обода ротора показана на Рис. 3. Сенсоры 1 на основе решетки Брегга (FBGs) во время работы запитываются от интеррогатора 2 посредством ВОК 3, неподвижного 4 и подвижного 5 коллиматоров, причем неподвижный коллиматор 5 установлен на статоре, а подвижный 4 – на роторе. Через эти же коллиматоры возвращается и свет, несущий информацию от ВОС температуры и деформации. Передача сигнала осуществляется, когда коллиматоры совмещены (находятся друг против друга). Низкая частота, с которой производятся измерения, не влияет на качество измерений, так как температура и дефор-

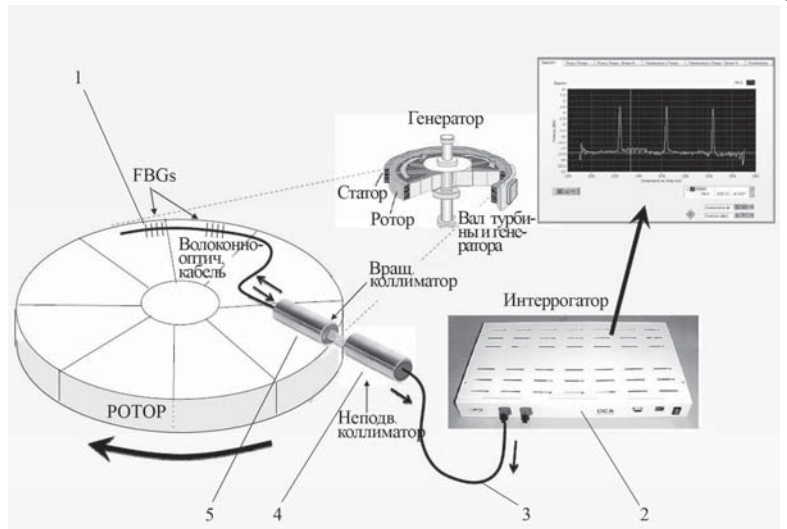


Рис. 3. Схема измерения температуры полюсов и деформации обода ротора гидрогенератора с помощью ВОС типа FBGs (с решеткой Брегга):

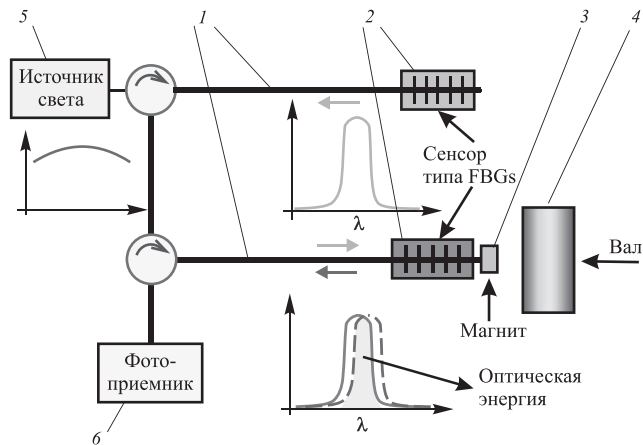


Рис. 4. Схема измерений биений вала с помощью ВОС непрямого типа

мация являются медленно изменяющимися параметрами.

В системе *Electronorte* для измерений биений вала применен так называемый сенсор "непрямого" типа (Рис. 4), для создания которого в конце оптоволоконного кабеля 1, обращенного к поверхности контролируемого вала, сформиро-

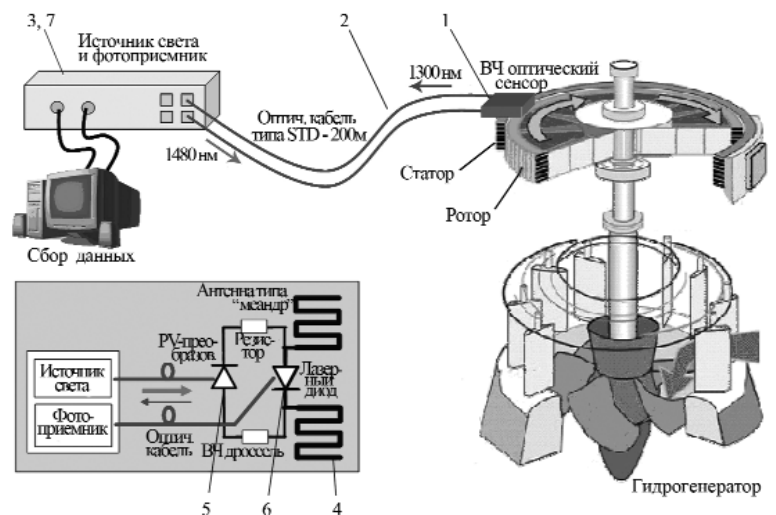


Рис. 5. Структурная схема измерителя частичных разрядов в обмотке статора гидрогенератора с помощью ВОС гибридного типа.

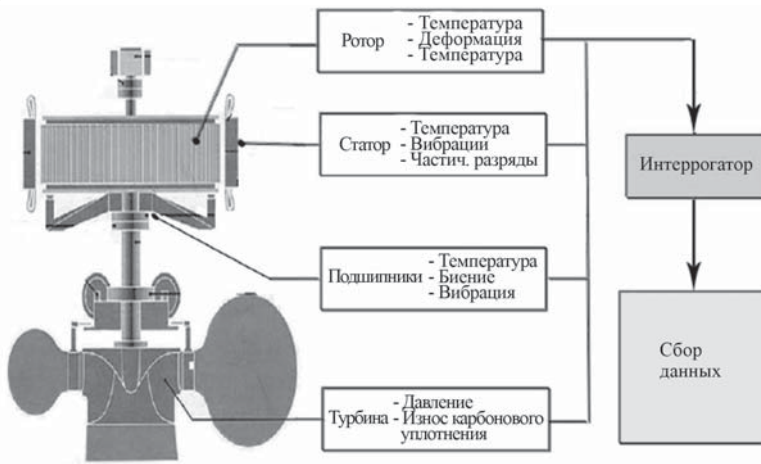


Рис. 6. Общая схема оптической системы мониторинга гидрогенератора, разработанной компанией Electronorte.

ван ВОС 2 типа FBGs. К торцу ВОК прикреплен магнит 3. Магнит притягивается валом 4, и усилие притяжения воздействует на решетку Брегга в волокне. Волокно деформируется при приложении внешнего воздействия, и интервал между узлами решетки изменяется. Соответственно, изменяется длина волны излучения, отраженного от решетки. По изменению длины волны определяется величина деформации волокна. Так как сила притяжения прямо пропорциональна расстоянию между магнитом и валом, то измененные параметры решетки косвенно отражают величину этого расстояния. Запитывается ВОС 2 от источника света 5. В фотоприемнике 6 происходит смешивание прямого и обратного лучей.

Частичные разряды в обмотке статора гидрогенератора измеряются при помощи системы (Рис. 5), в основу которой положен специальный, также разработанный в *Electronorte* ВОС гибридного типа. Измерение происходит следующим образом.

Оптический сенсор 1 запитывается через оптоволоконный кабель 2 от источника света 3. Электромагнитные импульсы, генерируемые частичными разрядами, улавливаются антенной 4 (типа меандр) сенсора 1. Затем преобразователь сенсора 1 с помощью мощного лазерного диода 6 преобразует электромагнитные импульсы в им-

пульсы света, которые передаются в фотоприемник 7. Сбор и обработка данных производятся компьютером.

Общая схема мониторинга гидрогенератора, разработанная в *Electronorte*, показана на Рис. 6.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что применение ВОИИС и ГВОИИС для систем контроля и диагностики крупных гидрогенераторов является перспективным средством повышения надежности их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fidanboyly K., Efendioglu H.S. Fiber Optic Sensors and Their Application. International Advanced Technologies Symposium (IFTS'09), May 13–15, Karabuk, Turkey. http://iats09.karabuk.edu.tr/press/pro/02_KeynoteAddress.pdf.
2. Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугодинов А.П. и др. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Спецвыпуск "Фотон-экспресс" – Наука, 2005. – № 6. – С. 128 – 140. <http://fotonexpress.ru/pdf/st/128-140.pdf>.
3. Overview of Fiber Optic Sensors. NEFC Meeting, February 23, 2010. http://www.nefc.com/wp-content/uploads/nefc_20100223.pdf.
4. Задворнов С.А. Исследование методов построения гибридных волоконно-оптических измерительных систем: автореф. Дис. ... канд. техн. наук: спец. 01.04.01 "Приборы и методы экспериментальной физики". – М.: 2009. – 23 с. <http://www.cplire.ru/abstracts/Zadornov.pdf>.
5. Задворнов С.А., Соколовский А.А. Преобразователи свет-напряжения для питания гибридных волоконных датчиков // Всерос. конф. по волоконной оптике. – Пермь, 10–12 октября 2007 г.
6. Задворнов С.А., Соколовский А.А. Двухканальный оптоэлектронный датчик температуры // Измерительная техника. – 2004. – № 11. – С. 35–37.
7. Левицкий А.С. Підвищення ефективності контролю та діагностики потужних гідрогенераторів за рахунок застосування смісних вимірювачів параметрів механічних дефектів // Гідроенергетика України. – 2010. – № 4. – С. 10–13.
8. Rosolem J.B., Florida C., Sanz J. Optical system for hydro-generator monitoring // Proc. International Council for Power Electroenergetical Systems CIGRE 2010. – Paris (France). –

© Левицкий А.С., Федоренко Г.М., 2011

