

**А. А. Ключников<sup>1</sup>, А. С. Левицкий<sup>2</sup>, Г. М. Федоренко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

<sup>2</sup>*Институт электродинамики НАН Украины, Киев*

## **ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ – ПУТЬ К ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ АЭС, ТЭС И ГЭС**

Рассмотрены перспективы применения волоконно-оптических информационно-измерительных систем и гибридных волоконно-оптических информационно-измерительных систем в системах контроля, диагностики, управления и аварийной защиты мощных генераторов.

*Ключевые слова:* генератор, надежность, контроль, диагностика, информационно-измерительная система, волоконно-оптический сенсор, волоконно-оптический кабель.

Работоспособность современных крупных турбо- и гидрогенераторов обеспечивается с помощью систем управления, контроля и аварийной защиты. В настоящее время в этих системах в основном применяются электронные измерительные технологии, в которых используется преобразование измеряемого параметра в электрический сигнал с последующей его обработкой. В своем составе эти системы содержат большое количество первичных преобразователей (сенсоров) различных физических величин, которые снабжают эти системы информацией о состоянии машины. Принцип действия используемых сенсоров основан на различных методах измерения, основные из них следующие [1 – 8]:

резистивный (температура составных частей конструкции)

вихретоковый (биения вала и смещения составных частей конструкции);

емкостный (воздушный зазор между статором и ротором, биения вала, вибрация стержней обмотки статора);

оптический триангуляционный (воздушный зазор между статором и ротором, биения вала).

Сенсоры физических величин современных информационно-измерительных систем (ИИС) контроля и диагностики мощных турбо- и гидрогенераторов во многих случаях разрабатываются с учетом их применения на работающей машине, чтобы удовлетворять требованиям надежности и обеспечивать необходимые метрологические характеристики [3 – 8]. В последние годы некоторые энергокомпании (в частности, VibroSystM, Канада) отдают предпочтение емкостным сенсорам из-за их способности работать в условиях сильных электромагнитных полей, повышенных температур, простоте конструкции и дешевизне [1 – 8].

В ИИС измеренная информация с помощью линий связи от сенсоров передается к устройствам обработки сигналов. Линии связи в основном представляют собой экранированные кабели (за исключением оптических сенсоров), которые собираются во время монтажа в многопроводные жгуты. Длина этих линий, как правило, не может превышать определенную величину, а применение жгутов вносит элемент ненадежности из-за перекрестных помех каналов измерения, электромагнитных наводок в экранах и необходимости создания специальных контуров заземления.

Использование *волоконно-оптических информационно-измерительных систем (ВОИИС)* для измерения физических величин, в которых 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)*, позволит устранить недостатки, присущие традиционным электронным системам измерения. Интенсивные разработки в области создания ВОИИС различных объектов, обеспечивающих более эффективную передачу информации о состоянии объекта в сравнении с традиционными системами сбора, ведутся во многих странах мира. Происходит совершенствование существую-

© А. А. Ключников, А. С. Левицкий, Г. М. Федоренко, 2012

щих и создание новых волоконно-оптических устройств, систем, их компонентов и технологии изготовления самих оптических волокон [10 – 12].

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) [12].

Современные ВОИИС позволяют измерять многие физические величины: давление, температуру, расстояние, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, массу, уровень жидкости, деформацию и т.д.

Вопросам создания и теоретических исследований волоконно-оптических сенсоров посвящено много публикаций. Одна из классификаций ВОС, учитывающая вид измеряемой физической величины и используемые физические явления в оптическом волокне, приведена в работе [12].

Общая структурная схема волоконно-оптического измерителя (системы) показана на рис. 1. В его состав входят оптический источник света (source) (лазер или светоизлучающий диод LED (light-emitting diode)) 1, волоконно-оптический кабель (optical fiber) 2, волоконно-оптический сенсор (transducer) 3, оптический детектор (detector) 4 и электронный блок обработки данных (electronic processing) 5. Измеряемый параметр (measurand) 6 воздействует на первичный измерительный преобразователь, в котором луч света, поступающий через оптоволоконный кабель от источника (лазера или светоизлучающего диода LED (light-emitting diode)), изменяет свои характеристики. По другому кабелю луч света с измененными параметрами попадает в детектор, где эти изменения измеряются. Дальнейшая регистрация данных и их обработка производится процессором.

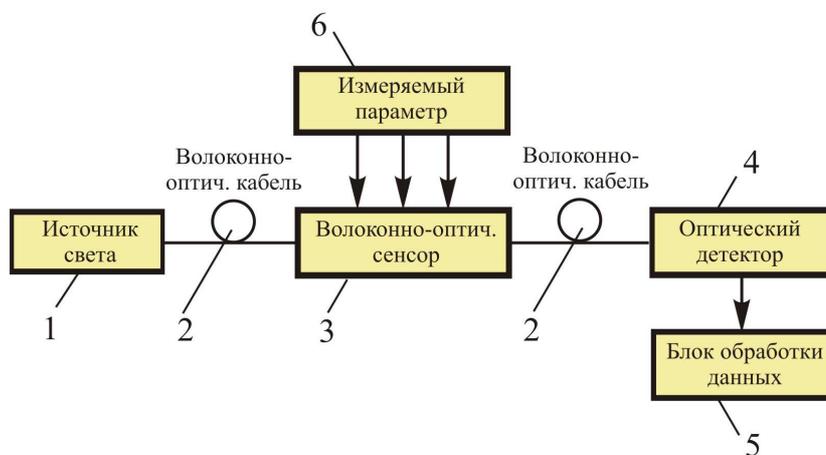


Рис. 1. Общая структурная схема волоконно-оптического измерителя.

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 приложении 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.

Классификация, приведенная в работе [11], все ВОС условно разделяет на три типа: *точечные*, *распределенные* и *квазираспределенные*. *Точечные* сенсоры позволяют проводить измерения и контролировать параметры в определенной точке, как и в большинстве 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  $0,1 \text{ см}^2$ , 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* сенсоры 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, инженерных сооружений, мостов, туннелей, корпусов кораблей и летательных аппаратов, нефтяных скважин, анализировать градиент распределения температуры, 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, что особенно важно для авиации и космонавтики.

Применение ВОИИС для измерения физических величин в мощных генераторах позволит [11]:

- 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, соответственно, 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;
- б) 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. Например: а) при измерении температуры в высоковольтных электрических аппаратах, таких как генераторы переменного тока, трансформаторы; б) при измерении тока и напряжения в высоковольтных линиях электропередачи; в) при быстром измерении температуры небольших поверхностей, имеющих малую теплопроводность и переменную отражательную способность; г) в труднодоступных местах.

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.

Но несмотря на все перечисленные сложности, появились первые сообщения о создании ВОИИС для генераторов. Так, на сессии CIGRE-2010 (Париж, август 2010 г.) был представлен доклад, в котором рассмотрена система мониторинга гидрогенераторов бразильской компании *Electronorte* (совместно с бразильским центром исследований и разработок в системах телекоммуникаций CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações)), созданная на основе волоконно-оптических сенсоров. В системе с помощью ВОС 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 [13]. В системе 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. 2. ВОС для этих целей являются сенсорами FBGs 1 прямого типа. Во время работы ВОС запитываются от интеррогатора (interrogator) 2 посредством ВОК (optical fiber) 3, неподвижного (fixed collimator) 4 и подвижного (rotating collimator) 5 коллиматоров, причем неподвижный коллиматор установлен на статоре, а подвижный – на роторе. Через эти же коллима-

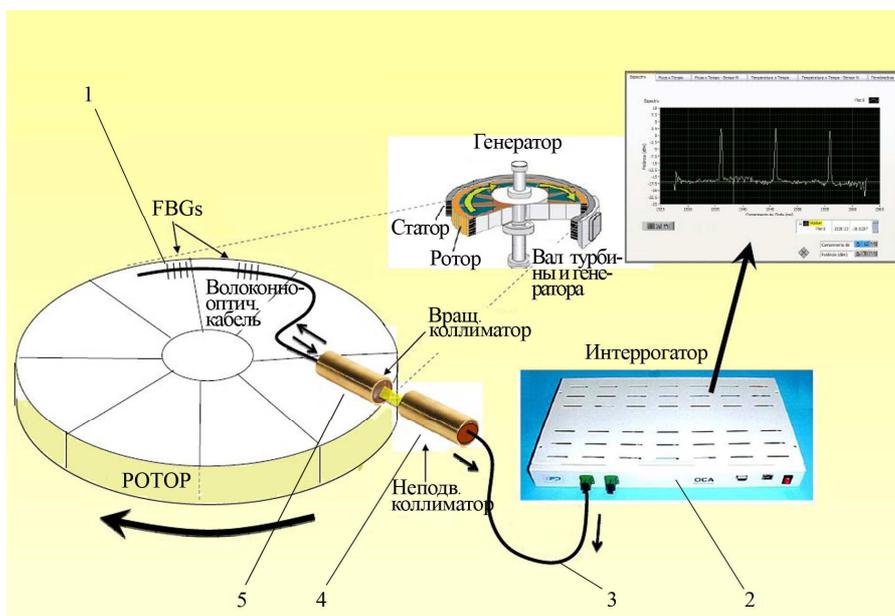


Рис. 2. Схема измерения температуры полюсов и деформации обода ротора гидрогенератора

с помощью ВОС типа FBGs (с решеткой Брегга). тора возвращается и свет, несущий информацию от ВОС температуры и деформации. Передача сигнала осуществляется, когда коллиматоры совмещены (находятся друг против друга). Низкая частота, с которой производится измерение, не влияет на качество измерений, так как температура и деформация являются медленно изменяющимися параметрами.

Разработанный в *Electronorte* ВОС для измерений биений вала является сенсором так называемого непрямого типа. Схема измерения таким ВОС показана на рис. 3.

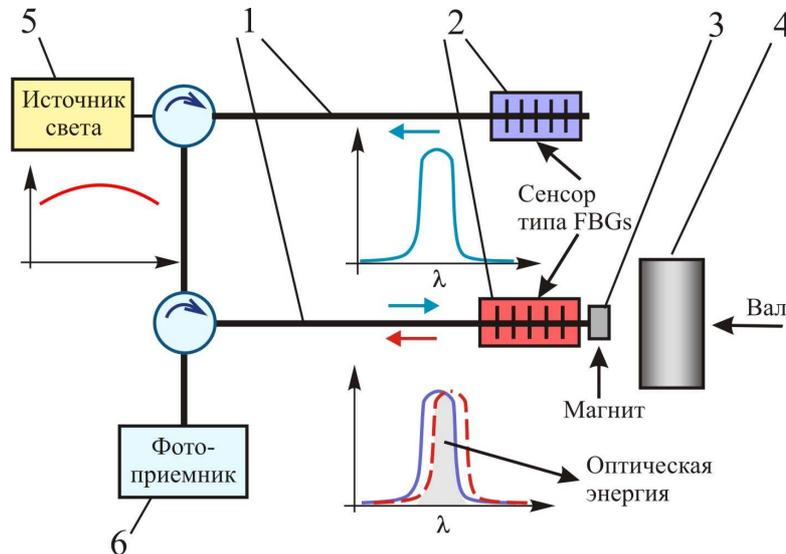


Рис. 3. Схема измерений биений вала с помощью ВОС непрямого типа.

В конце оптоволоконного кабеля (ВОК) 1, обращенного к поверхности контролируемого вала, сформирован 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. 4), в основу которой положен специальный, также разработанный в *Electronorte* ВОС гибридного типа. Измерение происходит следующим образом.

Оптический сенсор 1 (RF/Optical sensor) запитывается через оптоволоконный кабель 2 (STD optical fiber) от источника света 3. Электромагнитные импульсы, генерируемые частичными разрядами, улавливаются антенной 4 (типа Meander) сенсора 1. Затем преобразователь сенсора 1 с помощью мощного лазерного диода 6 преобразует электромагнитные импульсы в импульсы света, которые передаются в фотоприемник 7. Сбор и обработка данных производятся компьютером.

Общая схема мониторинга гидрогенератора, разработанная в *Electronorte*, показана на рис. 5.

Наиболее новым и также перспективным направлением повышения надежности и безопасности генераторов является использование так называемых гибридных волоконно-оптических информационно-измерительных систем (ГВОИИС) [14 – 16]. Разработка таких систем за рубежом ведется примерно 10 лет. Созданы основные компоненты ГВОИИС и проведены испытания ГВОИИС для измерения различных физических величин.

ГВОИИС (общая принципиальная показана на рис. 6) в основе устройства содержат волоконно-оптический световод 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. 6, а); б) при помощи энергии, передаваемой через световод (см. рис. 6, б).

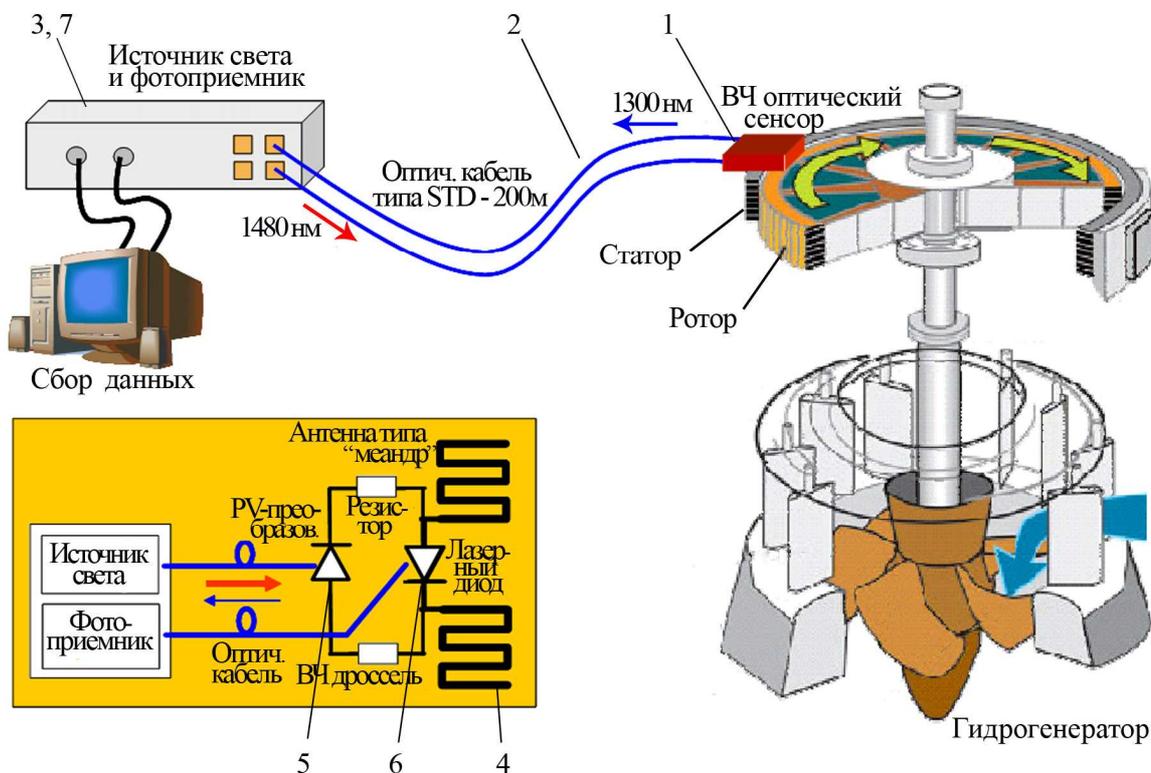


Рис. 4. Структурная схема измерителя частичных разрядов в обмотке статора гидрогенератора с помощью ВОС гибридного типа.

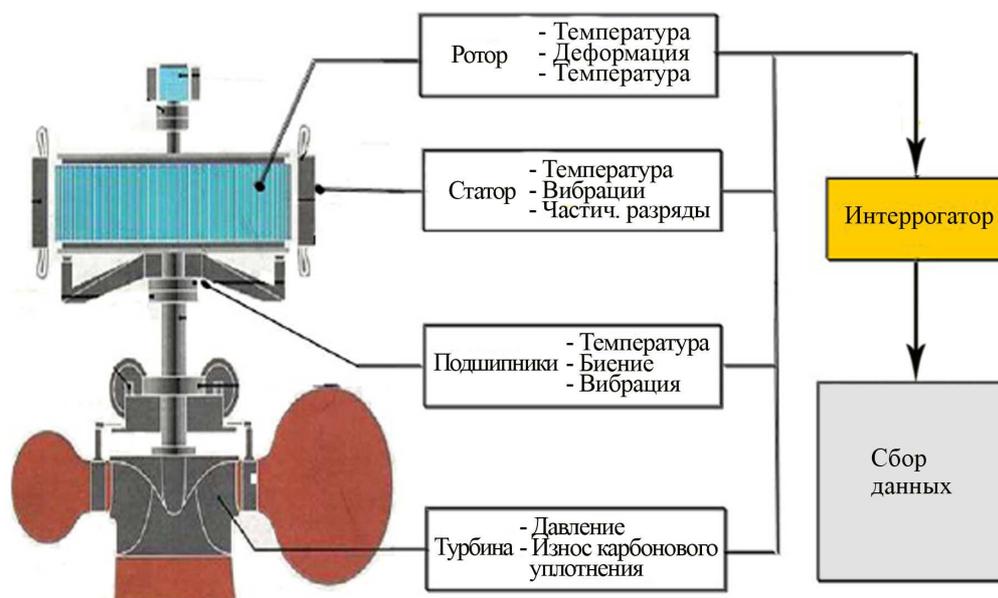


Рис. 5. Общая схема оптической системы мониторинга гидрогенератора.

Световая энергия может преобразовываться в электрическую энергию, необходимую для питания электрических сенсоров, при помощи *фотовольтаического преобразователя*. *Фотовольтаические преобразователи* представляют собой сложную в технологическом

плане структуру и поэтому, в силу начальной стадии разработок, имеют высокую стоимость. В [14] описан такой преобразователь, созданный на основе двойных гетероструктур AlGaAs–GaAs, который в диапазоне  $\lambda = 790 \dots 830$  нм обеспечивает преобразование энергии оптического излучения в электрическую энергию с эффективностью до 45 %, что является основой создания источников питания ГВОИИС с выходным напряжением 3–5 В и мощностью до 30 мВт.

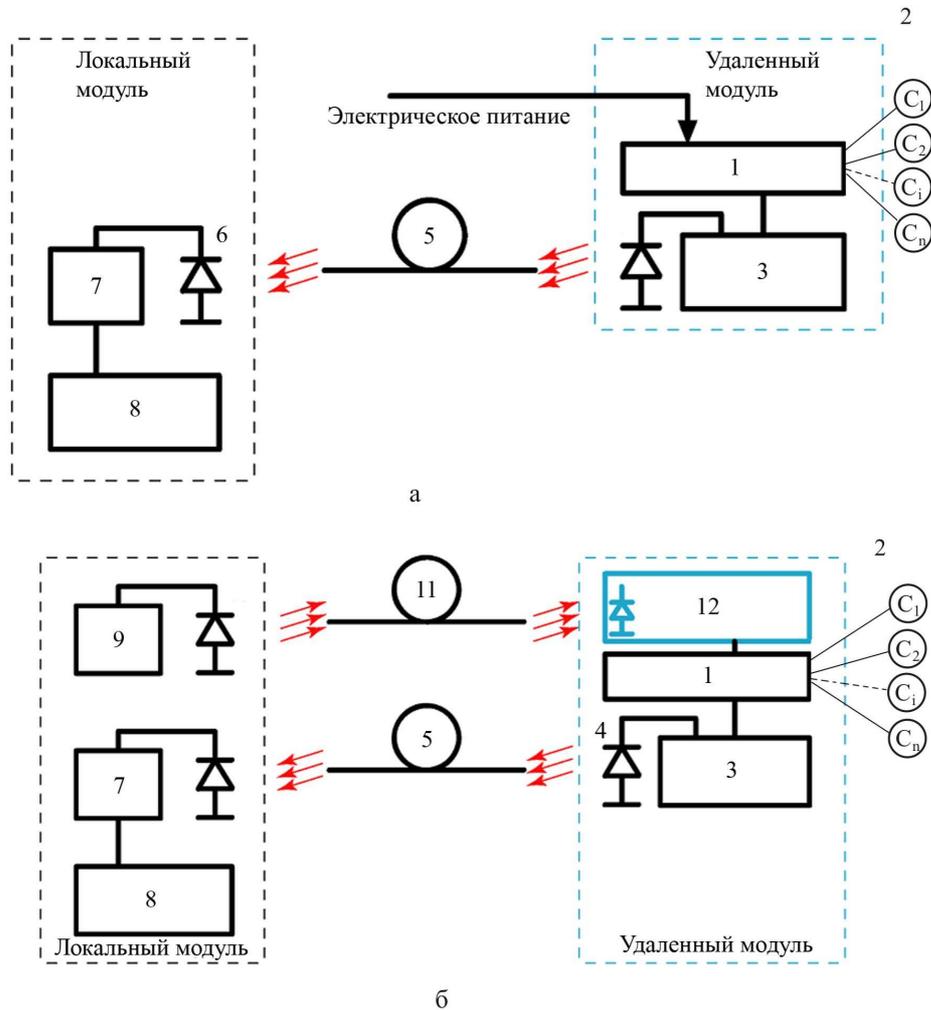


Рис. 6. Принципиальная схема ГВОИИС: *а* – с электропитанием; *б* – с питанием оптическим излучением. 1 – измерительный блок; 2 – сенсоры физических величин; 3 – блок кодирования и передачи измерительной информации; 4 – полупроводниковый лазер; 5 – волоконно-оптический кабель; 6 – фотодиод; 7 – декодер; 8 – блок отображения; 9 – блок накачки лазера; 10 – полупроводниковый лазер; 11 – волоконно-оптический кабель; 12 – блок фотовольтаического преобразователя.

Кроме высокой стоимости фотовольтаического преобразователя, сдерживающим фактором для применения ГВОИИС является недостаточная наработка по исследованию взрывобезопасности ВОК, передающих энергию питания сенсоров. Из немногих опубликованных результатов по этому вопросу заслуживают внимание результаты, опубликованные в работе [14], где приведены данные исследований, проведенных в Институте радиотехники и электроники РАН. Определялись максимальные уровни оптической мощности, при которой волоконно-оптическая система может считаться взрывобезопасной. Показано, что взрывобезопасность волоконно-оптического тракта в среде с температурой самовоспламенения 450 – 600 °С (смесь водорода, метана, пропана и подобных газов с воздухом) обеспечивается при

уровне передаваемой оптической мощности, не превышающей  $0,5d$  мВт, где  $d$  – диаметр световедущей жилы (мкм) многомодового оптического волокна.

На наш взгляд, ГВОИИС являются наиболее перспективными при измерении физических величин, определяющих параметры механических дефектов в мощных генераторах (зазор между ротором и статором, биение вала, вибрация обмотки статора и т.д.) с помощью емкостных сенсоров. Они имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими типами сенсоров [17]. Как было указано выше, 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 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 состоят 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.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
2. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 144 с.
3. *A New Conception on On-Line Monitoring and Diagnose of Turbo generators.* <http://www.marubun.co.jp/product/measurement/electric/qgc18e000003b8jf-att/Turbogenerators.pdf>.
4. *On-line Monitoring of Hydro Generating Units for Optimized Operation and Maintenance.* <http://www.vibrosystem.com/pdf/ZOOM E.PDF>.
5. *VibraWatch™ – Vibration Monitoring System.* <http://www.vibrosystem.com/en/vibra e.html>.
6. *AGMS<sub>R</sub> – Air Gap Monitoring System.* <http://www.vibrosystem.com/en/agmm e.html>.
7. *Системы измерения вибрации обмотки статора.* <http://www.vibrosystem.com/pdf/FOASBV R.pdf>.
8. *Turbine clearance Measurement. Underwater Proximity Probe.* <http://www.vibrosystem.com/en/btc e.html>.
9. *Соколов А.Н., Яцеев В.А.* Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // *LightWave, Russian Edition.* – 2006 – №4. – Р.44 –46. <http://optplex.ru/LightWave desember.pdf>.
10. *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](http://iats09.karabuk.edu.tr/press/pro/02_KeynoteAddress.pdf).
11. *Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугодников 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>.
12. *Overview of Fiber Optic Sensors.* NEFC Meeting, February 23, 2010. [http://www.nafc.com/wp-content/uploads/nafc\\_20100223.pdf](http://www.nafc.com/wp-content/uploads/nafc_20100223.pdf).
13. *Rosolem J.B., Florida C., Sanz J.* Optical system for hydrogenerator monitoring // Proc. International Council for Power Electroenergetical Systems CIGRE 2010. – Paris (France). – 2010. – A1\_201\_2010. – P.1 – 8.
14. *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>.
15. *Задворнов С.А., Соколовский А.А.* Преобразователи свет-напряжение для питания гибридных волоконных датчиков // Всерос. конф. по волоконной оптике. – Пермь, 10 – 12 октября 2007 г.
16. *Задворнов С.А., Соколовский А.А.* Двухканальный оптоэлектронный датчик температуры // Измерительная техника. – 2004. – № 11. – С. 35 – 37.

17. *Левицький А.С.* Підвищення ефективності контролю та діагностики потужних гідрогенераторів за рахунок застосування ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів // Гідроенергетика України. – 2010. – № 4. – С. 10 – 13.

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ – ШЛЯХ ДО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГЕНЕРАТОРІВ АЕС, ТЕС ТА ГЕС**

**О. О. Ключников, А. С. Левицький, Г. М. Федоренко**

Розглянуто перспективи застосування волоконно-оптичних інформаційно-вимірювальних систем та гібридних волоконно-оптичних інформаційно-вимірювальних систем в системах контролю, діагностики, управління та аварійного захисту потужних генераторів АЕС, ТЕС та ГЕС.

*Ключові слова:* генератор, надійність, контроль, діагностика, інформаційно-вимірювальна система, волоконно-оптичний сенсор, волоконно-оптичний кабель.

**FIBER OPTIC INFORMATIONAL MEASURING SYSTEMS ARE THE WAY TO RISE OF RELIABILITY OF GENERATORS A-PLANTS, THERMAL POWER PLANTS AND WATER POWER PLANTS**

**O. O. Klyuchnikov, A. S. Levytsky, G. M. Fedorenko**

Perspective of use fiber optic informational measuring systems and hybrid fiber optic informational measuring systems in monitoring, diagnostics and safety systems of power generators have been considered.

*Keywords:* generator, reliability, control, diagnostics, information measuring system, fiber optic sensor, fiber optic cable.

Поступила в редакцію 05.07.11