

# Энергетика. Автоматика

УДК 621.31

**В.В. Гретченко, Н.В. Савина**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ КАК СПОСОБ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

*Перестройка и изменение сложившихся правил содержания, обслуживания и проектирования гидроэлектростанций потребовали разработки новых направлений в эксплуатации крупных ГЭС и автоматизированном контроле гидротехнических сооружений.*

*Ключевые слова: гидроэнергетика, электротехническое оборудование, волоконно-оптические датчики, автоматизированная система, диагностический контроль.*

## **USE OF FIBER AND OPTICAL SENSORS AS WAY OF IMPROVEMENT OF SYSTEMS OF THE AUTOMATED CONTROL OF HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS OF POWER PLANTS**

*Alterations and change of the existing rules of the maintenance, service and design of hydropower plants require the development of new directions in the operation of large hydro and automated control of hydraulic structures.*

*Key words: hydropower, electrotechnical equipment, fiber-optical sensors, the automated system, diagnostic check.*

Гидроэнергетика современной России – практически более 20% установленной мощности электроэнергетики. Это объекты, которые дают развитие инфраструктуре, потенциал и задел инвестиционному развитию страны.

Гидроэлектростанции – важнейший инструмент обеспечения надежности и безопасности работы энергосистемы: в России ГЭС обеспечивают свыше 90% резерва регулировочной мощности, т.е. при необходимости могут в считанные минуты увеличивать выработку, покрывая пиковые нагрузки. Гидротехнические сооружения ГЭС играют ключевую роль в защите от наводнений. Водохранилища гидростанций обеспечивают свыше трети объема хозяйственного и промышленного водоснабжения в России, свыше четверти объема орошения и обводнения, а регулирование стока рек позволят создавать глубоководные транспортные пути. Еще один важный аспект – это инструмент регионального развития территорий. Соответственно, надежное и эффективное функционирование гидроэнергетических объектов, бесперебойное электроснабжение потребителей – основа поступательного развития страны и неотъемлемый фактор обеспечения цивилизованных условий жизни ее граждан.

### **Краткое описание принципов построения ГЭС**

Плотина ГЭС – структурно сложное сооружение. В ее состав входят глухие плотины, станционные плотины, через которые вода по водоводам подается на турбины, водосливные плотины, с помощью которых регулируется уровень воды в водохранилище.

Система водосброса – один из ключевых элементов гидроузла. Уровень воды в перекрытой плотиной реке может значительно колебаться в зависимости от времени года и климатических факторов. Неконтролируемый сброс воды из верхнего бьефа или незначительное разрушение плотины способны привести к разрушению конструкции всей плотины. Именно поэтому плотину необходимо поддерживать в рабочем состоянии. Как и другие гидротехнические сооружения, она должна быть оборудована современными средствами мониторинга, способными предупредить и предотвратить действия, направленные на разрушение или повреждение сооружений ГЭС.

Непосредственно в самом здании любой ГЭС располагается все энергетическое оборудование. В зависимости от назначения оно имеет определенное деление на виды. В машинном зале расположены гидроагрегаты, преобразующие энергию потока воды в электрическую энергию, а также различное дополнительное оборудование: устройства управления и контроля работы ГЭС, трансформаторы, распределительные устройства и т.д.

В состав ГЭС могут входить дополнительные сооружения: шлюзы или судоподъемники, рыбопропускные, водозаборные сооружения и т.д.

### **Угрозы**

Ежегодно в мире на гидроузлах происходит около трех тысяч аварий. Из них значительное число – в период прохождения катастрофически сверхвысоких паводков и паводков, что связано, как правило, с недостатками проектно-технических решений, а также с плохой работой эксплуатационных служб.

Больше половины существующих гидротехнических сооружений считаются опасными, поскольку в нижнем бьефе водохранилищ расположены населенные пункты, объекты экономики и социальной инфраструктуры. Это означает, что люди живут под угрозой, проистекающей от возможных аварий на ГЭС. Зачастую плотины расположены настолько близко к городам, что в случае тяжелых аварий (например, прорыва плотины) у жителей близлежащих населенных пунктов не останется времени для эвакуации, поскольку волна распространяется очень быстро. Прорыв плотин неизбежно приводит к многочисленным жертвам.

Вопросы эксплуатации гидроэлектростанций освещаются в специальной литературе. Однако если в существующих литературных источниках достаточно полно и хорошо отображен опыт эксплуатации гидроэлектростанций малой и средней мощности, то практически нет обобщения особенностей эксплуатации, связанных с появлением сверхмощных гидроагрегатов и строительством высоких бетонных плотин. Кроме того, либо не показана вообще, либо очень слабо представлена зависимость эффективности и надежности эксплуатации крупных ГЭС от проектно-конструкторских решений. Более того, часто даже не придается значения вопросам обслуживания электротехнического оборудования при эксплуатации ГЭС на том основании, что оно имеет много общего с аналогичным оборудованием электростанций других типов. Между тем это утверждение неприменимо для крупных ГЭС, где в большинстве случаев оборудование уникально и представлено, как правило, головными образцами. Создание больших гидроэлектростанций с крупными гидроагрегатами, уникальным электротехническим оборудованием и средствами технологического управления, а также с высокими бетонными плотинами – это особое явление в электроэнергетике страны. Оно потребовало значительного расширения задач эксплуатации, перестройки и изменения сложившихся правил содержания, обслуживания и даже проектирования гидроэлектростанции. Понадобилась и разработка новых направлений в эксплуатации крупных ГЭС.

Особые требования, предъявляемые к работе энергетических гидросооружений, заключаются в следующем:

- 1) непрерывность действия, так как выход из работы гидросооружений ГЭС может вызвать нарушение электроснабжения;
- 2) работа при предельной нагрузке (наибольшая выработка электроэнергии требует максимальных расходов и напоров);
- 3) возможность работы при значительных колебаниях уровней и расходов воды, вызываемых уменьшением или увеличением величин нагрузки;
- 4) недопустимость большого содержания наносов в воде, тем более отложения их на сооружениях; отложение наносов в деривационных каналах сокращает их пропускную способность, а отложение их в напорных бассейнах может вызвать завал решеток; крупные наносы, проходящие через турбину, ускоряют износ лопаток рабочих колес;
- 5) большая маневренность в управлении водопропускными отверстиями, обусловленная возможными резкими изменениями в режиме работы ГЭС;
- 6) приспособленность к работе в зимних условиях при наличии льда, шуги.

Приведенные особенности работы гидроэнергетических сооружений, в свою очередь, определяют условия их эксплуатации. Например, необходимость непрерывности действия гидросооружений чрезвычайно затрудняет проведение реконструктивных и ремонтных работ. В большинстве случаев приходится ориентироваться на производство ремонтов при наличии воды, напора и течения.

Предельная нагрузка гидросооружений ГЭС заставляет осуществлять эксплуатацию особенно бдительно. С этой целью приходится вести непрерывные наблюдения за состоянием сооружений. Большая нагрузка и непрерывность действия гидроэнергетических сооружений требуют от персонала постоянного наблюдения за их состоянием, контроля геометрических и физико-механических параметров – как минимально необходимого требования, обеспечивающего безопасность и надежность работы этих сооружений в течение всего эксплуатационного срока. Естественно, что крупные строительные конструкции нуждаются в оперативных оценках состояния по большому числу физических параметров и по многим контрольным точкам, разнесенным в пространстве и времени. Системно подобная задача может быть решена лишь при комплексном внедрении автоматизированных средств контроля и измерений с использованием современных достижений вычислительной техники, радиоэлектроники и связи.

Между тем сегодня на многих гидротехнических сооружениях крупных гидроэлектростанций России используется техника наблюдения, относящаяся к поколению 30-летней давности, установленная в момент начала их строительства, что не отвечает требованиям безопасности работы этих сооружений (с учетом старения во времени материалов и деталей строительных конструкций). Одним из параметров контроля и мониторинга гидротехнических сооружений гидроэлектростанций является оценка прочностных характеристик по геометрической форме плотины (створа), для которой при воздействии различных внешних факторов (чередование времен года, изменение уровня водохранилища, сейсмических воздействий и др.) необходимо измерять перемещение отдельных участков гребня плотины. Существует несколько методов контроля геодезического створа сооружений гидроэлектростанций, которые включают различные варианты реализаций:

струнный створ – закладывается внутри плотины вдоль галерей и представляет собой подвешенную на береговых анкерах стальную струну, защищенную асбестовым трубопроводом. Для снижения провисания струна подвешивается на поплавках через определенные расстояния, порядка 20 м. Координаты смещения стенки трубы относительно струны измеряются вручную или с помощью оптических, индуктивных и емкостных датчиков, расположенных вдоль плотины; используется на большинстве гидроэлектростанций;

оптический створ – метод оптической пеленгации точечных источников света (лазеров и т.п.), расположенных в дискретных точках вдоль кромки плотины;

дифференциальный створ – если плотина состоит из нескольких десятков блоков (например, плотина Зейской ГЭС), относительное смещение которых под напором воды определяет в целом контур верхней кромки, то возможным вариантом измерительного створа может быть способ дифференциального измерения относительных смещений строительных блоков с использованием датчиков перемещения.

### **Применение волоконно-оптических датчиков и систем в автоматизированном контроле гидротехнических сооружений (ГТС) электростанций**

Автоматизированная система диагностического контроля (АСДК) регламентирована для ответственных напорных ГТС в целях повышения оперативности и достоверности оценки их безопасности федеральными руководящими документами и стандартами отраслей [1 – 3].

Функционально АСДК предназначена для обеспечения автоматизированного опроса датчиков, сбора информации, ее передачи, обработки и анализа в информационно-диагностической системе (ИДС) контроля гидротехнических сооружений.

АСДК должна выдавать предупреждение о превышении критериальных значений контролируемых показателей состояния (критериев безопасности), разработанных и утвержденных в установленном порядке. Система АСДК должна отвечать требованиям Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» № 117-ФЗ от 21.07.1997 г.

Современная аппаратура промышленного исполнения располагает широким ассортиментом первичных датчиков, в том числе интеллектуальных, имеющих высокие метрологические характеристики [4].

Существующее состояние автоматизации инструментальных наблюдений на ГТС электростанций и современный уровень автоматизации на промышленных объектах отражены в общей концепции построения АСДК, основанной на следующих принципах:

применение высоконадежных серийных датчиков промышленного исполнения для выполнения инструментальных наблюдений различного вида;

построение системы контроля открытого типа, позволяющей наращивать АСДК по мере необходимости с применением новых типов датчиков и аппаратуры от различных производителей;

построение распределенной системы дистанционного контроля по технологии промышленной сети с использованием серийно выпускаемых распределенных датчиков, модулей и контроллеров для компьютерной техники;

обеспечение сквозного доступа информации от распределенных измерительных датчиков до центрального пункта сбора данных на базе промышленного компьютера-сервера;

интегрирование выходов АСДК с информационно-диагностической системой (ИДС).

Выбор конкретной аппаратуры и датчиков производится по принципу необходимой достаточности с анализом показателей соотношения «цена – качество».

Под качеством датчиков понимается:

1. Повышенная надежность (срок службы – более 30 лет).
2. Повышенная помехоустойчивость (невосприимчивость к электромагнитным помехам, молниям).
3. Негигроскопичность и стойкость к агрессивным средам.
4. Отсутствие механических резонансов на частотах меньше 200 Гц.
5. Отсутствие электропитания и заземления в местах установки датчиков (дистанционность).

6. Долговременная метрологическая устойчивость.

7. Простота монтажа (встраиваемость) и эксплуатации (опрос множества датчиков).

Под ценой датчиков понимается удельная стоимость датчика в многодатчиковой АСДК с учетом величины эксплуатационных расходов на техническое обслуживание, калибровку, поверку и ремонт.

Наиболее полно критерию «цена – качество» начинают соответствовать относительно новые изделия на рынке – волоконно-оптические датчики (ВОД). В качестве первичных датчиков АСДК вместо точечных электронных датчиков давления, температуры, деформации, смещения, вибрации, сейсмики, акустической эмиссии, уровня и расхода могут быть использованы волоконно-оптические датчики точечного и распределенного типа.

### **Многофункциональный волоконно-оптический приборный комплекс**

Служит для мониторинга фактического состояния и прогноза остаточного ресурса ГТС с целью обеспечения их безопасности.

#### Основные характеристики системы

1. Количество датчиков в одной траектории, шт.....до 3000

2. Расстояние между датчиками, мм..... от 5

I. Контроль напряженно-деформированного состояния

3. Диапазон измерения деформации, микрострэйн (о.у. 10-6) $\pm$ 10000

4. Разрешение измерения деформации, микрострэйн $\pm$ 1,0

II. Контроль вибрации и акустической эмиссии

5. Диапазон измерения виброакустического сигнала, дБ.....>140

6. Разрешение акустоэмиссионной деформации

в диапазоне ультразвуковых частот от 50 до 500 кГц, микрострэйн.....10-5

III. Контроль сейсмических колебаний

7. Диапазон измерения сейсмического сигнала, дБ..... >160

8. Разрешение сейсмических перемещений

в диапазоне звуковых частот от 0,1 до 100 Гц, микрострэйн.....10-4

IV. Контроль теплового состояния

9. Диапазон измеряемых температур, °С.....от -60 до +600

10. Погрешность измерения температур, % от ВПИ.....0,1

V. Контроль влажностного состояния

11. Диапазон измеряемой влажности, % ..... от 1 до 100

12. Погрешность измерения влажности, % ..... 1,0

Сенсоризация производственной деятельности, т.е. замена органов чувств человека на датчики, должна рассматриваться в качестве третьей промышленной революции вслед за первыми двумя – машинно-энергетической и информационно-компьютерной. Потребность в датчиках стремительно растет в связи с бурным развитием автоматизированных систем контроля и управления, внедрением новых технологических процессов, переходом к гибким автоматизированным производствам. Помимо высоких метрологических характеристик, датчики должны обладать надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением, совместимостью с микроэлектронными устройствами обработки информации при низкой трудоемкости изготовления и небольшой стоимости. Этим требованиям в максимальной степени и удовлетворяют волоконно-оптические датчики.

Первые попытки создания датчиков на основе оптических волокон можно отнести к середине 1970-х гг. Оптоволоконная система непрерывного мониторинга состояния сложных инженерно-

строительных сооружений предназначена для измерения деформаций, температуры, давления на грунт, наклонов и прочих физических величин, необходимых для оценки безопасности состояния объекта. Система измерения разработана на основе принципа интерферометра Фабри-Перо и метода спектрального анализа с использованием оптической дифракционной решетки. Такие датчики перспективны при внедрении в промышленность благодаря устойчивости к влиянию паразитных параметров: дрейфа мощности излучения источника, неконтролируемых потерь мощности в волокне, потерь при стыковке волокна с помощью коннекторов. Основные преимущества системы перед электронными аналогами: взрывобезопасность измерения; проведение удаленных измерений; высокая чувствительность измерений; малый размер и вес датчика; автономность; многоканальность и универсальность. Области применения: мониторинг магистральных трубопроводов (нефтяных, газовых и др.), мониторинг сложных промышленных и других инженерных сооружений.

Особую важность на текущий период представляет проблема геодезического контроля плановых смещений тела плотины, которая в общем случае решается измерением смещений контрольных точек от положения вертикальных струнных отвесов, заложенных в конструкцию гидротехнического сооружения на этапе строительства. Данные средства измерения на сегодняшний день в моральном и техническом плане полностью устарели, характеризуются рядом существенных недостатков (малое межградуировочное время, аналоговый интерфейс, низкая помехоустойчивость и др.), вследствие чего требуют серьезной модернизации или полной замены.

Анализ научно-технической информации по проблеме измерений координат струнных отвесов гидротехнических сооружений позволяет сделать вывод, что существующие в мировой практике альтернативные методы и средства измерений (оптико-механические и оптоэлектронные) обладают рядом значительных преимуществ, среди которых общими являются высокий уровень автоматизации, а также невысокая стоимость установки и эксплуатации изделий.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований вошли в ряд НИОКР, выполненных по заказу ОАО «Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного» и ОАО «Зейская ГЭС».

Экспериментальные исследования доказали, что предложенный оптоэлектронный метод позволяет создать промышленный прибор с точностью измерения  $\pm 100$  мкм в диапазоне перемещений струны  $\pm 50$  мм.

Высокие метрологические характеристики изделия подтверждены сертификатом Госстандарта Российской Федерации, два промышленных образца изделия ФПКС-2 в настоящее время установлены на контрольных точках плотины Саяно-Шушенской ГЭС.

Таким образом, физическое старение гидротехнических сооружений предъявляет все более жесткие требования к техническим средствам контроля их состояния. Для получения достоверной информации о состоянии ГТС и возможности ее обработки на современном техническом уровне необходима разработка систем автоматизированного контроля и мониторинга гидротехнических сооружений. Эффективный контроль предлагается осуществлять за счет использования стационарных волоконно-оптических датчиков. Система удаленного контроля предусматривает создание дистанционной опрашиваемой аппаратуры, совмещенной с компьютером, способной посылать сигнал на установленные в массиве плотины датчики и принимать их значения. Это позволит оперативно определять коэффициент запаса устойчивости и вовремя принимать управляющие решения по обеспечению безопасности ГТС.

Использование системы дистанционного контроля позволит вести непрерывное наблюдение за исследуемыми объектами в режиме реального времени. Данные замеров могут быть сразу обработаны в виде величин текущего коэффициента запаса устойчивости. Реагирование устройства

на превышение установленных допустимых значений и своевременное информирование об этом позволит принять меры для устранения причин превышения нормативных показателей и предупреждения аварийной ситуации.

Всё большее значение находит комплексный подход к обеспечению безопасности плотин с учетом всех жизненных их циклов. Это означает, что вопросы обеспечения безопасности должны учитываться собственниками плотин при проектировании, строительстве, вводе в эксплуатацию, эксплуатации, реконструкции, восстановлении, консервации и ликвидации этих объектов.

- 
1. СТО 17330282.27.140.002-2008. Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений ГЭС. Условия создания. Нормы и требования.
  2. РД 34-20-501-95 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей России (п. 3.1.28).
  3. Шайдуров, Г. Я. Автоматизированный контроль гидротехнических сооружений. – Новосибирск: Наука, 2006. – 250 с.
  4. Буймистряк, Г.Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем. – СПб.: ИВА ГРОЦ Минатома, 2004. – 198 с.
  5. Крук, Д.Е., Шайдуров, Г.Я. Модернизация измерения координат струнных отвесов гидротехнических сооружений. // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 1.
  6. Крук, Д.Е. О возможностях создания фотооптического измерителя координат струнных отвесов // Сб. научных трудов «Современные проблемы радиоэлектроники» / под общ. ред. Ю.В. Коловского. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. – С.30-31.
  7. Каганов, Г.М. Анализ состояния низконапорных гидротехнических сооружений Российской Федерации на примере обследования гидроузлов Московской области // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 8. – С. 42-47.
  8. Зуй, В.Н., Панфилов, А.Ю., Пуневский, С.А. Автоматизированный контроль устойчивости дамб хвостохранилищ ЛГОКа и СГОКа // ГИАБ. – 2010. – № 2. – С. 135-141.
  9. Щербин, В. Отдача будет не скоро // Вестник РусГидро. – 2009. – № 2. – 16 с.