



УДК 621.316.21.001

БИСОВЕЦКИЙ Ю.А., нач. отд. гидротехнических сооружений
ОАО "Укрэнерго"
ТРЕТЯК К.Р., докт. техн. наук, проф., директор института геодезии
Национального университета "Львовская политехника"
ЩУЧИК Э.С., председатель правления АО "Банкомсвязь"



БИСОВЕЦКИЙ Ю.А.



ТРЕТЯК К.Р.



ЩУЧИК Э.С.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМИ СООРУЖЕНИЯМИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ УКРГИДРОЭНЕРГО

Состав натурального контроля за состоянием гидротехнических сооружений (ГТС) регламентируется нормативными документами действующими в Украине:

- СНиП 2.06.05-84 "Плотины из грунтовых материалов";
- СНиП 2.06.06-85 "Плотины бетонные и железобетонные";
- СНиП 2.02.02-85 "Основания гидротехнических сооружений";
- ГКД 34.20.507-2003 "Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей";

- СОУ-Н МПЕ 40.1.21.343:2005 "Состав и периодичность эксплуатационного контроля за состоянием гидротехнических сооружений гидравлических и тепловых электростанций".

В соответствии с указаниями нормативных документов натуральный контроль состояния сооружений должен проводиться, в том числе, и за вертикальными и горизонтальными перемещениями гидротехнических сооружений. В этой части украинский нормативный документ СОУ-Н МПЕ 40.1.21.343:2005 гласит:

- для плотин из грунтовых материалов I, II, III классов должны проводиться инструментальные наблюдения за горизонтальными смещениями гребня, берм и противофильтрационных устройств (п. 4.1.1);

- для бетонных и железобетонных ГТС I, II, III классов проводятся инструментальные наблюдения за вертикальными и горизонтальными смещениями (п. 4.2.3);

- горизонтальные смещения гребня высоконапорных бетонных плотин являются одной из важнейших характеристик для контроля за их работой и состоянием. Контроль необходимо производить путем сравнения измеренных во время

эксплуатации горизонтальных смещений с экстремальными смещениями, которые прогнозируются. Прогноз экстремальных смещений должен выполняться научно-исследовательской организацией на основании результатов натуральных наблюдений в начальный период эксплуатации. Наблюдения за горизонтальными смещениями должны проводиться не реже чем:

— на сооружениях на скальных основаниях в первые три года эксплуатации — один раз в год, в дальнейшем — один раз в три года;

— на сооружениях на нескальных основаниях в первые три года эксплуатации — 2–3 раза в год, в дальнейшем — один раз на два года. (п. 5.3.4).

Следует отметить, что осадки и горизонтальные смещения являются основными и наиболее показательными параметрами, необходимыми для диагностики состояния эксплуатируемых ГТС, и в нормативных документах, действующих в Украине, уделяется достойное внимание этому виду контроля.

Теория. Пространственное смещение сооружения под действием эксплуатационных нагрузок состоит из вертикальной и горизонтальной составляющих.

Вертикальное смещение сооружения вызвано осадкой плотины в результате деформирования

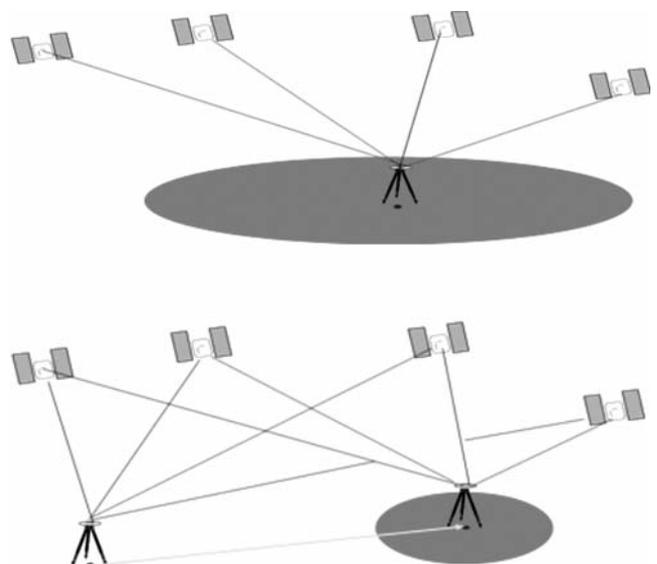


Рис. 1. Абсолютный и дифференциальный методы измерений приёмниками ГНСС



основания, а также изменения вертикальных размеров массива материала сооружения.

Горизонтальное смещение плотин обусловлено воздействием гидростатического давления на плотину и глобальными тектоническими изменениями ложа водохранилища, а также смещениями, связанными с сезонными изменениями температуры воздуха, воды и бетона.

На всех ГЭС, входящих в состав Укрэнерго, измерения осадок плотин и зданий ГЭС были предусмотрены проектом организации инженерно-геодезических работ в составе проекта натуральных наблюдений и исследований и выполнялись с начала строительства весь период эксплуатации с разной периодичностью (чаще 1 раз в год) собственными геодезическими службами ГЭС или привлеченными специализированными организациями. Полученные результаты измеренных осадок сравниваются с предельно-допустимыми показателями (ПДП), разработанными и пересматриваемыми с установленной периодичностью генеральной проектной организацией. Наблюдения за горизонтальными смещениями сооружений проектом натуральных наблюдений не предусматривались и долгое время не проводились, и только после появления нормативных документов установивших необходимость проведения таких наблюдений, на ряде ГЭС были выполнены циклы наблюдений специализированными организациями методом GPS:

- на Киевской ГАЭС – 2003, 2004 – Укринжгеодезия, 2009 – ЧП "Инжгео".
- на Каневской ГЭС – май и октябрь 2007, 2010 – Львовская политехника.
- на Кременчугской ГЭС – 2000, 2001 – Укринжгеодезия, 2007 – Львовская политехника.
- на Днепродзержинской ГЭС – май и октябрь 2007 – Львовская политехника.
- на Днепровской ГЭС – 1997 (2 цикла) – Укринжгеодезия, 2010 – Львовская политехника.
- на Днестровской ГЭС – 1997 – Укринжгеодезия, 2005 – Львовская политехника.
- на Днестровской ГАЭС – 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009 Львовская политехника.

Средняя квадратичная погрешность измерения горизонтальных смещений в последних циклах наблюдений составляла 2 мм, а вертикальных 3 мм.

Методология. Измерение осадок сооружений выполняется геодезическими методами – геометрическим или тригонометрическим нивелированием. Для наблюдений за осадками всех ГЭС Укрэнерго применяется высокоточное гео-

метрическое нивелирование. Осадка бетонных плотин на скальном основании определяется со средней квадратичной погрешностью ± 1 мм, на нескальном основании ± 2 мм. Для обеспечения наблюдений за осадками создана и функционирует высотная опорная сеть в составе фундаментальных реперов, рабочих реперов, высотных марок. Превышение одной точки сооружения над другой определяется посредством горизонтального луча визирования, для чего между наблюдаемыми точками устанавливается прецизионный (цифровой) нивелир, а на точках – инварные штриховые или кодовые рейки.

Измерение горизонтальных смещений сооружений выполняются геодезическими методами, основанными на точных линейных измерениях, линейно-угловых построениях, створных методах (оптический, струнный), измерения с помощью прямых и обратных отвесов, методы космической геодезии, а также комбинированные методы.

Методы космической геодезии используемые для мониторинга деформационных процессов гидротехнических объектов основаны на использовании Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС). К ним относится американская система GPS и российская – Глонасс. В настоящее время Европейским союзом создаются система Галилео и китайская система – Компас. Современные технологии космической геодезии используют систему GPS или одновременно GPS и Глонасс.

Обе системы состоят из трех сегментов (составных частей) – сегмент потребителей, космический и контрольный сегмент. Сегмент потребителей включает все технические средства, которые в состоянии принимать и распознавать спутниковые сигналы соответствующей системы. Космический сегмент состоит из 24 (проектное количество) спутников, установленных на круговых орбитах на высоте приблизительно 20000 км. Равномерное покрытие спутниками околоземного пространства, обеспечивает в любое время прямую видимость, как минимум четырех спутников с любой точки с открытым горизонтом на земной поверхности. Космический сегмент обеспечивает пользователей спутниковыми сигналами необходимыми для проведения позиционных измерений. Контрольный сегмент выполняет мониторинг орбит спутников, контролирует работу всех систем космического сегмента и обеспечивает его функционирование необходимой информацией о точном времени.

Спутниковые приемники сегмента пользователей на основании принимаемых спутниковых сигналов, определяют свое местоположение в ви-



де трех пространственных координат (X,Y,Z) или трёх геодезических координат — широта, долгота и высота (B,L,H), а также определяют точное время эквивалентное шкале атомного времени. Упрощенная схема определения местоположения приемника спутниковых сигналов представлена на Рис. 1. Спутники посылают с излучаемым сигналом свои координаты и время выхода сигнала из антенны спутника. Время определяется с помощью атомных часов установленных на спутнике. Сигнал достигает антенны приемника и в этот момент с помощью кварцевых часов приемник фиксирует время прихода сигнала на антенну приемника. Разница моментов времени прихода сигнала на антенну приемника и выхода сигнала с антенны спутника определяет время прохождения сигналом расстояния от спутника до приемника. Умножая полученную разницу времени на скорость распространения радиоволн вычисляем расстояние от спутника до приемника. Имея одновременно координаты трёх спутников и расстояния до них, легко вычисляются координаты приемника. Однако приемник измеряет расстояние до четвертого доступного спутника и на основании этого измерения определяет поправку своих кварцевых часов к шкале атомного времени часов спутника, что необходимо для получения субметровой точности определения координат приемника. Этот метод используется для навигационных измерений, и получил название абсолютного метода. Повышение точности абсолютного метода ограничивают погрешности координат спутников, передаваемые с сигналом, изменение скорости прохождения радиоволн через слои ионосферы и тропосферы и другие источники погрешностей.

Для проведения геодезических измерений этот метод неприемлем ввиду недостаточной точности. В геодезии используют дифференциальный метод. Методика состоит в одновременном использовании как минимум двух приемников, которые на протяжении некоторого времени измеряют расстояния до тех же спутников с двух точек.

В результате постобработки измерений вычисляются не расстояния до спутников, а их разницы. До каждого наблюдаемого спутника определяются разницы расстояний с двух точек на земной поверхности. В результате обработки полученных разностей расстояний определяют не координаты точек на земной поверхности, а их разности. Дифференциальный метод благодаря компенсации большинства погрешностей в результатах измеряемых разностей измерений, позволяет достичь субмиллиметровой средней квадратической погрешности измерения векторов

(разности координат двух точек). На основании обработки значительного количества измеряемых векторов в геодезической сети определяются надежные координаты пунктов. Повторные циклы наблюдений позволяют определять смещения пунктов сети. Для получения максимально возможной точности определения смещений пунктов геодезических сетей на гидротехнических объектах необходимо проводить измерения отдельных векторов в течение минимум 6-ти часов. Обычно при наличии нескольких десятков пунктов в сети период всех измерений с помощью пяти — семи ГНСС приемников занимает в среднем от 6-ти до 10-ти дней.

С помощью обратных отвесов выполняются наблюдения за относительными горизонтальными смещениями сооружений Киевской ГАЭС и Днестровской ГЭС, а на строящейся Днестровской ГАЭС предусмотрены проектом натурные наблюдения и находятся в стадии внедрения. Обратный отвес представляет собой проволоку, один конец которой закреплен в забое скважины в основании плотины, а другой погружен в бак с жидкостью и поддерживает проволоку в вертикальном натянутом положении. Измерения по отвесам выполняются определением положения проволоки относительно сооружения по его высоте с помощью оптических (механических) средств измерения.

АСК ГТС Укрэнерго. В Укрэнерго проходит завершающий этап автоматизации инструментальных наблюдений за состоянием ГТС ГЭС. На первом этапе в составе проекта Системы обеспечения безопасности ГТС (СОБ ГТС) были созданы автоматизированные системы ГТС Киевской, Кременчугской и Каховской ГЭС. Функционирующие АСК ГТС представляют собой постоянно действующие системы, которые состоят из сенсоров (первичных преобразователей) установленных в точках контроля, локальных систем сбора информации (мультиплексоров), серверов, рабочих станций, каналов связи, специального программного обеспечения. Основной целью создания АСК преследуется идея максимальной автоматизации инструментальных наблюдений, выполнявшихся ранее ручным способом, а также максимально возможная автоматизация обработки полученных результатов измерений. При комплексном подходе к задаче глобальной автоматизации измерений и обработки контролируемых показателей состояния сооружений, возможно достичь минимизации влияния человеческого фактора на точность измерений, обработку полученных результатов, и как следствие, устранить возможность принятия неверных

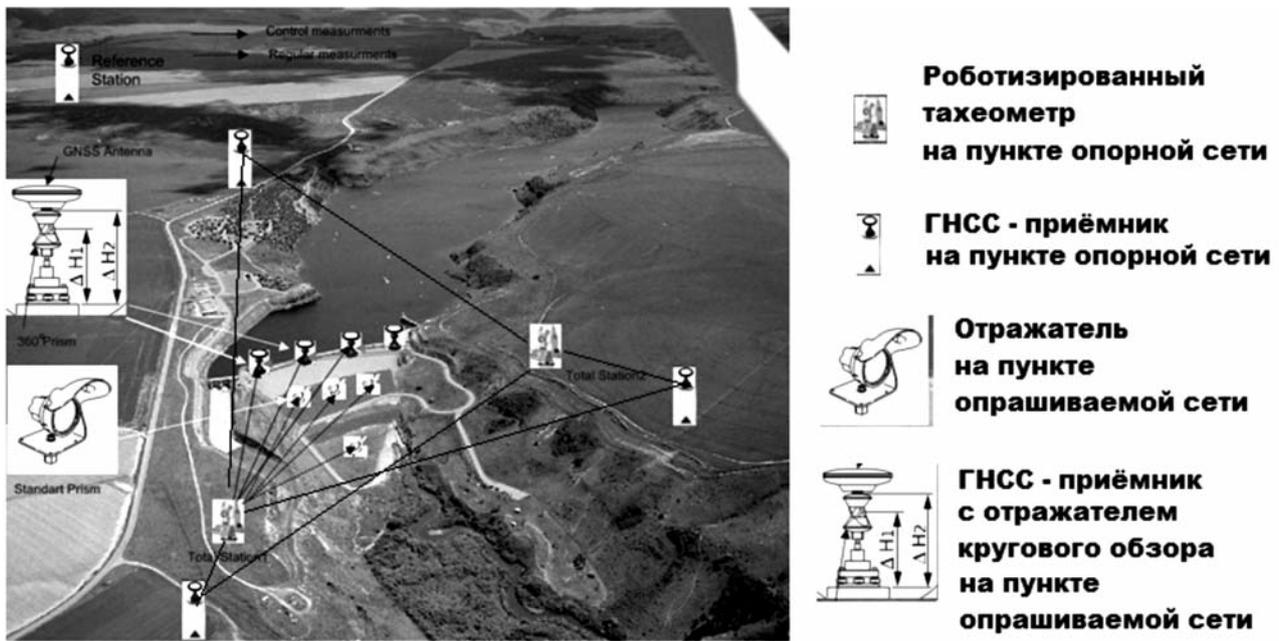


Рис. 2. Схема геодезического мониторинга ГТС

решений основанных на недостоверной информации. В созданных АСК реализована автоматизация большей части контролируемых показателей, установленных изначальным проектом натуральных наблюдений, однако геодезические наблюдения остались неохваченными автоматизацией.

Следует отметить, что автоматизация геодезических наблюдений за осадками гидротехнических сооружений технически усложнена большой протяженностью и значительными перепадами высот инженерных сооружений, и только в отдельных случаях на локальных участках бетонных плотин возможно устройство систем гидростатического нивелирования. Система представляет собой стационарную установку гидростатического нивелирования, состоящую из вертикально установленных измерительных кобл, укрепленных на швах между секциями плотины в продольных или поперечных галереях (потернах) и соединенных между собой гибкими шлангами. Система заполняется жидкостью, в местах измерения устанавливаются автоматические сенсоры измеряющие уровень воды в конкретной точке системы. Уязвимым местом систем гидростатического нивелирования, является проблема обеспечения их термостатичности и постоянная опасность повреждения соединительных шлангов в условиях эксплуатации сооружений ГТС.

Автоматизация геодезических работ по выполнению геометрического нивелирования в некоторой степени решается применением современных электронных нивелиров с сохранением результатов нивелировки непосредственно в блок памяти нивелира и последующего сохранения результатов в базе данных АСК при подключении нивелира к системе. Однако, эти системы в насто-

ящее время имеют тоже локальное применение.

В отличие от наблюдений за осадками во внутренних помещениях сооружений, в настоящее время, с высокой эффективностью поддается автоматизации другая часть геодезического мониторинга — наблюдения за пространственными и горизонтальными смещениями сооружений методами космической геодезии. В функционирующих в Укрэнерго АСК этот вид контроля не был реализован по причине недостаточной точности подобных систем мониторинга основанных на ГНСС — измерениях, на время создания АСК.

На сегодняшний день произошло значительное развитие технических средств, методологии измерений для обеспечения достаточной точности измерения горизонтальных смещений ГТС. Как правило, такие системы представляют собой интегрированный комплекс перманентной геодезической сети состоящей из двух групп опорных пунктов. На первой группе установлены прецизионные ГНСС приемники с отражательными призмами кругового обзора, а на второй установлены роботизированные электронные тахеометры. На остальных опрашиваемых пунктах сети, которые размещены на горизонтальных площадках устанавливают ГНСС приемники и могут дополнительно устанавливаться отражательные призмы кругового обзора, а на пунктах закрепленных на вертикальных или наклонных стенах сооружений устанавливают отражательные призмы. Роботизированные тахеометры непрерывно измеряют горизонтальные и вертикальные углы, а также расстояния до опорных пунктов и опрашиваемых пунктов, используя в качестве визирных целей обычные отражательные призмы или с круговым обзором. Все данные измерений с помощью раз-



Рис. 3. Модель 6850. Электронное устройство обратного отвеса

личных средств связи передаются в режиме реального времени в центр обработки информации, в который с помощью сети Интернет поступают данные ГНСС измерений из ближайших

перманентных станций государственной сети. Центр непрерывно выполняет обработку измерений. Таким образом, опорная сеть ГНСС приемников задает на территории ГТС независимую от локальных геодинамических деформаций координатную систему. В эту систему включаются опорные пункты с установленными роботизированными электронными тахеометрами и пункты опрашиваемой сети. Интеграция линейно-угловых и ГНСС измерений позволяет в режиме реального времени непрерывно вести контроль опорной геодезической сети и определять реальные смещения пунктов опрашиваемой сети.

Для реализации АСК на остальных ГЭС Укрэнерго генеральной проектной организацией Укрэнергопроект были разработаны концептуальные проекты АСК ГТС Каневской, Днепро-Дзержинской, Днепровской и Днестровской ГЭС. В сотрудничестве с международным консультантом Укрэнерго – Electricite de France (EDF) был разработан тендерный документ, с учетом международного опыта EDF, в части создания систем мониторинга ГТС, и проведены международные тендерные торги. Победители, с которыми подписаны контракты, определены – украинская компания системный интегратор "Банкомсвязь", задача которой создать автоматизированные системы контроля основных показателей состояния ГТС четырех указанных выше ГЭС, а также Каскадный центр безопасности и швейцарская компа-



Рис. 4. Обратный отвес в галерее арочной плотины Тинь (Франция)

ния-производитель высокоточного геодезического оборудования Leica, задача которой создать перманентные системы мониторинга пространственных перемещений ГТС четырех ГЭС.

В системах создаваемых Банкомсвязь будет реализован, в том числе, и автоматический съем показаний с обратных отвесов на Днестровской ГЭС с помощью установки стационарного устройства американского производителя Geokon.

Основные характеристики:

Стандартный диапазон – X от 0 до 50 мм,
Y от 0 до 50 мм

Разрешение – 0,01 мм

Точность – меньше 0,1 мм

На Днепровской ГЭС, которая имеет сравнительно небольшую протяженность сооружений, будет установлена система гидростатического нивелирования производства Geokon.

Основные характеристики:

Стандартный диапазон – 75 мм.

Разрешение – 0,025 мм.

Точность – + 0,1 % полной шкалы.

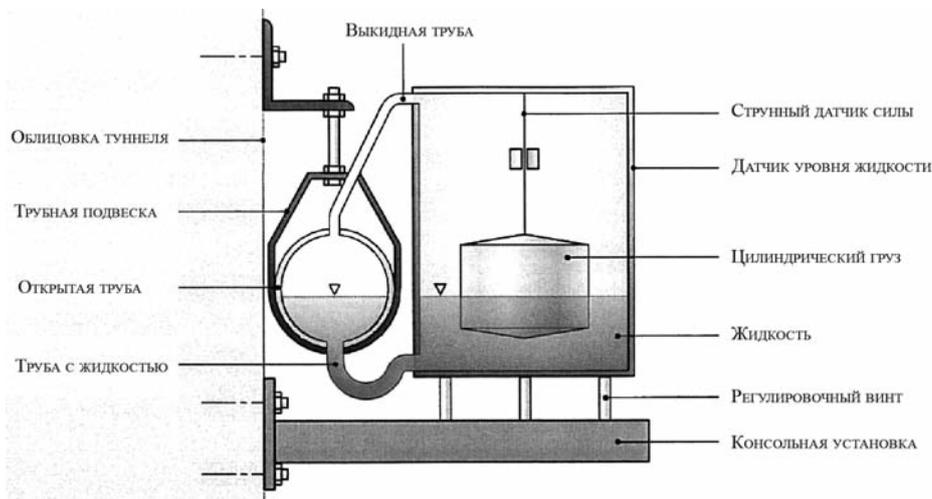


Рис. 5. Принципиальная схема системы гидростатического нивелирования. Модель 4675 ОС



Рис. 6. Система гидростатического нивелирования, установленная в здании железнодорожного вокзала в г. Цюрих на период строительства туннеля под существующими сооружениями



Рис. 7. Приемник Leica GMX 902 GG



Рис. 8. ГНСС приемник GMX 902 GG на пункте опорной сети для мониторинга деформаций подвесного моста через реку Янцзы в Китае

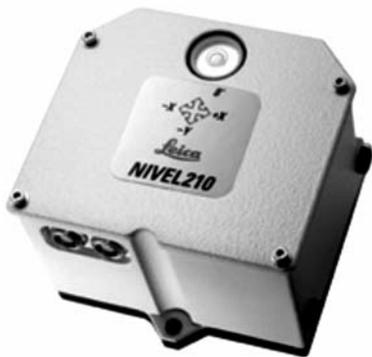


Рис. 9. Датчик наклона Nivel 210



Рис. 10. Роботизированный тахеометр Leica TS30

ков системы GPS и 12 спутников Глонасс. Приемник использует прецизионные антенны Leica AX1202 GG или AT504 GG.

В течение суток под воздействием неравномерного нагрева солнечными лучами пилонов с установленными ГНСС антеннами, происходят их периодические колебания. С целью учета этих колеба-

Также в АСК Днепровской ГЭС с помощью экстензометров производства Geokon, которые будут установлены в предварительно пробуренные скважины, будет выполняться автоматический контроль:

- деформации скального массива основания плотины – сенсоры распределяются таким образом, чтобы нижний анкер крепился на дне скважины, а верхний – выше шва бетон-скала. Промежуточные анкеры распределяются равномерно, а оголовок сенсоров крепится к верхнему слою бетонного массива сооружения. Глубина скважин составляет от 36 до 54 м, из них 18–20 м в скальном массиве.

- горизонтальной деформации контакта бетон-скала вдоль потока.

- вертикальной деформации контакта бетон-скала.

Экстензометр состоит из трех основных частей: анкера, стержня и сенсора (измерителя) смещений. Стержень соединяет индикатор с анкером, представляющим собой механически расширяющуюся конструкцию, изготовленную на базе клина, конуса или пружины и крепящуюся к стенке скважины.

Система геодезического мониторинга предполагает использование геодезического оборудования компании Leica (Швейцария).

На опорной и опрашиваемой сети будут использоваться ГНСС приёмники Leica GMX 902 GG. Этот приемник разработан специально для целей мониторинга инженерных сооружений. Эффективно интегрируется в систему мониторинга и дистанционно управляется с помощью программного обеспечения Leica GNSS Spider. Может быть использован в комбинации с устройствами связи (GSM-модемами) для передачи данных в реальном времени в центр обработки информации. Для определения высокочастотных смещений или колебаний периодичность определения координат пункта может выполняться с частотой 0,05 с. Приемник Leica GMX 902 GG может одновременно принимать сигналы на двух частотах от 14- спутников системы GPS и 12 спутников Глонасс. Приемник использует прецизионные антенны Leica AX1202 GG или AT504 GG.

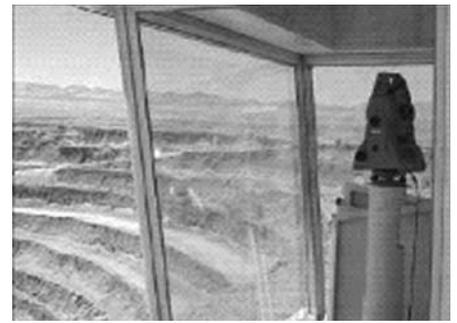


Рис. 11. Мониторинговая станция. Leica TS30 в термостатированном павильоне



Рис. 12. Цифровой нивелир DNA03



Рис. 13. Отражатели устанавливаемые на опрашиваемых пунктах (сверху кругового обзора)



ний при обработке измерений будут использованы прецизионные датчики наклона Nivel 210, работающие на принципах оптоэлектроники, и позволяющие в режиме реального времени определять углы наклона по двум осям конструкции, на которой он установлен. Датчик одновременно записывает изменение температуры. Точность определения углов наклона 0,2". Скорость изменений наклонов 0.3 с.

Для проведения линейно-угловых измерений на пунктах опорной сети будут использоваться высокоточные автоматизированные тахеометры Leica TS30.

Точность измерения углов будет в пределах 0,5", а измерения расстояний 0.6 мм + 1мм/км. В зависимости от атмосферных условий тахеометр способен измерять расстояния до 12 000 м. Тахеометр оборудован системой быстрого поиска цели, наведения и слежения за отражателем.

У TS30 технология прямого пьезопривода позволяет производить высокоточные измерения со скоростью 5 000 измерений в секунду. Скорость вращения зрительной трубы может превышать 180 градусов в секунду.

Для автоматизации измерения превышений в системе мониторинга будет использован высокоточный нивелир, который работает по методике сравнения результатов измерений с задаваемыми пользователем допусками. Стабильные результаты достигаются с помощью автоматической компенсации температурного влияния на измерения.

Обработка результатов измерений их интегрирование и анализ будет выполняться программным обеспечением GeoMoS. В систему обработки данных будут одновременно интегрированы геотехнические датчики и геодезические приборы, что позволит всесторонне наблюдать за деформационными процессами, протекающими на ГТС. GeoMoS будет управлять данными и накапливать собранную информацию, а также оперативно с использованием технологии web browser или по мобильному телефону, оповещать соответствующие службы о критических накоплениях деформаций, находясь в любом месте, в любое

время карманному или персональному компьютеру. Программа GeoMoS может рассылать SMS сообщения через Интернет. Программное обеспечение GeoMoS может показывать на экране монитора данные с подключенных датчиков и геодезических приборов, что позволяет просматривать и анализировать накопленные данные через Интернет, как в режиме реального времени, так и с последующей обработкой.

Выводы. Таким образом, в результате реализации контрактов с компаниями Банкомсвязь и Leica на всех ГЭС Укрэнерго будут функционировать полномасштабные автоматизированные системы контроля ГТС, в центральном офисе Укрэнерго (г. Вышгород) будет создан Каскадный центр безопасности ГТС, куда будет передаваться, храниться и обрабатываться специальным программным обеспечением информация из стационарных АСК. В процессе строительства Днестровской ГАЭС поэтапно внедряется автоматизация контроля ГТС, в том числе и геодезическая составляющая, и в будущем АСК ГТС Днестровской ГАЭС будет интегрирована в общую систему безопасности ГТС Укрэнерго.

Создание полномасштабной АСК Днепровского и Днестровского каскадов значительно повысит оперативность получения информации о состоянии сооружений и принятия решений о выполнении ремонтных и реконструктивных мероприятий, а также обеспечение безопасности ГТС в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *СОУ-Н* МПЕ 40.1.21.343:2005 "Состав и периодичность эксплуатационного контроля за состоянием гидротехнических сооружений гидравлических и тепловых электростанций".
2. *ГКД* 34.20.507-2003 "Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей".
3. *П83-2001*. ВНИИГ. Рекомендации по анализу данных и проведению натурных наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями бетонных плотин. Санкт-Петербург. 2001.
4. *Инструментальный* контроль за состоянием гидротехнических сооружений./ Под общей редакцией А.Г. Васильевского. — М.: НТФ "Энергопрогресс", "Гидротехническое строительство", 2001.

© Бисовецкий Ю.А. Третяк К.Р. Щучик Э.С., 2011

