

УДК 621.396.98

С.Н. Флерко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГНСС ТЕХНОЛОГИЙ

*Представлена методика и основные принципы построения системы непрерывного геодинимического мониторинга гидротехнических сооружений и других объектов техногенного и природного характера на основе использования высокоточных технологий и аппаратно-программных средств глобальных спутниковых навигационных систем. Выполнен анализ потенциальных характеристик точности функционирования*

**Ключевые слова:** геодинимический мониторинг, глобальные навигационные спутниковые системы, базовые станции, RTK режим.

### Введение

**Постановка проблемы.** В последнее время резко возросла актуальность изучения геодинимических процессов, происходящих в приповерхностных геологических структурах на локальных территориях, которые характерны для городов и зон расположения крупных инженерных сооружений. С этой целью в упомянутых регионах создаются специализированные геодинимические полигоны, используемые для периодических или постоянных наблюдений и последующего изучения тектонических, техногенных, физико-химических и других процессов, обуславливающих изменение свойств и состояния пород. Данные процессы могут приводить к возникновению опасных деформаций как земной поверхности, так и расположенных на ней различного рода сооружений. При этом, крупные гидротехнические сооружения электроэнергетической отрасли в связи с этим должны рассматриваться как приоритетные с точки зрения организации контроля и мониторинга. К числу критичных объектов, требующих мониторинга относятся как уже эксплуатируемые, так и строящиеся гидротехнические сооружения. При этом, должны применяться комплексные подходы построения геодинимических полигонов, использующие разнородные по физическому принципу источники получения необходимой информации.

Технологии и аппаратно-программные средства ГНСС (GPS (США) и ГЛОНАСС (РФ), а в перспективе и Европейской системы Galileo) становятся все более массово используемыми практически во всех областях деятельности человека. Как показал **анализ литературы** [1 – 5], в некоторых (специальных) случаях достигается сантиметровый уровень точности при абсолютных определениях и миллиметровый уровень – при относительных. ГНСС технологии практически не имеют конкурентов по критерию эффективность/стоимость практически во всем спектре приложений. Особо следует выделить

задачи геодинимического и экологического мониторинга, многие из которых решаются в квазиглобальном масштабе при международном взаимодействии. В качестве примеров можно назвать IGS-сети перманентных станций, национальные CORS-системы многих стран мира. Эти системы служат интересам изучения геодинимических явлений, таких как движение тектонических платформ, землетрясения, вулканическая активность, связанных с этим ионосферных, атмосферных и геомагнитных явлений, параметров вращения Земли, т.д. В ряде стран мира созданы специальные региональные и локальные геодинимические полигоны, оснащенные и ГНСС оборудованием. Несмотря на мировые тенденции развития, в Украине до сих пор не реализовано ни одной системы непрерывного мониторинга на основе ГНСС технологий ни на крупных гидрографических объектах (Днепроовская ГЭС, Киевская ГЭС, Новоднестровская ГАЭС, Каневская ГАЭС и т.п.), ни на природных склонах с оползнеопасной обстановкой. На данных объектах в лучшем случае выполняются сезонные периодические и дорогостоящие ГНСС наблюдения, дающие только отрывочные и неоперативные данные о структурных изменениях контролируемых объектов.

В данной статье представлены результаты разработки методики и основных принципов построения системы мониторинга гидротехнических сооружений с использованием высокоточных технологий глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС). Основной задачей системы является осуществление оперативного и надежного контроля возможных горизонтальных смещений выбранных пунктов (объектов) мониторинга с целью предотвращения или предупреждения крупных техногенных катастроф.

### 1. Общие принципы построения системы

Для реализации системы непрерывного мониторинга первоначально необходимо четко определить на

местности группу опорных пунктов с целью организации базисной измерительной сети и группу контролируемых (рабочих) пунктов, данные о смещениях которых относительно базисной сети и будут определяющими в процессе мониторинга. Наиболее важной задачей является определение опорных пунктов. Существующие на этот счет рекомендации сводятся к целесообразности расположения твердых (опорных) пунктов в местах выхода скальных пород. Применительно, например, к региону расположения Днестровской ГАЭС, реализовать такую рекомендацию не всегда представляется возможным. Исходя из этого, на практике должен использоваться подход, который базируется на комплексных геологических и геоморфологических исследованиях. При этом, немаловажным является вопрос об определении минимально необходимого количества опорных пунктов. В большинстве уже реализованных в мире систем применяются 2 – 3 базовых станции (опорных пункта), относительно которых и определяются все возможные смещения контролируемых точек. Однако, как показывает опыт специалистов Московского государственного университета геодезии и картографии, а также Института прикладных наук Карлсруйского Технического Университета, с точки зрения построения устойчивых измерительных систем целесообразно построить замкнутый контур каркасной сети, чтобы все контролируемые точки находились внутри описываемой фигуры. Исследования, проведенные в этой области, свидетельствуют о целесообразности использования на локальных геодезических полигонах не менее 4 – 5 пунктов. В этом случае удастся получить устойчивую геометрическую конфигурацию, позволяющую выполнять уравнивание (adjustments) результатов контрольных измерений. При этом обеспечивается достаточно высокая достоверность определения смещений контрольных пунктов сети, а также возможность отдельного получения информации об остаточном влиянии систематических ошибок спутниковых определений и о реальных значениях изучаемых деформаций земной поверхности и элементов строительных конструкций. Пример возможной конфигурации представлен на рис. 1.

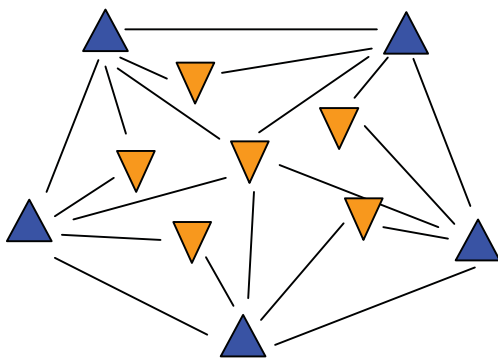


Рис. 1. Пример возможной геометрической конфигурации измерительной системы: ▲ – опорные (каркасные) пункты; ▼ – контролируемые пункты

При выборе мест расположения контролируемых пунктов внутри каркасной сети целесообразно учитывать наиболее критичные с точки зрения безопасности элементы конструкции объектов и места наиболее вероятных ощутимых проявлений тех или иных деформаций земной поверхности.

Например, для случая строящейся Днестровской ГАЭС с учетом пространственного расположения технических и природных объектов можно предложить следующий дислокацию (рис. 2).

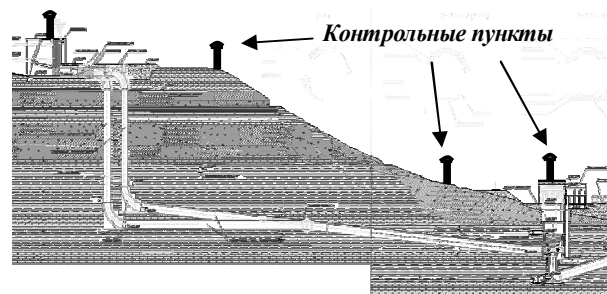
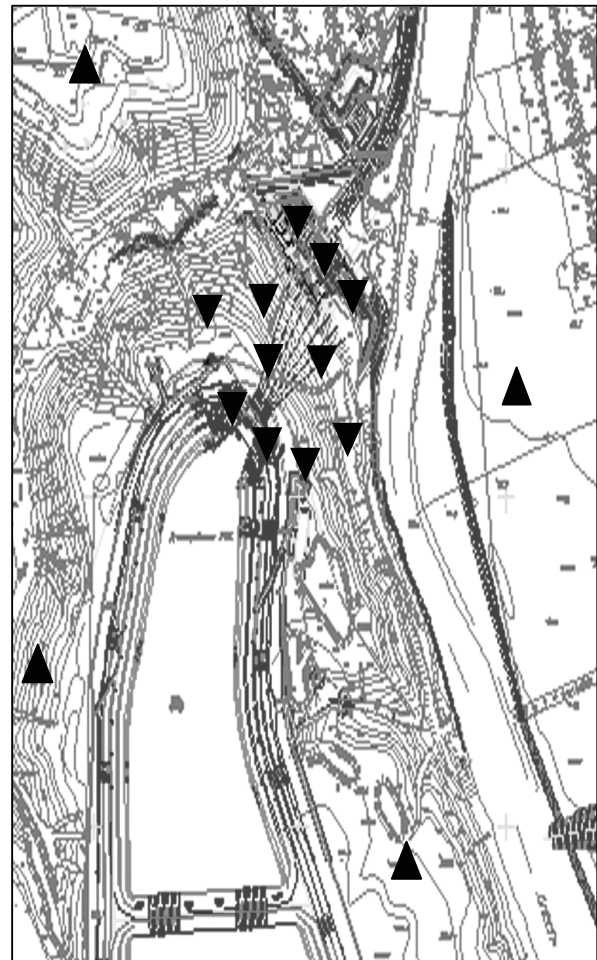


Рис. 2. Вариант расположения опорных и контрольных пунктов (вид сверху и сбоку)

В данной схеме предлагается разместить на местности четыре опорных пункта желательно совместив их с геодезическими знаками с принудительным центрированием.

Как видно из рис. 2 данные пункты будут образовывать неправильный четырехугольник с пунктами на юго-западе, на севере, на северо-востоке и юго-востоке, Внутри периметра четырехугольника будут находиться все основные сооружения ГАЭС, а также практически все природные зоны, требующие контроля. Контрольные пункты предлагается организовать в качестве постоянно действующих. При этом, на местности могут быть организованы дополнительные контрольные пункты для периодических наблюдений с целью мониторинга других зон и объектов ГАЭС. Антенны ГНСС станций устанавливаются на опорных и контролируемых пунктах на специальных конструкциях, называемых «пиллары».

Стандартно пиллар пункта, размещаемого на местности, имеет следующую конструкцию. Бетонный столб диаметром 35 см с металлическим окончанием в верхнем основании (диаметр окончания 5/8 дюйма или около 15 мм с резьбой) Важнейшим элементом пилларов используемых для задач ГНСС мониторинга является защита от солнечного нагрева. Для обеспечения такой защиты пиллар помещается в металлическую трубу, которая не касается стенками бетонной конструкции. При реализации данного конструктива обеспечиться достаточно надежная защита от эффекта сужения – расширения основного материала (бетона) при воздействии различных по времени сезонных и суточных вариаций температуры. Отсутствие специализированной защиты вокруг пиллара может привести к вариациям бетона в зависимости от температурного режима на величины около 1,2 мм, что может нивелировать точностные характеристики метода измерений. Вся конструкция пиллара заглубляется в грунт ниже средней глубины его промерзания.

Важнейшим моментом при размещении пунктов является обеспечение максимально возможной открытости небесной сферы. Особенно критичным данное требование является для пунктов опорной сети. Стандартно в задачах мониторинга с обеспечением высочайшего урон точности определений принимается отсечка измерений по углу мета (визирования) меньше, чем  $20^0$  от уровня местного горизонта. Тем не менее на опорных пунктах необходимо обеспечивать зоны открытости практически до  $0^0$ , по крайней мере, в тех местах, где это представляется возможным.

Система должна иметь единый центр обработки и анализа, а для обеспечения ее функционирования все элементы оборудуются каналами связи (по возможности проводными. При невозможности – радио, GSM или CDMA).

Функциональная схема системы представлена на рис. 3.

Для решения поставленных задач система должна выполнять следующие функции:

- формирование устойчивой постоянно контролируемой местной системы координат для обеспечения фундаментальной основы решения задачи мониторинга деформаций;

- одновременное измерение текущих первичных навигационных параметров (ТПНП) сигналов спутников ГНСС на всей совокупности измерительных пунктов с темпом 1...20 Гц;;

- измерение параметров текущего состояния окружающей среды (температуры, влажности и атмосферного давления) для выполнения коррекции измерений по сигналам ГНСС относительно тропосферной погрешности;

- передача в реальном масштабе времени (РМВ) измерительных данных от всей совокупности пунктов в центр обработки и анализа информации;

- идентификация принадлежности измерений к соответствующим пунктам, администрирование элементов системы;

- регистрация и архивирование всех измерительных данных системы;

- одновременная обработка всех измерительных данных системы в едином центре с целью выявления горизонтальных смещений контролируемого сооружения, определение статистических характеристик полученных оценок;

- анализ информации и формирование удобных графических и табличных отчетов о состоянии процесса деформации контролируемого сооружения на основе накопления информации (суточной, недельной, месячной и сезонной);

- периодический контроль стабильности координат опорных пунктов.

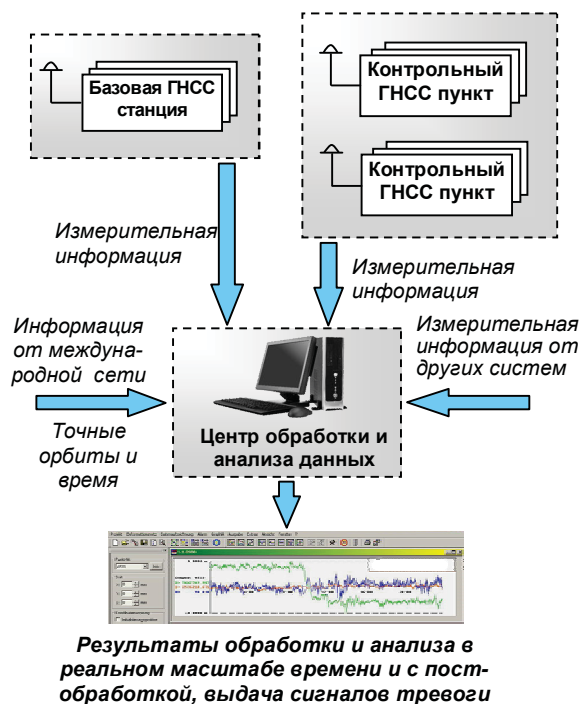


Рис. 3. Функциональная схема построения системы

Таким образом, система мониторинга должна состоять из четырех основных элементов: совокупности базовых ГНСС станций, совокупности контрольных ГНСС приемников, подсистемы сбора и передачи данных, центра обработки и анализа измерительной информации.

Для обеспечения высокой точности и надежности функционирования системы все ее пункты должны быть оборудованы двухчастотными GPS+ГЛОНАСС приемниками с антенными устройствами, имеющими высокостабильное положение фазовых центров.

При построении подсистемы сбора и передачи данных необходимо использовать высокоскоростные цифровые радиомодемы. Как альтернатива может рассматриваться организации передачи данных с использованием кабельных линий по интерфейсу RS-242.

## 2. Анализ потенциальных характеристик точности функционирования системы

В основу функциональной способности рассматриваемой системы положен принцип сетевого режима RTK (real time kinematik), когда относительно фиксированных и известных координат опорных пунктов в реальном масштабе времени определяются координаты контрольных пунктов. Геометрически принцип реализации сетевого RTK метода представлен на рис. 4.

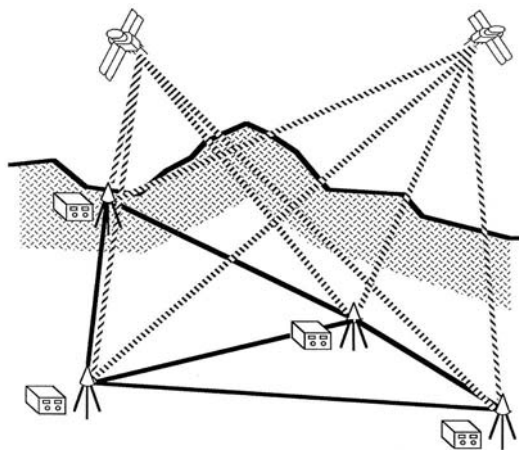


Рис. 4. Принцип реализации сетевого RTK метода

При сетевом RTK методе результирующая точность спутниковых координатных определений может быть существенно повышена. Во-первых, сеть из нескольких приемников, как правило, имеет строгую геометрическую конфигурацию. При этом погрешности определения отдельных базовых векторов (линий) в сети могут быть снижены за счет весовой обработки результатов определений совместно с другими векторами.

Таким образом, может быть строго реализовано, так называемое уравнивание результатов измерений.

Во-вторых, задача достижения максимальной точности еще более упрощается за счет относительной стабильности точек наблюдения и непрерывности самого измерительного процесса.

Длина базовых расстояний в ГНСС сетях мониторинга не превышает 500 м – 1 км, что при условии дополнительных мер по учету некоррелированных и плохо моделируемых погрешностей, может позволить достичь точности определения относительных изменений координат контролируемых точек на уровне инструментальной точности фазовых измерений, т.е. около 1...2 мм. В наиболее общем случае на результаты спутниковых измерений координат оказывать влияния комплекс погрешностей, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Баланс основных источников погрешностей

Источники погрешностей	СКО измерений, м	
	кодовых	фазовых
1. ШВ* спутников	3	3
2. эфемериды	0,7...1,0	0,7...1,0
3. ионосфера	5...45	5...45
4. тропосфера	2...15	2...15
5. многолучевость	2...15	0,1...0,3
6. шумы приемника	0,75...1,5	0,001...0,002

\* ШВ – шкалы времени

Уравнения измерений на заданный момент времени для опорных и контрольных пунктов можно представить как:

$$D = p + c(dt - dT) + d_{\text{ион}} + d_{\text{троп}} + \delta d_D;$$

$$\Phi = p + c(dt - dT) + \lambda N - d_{\text{ион}} + d_{\text{троп}} + \delta d_{\Phi},$$

где  $D$  – измеренное значение псевдодальности до конкретного спутника,

$D = c dt$ ;  $d_{\text{ион}}$  – изменение дальности, связанное с воздействием ионосферной погрешности;

$d_{\text{троп}}$  – изменение дальности, связанное с воздействием тропосферной погрешности;

$\delta d_D$  – воздействие флуктуационной погрешности и погрешности из-за приема пере отраженных сигналов;

$\Phi = \lambda \phi$  – геометрическая интерпретация фазовой псевдодальности, полученной методом перемножения измеренного значения фазы несущей  $\phi$  на величину длины волны  $\lambda$  соответствующего несущего сигнала;

$N$  – значение целочисленной неоднозначности измерений

В данных уравнениях представлены все виды погрешностей, табл. 1.

В отличие от кодовых измерений, где в основе лежит сличение псевдодальномерных последовательностей, фазовые измерения выполняются с использованием несущей сигнала, что предопределяет их более высокую точность.

Применительно к рассматриваемой системе обработке подвергаются разности измерений выполненных на опорных пунктах с известными координатами и измерений на контрольных пунктах, координаты которых требуют определения. Упрощенно (оставив в системе по одному контрольному и опорному пункту) математически можно записать следующую модель измерений:

$$\begin{cases} \Delta D_{12} = D_1 - D_2 = \Delta p_{12} + c(dT_1 - dT_2) + \delta d_{12}; \\ \Delta \Phi_{12} = \Phi_1 - \Phi_2 = \Delta p_{12} + c(dT_1 - dT_2) + \lambda \Delta N_{12} + \delta d_{12}. \end{cases}$$

Данная модель записана для случая незначительного расстояния между приемниками, что приводит к полному устранению коррелированных источников погрешностей: эфемеридных, тропосферных и ионосферных. Остается влияние некоррелированного рассогласования шкал времени между приемниками, флуктуационная погрешность (включая влияние эффекта многолучевости) и фазовая неоднозначность измерений. Кроме того, критичным будет показатель нестабильности фазовых центров приемных антенн.

Рассогласование шкал времени либо включается в состав оцениваемых параметров наряду с координатами контрольного пункта и значениями неоднозначности либо устраняется методом формирования вторых разностей измерений (между спутниками рабочего созвездия). Влияние многолучевости нивелируется выбором специальных антенных устройств, обеспечивающих режекцию переотраженных сигналов.

Таким образом, ключевое влияние в системе будут оказывать собственно флуктуационные погрешности или внутренние шумы аппаратной части приемных устройств, а также стабильность выполненных фазовых измерений.

При данных условиях известно [2, 3], что в реальном времени будут достижимы следующие характеристики точности: 1 см по плановым координатам и 2 см по высотной составляющей. Следует отметить, что система имеет сетевой принцип построения и функционирует непрерывно, что предопределяет возможность уравнивания (весаго усреднения) полученных результатов определений на различных по длительности временных интервалах: 1, 12, 24 часа. Это позволит с учетом свойств флуктуационных погрешностей выйти на характеристики точности на уровне 1 мм по плановым координатам и 2 мм по высоте.

### 3. Результаты моделирования на основе реальных измерительных данных

С целью практического подтверждения разработанных теоретических принципов построения системы было выполнено моделирование ее работы на основе реальных измерительных ГНСС данных. Измерения были получены при выполнении работ по периодическому мониторингу объектов Днестровской ГАЭС, выполненных специалистами Национального университета "Львовская политехника" в феврале 2009 года.

Для моделирования системы было выбрано семь пунктов: два опорных (ОП1 и ОП2) и пять контролируемых (КП1 – КП5).

Измерения на данных пунктах были зарегистрированы в течение 6 – 12 часов с темпом 1 раз в пять секунд ГНСС приемниками NovAtel DL-V3 и Leica 1200. Схема расположения пунктов приведена на рис. 5.

Моделирование выполнялось в программном пакете NovAtel RTKNav, позволяющего зарегистрированным данным выполнять имитацию режима реального времени с последующим весовым уравниванием результатов на различных временных отрезках (модуль RTStatic).

Первоначально была выполнена привязка с миллиметровым уровнем погрешностей координат опорных пунктов относительно измерений постоянно действующих ГНСС станций международной сети IGS и контрольно корректирующей станции DNRS Системы космического навигационно-временного обеспечения Украины.

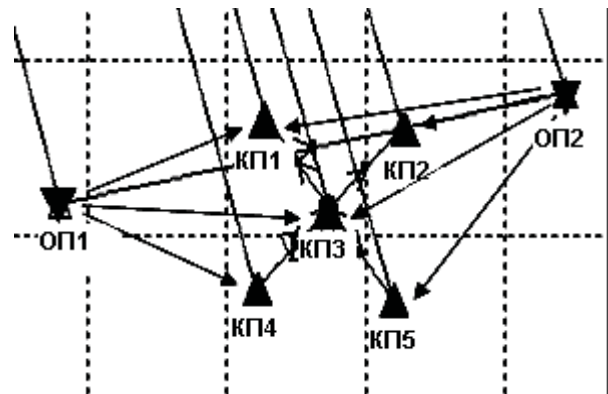


Рис. 5. Принцип реализации сетевого RTK метода

В табл. 2 приведены результирующие значения погрешностей плановых координатных определений контролируемых пунктов.

Как свидетельствуют результаты, миллиметровый уровень точности достигается уже после первого часа наблюдений, а по достижении шестичасового интервала стремится к значению 1 мм и менее.

Таблиця 2

Баланс основных источников погрешностей

Пункт	Погрешности, мм			
	РМВ	1 час	3 часа	6 часов
КП1	12	4	1,3	≥ 1
КП2	12,2	6	1,7	
КП3	9	2,5	1,1	
КП4	11	4,3	1,5	
КП5	14	6,1	2	

### Выводы

Предложенный сетевой метод построения системы непрерывного геодинимического мониторинга обладает высоким потенциалом по точности и надежности координатных определений контролируемых пунктов. При таком подходе компенсируются все систематические погрешности ГНСС измерений, а накопление результатов измерений на длительных интервалах времени позволяет выполнять весовое уравнивание для снижения значений погрешностей от сантиметрового до миллиметрового уровня. Данный факт подтвержден теоретическими исследованиями и моделированием на основе реальных измерительных данных.

Автор выражает искреннюю благодарность начальнику научно-исследовательского отдела ОАО "Укргидропроект" Чугунникову Владимиру Степановичу за ценные рекомендации и замечания, а также за предоставление измерительной базы.

Поступила в редколлегию 8.04.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.П. Деденок, Харьковский центр Института космических исследований НАНУ-НКАУ, Харьков.

### МЕТОДИКА ПОБУДОВИ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ГЕОДИНАМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД НА ОСНОВІ ГНСС ТЕХНОЛОГІЙ

С.М. Флерко

*Запропоновано методику та основні принципи побудови системи безперервного геодинимічного моніторингу гідротехнічних споруд і інших об'єктів техногенного і природного походження на основі використання високоточних технологій і апаратно-програмних засобів глобальних супутникових навігаційних систем. Виконано аналіз потенційних характеристик точності функціонування.*

**Ключові слова:** геодинимічний моніторинг, глобальні навігаційні супутникові системи, базові станції, RTK режим.

### DESIGN METHODIC OF PERMANENT GEODINAMIC MONITORING SYSTEM FOR HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION ON THE BASE OF GNSS TECHNOLOGY

S.N. Flerko

*A method and basic principles of continuous geodynamic monitoring system construction for hydrotechnical buildings and other objects on the basis high precision GNSS technologies is presented. The analysis of potential accuracy characteristics of the system functioning is executed.*

**Keywords:** geodynamic monitoring, global navigation satellite systems, base stations, RTK mode.