



Получена: 10.03.2017 г.

Приета: 12.05.2017 г.

ДИНАМИЧНИ МЕТОДИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ДЕФОРМАЦИИ НА ИНЖЕНЕРНИ СЪОРЪЖЕНИЯ В РЕАЛНО ВРЕМЕ

А. Ангелов¹

Ключови думи: инженерна геодезия, изследване на деформации на високи сгради и съоръжения, координати, ъгъл и посока на наклоняване.

РЕЗЮМЕ

В статията се разглеждат възможностите на съвременните към този момент технически средства за определяне на наклоняването и конструктивните деформации на високи сгради и инженерни съоръжения.

Предлага се възможност за комбинирано използване на тези средства при изследване на някои деформационни процеси в реално време. Особено удачно за установяване на моментни отклонения от вертикала в изследваното съоръжение е прилагането на динамични измервателни технологии, в т.ч. ГНСС, електронни наклономери, видеоконтролери, електронни зенит-прибори.

1. Въведение

Проследяването на динамиката в деформационните процеси е важен аспект при анализиране на техническото състояние на изследваното съоръжение. С помощта на достъпните към този момент технически средства е възможно тази задача да се решава в реално време с достатъчно висока точност. С тяхна помощ става възможно проследяване в динамична среда на разнородни деформационни процеси, като ще се обърне специално внимание на изследване на наклоняване и усукване:

■ Наклоняване

Установяване на движение и наклоняване на върха на мачта, кула или друго високо съоръжение в реално време през 2, 5 или 10 секундни интервали.

¹ Антонио Ангелов, гл. ас. д-р инж., кат. „Приложна геодезия“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: angelov_fgs@uacg.bg

Наклоняване и преместване на корпуса на изследваното съоръжение в точките с монтирани наклономери в реално време през 1, 2, 5 или 10 секундни интервали.

■ Усукване

Установяване на премествания на отделни сегменти от корпуса на изследваното съоръжение един спрямо други в реално време.

2. Електронни наклономери

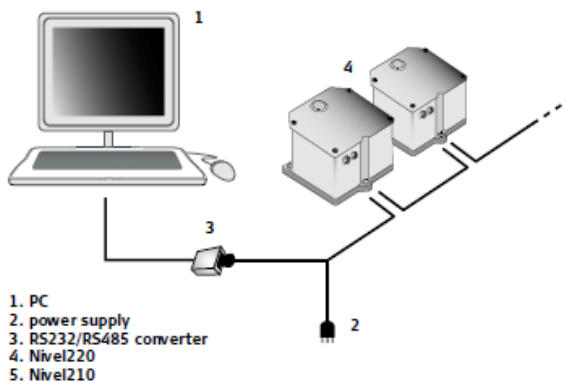
Наклономерните инструменти „*inclination sensors*“ позволяват високо точни измервания на наклоняванията едновременно в две направления/оси.

Компонентите на вектора на преместване (r) се дефинират като резултат от регистрираните премествания по две оси в линейна мярка [1].

Показаният на фиг. 1а наклономерен сензор NIVEL 210/220, производство на „Leica Geosystems“, позволява приемане на данни в реално време и отдалечен контрол, чрез използване на мрежова връзка с монтираните сензори.



Фиг. 1а



Фиг. 1б

Точността при този метод зависи най-вече от прецизността на използваните сензори за измерване на ъгъла на наклона (φ). От съществуващите в момента наклонометрични сензори могат да се използват тези от прецизен клас, като тяхната точност за определяне на ъгъла на наклона φ е от порядъка на ($1'' \div 3''$).

От изведените формули [1] е видно, че при $H \approx 50$ m, $m_\varphi = 1'' \div 3''$ и $\gamma \approx 100$ g, за $m_r \approx 1,5$ mm.

В режим на измерване „Real Time“ в 1, 2 до 5 секундни измервателни серии точността е в интервала: $0,5$ mm $\leq m_r \leq 1$ mm – при височина на монтаж на сензора до 50 m.

Системата за измерване в режим „Real Time“ обикновено се допълва от модемна конфигурация, разположена на обекта, в която постъпват данните от монтираните сензори и чрез осигурена мрежова връзка достига до обработваща хардуерна система – фиг. 1б.

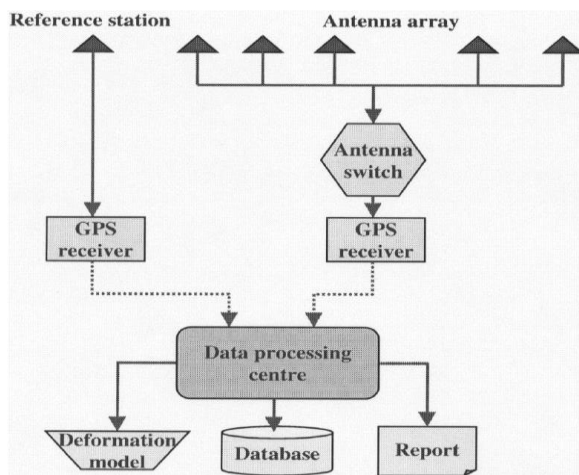
Връзката може да се осъществи чрез локална мрежа, GPRS/мобилен Internet.

2. Определяне на наклоняване чрез използване на ГНСС – Глобални Навигационни Сателитни Системи

Глобалните навигационни сателитни системи – ГНСС, в т.ч. GPS, GLONASS и други подобни, благодарение на своята висока точност, скорост и надеждност в позициониране, могат с успех да се използват както при стандартни геодезически измервания, така и за наблюдение на деформационни процеси и сеизмологични проучвания. От гледна точка на очевидните им предимства по отношение на точност и практичност, в наши дни ГНСС се прилага успешно за определяне както на много бавни движения на структури, така и за изследване на бързи премествания, като например, запис на трептенията, провисване и наклоняване на мостове, високи сгради и други инженерни съоръжения. В геодезическата практика се използват най-често т.нар. диференциални измервания, които се прилагат чрез обработка на данните от две или повече приемни антени в една и съща епоха и чрез използването на няколко основни подхода:

- **статични** измервания (непрекъснати измервания в две или повече фиксирани ГНСС приемника в определена позиция);
- **кинематични (РТК)** (един фиксиран ГНСС приемник и един или няколко подвижни), които от своя страна се изпълняват като:
 - **кинематичен в реално време** – позициониране в реално време с приемници, свързани чрез радио или кабелна връзка;
 - **кинематичен с последваща обработка**, при който обработката се извършва след приключване на измерванията.

От направения по-горе кратък преглед се налага изводът, че при изследване на деформационни процеси във високи сгради и кули, в т.ч. наклоняване и усукване, е подходящо използването на ГНСС в комбинация с други геодезически методи или самостоятелно. Направените практически и теоретични изследвания в световен мащаб за използване на ГНСС технология при [3] се основават най-често на показаната по-долу схема (фиг. 2), чрез използване на една или повече референтни станции извън изследваното съоръжение и няколко приемни антени в подходящо подобрени наблюдавани точки по самото съоръжение.



Фиг. 2

Чрез сравнение на измерените вектори и координатните разлики се анализира поведението на изследваното съоръжение както в краткосрочен план (РТК метод) така и дългосрочни деформационни процеси (статичен метод).

Оптималната точност, която може да се осигури чрез този технологичен подход, е както следва:

- при режим на измерване „Static“ предвид късите вектори е достатъчно прилагането на краткотрайни измервателни сесии с продължителност 2 – 5 минутни сесии по двете достъпни за граждански нужди честоти с достижима точност на контролната точка по положение:

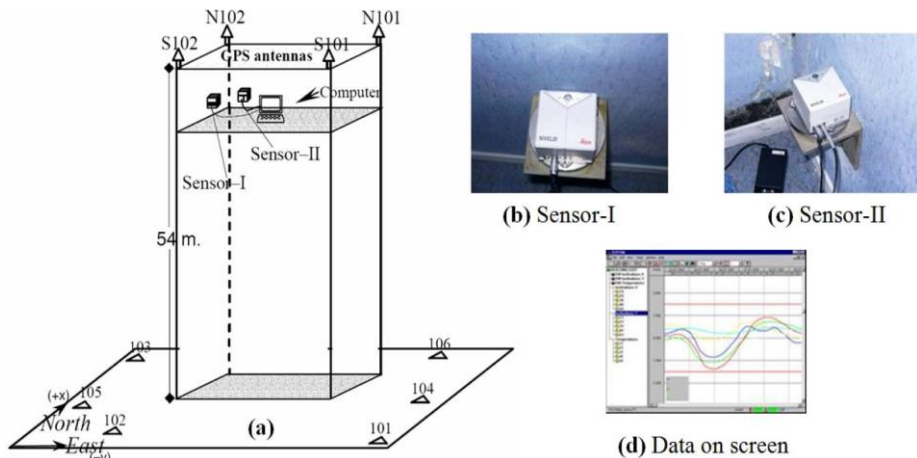
$$1 \text{ mm} \leq M_p \leq 3 \text{ mm};$$

- при режим на измерване „РТК – Real Time Kinematic“ (1, 2 – 5 секундни интервали) с достижима точност на контролната точка по положение:

$$10 \text{ mm} \leq M_p \leq 15 \text{ mm}.$$

Описаната по-горе технологична схема се прилага успешно в световната геодезическа практика в последното десетилетие, а така също и при изследване на устойчивостта на високи сгради и технически съоръжения, в т.ч. наклоняване, усукване, ветрови колебания и вибрации [3], [4].

Особено удачно в тези случаи е комбинирането на ГНСС с наклономерни сензори, разположени във вътрешността на сградата или корпуса на изследваното съоръжение. На фиг. 3 е показано едно практически изпълнено разположение на измервателните сензори – ГНСС и наклономери, реализирано при изследване на деформациите в сграда с височина от 54 m в гр. Истанбул, при измервания, проведени в две последователни кампании през 2000 и 2002 г. [5].



Фиг. 3

Разположението на приемните антени от ГНСС и наклономерните сензори е показано в част 3a на снимковия материал, а в 3b, c – наклономерни сензори, използвани при изследването и 3d – потребителски софтуер за обработка и визуализация на регистрираните деформации.

Аналитичните резултати от наклона и резултатите от обработката на ГНСС и наклономерните сензори са използвани комбинативно при деформационния анализ на поведението на сградата.

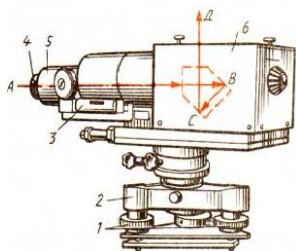
3. Зенит-прибори и видеоконтролери в комбинация с прави и обратни отвеси

3.1. Зенит-прибори

Друг метод за директно определяне на наклона е чрез материализиране в пространството на отвесна оптична визирна линия или лазерен лъч. В наше време съществуват широк спектър инструменти в това направление, известни най-общо под наименованието зенит-прибори или вертикални проектиращи инструменти – фиг. 4.

Принципът на работа се основава на пречупване на визирната линия, чрез система от лещи и проектирането ѝ в посока, перпендикулярна на хоризонталната равнина, в която е хоризантиран инструментът – фиг. 4а.

При определени благоприятни условия оптическите прибори за вертикално проектиране биха могли да осигурят точност в рамките на 1 – 2 mm на 100 m височина – фиг. 4б, а при тези с лазерно проектиране точността зависи от дебелината на генерирания лазерен лъч и се движи в границите 2 – 7 mm за височини до 100 m фиг. 4в.



Фиг. 4а

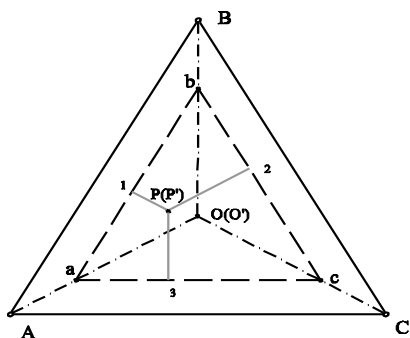


Фиг. 4б

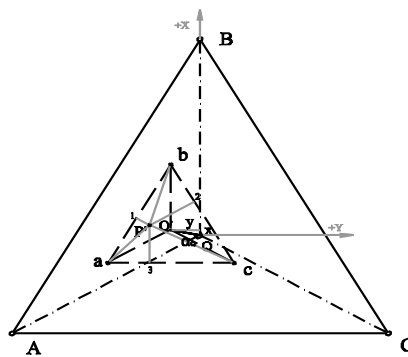


Фиг. 4в

Принципът на работа при определяне на вертикалност се състои основно в директно отчитане по мерна линийка на отклонението от отвесната линия, материализирана чрез съответния зенит-прибор. Обикновено в основата на изследваното съоръжение, например триъгълна мачтова кула, се фиксира зенит-прибор в т.нар. опорна точка P , разположена в основата на съоръжението, на определено технологично разстояние от ортоцентъра на основната равнина – фиг. 5. С помощта на материализираната чрез прибора отвесна линия се проектира т. P в монтажните хоризонти по височина до нейната проекция – P' [2].



Фиг. 5а



Фиг. 5б

От тази точка се отчитат разстоянията по фиксирани мерни линейки, в разглеждания случай, до страните на триъгълника в монтажния хоризонт – $P'1$, $P'2$ и $P'3$, като се сравняват с проектните такива – $P'1_{\text{проект}}$, $P'2_{\text{проект}}$ и $P'3_{\text{проект}}$. Тези проектни разстояния за всеки отделен монтажен хоризонт, при условие че $ab = bc = ac$, могат да бъдат сравнявани с регистрираните в началното измерване или изчислени [44].

При условие, че отчетените стойности не отговарят на проектните такива, може да се твърди, че е налице наклон и/или усукване на съоръжението в съответния монтажнен хоризонт, или по-точно казано, ортоцентърът на основата т. O и този в изследвания монтажнен хоризонт т. O' не се намират на една вертикала – фиг. 5б.

Ако въведем една локална координатна система с център в основата и направление на $+X$ по една от осите на съоръжението, например по посока на т. B , за големината на наклона $OO' = Q$ и неговото направление – α_Q (фиг. 5б) може да напишем:

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}; \\ \alpha &= \arctg \frac{\Delta Y}{\Delta X}. \end{aligned} \quad (1)$$

Стойностите за ΔX и ΔY в горните формули може да се изчислят по следните зависимости:

$$\Delta X = \frac{OP}{2} + \frac{ab}{2\sqrt{3}} - P'3, \quad \Delta Y = P'c \cos\beta - \frac{\sqrt{3}}{2} OP - \frac{ab}{2}, \quad \beta = \arcsin \frac{P'3}{P'c}. \quad (2)$$

Горните зависимости имат значение при условие, че се изключи възможността за усукване на изследвания монтажнен хоризонт спрямо основата, на ъгъл φ .

За определяне на ъгъла на усукване φ може да се приложи аналогия и се използват зенит-прибори в две фиксирани точки в основата P_1 и P_2 [2].

3.2. Видеоконтролери в комбинация с прави и обратни отвеси

3.2.1. Прави и обратни отвеси

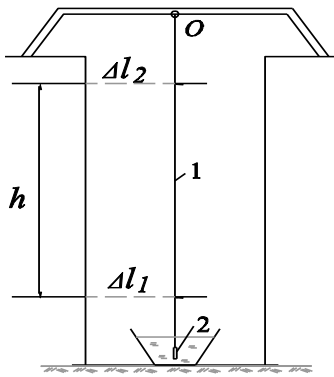
Честа практика, особено при изследване на деформации на големи съоръжения, в т.ч. и язовирни стени, е използването на прави (фиг. 6а) и обратни отвеси (фиг. 6б) с цел едновременно определяне на хоризонтални премествания и наклон. В наши дни този метод успешно може да се комбинира с електронни средства за регистрация, каквито са видеоконтролерите или т.нар. видеокоординатометри.

Принципът на работа и при двата типа отвеси се състои в пряко отчитане по мерна линейка или координатометър, чрез струната на отвеса (1) в контролни точки, разположени в основата и върха на изследваното съоръжение. Самата струна се установява в отвесно положение посредством тежест (2), плуваща във вана с течност. За определяне на наклона на съоръжението q се образуват разликите в отчетите $(\Delta l_1 - \Delta l_2)$. Изменението на разликата $(\Delta l_1 - \Delta l_2)$ с течение на времето свидетелства за продължаващ процес на наклоняване на съоръжението.

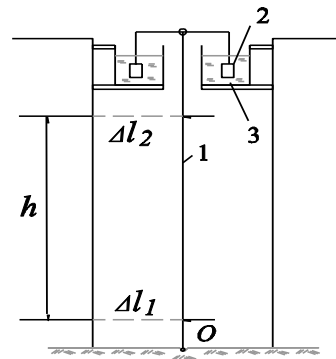
Относителната стойност на наклона може да се изчисли, като се използва следната зависимост:

$$q = (\Delta l_1 - \Delta l_2) / h, \quad (3)$$

където h е разстоянието между контролните точки.



Фиг. 6а



Фиг. 6б

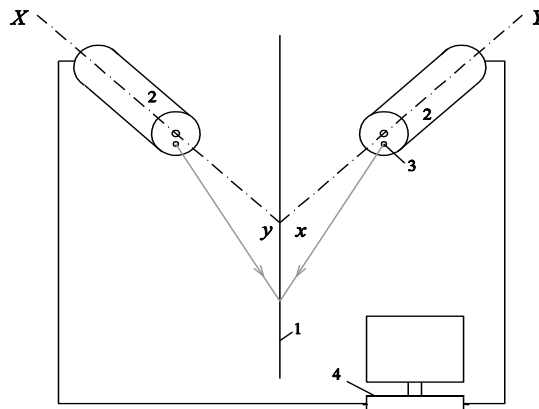
Известно е от практически и теоретични изследвания, че точността на правите отвеси зависи до голяма степен от дължината на струната, като нейната препоръчителна дължина е 50 – 60 m. Влияние върху точността оказва също въздушният поток, консистенцията на течността, в която се движи поплавакът и др.

Пределната точност, която се достига чрез прави отвеси и оптично отчитане е от порядъка на $2 \div 5,7$ mm.

Точността на определяне на наклона може да се повиши при използване на т.нар. обратни отвеси – фиг. 6б, където точката на фиксиране е в основата на изследваното съоръжение, а тежестта на опън (2) се реализира чрез поплавци, обикновено разположени във вани с течност (3). Под действието на подемната сила на поплавъка (40 – 70 kg) струната заема положението на отвесна базисна линия, относно която се извършват измерванията и определяне на отчетите към форм. 3.6. За определяне на отчетите ($\Delta l_1, \Delta l_2$) най-често се използват оптични координатометри.

3.2.2. Видеоконтролери

Друга възможност за повишение на точността, особено в процеса на отчитане, е използването на видеоконтролери (видеокоординатометри), обикновено в комбинация с обратни отвеси.



Фиг. 7

В този случай точността на отчитане на отсечките ($\Delta L_1, \Delta L_2$) е с един порядък по-висока в сравнение с оптичните координатометри и е в рамките на $0,02 \div 0,04$ mm.

Друго практическо предимство е възможността за автоматизация на процеса и получаване на динамични данни за състоянието на изследваното съоръжение в реално време. На фиг. 7 е показана принципна схема на работа на видеокоординатометър по протежение на материализирана отвесна линия.

На схемата по-горе двата видеоконтролера са разположени в две взаимно перпендикулярни направления по осите – X, Y на локално въведената координатна система, с център, разположен по струната на отвеса (1) в контролирания хоризонт. Видеодатчици (2) приемат светлинния сигнал, генериран от светодиоди (3) и отразен от струната на отвеса. Получените сигнали се обработват от компютърна система (4), чрез която се изчисляват разликите ($\Delta L_1 - \Delta L_2$) и наклонът q в непрекъснат режим.

4. Заключение

В статията се разглеждат възможностите за наблюдение на високи сгради и инженерни съоръжения, чрез използване на електронни геодезически инструменти и сензори, позволяващи отдалечен контрол и работа в реално време. Направен е анализ на точността на различните инструменти и методи.

Обръща се внимание на възможностите за решение на тази задача, чрез прилагане на комбинация от сензори (ГНСС, електронни наклономери, зенит-прибори и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ангелов, А.* Възможности за оптимизация на процеса на наблюдение и обработка на резултатите при определяне на наклоняването високи кули мачтови съоръжения. //Годишник на Университета по Архитектура, Строителство и Геодезия, том XLVI, св.III – Геодезия, 2014.

2. *Шеховцов, Г. А., Шеховцова, Р. П.* Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений. Монография, Н. Новгород, 2009.

3. *Yongqi Chen, Xiaoli Ding, Dingfa Huang, Jianjun Zhu.* A multi-antenna GPS system for local area deformation monitoring, June 26, 2000, <https://link.springer.com/article/10.1186/BF03352298>.

4. *Erol, S.* Determination of Deformations with GPS and Leveling Measurements. Ph.D. Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology: Istanbul, Turkey, 2008, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231072/>.

5. *Geomatics Engineering Department, Civil Engineering Faculty, Istanbul Technical University, Maslak 34469 Istanbul, Turkey.* bihter@itu.edu.tr, Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22163499>.

DYNAMIC METHODS FOR DETERMINING DEFORMATIONS IN ENGINEERING FACILITIES IN REAL TIME

A. Angelov¹

Keywords: engineering geodesy, tilting and sinking of high facilities, coordinates, angle and direction of tilt

ABSTRACT

The paper discusses the possibilities of the contemporary technical equipment to determine the inclination and structural deformations of tall buildings and civil engineering structures.

It offers an opportunity for the combined use of several technical tools in the study of some deformation processes in real time. The application of dynamic measurement technologies, including GNSS, electronic inclination tools, video recorders, and zenith instruments is especially appropriate to establish a momentary deviation from the vertical in the test facility.

¹ Antonio Angelov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Applied Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: angelov_fgs@uacg.bg