



Получена: 14.12.2021 г.

Приета: 04.02.2022 г.

ДОПУСТИМИ ТОЧНОСТИ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА АВТОМАТИЗИРАНИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИ МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДЕФОРМАЦИИ НА ИНЖЕНЕРНИ СЪОРЪЖЕНИЯ

А. Ангелов¹

Ключови думи: деформации на инженерни съоръжения, свлачища и хвостохранилища

РЕЗЮМЕ

В статията се разглеждат възможностите на съвременните към този момент технически средства за осъществяване на непрекъснат мониторинг върху деформационните процеси в инженерни съоръжения. Разгледани са основните, геодезически методи, приложими при изследване на деформации на язовирни стени и хвостохранилища, включително и чрез роботизирани тотални станции. Обръща се особено внимание върху оценката на точността на отделните методи и анализа на възможностите за практическо им приложение в съответствие с предварително зададените допуски. Представени са основните принципите за реализация на автоматизирани системи за мониторинг, базирани върху съществуващия световен опит в тази област, включително и програмна система на автора.

1. Въведение

Изследването на деформационните процеси в инженерните съоръжения, както е известно, се осъществява чрез периодично наблюдение на поведението на определен брой контролни точки, разположени на подходящо подбрани места. Практическата реализация на тези наблюдения се извършва най-често посредством прецизни геодезически измервания. Обикновено същността на геодезическите работи се състои в това, да се

¹ Антонио Ангелов, доц. д-р инж., кат. „Приложна геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: angelov_fgs@uacg.bg

определи пространственото преместване на споменатите точки, по отношение на тяхната първоначална позиция в предварително установена координатна система. Сравнението на резултатите от отделните измервания позволява да се изведе в подходяща числена и графична форма: големината, посоката и скоростта на настъпилите деформации. При определени технически съоръжения е особено важно проектната им позиция да не се променя чувствително във всеки един момент от тяхната експлоатация. Такива съоръжения се явяват и всички видове подпорни стени на язовири и хвостохранилища, при които всяко по-съществено отклонение може да доведе до опасни конструктивни изменения с понякога и катастрофални последици. Този факт предполага необходимост от наблюдение на подобен тип съоръжения и в реално време, с оглед на осигуряването на възможност за навременна реакция на техническия персонал.

За тази цел е необходимо да бъде направена правилна оценка на точността на отделните методи и анализ на възможностите за практическото им приложение. В статията е обърнато по-специално внимание на съвременните методи, приложими при изследване на деформации на язовирни стени, хвостохранилища и свлачищни процеси. Оценка на точността и анализ на възможностите за комплексно решение на тази задача чрез прилагане на наблюдателна система – съвкупност от сензори (геодезически инструменти, ГНСС, специализирани датчици), модули за трансфер, обработка и съхранение на данните, визуализация на резултатите.

2. Обосновка на необходимата точност на измерванията

В специализираната литература са развити няколко различни подхода за определяне на точността, с които следва да се извършват геодезическите измервания при изследване на деформации. Един от подходите [3] е да се използва критерият на минималната деформация (d_{\min}), която може да се регистрира със стойност, по-голяма от средната квадратна грешка на измерванията. В друг от широко разпространените подходи се използва критичната за изследваното съоръжение деформация [7], максимално допустима стойност, при която съоръжението може да се експлоатира. Първата група методи се характеризира със затихване на деформациите, а втората с критични стойности, които рядко се проявяват в експлоатацията на съоръжението.

Практически подход за обосновка на точността може да се предложи чрез представяне на очакваните деформации, под формата на строителен допуск [5] (Δd).

$$\Delta d = \Delta d_{\text{кр}} - \Delta d_{\text{min}} \approx \Delta_{\text{кр}}, \quad (2.1)$$

$$m_{\Delta d} \leq \frac{\Delta d}{2t}. \quad (2.2)$$

При равноточни измервания и тъй като деформациите в изследваната точка (k) се явяват разлики в преместванията между текущия (i) и началния цикъл (0), т.е. $\Delta d = d_k^i - d_k^0$, следва:

$$m_{\Delta d} = m_d \sqrt{2}, \quad (2.3)$$

където m_d е средната квадратна грешка в отделното измерване, от (2.2) и (2.3) следва

$$m_d \leq \frac{\Delta d}{2\sqrt{2}t} \approx \frac{\Delta_{\text{кр}}}{2\sqrt{2}t}, \quad (2.4)$$

където t е нормирана случайна величина, която зависи от приетата доверителна вероятност P ($t = 3$ при $p = 99,7\%$ и $t = 2$ при $p = 94,5\%$).

Получената по-горе формула е в сила както за вертикални (ΔH), така и за хоризонтални деформации (ΔQ). Например, при стойност за $t = 2$ се получава

$$m_H \leq 0,18\Delta H_{кр}, \text{ а за } t = 3 \text{ имаме } m_H \leq 0,12\Delta H_{кр}, \quad (2.5)$$

което е доста близо до приетите в земната механика зависимости [5]:

$$m_H \leq 0,1\Delta H_{кр}; \quad m_V \leq 0,1V. \quad (2.6)$$

Тъй като по (2.6) обикновено се получават големи стойности за средната квадратна грешка (m_H) поради големите стойности за $\Delta H_{кр}$, а при използване на ΔH_{\min} се получават практически недостижими малки стойности, за m_H е препоръчително да се използва стойността на относителната деформация между два съседни цикъла на измерване. В този случай (1.13) ще приеме вида:

$$m_H \leq \frac{\Delta H^{(j-1,j)}}{2\sqrt{2}t}. \quad (2.7)$$

Понеже за първия цикъл от измервания не е известна тази стойност, може да се използва една средна стойност $\Delta H_{\text{ср}}$ за период Δt , за който е предвидено в проекта, че е възможно да се прояви. При определяне на деформациите на технически съоръжения от земно-насипен тип, чрез използване на геометрична нивелация, в съществуващите нормативни документи [10, 11] е прието, че критичните деформации са от порядъка на ≥ 10 cm до критична стойност, различна за различните типове конструкции. Като се допусне предпоставката, че в процеса на строителство на язовирната стена или на стената на хвостохранилището – обикновено земно-насипна ($\sim 1 - 1,5$ год.) се регистрират приблизително 60 – 80% от деформациите и в този период измерванията следва да се извършват на всеки $\sim 3 - 4$ месеца, следва, че е необходимо да се реализират приблизително 4 – 5 цикъла измервания с $\Delta H_c = 20 - 25$ mm. В този случай по (2.7) се получават следните стойности за средните квадратни грешки (СКГ) на реперите:

$$m_H = 3 - 5 \text{ mm (при } t = 2) \text{ и } m_H = 2 - 3 \text{ mm (при } t = 3). \quad (2.8)$$

Същата предпоставка би следвало да се използва и при обосновката на точността на плановете координати на наблюдаваните точки, разположени по стената на съоръжението.

Честотата на извършване на измерванията е най-трудно да се определи в първите няколко цикъла, които обикновено са в процеса на строителство. В този период характерът на деформациите все още не е известен, а освен това, както беше споменато, тогава се реализират около 60 – 80% от тяхната стойност.

3. Съвременни геодезически методи с възможност за автоматизация на наблюдателния процес при изследване на деформации на язовирни стени и хвостохранилища

Накратко ще бъдат разгледани, някои от практически приложимите геодезически методи, като ще се обърне особено внимание само на тези, които позволяват автоматизация на процеса и отдалечен контрол на управление чрез използване на *роботизирани тотални станции*.

3.1. Тригонометричен метод

Методът, както е известно, се изразява в непосредственото координиране на определен брой предварително стабилизирани и сигнализирани контролни марки (KM), разположени по протежение на съоръжението – напр. стената на хвостохранилището. Най-често това се постига чрез прави ъглово-дължинни засечки от две или повече изходни геодезически точки ($ИТ$) посредством измерване на хоризонтални посоки, наклонени (хоризонтални) разстояния и вертикални (зенитни) ъгли към контролната марка. Хоризонталните премествания на всяка контролна марка (KM_i) се изразяват като разлика в позицията ѝ, изразена чрез нейните координати, спрямо началната позиция (KM_0)

$$\begin{aligned}\delta_x^i &= X_i - X_0 \\ \delta_y^i &= Y_i - Y_0.\end{aligned}\quad (3.1)$$

Като резултат се извежда векторът на преместване на всяка KM по формулите:

$$\begin{aligned}Q^i &= \sqrt{(\delta_x^i)^2 + (\delta_y^i)^2}; \\ \alpha^i &= \arctg \frac{\delta_y^i}{\delta_x^i}.\end{aligned}\quad (3.2)$$

Получените отклонения ($\delta_x^i, \delta_y^i, Q^i$) и посочен ъгъл (α^i) обикновено се представят спрямо въведена *локална координатна система* за съответния обект. С цел повишаване и контрол на точността координатите на KM е по-подходящо да се определят чрез използване на многократна права ъглова засечка, при което най-голямо влияние върху грешката m_Q , с която се определя търсеното преместване Q_j , оказва грешката m_β , с която се измерват прилежащите ъгли на засечките – β_i .

Средната квадратна грешка (СКГ) в положението на една контролна марка KM_j (m_j), определена с права ъглова засечка, може да се изведе по съкратената форм. 3.3, при условие, че прилежащите ъгли и разстоянията (S) до точката са приблизително равни:

$$m_j = \frac{m_{\beta_i}}{\rho} \frac{S\sqrt{2}}{\sin^2 2\beta}, \quad (3.3)$$

като е видно, че най-голямо влияние върху точността оказва прецизността на измерване на прилежащите ъгли на засечките β_i , както и нейната геометрична определеност – ъгъл при засичаната точка, близък до 100^{grad} (90°).

Пример (1). От горното условие, и като се има в предвид и формула (2.3), следва, че за да се определи Q_j с грешка $m_Q \approx 10 - 15$ mm, при стойности за β ($50^g \div 70^g$), S (400 m \div 600 m) и $\sim 500 - 700$ m, базисно r -е м/у изходните точки, е необходимо прилежащите ъгли β да бъдат измерени с грешка $m_\beta \leq 15^{cc} \div 20^{cc}$. Получените по-горе стойности определят и избора на инструменти, които в случая трябва да отговарят на условието за грешка на измерена посока $m_r \leq 10^{cc} \div 15^{cc}$.

В днешно време е по-удачно да се използват **комбинирани ъглово-линейни засечки**, с оглед на широко достъпните далекомерни инструменти с висока точност на измереното разстояние – $m_S \leq 2 \div 3$ mm/1km. В този случай, освен контрол върху ъгловите измервания допълнителните прецизни, дължинни измервания биха повишили точността

с до 20 – 30%. При използване на **многократни ъглово-дължинни засечки** предварителната оценка на точността в геодезическата мрежа и съответно в контролираните точки би следвало да се извърши по строги методи чрез извеждане на тежестната матрица и изчисляване на СКГ по МНМК или друг, подходящ математически модел. Когато са реализирани измервания в три дименсии или *определени пространствени координати* на контролните точки е налице възможност за определяне и на *вертикалните деформации* на контролните точки. При този тип съоръжения – *земно-насипни стени на хвостохранилища и язовири* методът, *при определени обстоятелства*, би удовлетворил изискванията за точност, разписани при обосновката на точността по-горе (т. 2) и приведен към допуските за земно-насипни стени [10, 11], а именно, използвания в случая метод на **тригонометричната нивелация**.

Точността на определените коти по този метод, както е известно, зависи от точността на измерените зенитни (вертикални) ъгли, разстоянието и допълнителни фактори, като кривина на земята и атмосферна рефракция. Поради факта, че в тези случаи се използват едни и същи устройства за принудително центриране на инструменти и сигнали, грешките от измерването на техните височини се елиминират, като не оказват влияние върху сумарната грешка, която в най-голяма степен ще зависи от точността на измереното превишение.

Котата на наблюдаваната точка (N), получена чрез ъглово-дължинни измервания от инструмент, стабилизирани в изходната точка (репер) (I), би се изчислила по познатата формула [3]:

$$H = H_I + D_{IN} \operatorname{ctg} Z_N + J_I - l_N + \frac{1-k}{2R} D_{IN}^2. \quad (3.4)$$

При елиминирание на влиянието на височини на сигнали и инструмент, предварителна оценка на точността може да се направи чрез изследване на измереното превишение (h):

$$h_{IN} = D_{IN} \operatorname{tg} \gamma_N, \quad (3.5)$$

където γ_N е измереният вертикален ъгъл, а D_{IN} – хоризонталното разстояние.

При прилагане на закона на Гаус за функция от измерени величини, за СКГ на превишението би се получило:

$$m_h^2 = \left(\frac{\partial h}{\partial D} \right)^2 m_D^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \gamma} \right)^2 \frac{m_\gamma^2}{\rho^2}, \quad (3.6)$$

или, след намиране на частните производни, ще добие следния вид:

$$m_h^2 = (|\operatorname{tg} \gamma|)^2 m_D^2 + \left(\frac{1}{\cos^2 \gamma} D_{IN} \right)^2 \frac{m_\gamma^2}{\rho^2}, \quad (3.7)$$

а за допустимата стойност на измерения вертикален (респ. зенитен) ъгъл и разстояние, ако се използва принципът на равните влияния, може да се разпишат следните зависимости:

$$m_\gamma \leq \left(m_h \frac{\cos^2 \gamma}{D_{IN} \sqrt{2}} \rho \right) \quad \text{и за СКГ на разстоянието} \quad m_D \leq \left(\frac{m_h}{|\operatorname{tg} \gamma| \sqrt{2}} \right). \quad (3.8)$$

*Пример (2). При разстояния D ($400\text{ m} \div 600\text{ m}$) до наблюдаваната точка и при изисквания за определяне на котите на реперите с грешка в интервала $5\text{ mm} \leq m_H \leq 10\text{ mm}$ и вертикален ъгъл в рамките на 10^{grad} , и следвайки зависимостите (3.8) биха се получили допустими стойности за СКГ на измерения зенитен ъгъл $m_Z \leq 7^{\text{cc}} \div 15^{\text{cc}}$ и необходима точност в измереното разстояние в рамките на $\pm 4 - 5\text{ cm}$, като в случая трябва **допълнително** да се вземат предвид и споменатите по-горе фактори, влияещи на точността – атмосферна рефракция и кривина на земята.*

Получените по-горе изисквания за точност за вертикални (зенитни) ъгли и разстояния са напълно във възможностите на съвременните инструменти, чрез ъглови измервания в 2 или 3 гируса.

Определянето на котите на реперите в отделните цикли би могло да се извърши, разбира се, и чрез метода на *прецизната геометрична нивелация*, при земно-насипни стени (Нивелация II клас) [10]. В този случай обаче трябва да се взема в предвид и спецификата на някои съоръжения, особено на хвостохранилища от типа на *сгуроотвали*; *насипища с материали от рудници и минни отлагания, както и такива с големи по обем земни маси*. Тук, върху точността на измерените превишения, е възможно да окажат съществено влияние и фактори като: *отклонение на отвесната линия* – поради магнитни аномалии и/или неравномерно разпределени земни маси; *дълги нивелачни ходове и/или стръмни откоси*, предполагащи голям брой стационарирования на нивелира и т.н. При наличие на споменатите обстоятелства биха се наложили и съответните *гравиметрични измервания* за определяне на геопотенциалните коти [4] и евентуално преминаване към динамични височини.

Сумарното влияние на грешките, описани по-горе, както и икономическата целесъобразност, в резултат на допълнителните измервания и загубата на време, в тези конкретни случаи биха затруднили прилагането на метода на геометричната нивелация.

Налага се изводът, че при такъв тип съоръжения е по-удачно използването на метода на тригонометричната нивелация за прякото контролиране на наблюдаваните точки (*при спазване на споменатите по-горе допустими точности*). Същевременно, този метод може лесно да се автоматизира и да се използва комплексно, заедно с определянето на хоризонталните деформации. А прецизната геометрична нивелация да се прилага като метод за периодичен контрол на изходните реperi и налагането на съответните корекции (*по смисъл и принцип, описан по-долу в т. 3.2 – устойчивост на изходните точки и реperi*).

3.2. Створен метод

Както е добре известно, *створният метод* се характеризира със система от действия, посредством които се определят хоризонталните премествания на контролираните точки по отношение на една права линия, дефинираща створа. Този метод има много добро приложение при изследване на деформации на праволинейни язовирни стени и хвостохранилища. За практическото приложение на створния метод са възможни различни схеми [3, 5] в зависимост от местоположението на контролираните и изходните точки, както и дължината на створната линия. Обикновено крайните точки на створа се включват в триангулационната мрежа на обекта, чрез която следва да се контролира тяхното неизменно положение във времето. Изборът на схема в крайна сметка зависи от специфичните условия на изследвания обект, като точността, която може да се постигне чрез използване на створни методи, е от порядъка на **$0,5 \div 5\text{ mm}$** , като зависи най-вече от точността на измерените хоризонтални ъгли, в по-малка степен от разстоянията до контролната марка, а също и от други фактори. Обикновено се предпочита да се използва схема-

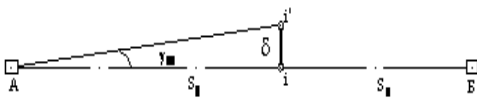
та на пълния створ с метод на неподвижна сигналната марка, позволяващ и **най-лесна автоматизация на процеса**. Отклоненията в този случай се определят посредством измерването на малкия (паралактичен) ъгъл γ и разстоянието S_1 (фиг. 3.1а, фиг. 4.2) по форм. 3.9.

$$\delta = S_1 \operatorname{tg}(\gamma). \quad (3.9)$$

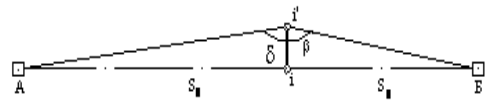
Тъй като ъгълът γ обикновено има малка стойност, хоризонталните премествания от створа δ могат да се определят и по формулата:

$$\delta = S_1 \frac{\gamma^{cc}}{\rho^{cc}}. \quad (3.10)$$

Малките ъгли γ се измерват по начина за измерване на отделни ъгли или по гирусния метод.



Фиг. 3.1а



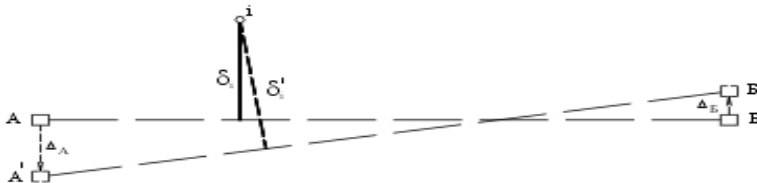
Фиг. 3.1б

При големи разстояния може да се използва и методът на обратната биполярна засечка (фиг. 3.1б). Отклоненията δ се изчисляват посредством пряко измерване на ъгъла β при контролираната точка, както и разстоянията S_1 и S_2 до изходните точки, по формулата

$$\delta = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2} \frac{200 - \beta}{\rho}. \quad (3.11)$$

С цел да се повиши точността, разгледаният метод може да се приложи и като двойна биполярна засечка. Точността при този подход се повишава с $\sqrt{2}$ пъти в сравнение с единичната засечка и достига до около **0,3 mm**. Този метод обаче е по-трудоемък и ресурсно уязвим за прилагане в масовите случаи, а така също и трудно реализуем при автоматизация на процеса на наблюдения.

Характерна особеност при използването на створния метод е, че той дава добри резултати и реална оценка на преместванията на изследваните точки само при условие, че определящите створа крайни точки имат неизменна стабилна позиция по време на всяко следващо измерване. В случай, че тези точки се намират в зоната на деформации на обекта и променят своята позиция повече от допустимото, то големината на това изместване (фиг. 3.2) трябва да се определя преди всеки цикъл от створни измервания и да се нанасят съответните корекции. В специализираната литература този въпрос се разглежда като процес по *изследване на устойчивостта на изходните точки* [3, 5].



Фиг. 3.2

При наличие на изместване на изходните точки – ΔA и ΔB (фиг. 3.2), реално се определят преместванията на точките спрямо изместения створ ($A' - B'$) – δ_i' . За да се премине към пълните премествания – δ_i спрямо първоначалното положение на створа ($A - B$), се използва следната зависимост:

$$\delta_i = \delta_i' + \frac{\Delta A}{S_{AB}} S_{Bi} + \frac{\Delta B}{S_{AB}} S_{Ai}. \quad (3.12)$$

Горната зависимост се използва за коригиране на измерените премествания δ_i' винаги, когато изместванията на изходните точки преминават определена допустима стойност. Тази допустима стойност е в пряка зависимост от минималната деформация – δ_{\min} , която е необходимо да бъде регистрирана, съгласно техническото задание:

$$\Delta_A, \Delta_B \leq \frac{\delta_{\min}}{2}. \quad (3.13)$$

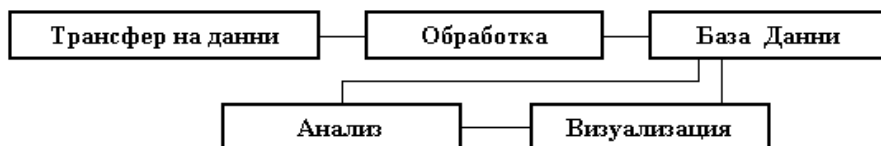
При условие, че неравенство (3.13) не е изпълнено, то измерените деформации на точките от створа **следва да се коригират по формула (3.12)**.

3.3. ГНСС

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 също и за изследване на наблюдението на регулярни деформационни процеси. В геодезическата практика се използват най-често т.н. 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, в реално време и смесени [6], в зависимост от изискуемата точност. **В случаите, когато се използват за изследване на деформации, както беше разписано по-горе (т. 2) – постигнатите точности в позицията на контролираните точки следва да са в сантиметров, а при определени обстоятелства и в милиметров порядък.** От направения по-горе преглед се налага изводът, че при изследване на деформационни процеси на *язовирни стени и хвостохранилища* е удачно използването на ГНСС **в комбинация с разгледаните геодезически методи или самостоятелно**. Направените практически и теоретични изследвания в световен мащаб за използване на ГНСС технология [8, 11] се основават най-често на схема, чрез използване на една или повече референтни станции извън изследваното съоръжение и необходимия брой приемни антени в подходящо подобрани наблюдавани точки по самото съоръжение. Максималната точност (СКГ) **в плановото положение на контролираните точки** ($3 \div 5 \text{ mm} \leq M_p \leq 15 \div 20 \text{ mm}$), която може да се осигури при статични измервания чрез този технологичен подход, според практически изследвания [8, 11] би удовлетворила в голяма степен допуските за земно-насипни стени, описани по-горе.

4. Автоматизирана система за мониторинг на язовирни стени и хвостохранилища

Въз основа на световния опит до този момент и като се имат в предвид някои разработки и публикации по този въпрос [1, 7, 8, 10] може да се каже, че най-доброто решение за обработка и съхранение на постъпващата информация е прилагането на релационен модел за организация на отделните масиви от данни. Чрез прилагане на принципите на този модел се изгражда т.нар. релационна база данни (РБД), като нейното управление се осъществява от подходящи СУРБД – Системи за управление на релационни бази данни.

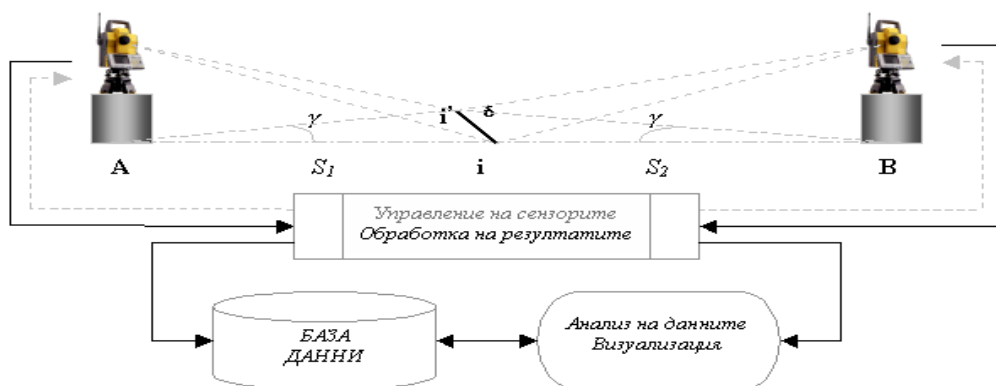


Фиг. 4.1

4.1. Мониторинг в реално време

Автоматизацията на процеса на изследване на деформации при този подход може да се види най-общо на показаната по-долу схема [1], фиг. 4.2.

В конкретния случай е разгледана схемата за наблюдение на оптичен створ, като същият принцип се прилага и при метода на малките ъгли, ъглово-линейни засечки и координатни определения. Чрез поставените в изходните точки на створа (A - B) инструменти – тотални геодезически станции (*конвенционални или роботизирани*) се измерват необходимите за този метод величини, за всяка контролирана точка i (γ_1 , S_1 и γ_2 , S_2), респективно от наблюдателен стълб (н.с.) A и н.с. B .



Фиг. 4.2

Осреднената стойност (средно тежестно) на отклонението от створа δ ; за всяка наблюдавана точка i се изчислява и записва автоматично в БД на системата под съответния номер (цикъл) на измерване. Съхранените в БД на системата данни за хоризонталните премествания на всяка точка се използват от анализиращия модул при извеждане

на необходимите за потребителя статистически данни, графични и таблични отчети във всеки един момент от наблюдението. По подобен начин са организирани процедурите и при изследване на вертикални деформации, както и при определяне на наклоняване в наблюдаваната точка.

Чрез описания по-горе принцип и структура (фиг. 4.1) действа и разработената от автора система *DeMES – Deformation Monitoring and Examination System (Система за наблюдение и изследване на деформации)* [1, 2]. Системата е ориентирана преди всичко за изследване на деформации на инженерни съоръжения, в т.ч. язовирни стени и хвостохранилища, високи сгради и технически съоръжения, свлачищни процеси и др. Алгоритмите на обработка са базирани основно върху директните геодезически методи за наблюдение – оптичен створ, ъглово-дължинни засечки, координатни определения, тригонометрична и/или геометрична нивелация. Предвидена е възможност, чрез допълнителни модули за включване на данни от външни датчици: *ГНСС, наклономери, видео-контролери и др.*

4.2. Обработка на данните и визуализация на резултатите

Схемата на взаимодействие на основните модули в една автоматизирана наблюдателна система се основава на световния опит в това направление, както и на авторски алгоритми, като е реализирана практически, следвайки принципите от фиг. 4.1. Система, реализирана по този начин, предлага комбинация от периодични и перманентни наблюдения, като се осигурява възможност получените данни да се обработват и в реално време. За обработка на резултатите – вертикални и хоризонтални премествания на репери и марки може да се използват както съществуващи софтуерни продукти [8, 9], така и авторска програмна система [1] или базирани на подобни принципи специализирана система за мониторинг на изследваното съоръжение. За съхранение на данните от отделните наблюдения се използват ресурсите на релационна база данни, а връзката с визуализиращите форми се осъществява чрез специално изградени вътрешно-програмни процедури, формуляри и отчети. Деформационните процеси биха могли да се визуализират и в реално време чрез подходящи графики и отчети, като всички данни се съхраняват в СУБД [1], а именно:

- потъване/издигане на основната равнина/повърхнина на съоръжението, сравнение между отделните измервания и спрямо проектното геометрично състояние;
- хоризонтални премествания на изследваното съоръжение или на отделни негови сектори;
- въвеждане на корекции за настъпилите изменения в позицията на изходните точки и автоматично редуциране на резултатите към първоначалното (нулево) измерване;
- отчети и графики по стандартни или специализирани шаблони.

5. Заключение – изводи и препоръки

В заключение може да се обобщи, че в днешно време наблюдението на деформационните процеси на инженерни съоръжения, включително и *хвостохранилища*, трябва да се извършва като се използват възможностите на съвременните технологии.

С внедряването на автоматизирани системи, мониторинговата дейност би се извършвала много по-бързо, с достоверни резултати и не на последно място – с възможност за отдалечен контрол и управление. В процеса на изграждане на такива системи за наблюдение обаче трябва да се следват научно признатите принципи в тази област, както и добрата световна практика. В тази връзка, основните изисквания, които би трябвало да се спазват при реализацията на автоматизирани системи за наблюдение, може обобщено да се групират, както следва:

- икономическа обосновка за избор на технологичен подход – периодични, динамични или наблюдения от смесен тип, чрез реализиране на съответната система за наблюдение: автоматична, полуавтоматична, с последваща обработка;
- технически изисквания за използваните геодезически методи, в т.ч.: проектиране и предварителна оценка на точността на геодезическите мрежи за извършване на мониторинг; схема на разположение на инструменти и сигнали; контролни измервания от минимум 2 наблюдателни станции; изследване на устойчивостта на изходните точки и реперни и др.;
- правилно структуриране на програмните модули за връзка с инструменти и сензори, обработка на данните и визуализация на резултатите.

Неспазването на посочените по-горе условия и най-вече на техническите изисквания за допуски и точности, част от които бяха засегнати в настоящата статия, би довело до недостоверни резултати и изкривяване на картината за протичащите деформационни процеси в изследваното съоръжение.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Angelov, A.* Building of optimization model, data base and software for processing, manage and analysis of surveying data, during the deformation monitoring of dams. Sofia. Dissertation, 2005.
2. *Angelov, A.* Geodetic methods in the study for deformation process of high buildings and engineering facilities. Monographic, ISBN 978-619-90832-1-5, 2017.
3. *Dimitrov, D.* Engineering geodesy. Sofia, Tehnika, 1989.
4. *Lambeva, T.* Transformation between geopotential numbers and normal heights for precise height determinations. // Annual of UACEG, issue 2, vol. 54, 2021, Sofia, pgs. 219-228.
5. *Penev, P.* Geodetic nets and methods for determine of deformation process in the engineering facilities. Sofia, Dissertation, 1981.
6. *Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J.* GPS. Theory and Practice. Sofia, UACEG, 2002.
7. *Levchuk, G. P., Novak, V. E., Lebedev, N. N.* Prikladnaya geodezia. Moskva, Nedra, 1981.
8. *Sippel, K.* Modern Monitoring System software development. Leica Geosystems AG, 2001.
9. *Lutes, J., Chrzanowski, A., Bastin, G, Whitaker, C.* DIMONS – Software for automatic data collection and automatic deformation analysis. 2001.

10. Instruction for deformation monitoring of building and engineering facilities. Sofia, GUGKK, 1980.

11. Structural Deformation Surveying. US Army Corps of Engineers, Department of Army, Washington, DC 20314-1000, Manual No. 1110-2-1009, 1 June 2002.

PERMISSIBLE ACCURACIES WHEN USING AUTOMATED GEODETIC METHODS FOR MONITORING DEFORMATION PROCESSES IN ENGINEERING FACILITIES

A. Angelov¹

Keywords: deformations of engineering facilities, landslides and tail-storages

ABSTRACT

This paper examines the possibilities of modern technical resources for continuous monitoring of deformation processes in engineering facilities, landslides and tail-storages, using a combination of periodic geodetic measurements, real-time monitoring and application software. The main geodetic methods applicable in the study of deformations of similar sites, including through robotic total stations and GNSS, are considered.

Particular attention is paid to the assessment of the accuracy of the different methods and analysis of the possibilities for their practical application in accordance with the pre-set tolerances. The basic principles for the realization of automated monitoring systems based on the existing world experience in this field are presented, including the author's software system allowing processing, storage and visualization of the results of deformation processes, with periodic observations and in real time.

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