

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

БОГДАНОВ СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 528.4

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТА ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА
ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ
ЕЛЕКТРОННИМИ ГЕОДЕЗИЧНИМИ ПРИБЛАДАМИ**

05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Київському національному університеті будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Кузьмич Олександр Йосипович,
Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри інженерної геодезії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Самойленко Олександр Миколайович,
Науково-виробничий інститут метрологічного забезпечення вимірювань геометричних, механічних та віброакустичних величин,
ДП «Укрметртестстандарт», директор;

кандидат технічних наук,
Гончаренко Олександр Степанович,
Київський національний університет ім. Т.Шевченка,
доцент кафедри геодезії та картографії

Захист відбудеться «19» червня 2015 р., о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.09 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03680, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03680, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий «_____» _____ 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент

О.П. Ісаєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Методи застосування лазерних приладів і засоби інженерно-геодезичних вимірювань використовують у поєднанні з оптико-електронним та фотоелектричним обладнанням, які в останні роки отримали особливий розвиток. Методи і засоби вимірювань в умовах вібрацій не забезпечують необхідну точність і автоматизацію геодезичного контролю при монтажі технологічного обладнання та експлуатації сучасних інженерних споруд промислового та енергетичного призначення.

Незважаючи на те, що в останні два десятиліття масштаб будівництва сучасних промислових споруд значно скоротився, а кількість введених у дію підприємств енергетичного та промислового призначення знизився, необхідність дослідно-конструкторських розробок по вивченню впливу вібрацій на геодезичні прилади не втратили своєї значущості та актуальності.

Специфіка сучасного будівництва унікальних інженерних споруд вимагає значного підвищення точності вимірювань, максимальної автоматизації геодезичних робіт та математичного оброблення результатів вимірювань.

У даний час у практику геодезичного забезпечення будівництва, монтажу технологічного обладнання, експлуатації адміністративних, інженерних і промислових споруд інтенсивно впроваджуються оптико-електронні прилади для інженерно-геодезичних вимірювань, такі, як: електронні тахеометри, цифрові нівеліри, лазерні сканери, трейкери, супутникові системи координатного позиціонування т.ін. Ці високоточні сучасні геодезичні прилади і системи при роботі в промислових умовах також піддаються впливу вібраційних полів.

Проте і в цих умовах доводиться виконувати геодезичні вимірювання, що свідчить про необхідність розроблення методики визначення та врахування впливу вібрацій на точність вимірювань електронними геодезичними приладами.

У зв'язку з необхідністю виконання інженерно-геодезичних вимірювань в умовах вібрацій, в роботі виконані експериментальні дослідження для визначення ступеня вібростійкості і впливу вібрацій на точність вимірювань електронними геодезичними приладами, розроблені рекомендації щодо застосування спеціальних методик геодезичних вимірювань. Тому електронні тахеометри і цифрові нівеліри стали предметом дослідження у дисертаційній роботі.

В останні декілька десятиліть питання, пов'язані з цією проблемою, розглянуті в роботах: І.Ю. Васютінського, Д. Гоммеля, Б.М. Джуман, Б.Н. Жукова, Ю.Г. Кирьянова, А.В. Кошельова, О.Й. Кузьмича, Б. Мантойфеля, М.Н. Мироновича, В.Ф. Нестеренока, М.С. Нестеренока, В.Н. Найденка, Г.П. Налімова, П.В. Павліва, Ю.Г. Соколова, М.І. Тарасенка, Г.У. Уставича, В.Ф. Шаульського, Х.К. Ямбаєва т.ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано у рамках державних, галузевих і науково-дослідних програм на підставі таких документів:

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 11 лютого 1998 р. № 113/98.

2. Постанова Кабінету Міністрів України від 8 квітня 2009 р. № 332. Про затвердження Технічного регламенту щодо суттєвих вимог до засобів вимірювальної техніки.

3. Постанова Кабінету Міністрів України від 11 вересня 1995 р. та від 28 червня 1997 р. про створення програм для спостережень на геодинамічних полігонах за ендогенними, екзогенними і техногенними процесами на атомних електричних станціях України.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи є вирішення науково-прикладного завдання, визначення та врахування впливу вібрацій на точність вимірювань електронними тахеометрами і цифровими нівелірами.*

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- аналіз сучасного стану впливу вібрацій на точність вимірювань геодезичними приладами;
- аналіз впливу вібрацій на електронні геодезичні прилади та основні фактори, що впливають на точність вимірювань;
- розробка методики контролю і розрахунок допустимих величин впливу вібрацій на електронні геодезичні прилади;
- дослідження приладів щодо збереження метрологічних характеристик в умовах вібрацій (оцінка вібростійкості) та отримання значень резонансних частот (оцінка віброчутливості);
- дослідження впливу вібрацій на точність результатів кутових і лінійних вимірювань, зняття відліку та стійкість системи «штатив-геодезичний прилад»;
- розроблення математичної залежності між частотою і амплітудою вібрацій за результатами експериментальних досліджень;
- розроблення практичних рекомендацій щодо виконання інженерно-геодезичних робіт в умовах вібрацій.

Об'єкт дослідження – цифрові нівеліри та електронні тахеометри при вимірюванні відстаней, горизонтальних і вертикальних кутів, визначення координат і висот пунктів.

Предмет дослідження – інженерно-геодезичні вимірювання в умовах вібрацій.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні статистичного аналізу та дисперсійного аналізу. Для визначення оцінки точності результатів вимірювань в умовах вібрацій побудовано математичні моделі за методом найменших квадратів (МНК).

Наукова новизна. Полягає в отриманні теоретичних і практичних результатів щодо вирішення науково-прикладного завдання впливу вібрацій на точність вимірювань електронними геодезичними приладами, а саме:

- вперше виконані експериментальні дослідження впливу вібрацій на точність вимірювань сучасними електронними тахеометрами і цифровими нівелірами;
- визначені резонансні частоти і параметри вібростійкості приладів;
- застосовано програмне середовище «MathCad» для перевірки коректності даних та побудови математичної залежності між частотою і амплітудою вібрацій;
- вперше розроблена та теоретично обґрунтована модель вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів в умовах вібрацій, яка дозволяє виконати оцінку точності залежності між частотою і амплітудою вібрацій;
- на основі експериментальних даних теоретично обґрунтована та підібрана оптимальна математична модель зняття відліків;

- розроблені рекомендації щодо зменшення впливу вібрацій на точність геодезичних вимірювань електронними геодезичними приладами.

Практичне значення одержаних результатів полягає в отриманні реальних діапазонів частот і амплітуд вібрацій, що дають можливість визначити параметри вібростійкості і віброчутливості електронних геодезичних приладів в умовах вібрацій. Практичні рекомендації та результати теоретичних і експериментальних досліджень дозволяють використовувати під час виконання інженерно-геодезичних вимірювань на гідротехнічних, енергетичних і промислових об'єктах, тобто для проведення вимірювань в місцях вібраційного впливу.

Особистий внесок здобувача. Наукові дослідження, що викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно, що підтверджується одноосібними публікаціями з ключових аспектів задачі, а саме: побудова математичної моделі результатів вимірюваних кутів електронним тахеометром в умовах вібрацій на основі експериментальних даних, використання сучасних матеріалів для зменшення впливу вібрацій; аналіз впливу вібрацій на стійкість системи «штатив-тахеометр». У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: [1,3] – особливості та методика дослідження геодезичних робіт в умовах вібрацій; [6] – дослідження впливу вібрацій на сучасні цифрові нівеліри.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на щорічних науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури та отримали позитивну оцінку (м. Київ, 2010-2014 рр.), на наукових конференціях молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА (м. Київ, 2010-2014 рр.).

Публікації. Основні результати та висновки дисертаційного дослідження опубліковані у 6-ти роботах (з них 3 одноосібних), 5 з них опубліковані у фахових наукових періодичних виданнях, які входять до затвердженого в Україні переліку, 1 у міжнародних періодичних виданнях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг роботи становить 167 сторінок, у тому числі 153 сторінки основного тексту, 63 рисунки, з них 6 на окремих сторінках, 31 таблиця, список використаних джерел, обсягом 85 найменувань на 8 сторінках та додаток на 27 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання і методи досліджень, відмічено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, сформульовано основні положення, що виносяться на захист, викладено відомості про апробацію роботи, повноту публікацій результатів, коротко розкрито основний зміст роботи.

У першому розділі «Аналіз сучасного стану впливу вібрацій на точність вимірювань геодезичними приладами» проведено аналіз основних видів і параметрів промислових вібрацій, які виникають на об'єктах під час проведення інженерно-геодезичних вимірювань. Основні параметри вібрацій представляються у вигляді чисельних величин: вібропереміщення, віброшвидкість, віброприскорення, амплітуда і частота.

Розглянуто основні види вібрацій, які виникають при виконанні інженерно-геодезичних вимірюваннях, будівництві і експлуатації сучасних споруд – транспортні і технологічні. З аналізу досліджень впливу вібрацій на точність вимірювань геодезичними приладами основними характерними чинниками є: рух автомобілів на будівельних майданчиках, рух механізмів і систем стаціонарних машин, інтенсивність дій яких регламентована технологією і тому не може зупинятися на момент проведення геодезичних робіт.

Проаналізовано параметри вібрацій, що виникають в процесі роботи, які характеризуються частотами 20-60 Гц і амплітудами від 5-10 до 80-100 мкм. За попередніми дослідженнями зафіксовано, що при дії вібрацій на точність геодезичних вимірювань, приладу необхідно пред'являти метрологічні вимоги не тільки до віброміцності, але й вібростійкості. Тобто, мається на увазі спроможність приладів виконувати свої функції і зберігати метрологічні параметри.

При проведенні детального аналізу встановлено, що вібрація значно впливає на точність геометричного нівелювання. Дослідження показали, що вібрація викликає: резонанс приладів з маятниковим компенсатором, коливання лінії візування, значні коливання бульбашки рівня, похибку зняття відліку.

Виконаний аналіз впливу вібрацій на кутові вимірювання оптичними теодолітами, оскільки електронними тахеометрами ще не займалися. Вібрація викликає ряд негативних факторів: коливання візирної лінії зорової труби і відлікового індексу вертикального круга; резонансні коливання бульбашки рівня; розфокусування зорової труби по вертикалі; розворот зорової труби по азимуту; переміщення горизонтального круга; розворот системи «штатив-прилад».

Проаналізовано основні методи і засоби віброізоляції геодезичних приладів. Для підвищення точності вимірювань їх класифікують за трьома основними групами: пасивні, активні, безамортизаційні.

Проведено детальний аналіз методів підвищення точності візування в умовах вібрацій. Одним з найбільш перспективних методів є метод застосування стробоскопічного ефекту, принцип якого ґрунтується на інерційності зору людини. З результатів експериментальних досліджень встановлено, що використання стробоскопічного ефекту дозволяє трансформувати зорове сприйняття, завдяки чому зображення візирної цілі, що коливається, здається наглядно нерухомим.

Виконаний у розділі аналіз, дозволяє зробити висновок, що дослідженнями впливу вібрацій на точність геодезичних вимірювань електронними тахеометрами і цифровими нівелірами на сьогоднішній час не займалися і експериментальні дослідження не виконувалися. Проведений аналіз дозволяє сформулювати основні завдання і перспективи дослідження електронних геодезичних приладів. У роботі визначені основні напрямки дослідження щодо виконання інженерно-геодезичних вимірювань в умовах вібрацій.

У другому розділі **«Конструктивні особливості сучасних електронних систем та основні фактори, що впливають на точність вимірювань»** наведені загальні принципи роботи, технічні характеристики і конструктивні особливості цифрових нівелірів та електронних тахеометрів. Розглянуто вплив вібрацій на окремі конструктивні елементи, які піддаються вібраційному впливу. Визначені

основні фактори, що впливають на точність вимірювань електронними геодезичними приладами в умовах вібрацій.

Розглянуто вплив вібрацій на точність зняття відліку, що пов'язаний безпосередньо з внутрішньою частиною цифрового нівеліра, а саме: з компенсатором. Встановлено, що вібрація впливає на прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ-матрицю), яка складається зі світлочутливих фотодіодів, виконаних на основі кремнію, що перетворює зображення рейки (штрих-коду) в цифрову інформацію.

Визначено ряд негативних факторів при проведенні кутових і лінійних вимірювань електронними тахеометрами. Найбільш характерними з них є: коливання візирної лінії зорової труби; резонансні коливання бульбашки рівня; розворот зорової труби по азимуту; коливання електронного компенсатора; розворот системи «штатив-прилад»; нахил вертикальної осьової системи; коливання датчика вимірювання горизонтальних і вертикальних напрямків.

Розглянуто основні конструктивні елементи тахеометра, які можуть бути схильні до вібраційної дії: рівень, компенсатор, осьова система. За результатами досліджень встановлено, що під час виконання геодезичних вимірювань в умовах вібрацій спостерігається коливання або взагалі відхилення круглого рівня від нуля-пункту.

Вплив вібрацій на точність вимірювання кута пов'язаний з конструктивними особливостями тахеометрів – вертикальної осьової системи з робочою мірою – горизонтальним кругом. У сучасних електронних тахеометрах штрих-кодовий лімб скріплений з основною втулкою вертикальної осьової системи, яка в свою чергу міцно закріплена з трегером. Визначені основні джерела похибок з врахуванням впливу вібрацій при роботі з цифровими нівелірами та електронними тахеометрами. Результатом є випадкові і систематичні похибки.

СКП зняття відліку цифровим нівеліром з урахуванням похибок приладу та похибок зовнішнього середовища має наступний вигляд:

$$m_H = \sqrt{m_{Пр}^2 + m_{з.у.}^2}, \quad (1)$$

де $m_{Пр}$ – похибки прилада; $m_{з.у.}$ – похибки зовнішніх умов.

$$m_{Пр} = \sqrt{m_k^2 + m_{м.к.р.}^2 + m_i^2}; \quad m_{з.у.} = \sqrt{m_{н.т.}^2 + m_{віб}^2},$$

де m_k – похибка компенсації; $m_{м.к.р.}$ – похибка масштабу коду рейки; m_i – похибка одного інтервалу штрих-кодової рейки; $m_{н.т.}$ – похибка визначення температури навколишнього середовища; $m_{віб}$ – похибка впливу вібрацій.

В результаті визначено СКП відліку, що складає $m_H = 0,6$ мм.

Для розрахунку точності вимірювання горизонтальних напрямків отримано загальну СКП:

$$m_\beta = \sqrt{m_p^2 + m_u^2 + m_i^2 + m_{з.у.}^2 + m_{в.к.}^2 + m_{вих}^2}, \quad (2)$$

де m_p – похибка редукції візирної цілі; m_u – похибка центрування;

m_i – інструментальна похибка; $m_{з.у.}$ – похибка зовнішніх умов; $m_{в.к.}$ – похибка вимірювання кута; $m_{вих}$ – похибка вихідних даних.

Отримано СКП вимірювання горизонтального кута одним повним прийомом електронним тахеометром, що дорівнює $m_{\beta} = 3,9''$.

Загальна СКП вимірювання лінії з урахуванням випадкових і систематичних похибок:

$$m_L = \sqrt{m_{S_{\varphi}}^2 + m_{S_h}^2 + m_{S_{\varphi}}^2 + m_{S_{\varphi, p.}}^2 + m_{S_l}^2 + m_{S_c}^2 + m_k^2 + m_{з.у.}^2}, \quad (3)$$

де m_{φ} – похибка вимірювання різниці фаз; m_{S_h} – похибка приведення лінії до горизонту; $m_{S_{\varphi}}$ – циклічна похибка фазометра; $m_{S_{\varphi, p.}}$ – похибка центрування світловіддалеміра, редукції і відбивача; m_{S_l} – похибка генератора частоти; m_{S_c} – похибка в довжині, викликана похибками визначення робочої швидкості світла; m_k – похибка визначення постійної світловіддалеміра; $m_{з.у.}$ – похибка зовнішніх умов.

Визначено, що СКП при вимірюванні довжини електронним тахеометром складає $m_l = 5,6$ мм.

У третьому розділі «Розроблення методики визначення вібростійкості та врахування впливу вібрацій на електронні геодезичні прилади» виконані експериментальні дослідження на ДП «Укрметрестандарт» в інституті «УкрТЕСТ» на вібростенді ВЕДС-400А.

Розроблено методику дослідження вібростійкості конструктивних елементів цифрових нівелірів і електронних тахеометрів із застосуванням спеціальної вібрмарки (рис.1).

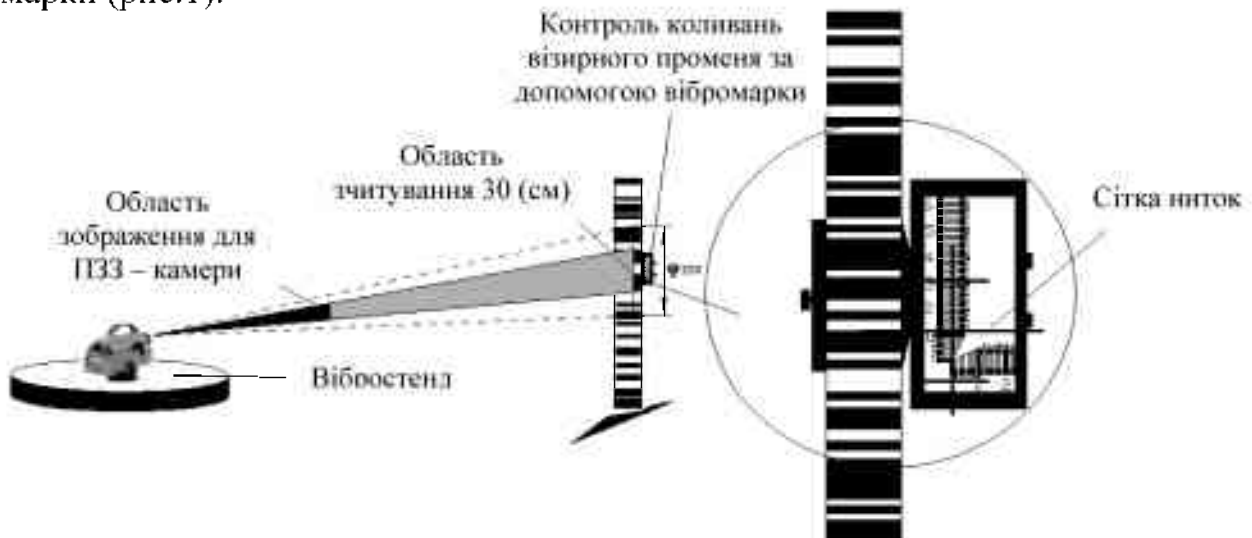


Рис. 1. Контроль коливання візирного променя цифрового нівеліра

Встановлено допустиму граничну амплітуду кутових коливань $\varphi_{дон}$ візирного променя цифрових нівелірів за формулою:

$$\varphi_{дон}'' = \frac{x_{дон}}{D} \cdot \rho'', \quad (4)$$

де $x_{дон}$ – величина змазання, D – відстань до рейки; $\rho = 206265''$.

При нівелюванні за програмою третього класу довжина візирного променя за інструкцією складає 60-70 м. Прийmemo величину змазання $x_{\text{дон}} = 3 \text{ мм}$, тоді за формулою (4) значення не повинно перевищувати, відповідно: $10,3''$ і $8,8''$.

На основі експериментальних досліджень побудовані графіки амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) електронних тахеометрів та цифрових нівелірів, на яких відмічені параметри вібрацій, при яких вона досягає $\varphi_{\text{дон}} = 10''$.

Для кожного дослідження апроксимована функція (лінія тренда). Розраховано коефіцієнт детермінації R^2 , який характеризує ступінь достовірності апроксимації за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (5)$$

де $y_i - \bar{y}_i$ – міра залежності варіації фактичної змінної від варіації розрахункових змінних;

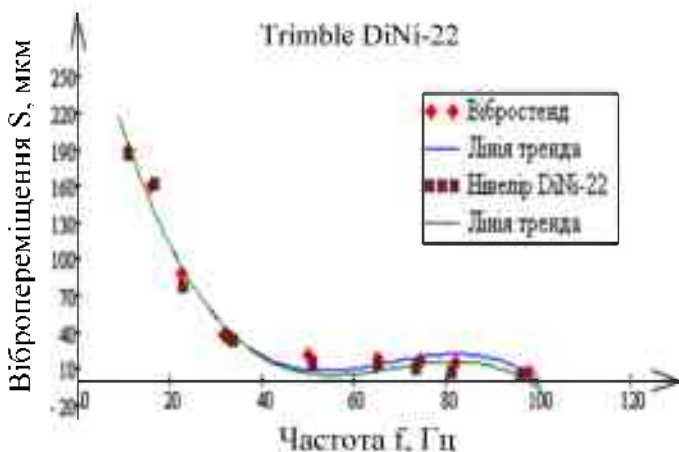
$y_i - \bar{y}$ – загальна сума квадратів фактичних і розрахункових значень змінної.

На першому етапі дослідження задавалася вібрація в діапазоні частот від 10 до 100 Гц і амплітудою від 20 до 200 мкм. Зі збільшенням частоти f збільшувалася амплітуда S . Виміряну амплітуду коливань зорової труби за допомогою віброметра 795M107В порівнювали з амплітудою коливань стола вібростенда (рис. 2). За результатами обчислень одержані рівняння регресії:

а) $y = -0,00012x^3 + 0,244x^2 - 15,845x + 340,05$; б) $y = 0,0005x^3 + 0,087x^2 - 5,766x + 206,078$;

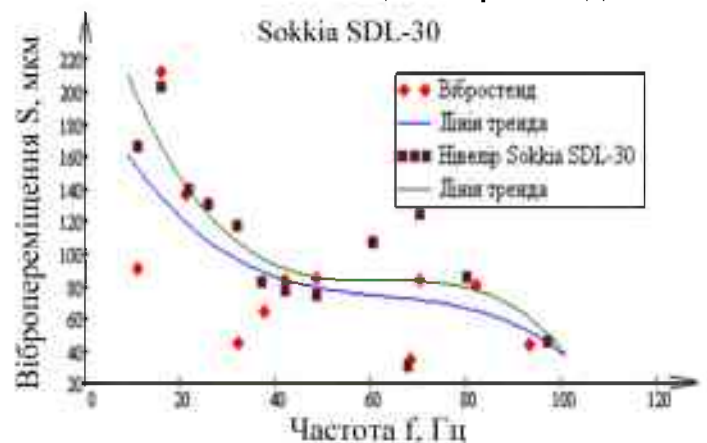
$R^2 = 0,9837$ – для вібростенда

$R^2 = 0,3778$ – для вібростенда



$y = -0,0012x^3 + 0,237x^2 - 15,618x + 337,943$;

$R^2 = 0,9733$ – для нівеліра



$y = -0,0008x^3 + 0,154x^2 - 9,632x + 284,161$;

$R^2 = 0,7117$ – для нівеліра

Рис. 2. Дослідження АЧХ вібростенда і цифрового нівеліра

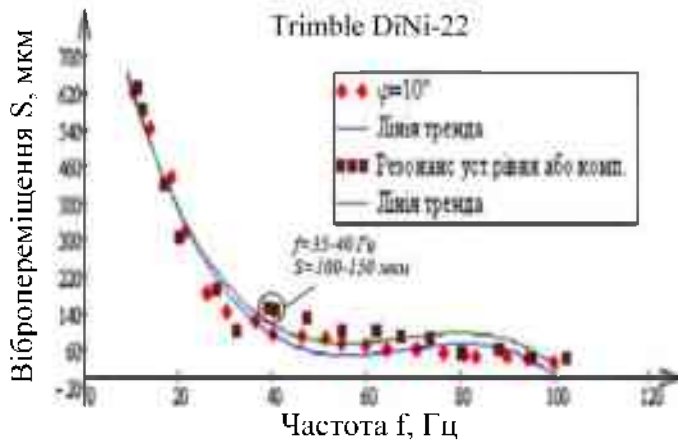
Виявлено резонанс для нівеліра Sokkia в діапазоні частот 30-32, 70-71 Гц і відповідно з амплітудами 44-117 та 84-124 мкм.

На другому етапі досліджень вимірювання проводилися на фіксованих частотах в діапазоні 10-100 Гц. Крок зміни частоти 5 Гц (рис. 3). На кожній фіксованій частоті амплітуду вібрацій вібростенда плавно збільшували до моменту,

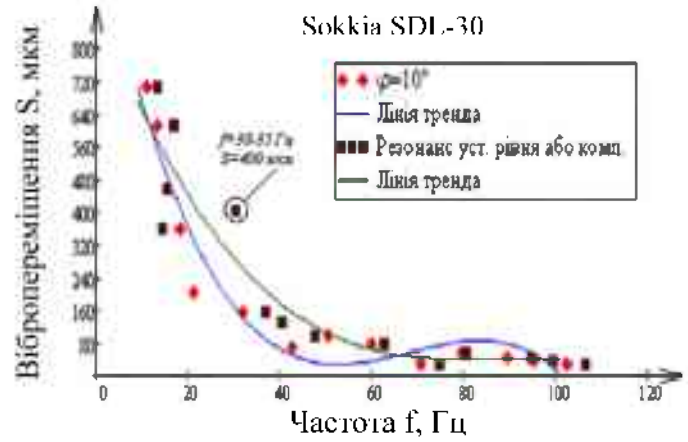
при якому спостерігалися різкі відхилення і аритмічні коливання візирного променя (більше $\varphi_{\text{дон}} = 10^\circ$). Отримані наступні рівняння регресій:

а) $y = -0,0034x^3 + 0,69x^2 - 45,543x + 1024$;
 $R^2 = 0,9748$ – для візирного променя

б) $y = -0,004x^3 + 0,811x^2 - 52,363x + 1116$;
 $R^2 = 0,9428$ – для візирного променя



$y = -0,0032x^3 + 0,653x^2 - 42,876x + 988,984$;
 $R^2 = 0,9561$ – для установчого рівня



$y = -0,0013x^3 + 0,345x^2 - 30,206x + 917,337$;
 $R^2 = 0,8706$ – для установчого рівня

Рис. 3. Дослідження АЧХ коливання візирної осі і установчого рівня або компенсатора

Відмічені резонансні коливання компенсатора в нівелірі Sokkia при дії вібрацій на частотах 30-35 Гц і при амплітуді 400 мкм (рис. 3, б). Компенсатор нівеліра Trimble найбільш стійкий до вібраційної дії. У DiNi-22 резонансні коливання компенсатора спостерігалися у вузькому діапазоні частот 35-40 Гц і з амплітудою 100-150 мкм (рис. 3, а).

За результатами досліджень точності роботи компенсатора цифрових нівелірів отримані середні квадратичні похибки компенсації m_k за формулою:

$$m_k = \sqrt{\frac{[V_i V_i]}{n-1}}, \quad (6)$$

де $V = h_i - h_{\text{сер}}$.

Визначені значення систематичних похибок з відліків θ_k в умовах вібрацій за формулою:

$$\theta_k = (h_0 - h_{\text{сер}}). \quad (7)$$

Результати СКП компенсації приведені в табл.1.

Таблиця 1

СКП компенсації цифрових нівелірів

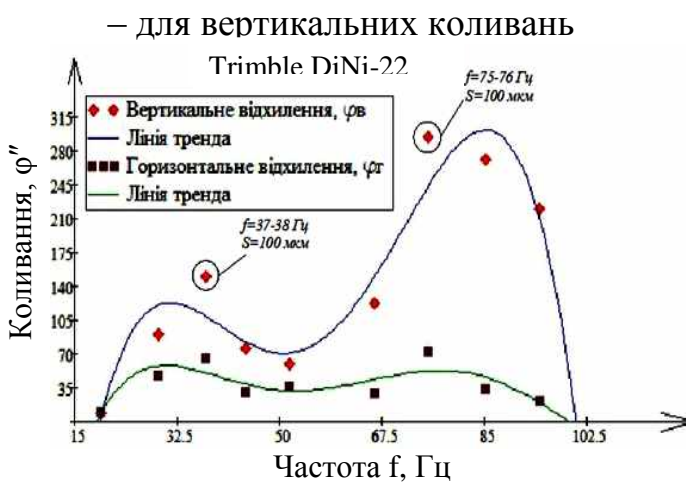
Назва прилада	СКП в норм. умовах $m_{k_{\text{норм}}}$, (мм)	СКП компенсації в умовах вібрацій m_k , (мм)			
		Режим Single	Режим Repeat	Режим Average	Режим Tracking
Sokkia	0,04	0,07	0,08	0,03	0,10
		Систематична похибка компенсації θ_k , (мм)			
		0,08	0,04	0,03	0,01
Trimble	0,04	0,16			
		0,04			

Слід зауважити, що для цифрового нівеліра Sokkia систематична складова похибки відліку буде зростати пропорційно зростанню відстані до рейки, наприклад, на відстані 50 м, вона може складати 0,4 мм. Систематичні похибки нівелірів DiNi і Sokkia в умовах вібрацій при цьому не перевищують відповідно: 0,04 і 0,08 мм.

Досліджено поведінку візирної осі і визначено значення резонансних частот цифрових нівелірів. Дослідження виконані на фіксованих частотах в діапазоні 10-100 Гц з кроком 5 Гц при постійній амплітуді вібропереміщення $S=100\text{мкм}$. Визначено амплітуду горизонтальних X_z і вертикальних X_e коливань (рис. 4) за формулою (4). Отримані рівняння регресій:

а) $y = 0,00004x^5 - 0,0003x^4 + 0,064x^3 - 4,653x^2 + 142,769x - 1438; \quad R^2 = 0,9072$

б) $y = 0,00007x^5 - 0,0156x^4 + 1,344x^3 - 57,014x^2 + 11,67x - 9116; \quad R^2 = 0,9850$



$y = 0,000001x^5 - 0,0004x^4 + 0,05x^3 - 2,945x^2 + 79,708x - 743,488; \quad R^2 = 0,6373$

— для горизонтальних коливань



$y = 0,000006x^5 - 0,0008x^4 + 0,029x^3 - 2,233x^2 + 29,359x - 375,43; \quad R^2 = 0,9999$

— для горизонтальних коливань

Рис. 4. Резонансні частоти та значення вертикальних і горизонтальних коливань візирної осі цифрових нівелірів

Результати експериментальних досліджень приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Резонансні частоти та значення вертикальних і горизонтальних коливань візирної осі цифрових нівелірів

Назва прилада	$f_{p.ч.}$, (Гц)	S_a , (мкм)	Вертикальні коливання, φ_e''	Горизонтальні коливання, φ_z''
Trimble	37-38	100	150	66
	75-76		295	73
Sokkia	30-32	100	94	5
	70-71		374	187

Встановлено, що конструкція сучасних нівелірів має 2 резонансні частоти, що пояснюється значною складністю такої коливальної системи як цифровий нівелір.

Методика дослідження вібростійкості електронних тахеометрів була такою, як і при дослідженні цифрових нівелірів. Контроль коливання візирного променя тахеометрів здійснювався за допомогою вібромарки (рис. 1). Дослідження АЧХ електронних тахеометрів наведені на графіках (рис. 5).

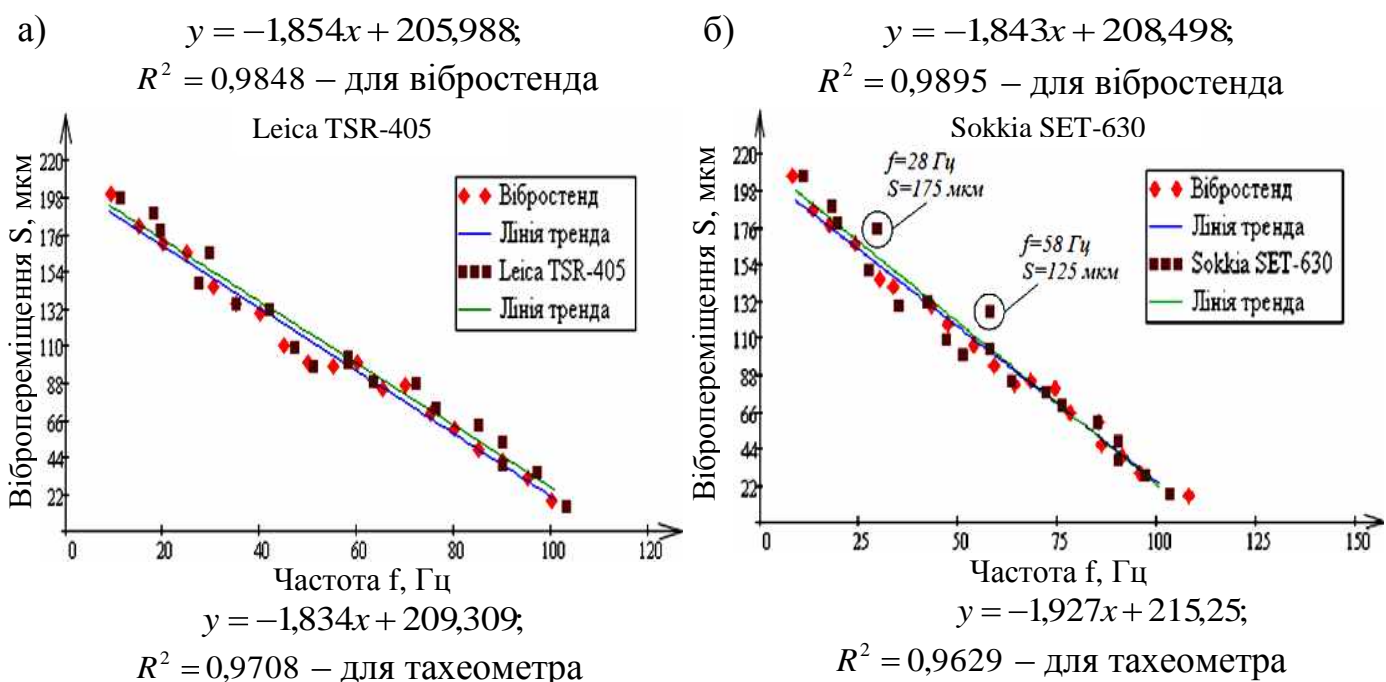


Рис. 5. Дослідження АЧХ вібростенда і електронних тахеометрів

Незначні коливання спостерігаються у тахеометра Sokkia SET-630 на частоті 29,58 Гц з амплітудами 175, 125 мкм (рис. 5, б).

У програмі на наступному етапі проведено дослідження на фіксованих частотах в діапазоні 20-100 Гц. Крок зміни частоти прийнято рівним 5 Гц (рис. 6). Розраховані рівняння регресій для обох тахеометрів:

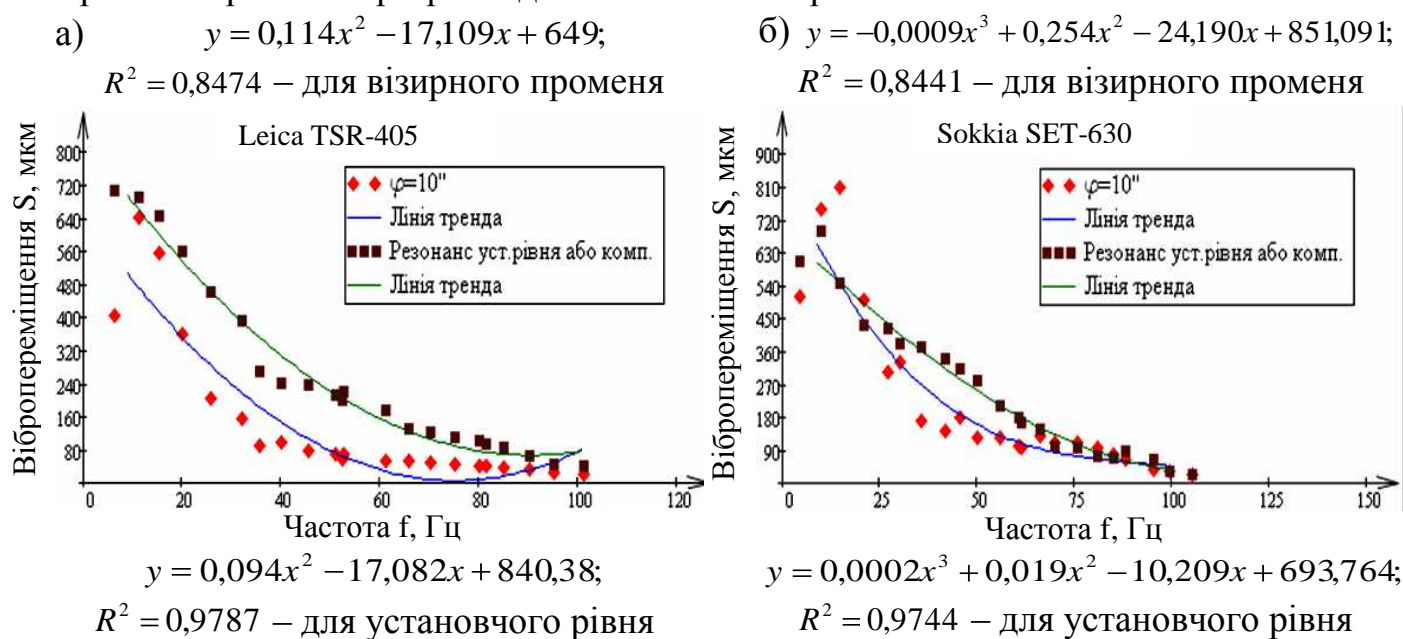


Рис. 6. Дослідження АЧХ зорової труби електронних тахеометрів

Фіксувалися відхилення і аритмічні коливання візирного променя тахеометрів до моменту, коли φ_i зростала до значення $\varphi_{дон} = 10''$.

Можна відзначити, що вібростійкість зорової труби порушується в усіх тахеометрів приблизно при частоті $f_e > 20-25$ Гц і амплітуді $S_a > 20$ мкм.

Перевірено стабільність роботи компенсатора в умовах вібрацій під час фіксування відліку по вертикальному кругу. Отримані результати зведені в табл. 3.

СКП компенсації електронних тахеометрів

Назва прилада	СКП в норм. умовах $m_{к.у.}, \dots$	СКП компенсації в умовах вібрацій $m_{к.віб}, \dots$	Систематична похибка компенсації θ_{k_i}, \dots
Leica	1,6	5	4,5
Sokkia	1,6	9,7	0,5

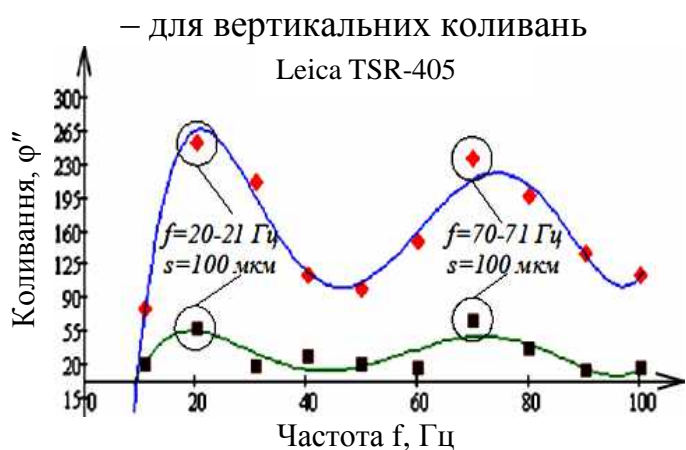
Встановлено, що систематичні похибки компенсатора електронних тахеометрів не перевищують відповідно: 4,5" і 0,5", що задовольняє умові роботи.

Визначені резонансні частоти та вплив вібрацій на вертикальні і горизонтальні коливання візирної осі електронних тахеометрів (рис. 7).

Амплітуда φ_e вертикальних коливань візирного променя у тахеометрах Leica складає $\varphi_e = 252''$ та $\varphi_z = 57''$ – горизонтальна, у Sokkia $\varphi_e = 197''$ і $\varphi_z = 44''$. У даному випадку наведення на візирну ціль значно складніше виконувати при вимірюванні вертикальних кутів, ніж при горизонтальних вимірюваннях. За результатами обчислень одержані рівняння регресій:

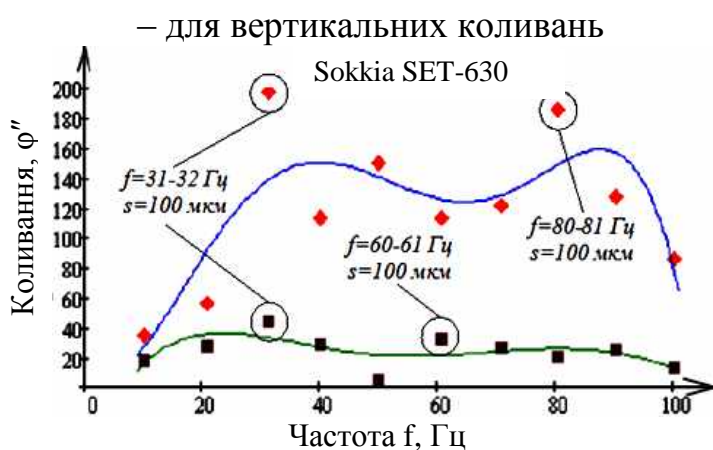
а) $y = 0,000005x^5 - 0,0014x^4 + 0,155x^3 - 7,686x^2 + 165,637x - 1002; \quad R^2 = 0,9639$

б) $y = -0,000001x^5 - 0,0003x^4 + 0,027x^3 - 0,875x^2 - 5,872x - 21,08; \quad R^2 = 0,6355$



$y = 0,000001x^5 - 0,0004x^4 + 0,041x^3 - 1,918x^2 + 38,724x - 222,308; \quad R^2 = 0,6349$

– для горизонтальних коливань



$y = 0,000001x^5 - 0,00005x^4 + 0,0068x^3 - 0,397 + 9,833x - 50,312; \quad R^2 = 0,4151$

– для горизонтальних коливань

Рис. 7. Резонансні частоти та значення вертикальних і горизонтальних коливань зорової труби електронних тахеометрів

Результати експериментальних досліджень приведені в табл. 4.

Таблиця 4

Резонансні частоти та значення вертикальних і горизонтальних коливань зорової труби електронних тахеометрів

Назва прилада	$f_{р.ч.}, (Гц)$	$S_a, (мкм)$	Вертикальні коливання, φ_e''	Горизонтальні коливання, φ_z''
Leica	20-21	100	252	57
	70-71		235	65
Sokkia	31-32	100	197	44
	60-61		-	33
	80-81		186	-

Встановлено, що при постійній амплітуді 100 мкм конструкція сучасних електронних тахеометрів має 2-3 резонансні частоти. Параметри вібрацій характерні під час виконання геодезичних робіт в промислових умовах.

Виконано теоретичний аналіз впливу вібрацій на стійкість системи «штатив-геодезичний прилад». Розглянуто вертикальні переміщення системи при гармонічних коливаннях основи, синхронних і рівних за амплітудою в кожній точці спирання штативу (рис. 8).

Вертикальна компонента основи u може бути описана залежність:

$$u = u_0 \sin \theta \cdot t, \quad (8)$$

де u_0 – амплітуда; θ – кругова частота коливань; t – час.

Якісний рівень роботи геодезичного приладу залежить від рівня параметрів вібрацій. Наприклад, зменшуючи амплітуду, ставимо умову:

$$u_{\text{доп}} = \frac{\eta g}{(2\pi f)^2}, \quad (9)$$

де $\eta=0,6$ – коефіцієнт віброякості приладу.

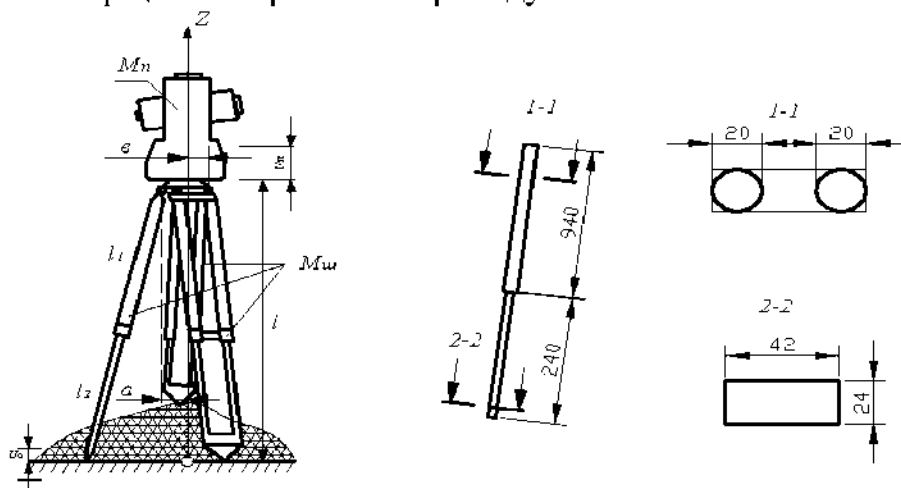


Рис. 8. Аналіз впливу вібрацій на стійкість системи «штатив-тахеометр»

Для розсувного штативу з постійним значенням площі поперечного перерізу F_1 по всій довжині однієї опори сумарна вертикальна жорсткість має вигляд:

$$K_{\text{ш}} = \frac{3EF_1}{l}, \quad (10)$$

де E – модуль пружності матеріалу; F – площа поперечного перерізу стрижня.

Кругова частота власних вертикальних коливань маси M_n , закріпленої на стрижневих опорах $M_{\text{ш}}$ складає:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{\text{ш}}}{M_n + 0,33M_{\text{ш}}}}. \quad (11)$$

За результатами досліджень визначено, що при амплітуді 5, 10, 15 мкм вібростійкість приладу не погіршується, тоді як при 20 мкм і більше, параметри гармонічних коливань приладу не допустимі з $u_{\text{доп}} = 59,7$ мкм.

У четвертому розділі «Дослідження впливу вібрацій на точність вимірювань електронними геодезичними приладами на основі експериментальних даних» виконувалися в лабораторних умовах. При незмінній частоті, що складала $f = 50 \text{ Гц}$, змінювалася амплітуда від 20 до 100 мкм. Середні квадратичні похибки зняття відліків цифровим нівеліром в умовах вібрацій представлені в табл. 5.

Таблиця 5

СКП зняття відліку при різних амплітудах вібрацій

1	Відстань, (м)		Амплітуда вібрацій S, (мкм)								
			20 мкм	30 мкм	40 мкм	50 мкм	60 мкм	70 мкм	80 мкм	90 мкм	100 мкм
2		СКП	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
3	HD=4.41	$m_{н.у.}$	0,048	0,042	0,042	0,048	0,032	0,048	0,042	0,042	0,042
4		$m_{віб}$	0,669	1,091	1,016	1,257	1,259	1,204	1,036	1,096	1,376
5	HD=6.11	$m_{н.у.}$	0,057	0,048	0,097	0,047	0,057	0,042	0,042	0,032	0,047
6		$m_{віб}$	0,863	1,076	1,253	1,266	1,287	1,160	1,287	1,449	1,265
7	HD=8.83	$m_{н.у.}$	0,097	0,042	0,067	0,032	0,042	0,047	0,070	0,047	0,047
8		$m_{віб}$	0,291	0,108	0,339	0,361	0,322	0,235	0,275	0,275	0,160

Результати дослідження показують, що максимальні середні квадратичні похибки на різних відстанях відрізняються. При відстані до рейки 4,41 м СКП становить 1,376 мм; 6,11 м – 1,449 мм; 8,83 м – 0,361 мм.

Отримані СКП вимірювання вертикальних і горизонтальних кутів в умовах вібрацій (табл. 6, 7). Умови лабораторні, тому візування виконували на нескінченно-віддалену ціль (коліматор) (рис. 9).

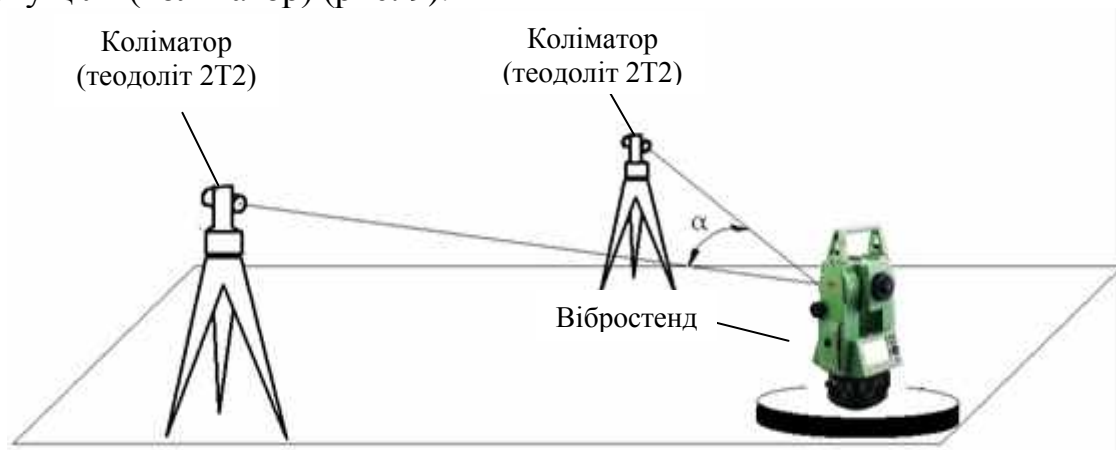


Рис. 9. Вимірювання кутів за допомогою коліматора (двох теодолітів 2Т2)

Таблиця 6

СКП вимірювання горизонтального кута при різних амплітудах вібрацій

№ п/п	$\beta=47^\circ 35' 26,5''$ – відлік в нормальних умовах									
		Амплітуда вібрацій S, (мкм)								
1	СКП	20 мкм	30 мкм	40 мкм	50 мкм	60 мкм	70 мкм	80 мкм	90 мкм	100 мкм
3		"	"	"	"	"	"	"	"	"
4	$m_{віб}$	0,7	1,5	1,1	0,8	1	1,2	1,2	1,1	1,3

СКП вимірювання вертикального кута при різних амплітудах вібрацій

№ п/п	$\beta=7^{\circ} 25' 30,5''$ – відлік в нормальних умовах									
1	Амплітуда вібрацій S , (мкм)									
2	СКП	20 МКМ	30 МКМ	40 МКМ	50 МКМ	60 МКМ	70 МКМ	80 МКМ	90 МКМ	100 МКМ
3		"	"	"	"	"	"	"	"	"
4	$m_{віб}$	2	2,1	2,8	3	2,6	3,3	3	3,4	3,3

Отже, встановлено, що максимальна СКП вертикальних кутів в умовах вібрацій складає $m_{\beta} = 3,4''$, що вдвічі перевищує максимальну похибку горизонтальних кутів $m_{\beta} = 1,5''$.

Досліджено вплив вібрацій на результати лінійних вимірювань електронним тахеометром. Частота і амплітуда вібрацій змінювалася в межах відповідно від 0 до 50 Гц і від 0 до 100 мкм. Довжина вимірюваної лінії складала 55,185 м.

Встановлено, що вібрації зумовлюють зміни результатів визначення довжини вимірюваної лінії і викликають поперечні зміщення (нахил) системи «тахеометр-відбивач» (рис. 10) в площині ХУ (кут α) і ZХ (кут δ).

СКП вимірювання відстані електронним тахеометром має дві складові: статичну ($m_{ст}$) і динамічну ($m_{дин}$). Перша – еквівалент відомої похибки світловіддалемірного блоку при відсутності вібрацій, друга – виникає в умовах вібрацій. Спільний їх вплив буде:

$$m_{\sigma}^2 = m_{ст}^2 + m_{дин}^2. \quad (12)$$

У свою чергу динамічну похибку можна представити як:

$$m_{дин}^2 = m_{\sigma}^2 + m_{н.в.}^2 + m_{ф.н.}^2, \quad (13)$$

де m_{σ} – похибка зумовлена мультиплікативною перешкодою вібрацій;

$m_{н.в.}$ – похибка за нахил тахеометра і відбивача;

$m_{ф.н.}$ – похибка фазової неоднорідності.

СКП вимірювання різниці фаз, визначається за формулою:

$$m_{\varphi} = \sqrt{\frac{P_{ш} \cdot \Delta F}{P_c \cdot \Delta f}}, \quad (14)$$

де P_c – потужність сигналу; $P_{ш}$ – потужність шумових перешкод вібрацій; ΔF – смуга пропускання частот фазометра; Δf – смуга пропускання підсилювача на вході фазометра.

У цьому випадку похибка відстані m_L , зумовлена вібраціями, має вигляд:

$$m_L = \frac{V \cdot m_{\varphi}}{4\pi f}, \quad (15)$$

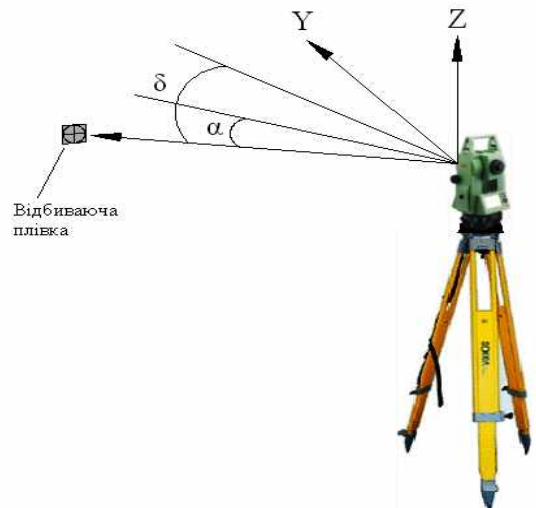


Рис. 10. Дослідження СКП впливу вібрацій на лінійні вимірювання

де V – швидкість світла в атмосфері; f – масштабна частота.

Отримані СКП вимірювання відстані в наступних режимах: вимірювання в нормальних умовах з увімкненим компенсатором (без вібрацій) (m_{L_1}); в умовах вібрацій з увімкненим компенсатором (m_{L_2}); з вимкнутим компенсатором (m_{L_3}); вимірювання в умовах вібрацій з увімкненим компенсатором із 5-ти повторювань (m_{L_4}). Значення СКП становлять відповідно:

$$m_{L_1} = 1,89 \text{ мм}; \quad m_{L_2} = 4,95 \text{ мм}; \quad m_{L_3} = 2,36 \text{ мм}; \quad m_{L_4} = 2,86 \text{ мм}.$$

Встановлено, що дія вібрацій на світловіддалемірні вимірювання зумовлена мультиплікативними похибками, вплив яких не залежить від потужності прийнятого світлового потоку, а визначається відстанню. СКП вимірювання лінії в умовах вібрацій може складати до 5 мм.

На основі експериментальних досліджень вимірювань горизонтальних і вертикальних кутів електронним тахеометром в умовах вібрацій, побудовано математичні моделі у вигляді: лінійної залежності, полінома 3-го степеня та синусоїдальної. Представлена та, яка найбільше відповідає характеру фізичного закону і дає меншу похибку.

Для визначення відповідності даних нормальному закону розподілу застосовувався критерій Пірсона або (χ^2), за формулою:

$$\chi_{\text{експ.},j}^2 = \sum_{j=0}^K \frac{(S_{I_j} - N_{I_j})^2}{N_{I_j}}, \quad (16)$$

де N_{I_j} – вирівнюючі частоти.

За даними варіаційних рядів побудовані полігони частот для горизонтальних і вертикальних кутів (рис. 11, 12).

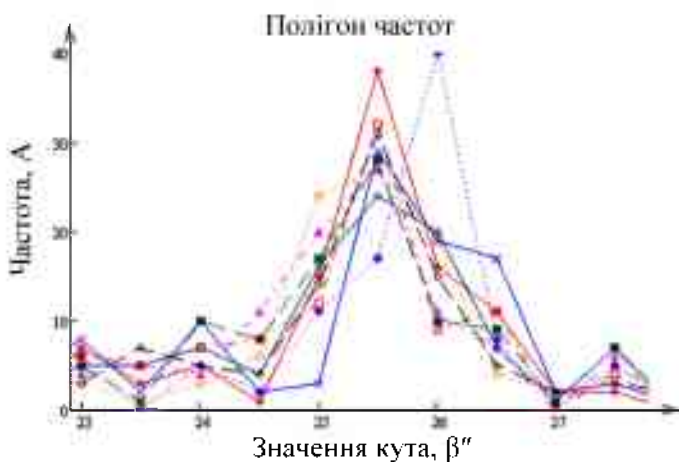


Рис. 11. Полігон частот варіаційного ряду горизонтальних кутів

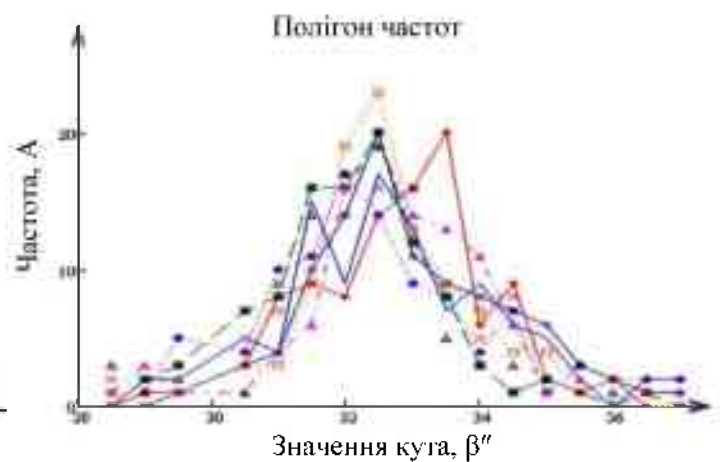


Рис. 12. Полігон частот варіаційного ряду вертикальних кутів

Побудовано синусоїдальну залежність між частотою і амплітудою вібрацій горизонтальних і вертикальних кутів (рис. 13, 14), рівняння має вигляд:

$$y = a \cdot \sin(x \cdot b + c) + d,$$

де a , b , c , d – коефіцієнти.

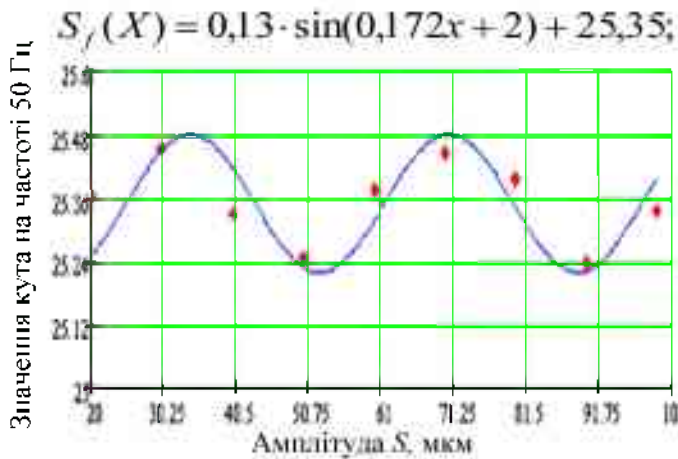


Рис. 13. Синусоїдальна залежність між частотою і амплітудою вібрацій горизонтальних кутів

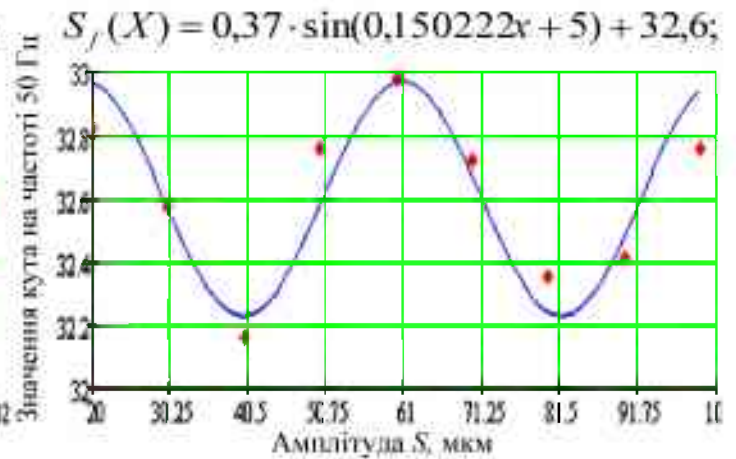


Рис. 14. Синусоїдальна залежність між частотою і амплітудою вібрацій вертикальних кутів

Для кожної моделі була знайдена СКП ε_j за формулою:

$$\varepsilon_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^8 (S_{s_j} - Sf(A_j))^2}{8}}. \quad (17)$$

Отримані дані представлені в табл. 8.

Таблиця 8

Результати середньої квадратичної похибки вимірювання кутів в умовах вібрацій за усіма моделями

№ п/п	Горизонтальні кути			Вертикальні кути		
	Лінійна залежність	Поліном 3-го степеня	Синусоїдальна залежність	Лінійна залежність	Поліном 3-го степеня	Синусоїдальна залежність
ε_j	0,074"	0,072"	0,061"	0,260"	0,259"	0,117"

Середня абсолютна Δ_s та відносна δ_s похибки обчислювалися за формулами:

$$\Delta_s = \frac{\sum_{j=0}^8 \Delta_j}{8}; \quad \delta_s = \frac{\sum_{j=0}^8 \delta_j}{8}. \quad (18)$$

Результати абсолютної та відносної похибок наведені в табл. 9.

Таблиця 9

Результати абсолютних і відносних похибок вимірювання кутів в умовах вібрацій за усіма моделями

№ п/п	Горизонтальні кути			Вертикальні кути		
	Лінійна залежність	Поліном 3-го степеня	Синусоїдальна залежність	Лінійна залежність	Поліном 3-го степеня	Синусоїдальна залежність
Δ_s	0,066"	0,065"	0,054"	0,241"	0,241"	0,102"
δ_s	0,003	0,003	0,002	0,007	0,007	0,003

Отже, побудована синусоїдальна залежність між частотою і амплітудою вібрацій у вигляді аналітичних і математичних розрахунків, яка є точнішою і відповідає фізичному закону.

За результатами досліджень точності зняття відліків цифровим нівеліром в умовах вібрацій побудовано математичні моделі у вигляді: лінійної залежності, синусоїдальної, лінії Безьє 2-го порядку та поліному 3-го степеня. Представлена та, яка відповідає характеру фізичного закону і дає найменшу похибку.

За даними варіаційних рядів побудовано полігон частот (рис. 15) та математичну залежність між частотою і амплітудою вібрацій у вигляді поліному 3-го степеня, яка найбільше відповідає характеру фізичного закону і дає меншу похибку (рис. 16). Рівняння має вигляд: $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$,

де a, b, c, d – коефіцієнти. Тоді отримаємо:

$$S_f(X) = -0,00093x^3 + 0,184558x^2 - 11,090028x + 1103,817825$$

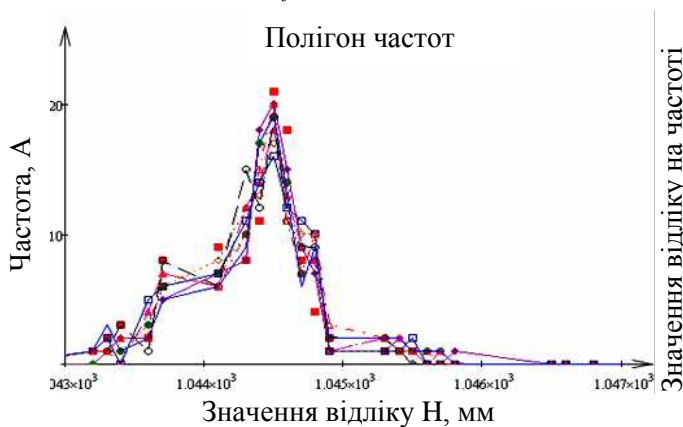


Рис. 15. Полігон частот варіаційного ряду з результатів зняття відліків

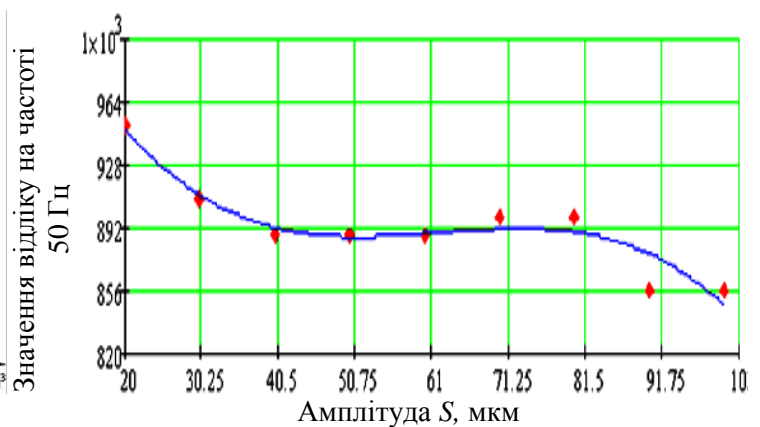


Рис. 16. Математична залежність між частотою і амплітудою вібрацій. Апроксимація поліномом 3-го степеня

Для кожної моделі була визначена середня квадратична похибка ε_1 за формулою (17). Дані представлені в табл. 10:

Таблиця 10

Результати середньої квадратичної похибки зняття відліків в умовах вібрацій за усіма моделями

№ п/п	Математичні моделі зняття відліків			
	Лінійна залежність	Синусоїдальна залежність	Лінія Безьє 2-го порядку	Поліном 3-го степеня
ε_i	16,43 мм	39,65 мм	0	16,02 мм

Визначені середня абсолютна Δ_s і відносна δ_s похибки за формулою (18) (табл.11):

Таблиця 11

Результати абсолютних і відносних похибок зняття відліків в умовах вібрацій за усіма моделями

№ п/п	Математичні моделі зняття відліків			
	Лінійна залежність	Синусоїдальна залежність	Лінія Безьє 2-го порядку	Поліном 3-го степеня
Δ_s	15,31 мм	32,18 мм	0	6,86 мм
δ_s	0,02	0,04	0	0,01

Модель апроксимована кубічним поліномом є більш точною.

Теоретично перевірено ефективність віброізоляційних матеріалів щодо зменшення впливу вібрацій на електронні геодезичні прилади та представлена методика розрахунку. Показником ефективності віброізоляції є коефіцієнт передачі μ :

$$\mu = \left[\left(\frac{f_3}{f_0} \right) - 1 \right] = (\varphi^2 - 1)^{-1}. \quad (19)$$

На основі експериментальних досліджень у лабораторних умовах і на виробництві виконана оцінка ступеня відповідності електронних геодезичних приладів в умовах вібраційного впливу, а також розроблені теоретичні та практичні рекомендації щодо зменшення впливу вібрацій на точність геодезичних вимірювань.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи такі:

1. Виконано аналіз сучасного стану впливу вібрацій на точність вимірювань геодезичними приладами, а також визначена класифікація існуючих методів і засобів віброзахисту. Розглянуто конструктивні особливості електронних тахеометрів та цифрових нівелірів, визначені основні фактори, що впливають на точність вимірювань із врахуванням впливу вібрацій.
2. Розроблена програма і методика контролю вібраційних досліджень електронних геодезичних приладів, яка містить дослідження на вібростійкість і віброчутливість. Розраховані і встановлені допуски вібростійкості цифрових нівелірів та електронних тахеометрів. Зокрема, в умовах вібраційного впливу кутові коливання візирної осі не повинні перевищувати $\varphi_{\text{дон}} = 10''$.
3. Встановлено, що вібростійкість геодезичних приладів залежить від особливостей конструкції і параметрів вібраційного впливу. Найменша вібростійкість спостерігається на частотах близько 30 Гц. Визначені резонансні частоти цифрових нівелірів та електронних тахеометрів, значення яких співпадають з частотами промислових вібрацій. Сучасні цифрові нівеліри мають 2, а тахеометри 2-3 частоти резонансу конструкції приладу. На резонансних частотах вібростійкість приладів до вібрацій мінімальна.
4. Досліджено СКП вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів при постійній частоті і змінній амплітуді. Встановлено, що вплив вібрацій на точність вимірювання кута пов'язано з конструктивними елементами внутрішньої частини електронного тахеометра та датчика вимірювання напрямку. Визначено, що СКП зняття відліку залежить від відстані до рейки і амплітуди кутових коливань візирної осі.
5. Досліджено вплив вібрацій на стійкість системи «штатив-геодезичний прилад». Визначено, що при амплітуді 5, 10, 15 мкм вібростійкість приладу не погіршується, тоді як при 20 мкм і більше параметри гармонічних коливань приладу не допустимі.
6. Досліджено, що вплив вібрацій на лінійні вимірювання зумовлений похибками, вплив яких не залежить від потужності прийнятого світлового потоку, а

визначається відстанню. Визначено, що вібрація основи на промисловій частоті і амплітуді коливань до 60 мкм можуть викликати СКП вимірювання лінії до 5 мм.

7. Розроблено та досліджено математичну залежність між частотою і амплітудою вібрацій результатів вимірювань вертикальних і горизонтальних кутів. Визначено середні квадратичні похибки, абсолютні та відносні похибки вимірювань і встановлено, що залежність носить синусоїдальний характер.
8. Розроблено математичну залежність між частотою і амплітудою вібрацій результатів зняття відліків цифровим нівеліром шляхом використання поліному 3-го степеня, яка найбільше відповідає характеру фізичного закону і дає найменшу похибку.
9. Представлено методику розрахунку віброізоляційних матеріалів, а також розроблено теоретичні і практичні рекомендації щодо зменшення впливу вібрацій на похибки геодезичних вимірювань.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кузьмич О. Й. Методика дослідження геодезичних робіт в умовах вібрації / О.Й. Кузьмич, С.С.Богданов // Містобудування та територіальне планування: Наук.-тех. зб. – К., 2010. – Вип. № 37. – С. 251-254.
2. Богданов С.С. Використання сучасних матеріалів для гасіння вібрацій при геодезичних вимірюваннях / С.С. Богданов // Містобудування та територіальне планування: Наук.-тех. зб. – К., 2012. – Вип. № 46. – С. 74-79.
3. Кузьмич О.Й. Особливості виконання геодезичних робіт в умовах вібрацій / О.Й. Кузьмич, С.С. Богданов // Інженерна геодезія: Наук.-тех. зб. – К., 2012. – Вип. № 58. – С. 12-16.
4. Богданов С.С. Аналіз впливу вібрацій на стійкість системи штатив-тахеометр / С.С. Богданов // Містобудування та територіальне планування: Наук.-тех. зб. – К., 2013. – Вип. № 47. – С. 106-110.
5. Богданов С.С. Побудова математичної моделі результатів вимірювань кутів електронним тахеометром в умовах вібрацій на основі експериментальних даних / С.С. Богданов // Містобудування та територіальне планування: Наук.-тех. зб. – К., 2013. – Вип. № 50. – С. 46-54.
6. Кузьмич А.И. Исследование влияния вибраций на современные цифровые нивелиры / А.И. Кузьмич, С.С. Богданов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Издательство: Московский государственный университет геодезии и картографии (Москва) ISSN: 0536-101X. – 2014. – №1. – С. 18-21.

АНОТАЦІЯ

Богданов С.С. Методика визначення та врахування впливу вібрацій на точність вимірювань електронними геодезичними приладами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія. Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ 2015.

У дисертаційній роботі розроблено методику визначення вібростійкості та врахування впливу вібрацій на електронні геодезичні прилади. Визначено контроль допустимих величин впливу вібрацій, що дозволяє дослідити вплив вібрацій на вібростійкість конструктивних елементів, а також отримати значення резонансних частот електронних тахеометрів і цифрових нівелірів. Виконано теоретичний аналіз впливу вібрацій на стійкість системи «штатив-геодезичний прилад».

Розроблена програма дослідження впливу вібрацій на точність зняття відліку цифровим нівеліром, а також вплив вібрацій на кутові і лінійні вимірювання електронними тахеометрами.

Розроблено і представлено математичні моделі, за допомогою яких можна визначити залежність між частотою і амплітудою вібрацій та отримати оцінку точності вимірювань вертикальних і горизонтальних кутів електронним тахеометром в умовах вібрацій.

Розроблено математичну залежність результатів зняття відліків в умовах вібрацій, що відповідає характеру фізичного закону і дає найменшу похибку. Виконана оцінка точності вимірювань.

Запропоновані практичні рекомендації щодо зменшення впливу вібрацій на електронні тахеометри і цифрові нівеліри.

Ключові слова: амплітуда і частота вібрацій, резонанс, оцінка точності, середня квадратична похибка, абсолютна і відносна похибки, електронні геодезичні прилади.

АННОТАЦИЯ

Богданов С.С. Методика определения и учета влияния вибраций на точность измерений электронными геодезическими приборами. – Диссертация есть рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 - Геодезия, фотограмметрия и картография. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, МОН Украины, Киев 2015.

В диссертационной работе разработана методика определения виброустойчивости и учета влияния вибраций на электронные геодезические приборы. Разработан метод допустимых величин воздействия вибраций, который позволяет исследовать влияние вибраций на виброустойчивость конструктивных элементов, а также получить значения резонансных частот электронных тахеометров и цифровых нивелиров. Выполнен теоретический анализ влияния вибраций на устойчивость системы «штатив-геодезический прибор», что дает возможность оценить параметры гармонических колебаний с допустимой амплитудой вибраций.

Разработана программа исследования влияния вибраций на точность снятия отсчета цифровым нивелиром, а также влияние вибраций на угловые и линейные измерения электронными тахеометрами.

Разработано и представлено несколько математических моделей, с помощью которых можно определить зависимость между частотой и амплитудой вибраций и

получить оценку точности измеренных вертикальных и горизонтальных углов тахеометра в условиях вибрации.

Разработана математическая зависимость результатов снятия отсчетов в условиях вибраций, которая соответствует характеру физического закона и дает наименьшую погрешность.

Представлен расчет виброизоляционных материалов для уменьшения влияния вибраций на точность геодезических измерений.

Предложены практические рекомендации по уменьшению влияния вибраций на электронные тахеометры и цифровые нивелиры.

Ключевые слова: амплитуда и частота вибраций, резонанс, оценка точности, средняя квадратическая погрешность, абсолютная и относительная погрешности, электронные геодезические приборы.

SUMMARY

The procedure for determining and consideration of the influence of vibrations on precision of measurements of electronic geodetic instruments. – The dissertation is a manuscript.

The dissertation for scientific degree of Candidate of Engineering Sciences in specialty 05.24.01 – Geodesy, photogrammetry and cartography. Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv 2015.

The procedure for determining vibration resistance and consideration of the influence of vibrations on electronic geodetic measuring instruments is developed in this dissertation. The control of allowed values of the influence of vibrations which makes it possible to study the influence of vibrations on vibration resistance of structural components and to obtain the rates of resonant frequencies of electronic tachometers and digital levels is defined. The theoretical analysis of the influence of vibrations on the strength of the “tripod-geodetic instrument” system which gives a possibility to estimate the parameters of harmonic vibrations with permissible amplitudes is done.

The research program to study the influence of vibrations on digital level reading accuracy and on electronic tachometers angular and linear measurements is developed.

Several mathematical models are elaborated and presented in this dissertation. They are the models which make it possible to identify the relationship between the frequency and the amplitude and to estimate the precision of electronic tachometer measurements of vertical and horizontal angles under conditions of vibrations.

The mathematical relationship between the reading results under conditions of vibrations is defined. It corresponds to the character of physical law and provides higher precision.

The estimation of one of the present-day materials to reduce the influence of vibrations on geodetic accuracy is presented in this dissertation.

Practical recommendations on how to reduce the influence of vibrations on electronic tachometers and digital levels are given.

Keywords: vibration frequency and amplitude, resonance, estimation of accuracy, root-mean-square error, absolute and relative errors, electronic geodetic instruments.