

DOI: 10.32347/2786-7269.2023.5.240-257

УДК 528.48

канд. тех. наук, доц. **Адаменко О.В.**,
adamaleksandr@i.ua ORCID: 0000-0001-7608-1845,
д-р. техн. наук, проф. **Анненков А.О.**,
geodez74@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3618-5399,
канд. тех. наук, доц. **Медведський Ю.В.**,
medvedskyi.iuv@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0342-7088,
Циколенко О.В.,
tsykolenko.ov@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9231-8400,
Гаврилов Є.В., e.gavrilov704@gmail.com, ORCID:0000-0003-0118-4916,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ СФЕР ЛАЗЕРНИМ СКАНЕРОМ FARO FOCUS S 120

Зроблено дослідження та аналіз точності визначення координат сфер під час геодезичних робіт з лазерного сканування.

Дослідження точності вимірювань лазерного сканера виконувалось методом прямих вимірювань. Під час досліджень, еталонне значення зміщення сфери вимірювалось за допомогою лазерного інтерферометра. Вимірювання виконувались для визначення похибок вимірювань різних вимірних величин лазерного сканера: горизонтального кута, вертикального кута та відстані. Опрацювання сканів та визначення координат сфери виконувалось у програмному комплексі FARO Scene Lt. Опрацювання результатів вимірювань виконувалось методами математичної статистики з використанням MS Excel.

Виконано також дослідження чутливості лазерного сканера по визначенню незначних зміщень опорних цілей, на прикладі сфер. Робіт з дослідженнями чутливості у визначенні координат опорних цілей, як складової похибки визначення їх координат ми не знаходили.

Проведені дослідження дозволять визначати оптимальні діапазони розташування опорних цілей під час виконання сканування для забезпечення найвищої точності визначення їх координат. Проте експериментально доведено, що даний метод не можна використовувати у якості визначення повної характеристики точності лазерного сканера по визначенню координат опорних цілей, оскільки у вимірюваннях виключено вплив деяких систематичних похибок, як наприклад ексцентриситети складових частин лазерного сканера.

За результатами досліджень зроблено висновок щодо найбільш доцільного розташування опорних цілей у вигляді сфер для досягнення найвищої

точності визначення їх координат. Як видно із досліджень, сфери бажано розташовувати на відстані приблизно 5 м від НЛС. На коротших відстанях (біля 2 м) на точність визначення координат сфер починають впливати зростаючі похибки вимірювань відстаней сканером, на великих відстанях (від 10 м) зростають похибки вимірювань висотних координат сфер.

Представлені у роботі результати вимагають подальшого дослідження. Дані дослідження варто виконати для інших типів опорних цілей та з використанням інших моделей лазерних сканерів, що є метою подальших досліджень авторів.

Ключові слова: наземне лазерне сканування; магнітні сфери; дослідження точності вимірювань; лазерний інтерферометр; хмара точок.

Проблема та зв'язок її з науковими та практичними задачами.

Як відомо, зв'язування окремих станцій під час лазерного сканування відбувається за допомогою встановлення та вимірювання контрольних точок. Більшість виробників обладнання для наземного лазерного сканування, в якості таких контрольних точок пропонують використовувати спеціальні магнітні сфери. В якості контрольної точки в такому випадку використовується математичний центр сфери, який вираховується за результатами апроксимації сфери зазначеного радіусу вимірюваних даних. Таким чином, можливі помилки у визначенні центру сфер призводять до помилок у визначенні взаємного розташування станцій сканування та, в результаті до помилок у «хмарі точок».

Аналіз досліджень та публікацій.

Питання дослідження точності визначення координат контрольних цілей при лазерному скануванні не нові, та регулярно досліджуються різними українськими та закордонними авторами [1-6]. В одних дослідженнях основна увага приділена дослідженню впливу фону контрольної цілі та щільності хмари точок на точність визначення координат цілей [5], в інших досліджуються можливі форми контрольних цілей, в третій досліджуються похибки вимірювань положення контрольних цілей різними наземними лазерними сканерами на різних відстанях до цілі [1, 3]. Робіт з дослідженнями чутливості у визначенні координат опорних цілей, як складової похибки визначення їх координат ми не знаходили. Дослідження даного питання допоможе визначити діапазон вимірювань контрольних цілей наземним лазерним сканером для досягнення найвищої точності, що дозволить удосконалити методики вимірювань та може бути використане в калібруванні лазерних сканерів.

Постановка задачі.

Основними цілями даної статті є:

- дослідження та аналіз точності визначення координат сфер під час

геодезичних робіт з лазерного сканування;

- експериментальне дослідження оптимального діапазону розташування опорних цілей під час виконання сканування

Викладення матеріалу та результати.

Особливістю роботи наземного лазерного сканера (далі – НЛС) є встановлення горизонтальних та вертикальних напрямів. Хочемо звернути увагу саме на процес встановлення, а не вимірювання. Лазерний промінь НЛС спрямовується по встановленому приладом напрямку і не може бути спрямований у центр вибраної цілі.

Магнітні сфери (рис.1) є одними із найчастіше застосовуваних опорних цілей, які використовуються для зшивання сканів між собою. Під час сканування сфери НЛС отримують кілька вертикальних перетинів цієї сфери. Апроксимуючи ці перетини сферою певного, визначеного виробником, радіусу, отримують просторові координати її центру.



Рис. 1. Сфера прикріплена до поверхні за допомогою магніту

Таким чином, виникає питання щодо точності визначення координат центру сфери за результатами вимірювання її поверхні НЛС, як складової частини визначення точності зшивання сканів у загальну «хмару точок» об'єкту.

Дослідження точності визначення координат сфер нами було вирішено виконувати через визначення чутливості НЛС по вимірюванню переміщення сфери у трьох напрямках: вдовж вимірювальної осі НЛС, що відповідає вимірюванню відстаней; горизонтально, поперек вимірювальної осі НЛС, що відповідає вимірюванню горизонтальних кутів; вертикально, що відповідає вимірюванню вертикальних кутів. Для контролю, у кожному експерименті додатково вимірювалась нерухома сфера.

Зміщення рухомої сфери контролювалось лазерним інтерферометром Renishaw XL-80. Вимірювання положення сфер виконувалось на наступних відстанях від НЛС до сфери: 2м, 5м, 10м та 20 м. На кожній дистанції виконувались вимірювання при наступних значеннях зміщень рухомої сфери: 0 мм, 0.1 мм, 0.2 мм, 0.3 мм, 0.5 мм, 0.8 мм, 1 мм, 1.5 мм, 2 мм, 3 мм, 5 мм та 10 мм. Таким чином, на кожній дистанції від НЛС до рухомої сфери виконувалось 12 сканувань у точному режимі вимірювань та параметрами щільності сканування: 3 мм на 10м. На кожній станції виконувалось 3 незалежних виміри координат сфер, за остаточний результат приймалось середнє арифметичне значення вимірів.

На рис. 2 показана схема вимірювань зміщень рухомої сфери вздовж осі вимірювань НЛС. Базовий відбивач інтерферометра встановлювався на одному кінці компаратора, поряд з інтерферометром. Рухомий відбивач інтерферометра разом із рухомою сферою встановлювались на каретці, яка забезпечує прямолінійний рух вздовж компаратора. НЛС встановлювався на компараторі на зазначених вище відстанях. Нерухома сфера встановлювалась позаду інтерферометра.

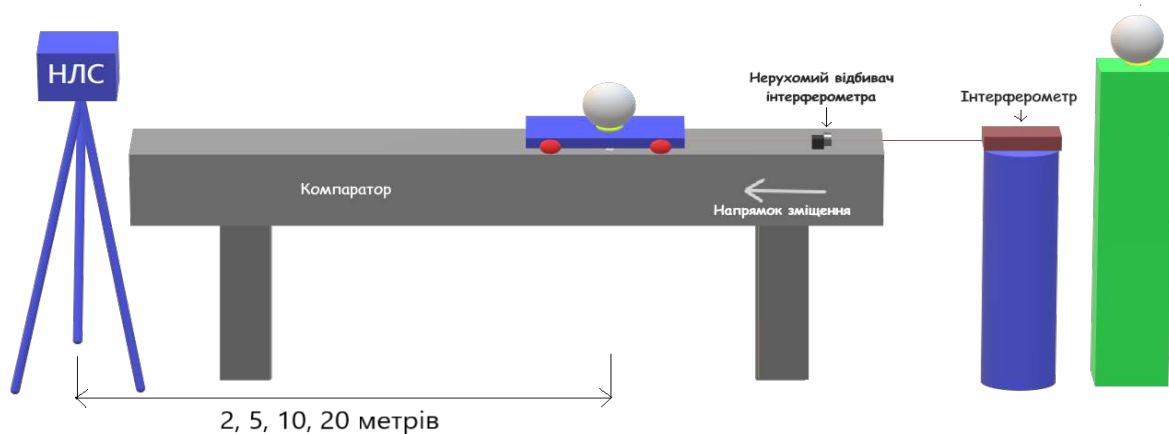


Рис. 2. Схема вимірювань зміщень рухомої сфери вздовж осі вимірювань НЛС.

Результати вимірювань на всіх дистанціях показано у табл. 1 та табл. 2.

Таблиця 1

Результати вимірювань рухомої сфери при вимірюванні поздовжніх зміщень

Встановлене значення зміщення	Виміряне зміщення на відстані			
	2 м	5 м	10 м	20 м
1	2	3	4	5
0,1	0,4	0,1	0,5	0,1
0,2	0,3	0,0	0,1	-0,1
0,3	0,9	0,0	0,2	0,3
0,5	0,9	0,0	-0,3	0,4

1	2	3	4	5
0,8	0,9	-0,1	-0,3	0,2
1,0	0,8	-0,1	0,6	-0,1
1,5	0,9	-0,1	0,3	0,2
2,0	0,8	-0,1	0,3	0,1
3,0	0,7	-0,1	0,4	-0,2
5,0	0,7	-0,1	-0,1	0,0
10,0	0,6	0,0	-0,1	0,3
СКП	0,7	0,1	0,3	0,2

Таблиця. 2

Результати вимірювань нерухомої сфери при вимірюванні поздовжніх зміщень

Встановлене значення зміщення	Виміряне зміщення на відстані			
	2 м	5 м	10 м	20 м
0,0	0,3	0,0	0,5	0,0
	0,0	0,0	0,5	0,3
	-0,4	0,0	0,3	-0,1
	-0,1	0,0	0,2	-0,4
	0,1	0,0	0,2	-0,2
	-0,2	0,0	0,4	0,0
	0,1	0,0	-0,3	0,2
	0,1	0,0	-0,3	0,1
	0,1	0,0	-0,5	0,0
	0,1	0,1	-0,3	0,0
	-0,1	0,0	-0,3	0,1
	0,0	0,0	0,2	-0,1
СКП	0,2	0,0	0,4	0,2

Результати вимірювань по кожній відстані покажемо на схемах 2-5 (рис. 3-6).

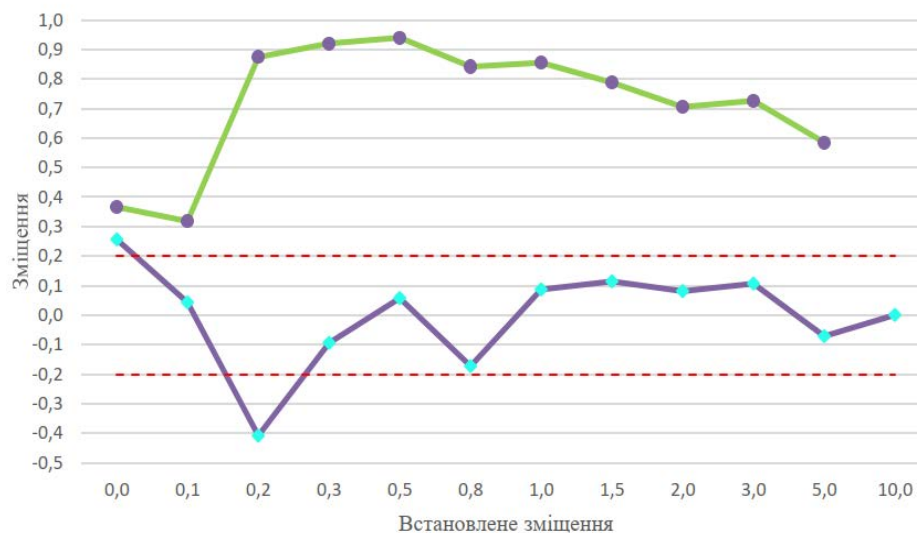


Рис. 3. Схема №2. Повздовжні зміщення. Відстань - 2м

На схемах експериментальних досліджень зеленим кольором показано відхилення у визначенні переміщень рухомої сфери наземним лазерним сканером, фіолетовим кольором показано відхилення у визначенні положення нерухомої сфери, червоними пунктирними лініями показана середня квадратична похибка визначення положення нерухою сфери.

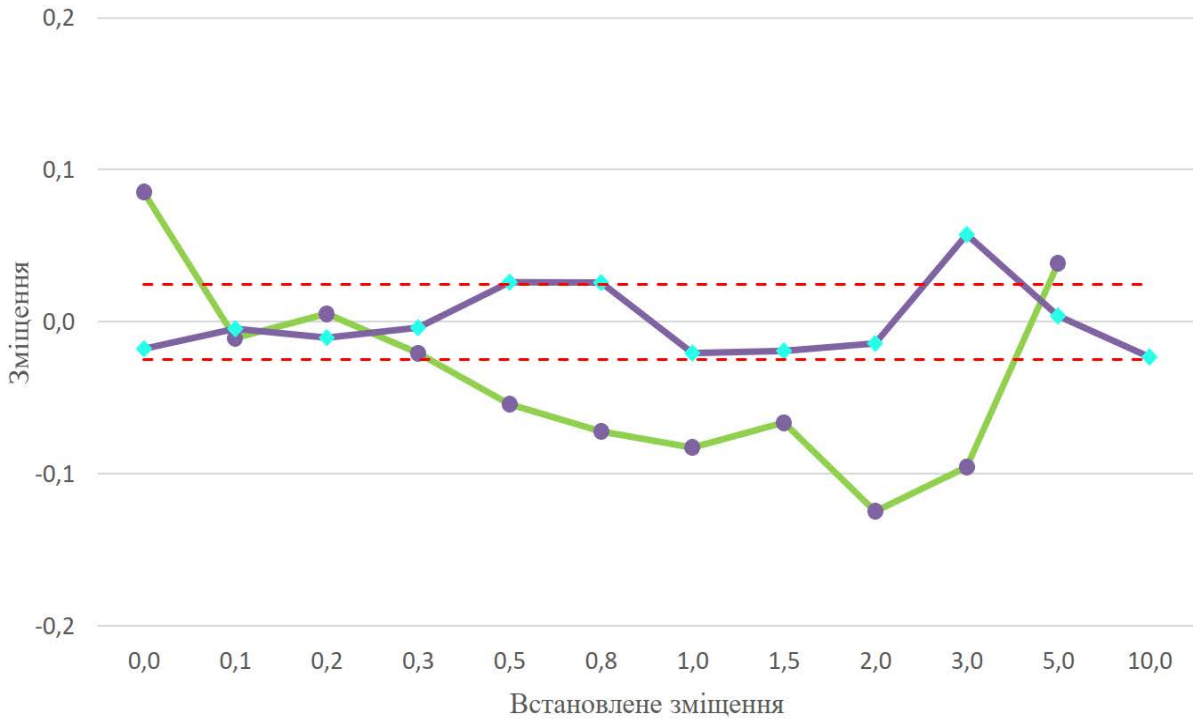


Рис. 4. Схема №3. Повздовжні зміщення. Відстань - 5м

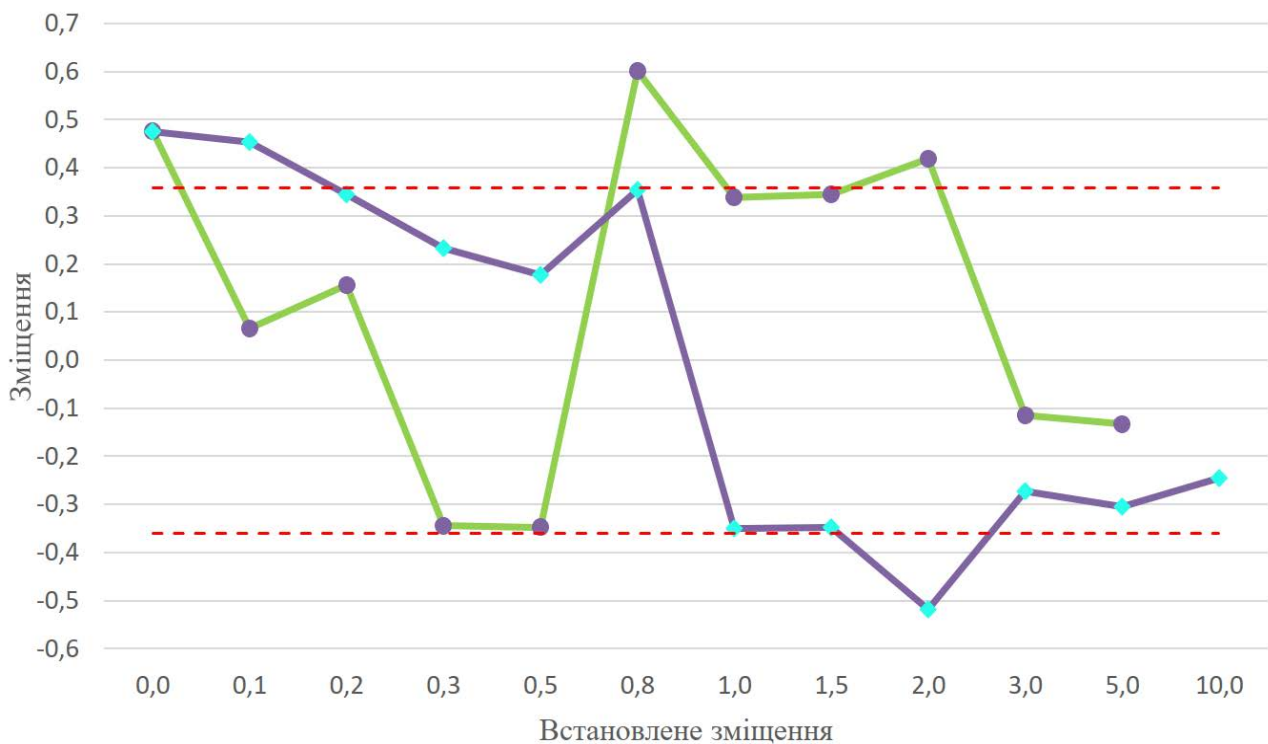


Рис. 5. Схема №4. Повздовжні зміщення. Відстань - 10м

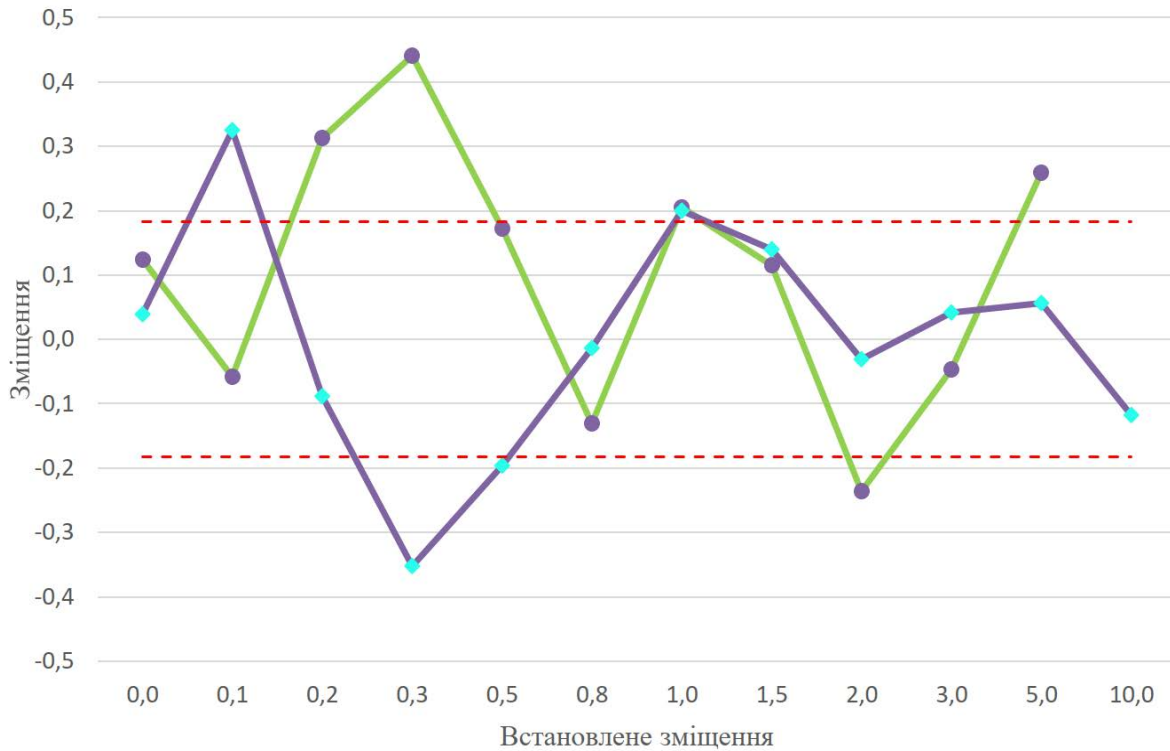


Рис. 6. Схема №5. Повздовжні зміщення. Відстань - 20м

Таким чином, найвищу точність при вимірюванні зміщення вздовж вимірювальної осі рухомої сфери, наземний лазерний сканер має на дистанції близько 5 м. Середня квадратична похибка таких вимірювань складає 0,1 мм. Найгіршу точність вимірювань НЛС має на відстані приблизно 2 м, що може бути пояснено наявністю систематичних похибок віддалеміра НЛС. На рис. 7 показана схема вимірювань зміщень рухомої сфери горизонтально, поперек вимірювальної осі НЛС.

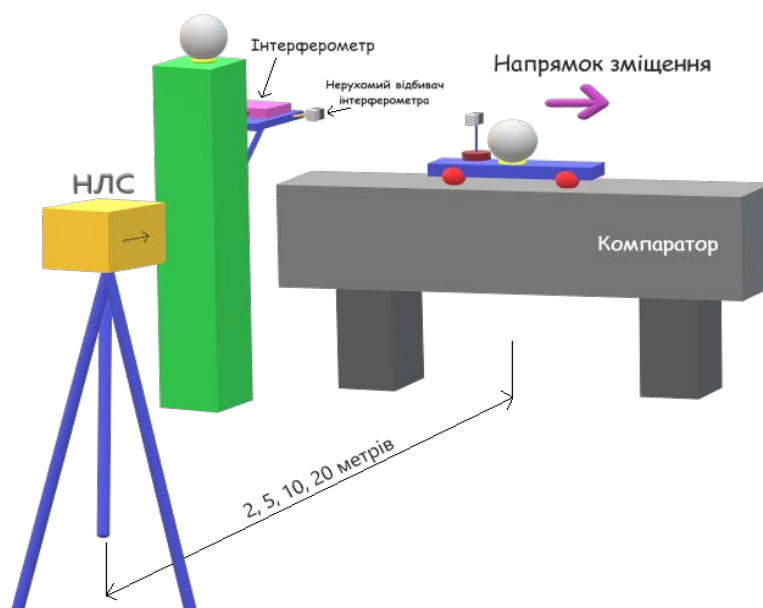


Рис. 7. Схема вимірювань зміщень рухомої сфери горизонтально, поперек вимірювальної осі НЛС.

Базовий відбивач інтерферометра встановлювався перед самим пристроєм. Рухомий відбивач інтерферометра разом із рухомою сферою встановлювались на каретці, яка забезпечує прямолінійний рух вздовж компаратора. НЛС встановлювався перпендикулярно компаратору на наступних відстанях від НЛС до сфери: 2 м, 5 м, 10 м та 20 м. Нерухома сфера встановлювалась поруч з інтерферометром, паралельно рухомій.

Результати вимірювань на всіх дистанціях показано у табл. 3 та табл. 4.

Як і в попередньому випадку, на всіх схемах зеленим кольором показано відхилення у визначенні переміщень рухомої сфери наземним лазерним сканером, фіолетовим кольором показано відхилення у визначенні положення нерухомої сфери, червоними пунктирними лініями показана середня квадратична похибка визначення положення нерухомою сфери.

Метою даного дослідження було визначити вплив похибок вимірювання горизонтальних кутів НЛС на точність визначення координат сфер.

Таблиця. 3

Результати вимірювань рухомої сфери при вимірюванні поперечних зміщень у горизонтальній площині

Встановлене значення зміщення	Виміряне зміщення на відстані			
	2 м	5 м	10 м	20 м
0,1	0,0	0,3	0,2	0,0
0,2	0,0	0,2	0,2	0,6
0,3	0,0	0,1	0,3	0,6
0,5	-0,1	0,2	0,0	0,4
0,8	0,0	0,0	0,2	-0,1
1,0	0,0	0,2	0,1	-0,3
1,5	0,0	0,1	0,2	-0,5
2,0	0,0	0,0	0,2	-0,6
3,0	0,0	0,1	0,1	0,3
5,0	0,0	0,2	0,1	-0,2
10,0	-0,1	-0,2	0,2	0,7
СКП	0,1	0,2	0,2	0,5

Таблиця. 4

Результати вимірювань нерухомої сфери при вимірюванні поперечних зміщень у горизонтальній площині

Встановлене значення зміщення	Виміряне зміщення на відстані			
	2 м	5 м	10 м	20 м
1	2	3	4	5
	-0,3	-0,2	-0,1	-0,5

1 0,0	2	3	4	5
	-0,2	-0,1	0,0	0,0
	-0,1	0,0	-0,1	0,2
	0,1	0,0	0,1	0,2
	-0,1	0,0	0,2	-0,2
	0,1	0,0	0,1	0,1
	0,2	0,0	-0,2	-0,1
	0,1	0,0	-0,5	-0,3
	0,0	0,1	0,1	0,0
	0,1	0,1	-0,1	0,1
	0,1	0,1	0,3	0,4
0,1	0,0	0,1	0,1	
СКП	0,1	0,1	0,2	0,2

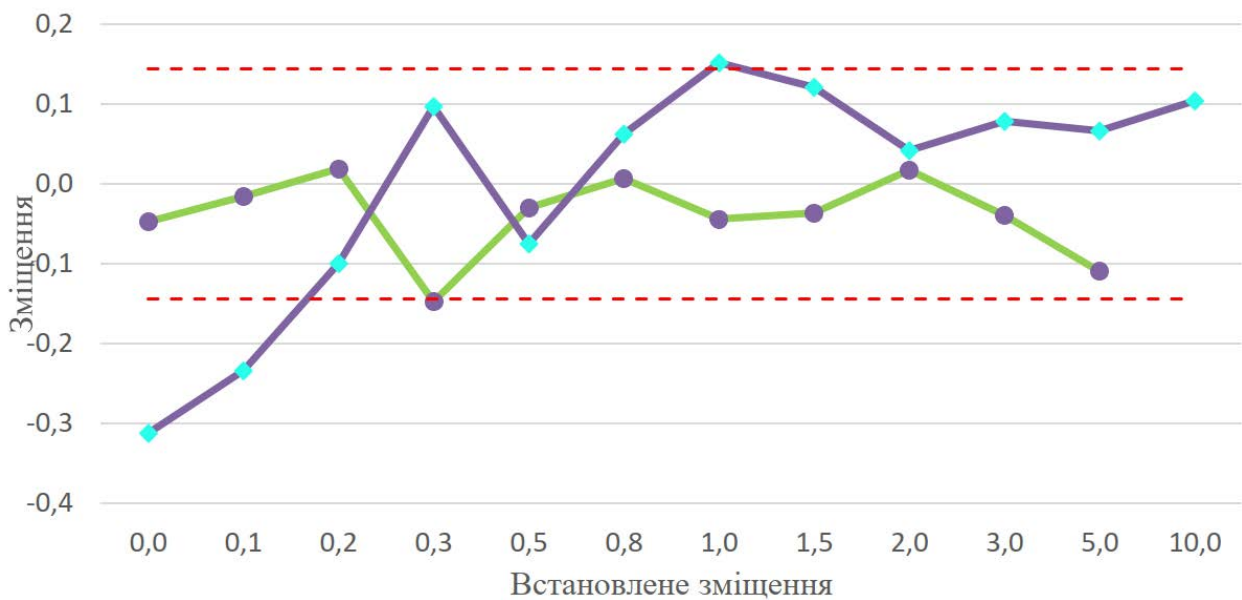


Рис. 8. Схема №7. Поперечні зміщення горизонтально. Відстань - 2м

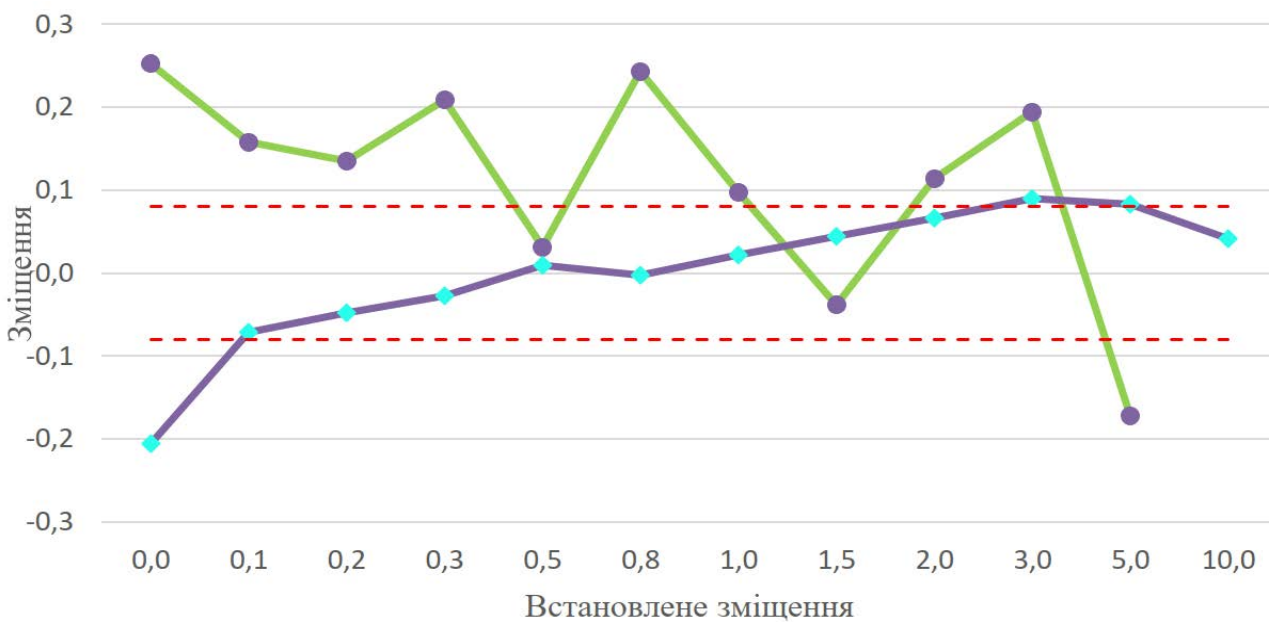


Рис. 9. Схема №8. Поперечні зміщення горизонтально. Відстань - 5м

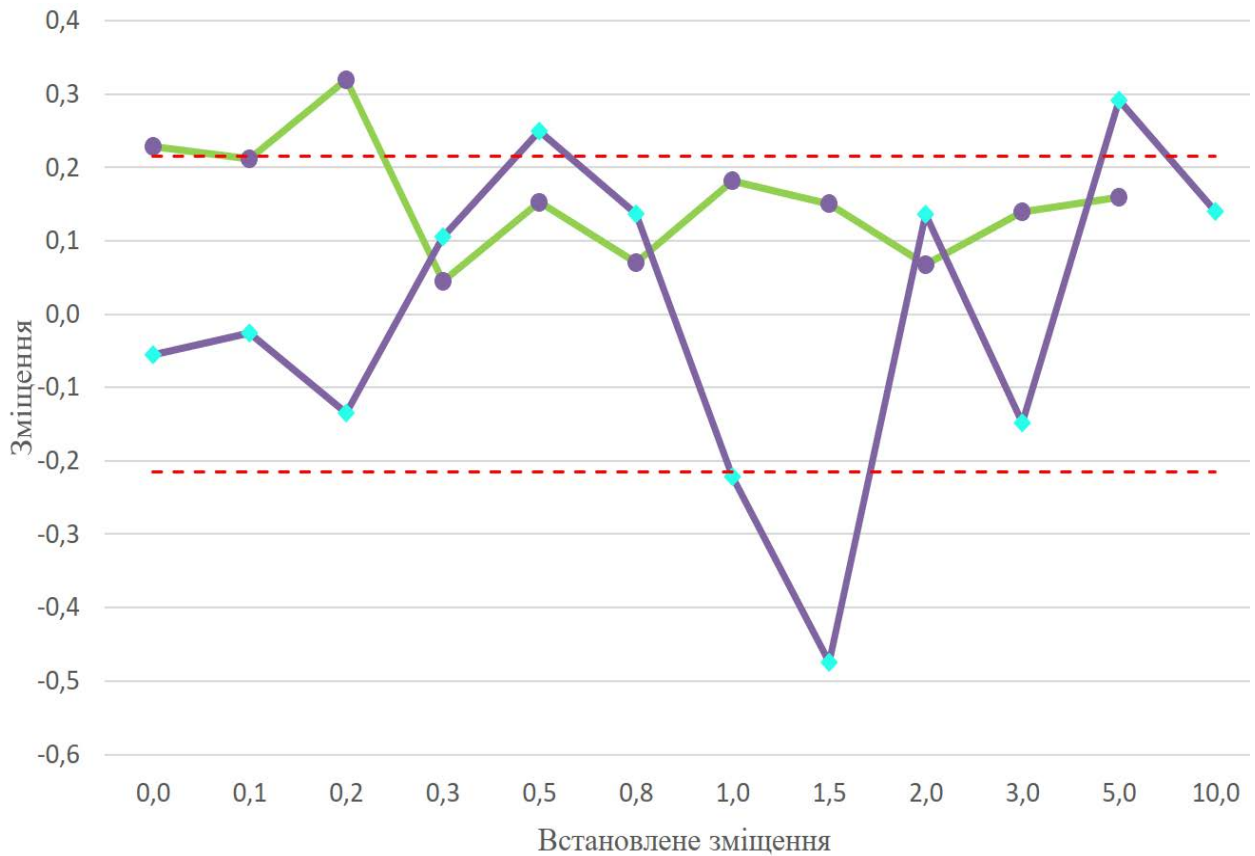


Рис. 10. Схема №9. Поперечні зміщення горизонтально. Відстань - 10м

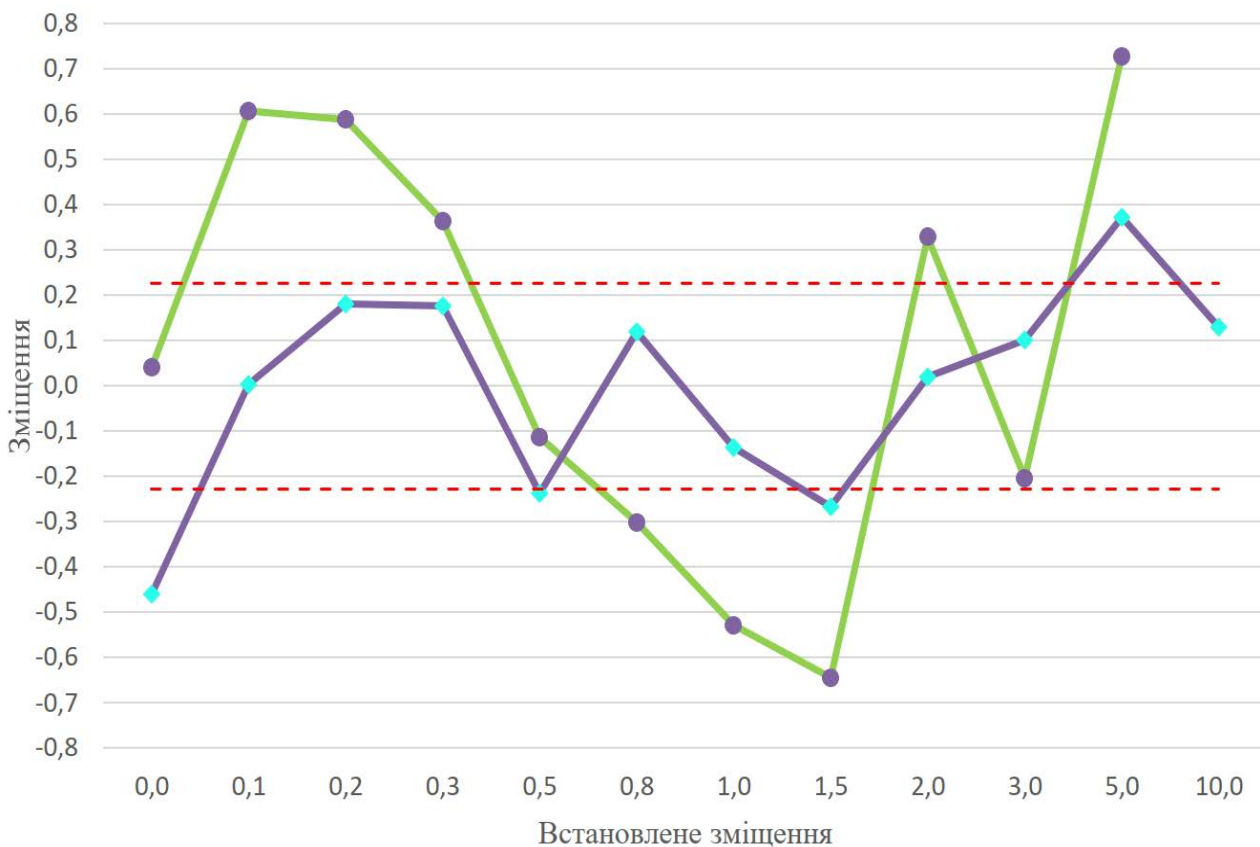


Рис. 11. Схема №10. Поперечні зміщення горизонтально. Відстань - 20м

Таким чином, при вимірюванні поперечних зміщень рухомої сфери в горизонтальній площині, на всьому діапазоні досліджень, від 2 до 20 м, НЛС показав високу точність вимірювань, яка дещо знизилась на відстані 20 м.

За результатами вимірювань можна зробити висновок, що вплив похибок вимірювань горизонтальних кутів НЛС не має переважного значення на точність вимірювань координат сфер, на відстанях від 2 до 10 м, точність вимірювань кутів НЛС дозволяють визначати положення сфери з точністю до 0,2 мм.

На рис. 12 показана схема вимірювань зміщень рухомої сфери вертикально, поперек вимірювальної осі НЛС. Базовий відбивач інтерферометра встановлювався перед самим пристроєм, паралельно до рухомого. Рухомий відбивач інтерферометра разом із рухомою сферою встановлювались на підставці, яка забезпечує прямолінійний рух у вертикальній площині. НЛС встановлювався на наступних відстанях від НЛС до сфери: 2 м, 5 м, 10 м та 20 м.. Нерухома сфера встановлювалась праворуч від рухомої сфери та весь час вимірювань знаходилась в одному місці.

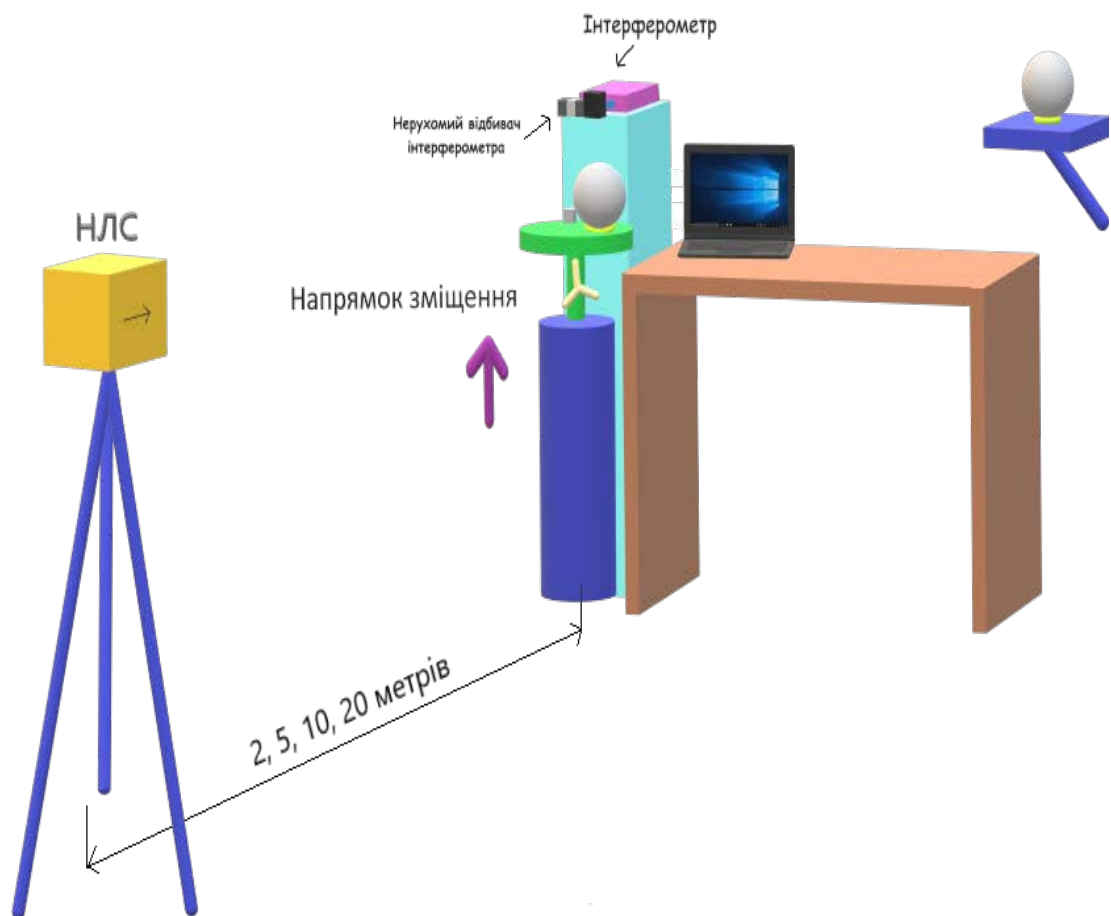


Рис. 12. Схема вимірювань зміщень рухомої сфери вертикально вимірювальної осі НЛС

Результати вимірювань на всіх дистанціях показано у табл. 5 та табл. 6.

Таблиця. 5

Результати вимірювань рухомої сфери при вимірюванні поперечних зміщень у вертикальній площині

Встановлене значення зміщення	Вимірне зміщення на відстані			
	2 м	5 м	10 м	20 м
0,1	0,2	0,3	0,7	0,1
0,2	0,1	0,2	1,1	1,6
0,3	0,1	-0,2	0,4	0,3
0,5	0,1	-0,4	0,1	0,3
0,8	0,2	-0,2	-0,1	0,1
1,0	0,3	-0,3	-0,7	0,3
1,5	0,2	-0,2	-1,1	0,2
2,0	0,3	-0,6	-1,3	0,5
3,0	0,0	-0,5	-0,2	0,6
5,0	-0,1	-0,4	-0,1	-0,4
10,0	0,0	-0,6	-0,2	-0,4
СКП	0,2	0,4	0,7	0,6

Таблиця. 6

Результати вимірювань нерухомої сфери при вимірюванні поперечних зміщень у вертикальній площині

Встановлене значення зміщення	Вимірне зміщення на відстані			
	2 м	5 м	10 м	20 м
0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7
	0,1	0,2	0,1	-1,1
	0,0	0,2	-0,1	-0,7
	0,1	0,2	0,1	-1,2
	-0,1	0,2	0,0	-0,9
	0,0	0,3	0,0	-0,9
	0,0	0,2	0,0	-0,7
	0,0	0,2	0,0	-1,0
	0,0	0,3	0,0	1,7
	0,0	-0,6	0,1	1,9
	0,0	-0,6	0,0	1,8
	-0,1	-0,6	0,0	1,8
СКП	0,1	0,3	0,1	1,3

Результати вимірювань по кожній відстані покажемо на схемах 12-15.



Рис. 13. Схема №12. Поперечні зміщення вертикально. Відстань - 2м



Рис. 14. Схема №13. Поперечні зміщення вертикально. Відстань - 5м

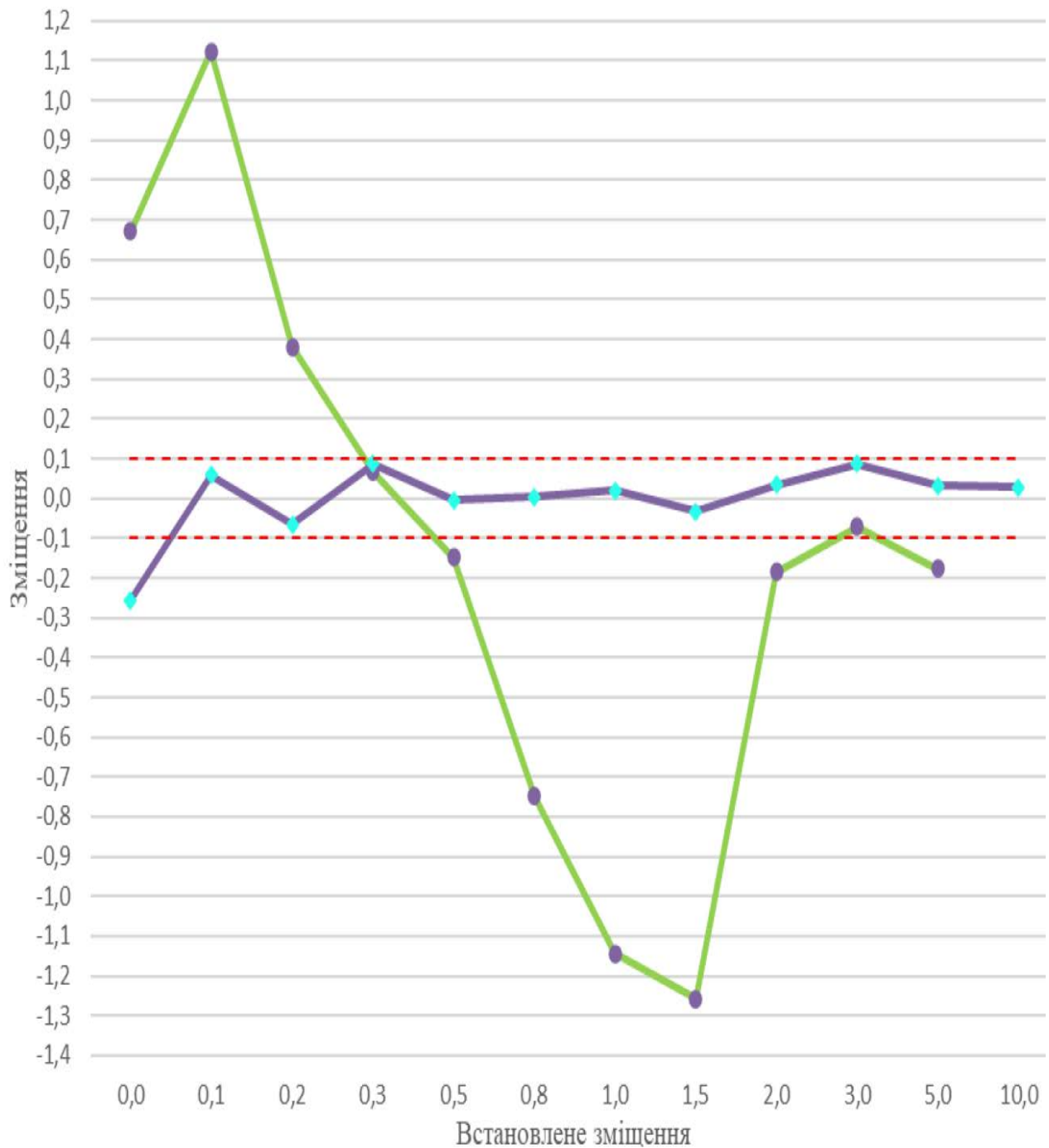


Рис. 15. Схема №14. Поперечні зміщення вертикально. Відстань - 10м

Таким чином, високу точність визначення зміщень сфери, НЛС має тільки на дистанціях 2 та 5 м. Із збільшенням відстані, значно зростають похибки вимірювань координат та зміщень сфер. На нашу думку, такі результати досліджень можна пояснити похибками роботи компенсатора сканера, які також впливали на результати вимірювань. Найкраще це видно на графіку вимірювань на дистанції 20 м, де відбувся зсув у вимірах координат нерухомої сфери.



Рис. 16. Схема №15. Поперечні зміщення вертикально. Відстань - 20м

Висновки та напрями подальших досліджень.

За результатами досліджень можна зробити висновок щодо найбільш доцільного розташування опорних цілей у вигляді сфер для досягнення найвищої точності визначення їх координат. Як видно із досліджень, сфери бажано розташовувати на відстані приблизно 5 м від НЛС. На коротших відстанях (біля 2 м) на точність визначення координат сфер починають впливати зростаючі похибки вимірювань відстаней сканером, на великих відстанях (від 10 м) зростають похибки вимірювань висотних координат сфер.

Збільшення похибки визначення висот сфер, на нашу думку, можна пояснити впливом похибок компенсатора НЛС, що може бути перевірено повторенням досліджень із виключеним компенсатором НЛС. В такому

випадку, при відтворенні вимірювань на об'єкті вимірювань, виникає задача завдання певної горизонтальної площини для приведення вимірювань НЛС. Такі завдання є метою подальших досліджень авторів.

Дані вимірювання варто продовжити для інших типів контрольних цілей НЛС, таких як спеціалізовані марки, що буде продовжено авторами у майбутньому.

Список літератури

1. Klaus Mechelke, Thomas P. Kersten Comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems., Maren Lindstaedt Conference: 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Gruen, A. & Kahmen, H.(eds.), Zurich, July 9-12, Vol. I, pp. 319-327.
2. Berit Schmitz , Christoph Holst , Tomislav Medic, Derek D. Lichti, Heiner Kuhlmann How to Efficiently Determine the Range Precision of 3D Terrestrial Laser Scanners Sensors (Basel) 019 Mar 26;19(6):1466. doi: 10.3390/s19061466.
3. Thomas P. Kersten, Klaus mechelKe Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems., maren lindsTaedt & harald sTernberg, September 2009 Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation 2009(4):301-315 DOI: 10.1127/1432-8364/2009/0023.
4. Reshetyuk Y. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners: Licenciate thesis in Infrastructure, Geodesy / Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy. Stockholm, 2006. 152 p.
5. Derek LICHTI, Stefan BRÜSTLE, Jochen FRANKE Self Calibration and Analysis of the Surphaser 25HS 3D Scanner IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 10, Issue 1, No 3, January 2013.
6. B. Muralikrishnan, M. Ferrucci, D. Sawye, G. Gerner, V. Lee, C. Blackburn, S. Phillips, P. Petrov, Y. Yakovlev, A. Astrelin, S. Milligan, J. Volumetric Performance Evaluation of a Laser Scanner Based on Geometric Error Model. Palmatee Precision Engineering-Journal Of The International Societies For Precision Engineering And Nanotechnology; 2015; Vol. 40; pp. 139–150.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Oleksandr Adamenko**,
Doctor of Technical Sciences, Professor **Andriy Annenkov**,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Yurii Medvedskiy**,
Elena Tcikolenko, Yehor Havrylov,
Kyiv National University of Construction and Architecture

INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF DETERMINING THE COORDINATES OF SPHERES USING THE FARO FOCUS S 120 LASER SCANNER

Goal. The purpose of the work is research and analysis of the accuracy of determining the coordinates of spheres during geodetic work on laser scanning.

Methods. The study of the accuracy of measurements of the laser scanner was

carried out by the method of direct measurements. During the research, the reference value of the displacement of the sphere was measured using a laser interferometer. The measurements were performed to determine the measurement errors of various measured values of the laser scanner: horizontal angle, vertical angle and distance. Processing of scans and determination of sphere coordinates was carried out in the FARO Scene Lt software complex. Processing of measurement results was carried out by methods of mathematical statistics using MS Excel.

Scientific novelty. A study of the sensitivity of the laser scanner for determining minor displacements of reference targets, using spheres as an example, was carried out. Work with sensitivity studies in determining the coordinates of reference targets, as a component of the error in determining their coordinates, we did not find.

Practical significance. The conducted studies will allow determining the optimal ranges of location of reference targets during scanning to ensure the highest accuracy of determining their coordinates. However, it has been experimentally proven that this method cannot be used to determine the full accuracy characteristics of a laser scanner in determining the coordinates of reference targets, since the influence of some systematic errors, such as the eccentricity of the component parts of the laser scanner, is excluded in the measurements.

The results. According to the research results, it is possible to draw a conclusion about the most appropriate location of reference targets in the form of spheres to achieve the highest accuracy of determining their coordinates. As can be seen from the research, it is desirable to place the spheres at a distance of approximately 5 m from the NLS. At shorter distances (about 2 m), the accuracy of determining the coordinates of the spheres begins to be affected by the growing errors of measuring distances by the scanner, at large distances (from 10 m), the errors of measuring the height coordinates of the spheres increase.

The results presented in the paper require further research. These studies should be performed for other types of reference targets and with the use of other models of laser scanners, which is the goal of further research by the authors.

Key words: terrestrial laser scanning; magnetic spheres; measurement accuracy research; laser interferometer; point cloud.

REFERENCES

1. Klaus Mechelke, Thomas P. Kersten Somparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems., Maren Lindstaedt Conference: 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Gruen, A. & Kahmen, H.(eds.), Zurich, July 9-12, Vol. I, pp. 319-327. {in English}
2. Berit Schmitz , Christoph Holst , Tomislav Medic, Derek D. Lichti, Heiner

Kuhlmann How to Efficiently Determine the Range Precision of 3D Terrestrial Laser Scanners Sensors (Basel) 019 Mar 26;19(6):1466. doi: 10.3390/s19061466. {in English}

3. Thomas P. Kersten, Klaus mechelke Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems., maren lindsTaedt & harald sTernberg, September 2009 Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation 2009(4):301-315 DOI: 10.1127/1432-8364/2009/0023. {in English}

4. Reshetyuk Y. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners: Licenciate thesis in Infrastructure, Geodesy / Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy. Stockholm, 2006. 152 p. {in English}

5. Derek LICHTI, Stefan BRÜSTLE, Jochen FRANKE Self Calibration and Analysis of the Surphaser 25HS 3D Scanner IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 10, Issue 1, No 3, January 2013. {in English}

6. B. Muralikrishnan, M. Ferrucci, D. Sawye, G. Gerner, V. Lee, C. Blackburn, S. Phillips, P. Petrov, Y. Yakovlev, A. Astrelin, S. Milligan, J. Volumetric Performance Evaluation of a Laser Scanner Based on Geometric Error Model. Palmatee Precision Engineering-Journal Of The International Societies For Precision Engineering And Nanotechnology; 2015; Vol. 40; pp. 139 – 150. {in English}