

УДК 528.8

к.т.н., доц. Шульц Р.В.,

Київський національний університет будівництва та архітектури

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРІЇ ЛІФТОВИХ ШАХТ ЗА ДАНИМИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

Розглянуто технологію визначення геометричних параметрів ліфтових шахт методом наземного лазерного сканування.

Постановка проблеми. Сучасні будівельні технології, які застосовуються у висотному будівництві, вимагають постійного вдосконалення та покращення методів інженерно-геодезичного забезпечення будівельно-монтажних робіт під час будівництва висотних споруд. Невід'ємною частиною таких споруд є ліфти. Будівництво ліфтів можна розділити на два етапи:

1) спорудження ліфтової шахти; 2) монтаж ліфтового обладнання.

Кожен з цих етапів обслуговується комплексом інженерно-геодезичних робіт, від якості виконання яких, залежить безпека експлуатації ліфтів.

До початку монтажу ліфтового обладнання необхідно визначити геометрію ліфтової шахти і встановити її придатність до монтажу обладнання. Важливою характеристикою є нерівність поверхні ліфтової шахти. Вимірювання нерівностей є досить складним завданням, оскільки вимагає виконання великої кількості вимірювань. Тому доцільним є використання методів наземного лазерного сканування які дозволяють за незначний проміжок часу автоматично визначити координати великого об'єму точок.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Головним нормативним документом на який посилаються при будівництві та експлуатації ліфтів є радянські ГОСТ [1;2]. Дані документи не відповідають сучасному стану будівельного виробництва і рекомендують для геодезичного забезпечення використовувати застарілі технології та вимірювальні засоби.

Більш детальні рекомендації щодо технології виконання спостережень та порядку виконання контрольних вимірювань наведені у відомчих будівельних нормах [3]. Ці норми було розроблено і затверджено в 1980 році, тому вони також є застарілими.

Детальний аналіз методів контролю ліфтових шахт виконано в [4], де обґрунтовано, що використання дротяних висків можливе тільки для будівель з кількістю поверхів до 16. Тому актуальною є задача розроблення нових методів для контролю монтажу ліфтових шахт та визначення їх геометрії. Нажаль розглянуті в роботі методи вимірювань аналогічні попереднім і детально описані ще в декількох роботах.

Більш сучасне викладення проблеми геодезичного забезпечення ліфтів можна знайти в роботі [5]. Для виконання спостережень в цій праці запропоновано використовувати лазерні прилади вертикального проектування. Розглянуто декілька схем виконання спостережень за допомогою 2-х, 3-х та 4-х лазерів. На час написання цієї роботи лазерне обладнання не дозволяло виконати точну побудову вертикалі, тому запропоновані методи на той час не набули широкого розповсюдження.

Всі розглянуті роботи були опубліковані до 1990 року і в них не враховано можливості сучасного геодезичного обладнання, насамперед електронних тахеометрів та наземних лазерних сканерів.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення методики та перевірка можливостей методу наземного лазерного сканування для визначення геометрії ліфтових шахт.

Виклад основного матеріалу. Для перевірки геометрії ліфтових шахт до сьогодення використовують традиційні методи, які базуються на використанні дротяних висків. Технологія проведення перевірки регламентується нормативною літературою, затвердженою ще в СРСР. Для перевірки положення кабіни по всій висоті шахти з шаблону, по його кутах опускають чотири виски із сталевого дроту діаметром 1-1,5 мм. Лінійкою заміряють відстані від висків до стінок шахти, починаючи з напрямку шахти, а результати заносять в таблицю. Виміри порівнюють з проектними, якщо виявляється, що деякі дійсні розміри збільшені або зменшені проти вказаних необхідно перемістити шаблон так, щоб були витримані проектні розміри від кабіни до стінок шахти. Якщо розміри шахт зменшені так, що знайти таке положення кабіни, при якому необхідні розміри були б дотримані, не представляється можливим, необхідно вирішити питання про доведення шахти до необхідних розмірів. Відхилення дійсних внутрішніх розмірів стінок шахти (у плані) від номінальних, вказаних в робочих кресленнях, не повинно бути більш +30 мм. Різниця довжин діагоналей шахти (у плані) має бути не більше 25 мм. Відхилення стінок шахти від вертикальної площини не повинні перевищувати 15 мм при висоті підйому кабіни до 45 м, 20 мм при висоті підйому від 45 до 75 м і 30 мм при висоті підйому від 75 до 150 м.

Для визначення відхилення стінок шахти від вертикальності використаємо метод наземного лазерного сканування. Головною умовою виконання лазерного сканування є збереження допустимого кута падіння лазерного променя на поверхню шахти. Обчислимо параметри сканування в проекції на вертикальну площину, при цьому прийmemo, що сканування виконується за одним з можливих варіантів так, як це показано на рис. 1

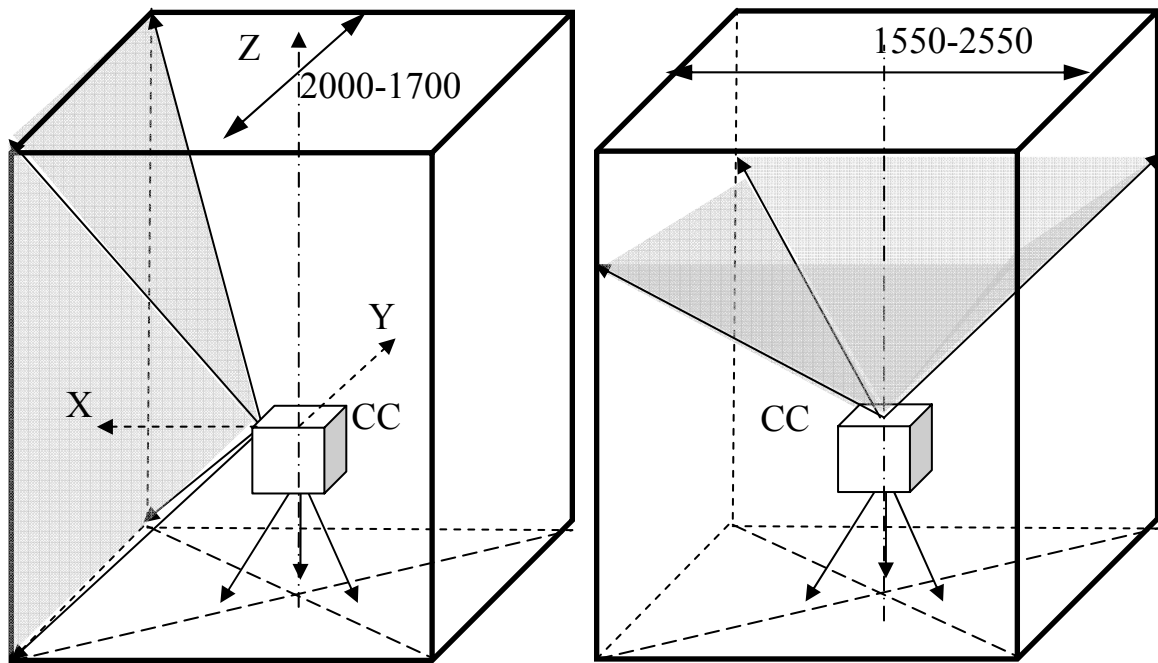


Рис. 1 Варіанти лазерного сканування ліфтової шахти

При послідовному скануванні шахти по висоті з перекриттям між сусідніми сканами будемо мати наступну схему розташування станцій сканування в проекції на площину XZ [7].

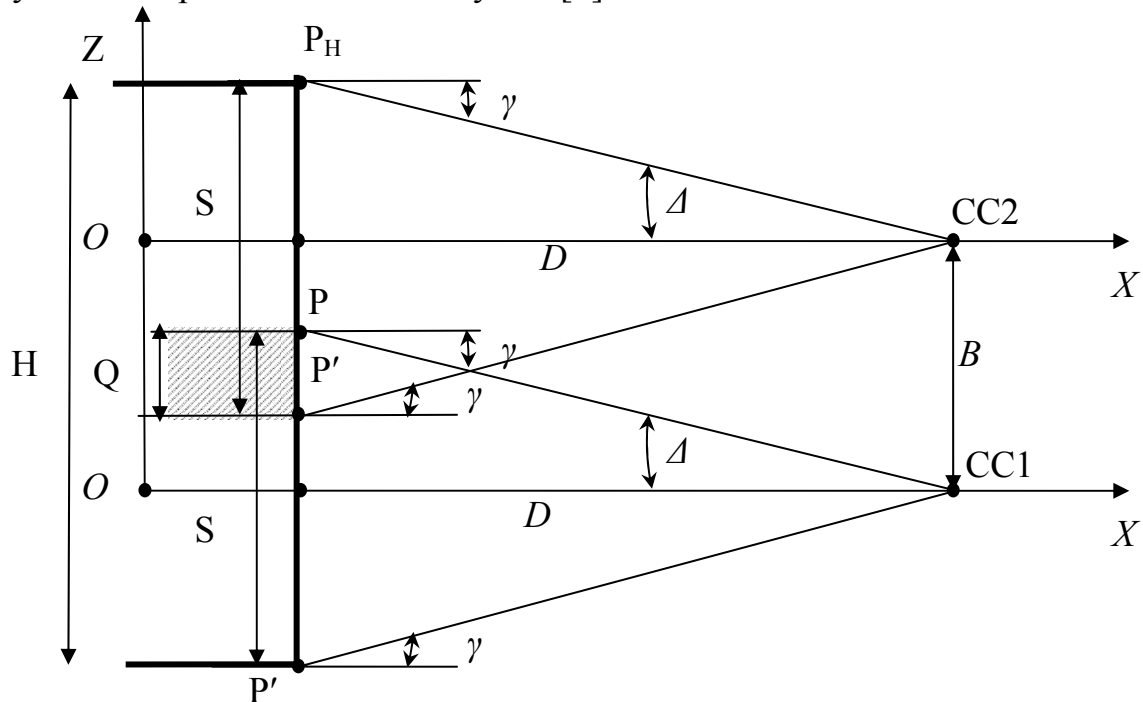


Рис. 2 Послідовне розташування двох станцій сканування

На рис. 2 CC – станція сканування; γ – кут падіння лазерного променя; Δ – кут між лінією сканування по нормалі до поверхні і лінією сканування в точці P ; D – відстань між станцією сканування і поверхнею по нормалі до поверхні; S – захват.

Максимальний захват по вертикалі при заданій відстані і куті падіння, обчислюють як:

$$\Delta = \gamma; \quad S = 2Dtg\Delta \quad (1)$$

За виразом 1 побудуємо графіки захвату шахти по вертикалі в залежності від кута падіння лазерного променя та відстані до площини сканування.

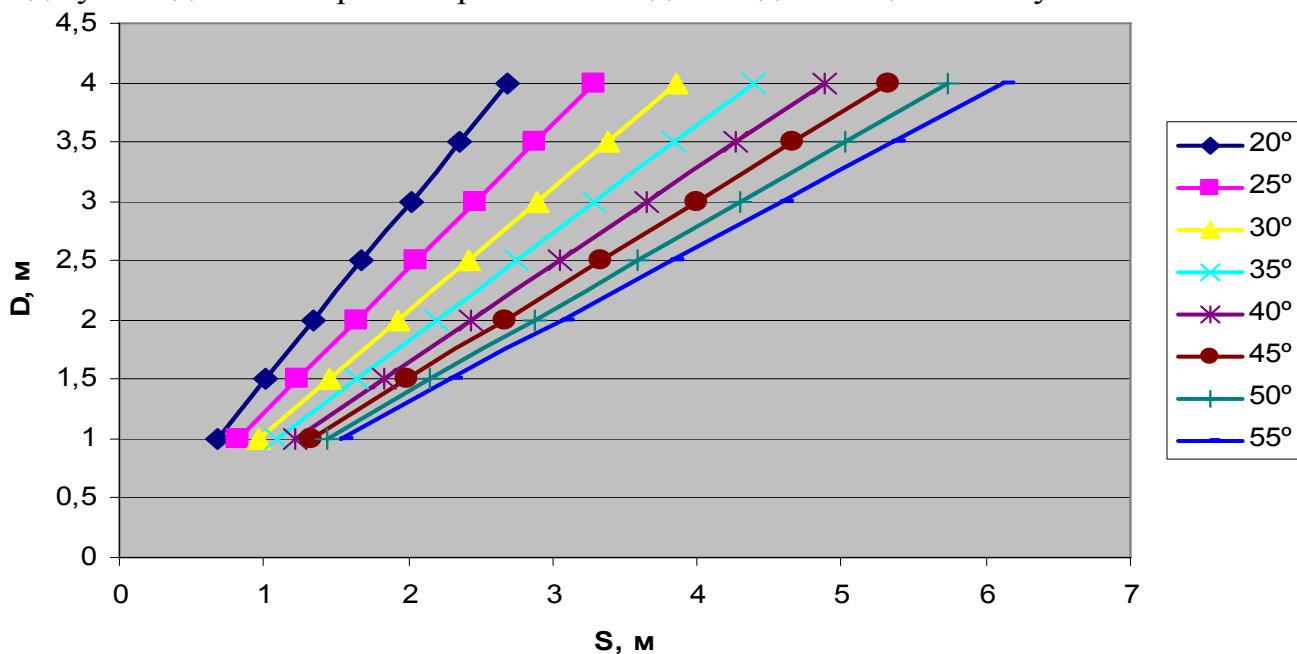


Рис. 3 Захват шахти по вертикалі

При відсутності перекриття, кількість станцій сканування (СС) для шахти висоти H обчислюють:

$$N = \frac{H}{S} \quad (2)$$

При умові, що кожен скан забезпечений 4-ма опорними точками з відомими координатами, сканування виконують без перекриття. Однак кількість точок з відомими координатами обмежена, тому виконують сканування з незначним перекриттям по аналогії з фототріангуляцією за наземними фотознімками. В перекритті розташовують звязуючі точки. Якщо прийняти величину можливого перекриття $Q = (0.1 \div 0.3)S$, тоді є можливість обчислити відстань B між СС та їх кількість:

$$B = S - Q; \quad N' = \frac{H + (N-1)Q}{S} \quad (3)$$

Аналізуючи формули (1-3) можна зробити висновок, що найбільш доцільно станції сканування розташовувати по діагоналі шахти для збільшення величини захвату шахти.

При скануванні шахти необхідно враховувати той факт, що кут падіння γ є просторовим, а отже необхідно враховувати не лише його горизонтальну

проекцію, а й вертикальну. Для обчислення просторового кута падіння γ розглянемо рисунок 4.

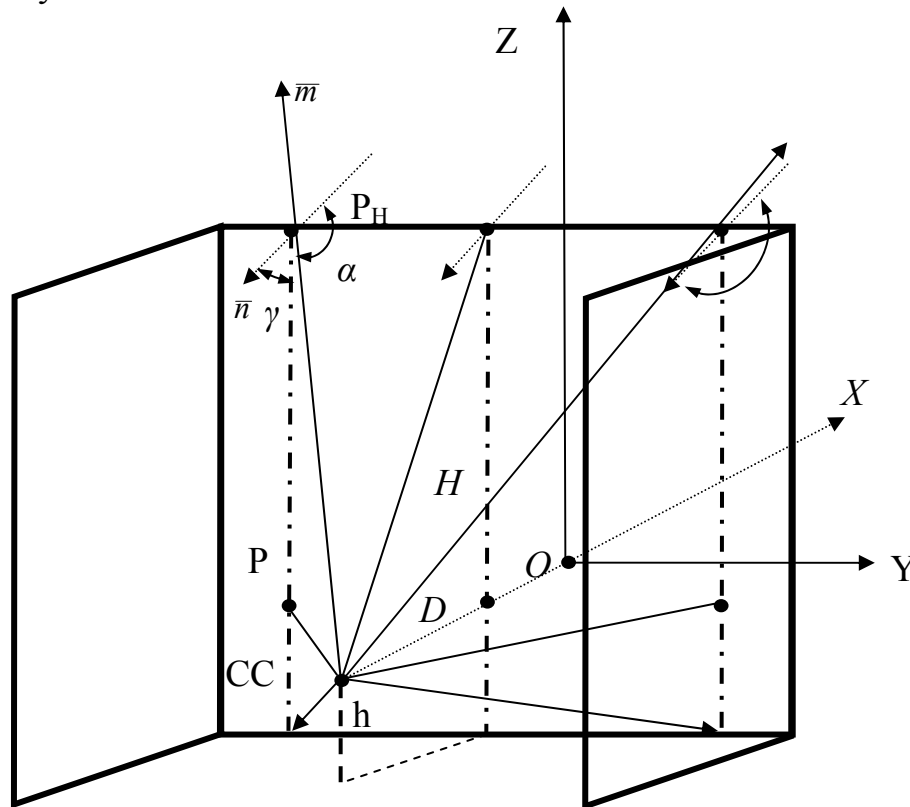


Рис. 4. Просторові параметри сканування

γ – просторовий кут падіння лазерного променя; $\vec{m}$ – вектор променя сканування; $\vec{n}$ – вектор нормалі до площини; α – кут утворений перетином векторів $\vec{n}$ і $\vec{m}$; H – висота шахти.

На рис. 4 окрім відомих величин додається висота об'єкту сканування H . Значення кутів розраховують за формулами скалярного добутку вектору сканування і вектору нормалі до поверхні сканування [7]:

$$\gamma = \pi - \alpha \quad (4)$$

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\vec{n} \cdot \vec{m}}{\|\vec{n}\| \|\vec{m}\|} \right) \quad (5)$$

де, $\vec{m} = (X_{P_H} - X_{CC}, Y_{P_H} - Y_{CC}, Z_{P_H} - Z_{CC})$; $\vec{n} = (X_{CC} - X_O, Y_{CC} - Y_O, Z_{CC} - Z_O)$.

За виразами (4-5) розраховують просторовий кут падіння лазерного променя. В умовах коли відстань до об'єкту та його висота є фіксованим за виразами (1-5) визначають кількість СС.

З усіх геометричних характеристик ліфтової шахти найбільший інтерес представляє визначення відхилень поверхні шахти від вертикалі. При опрацюванні результатів сканування використовують рівняння площини в наступному вигляді $Ax + By + Cz + D = 0$.

Для експериментальної перевірки можливостей наземного лазерного сканування було виконано роботи по скануванню поверхні ліфтової шахти на одному з поверхів. Результати та умови сканування наведено на рис. 5.

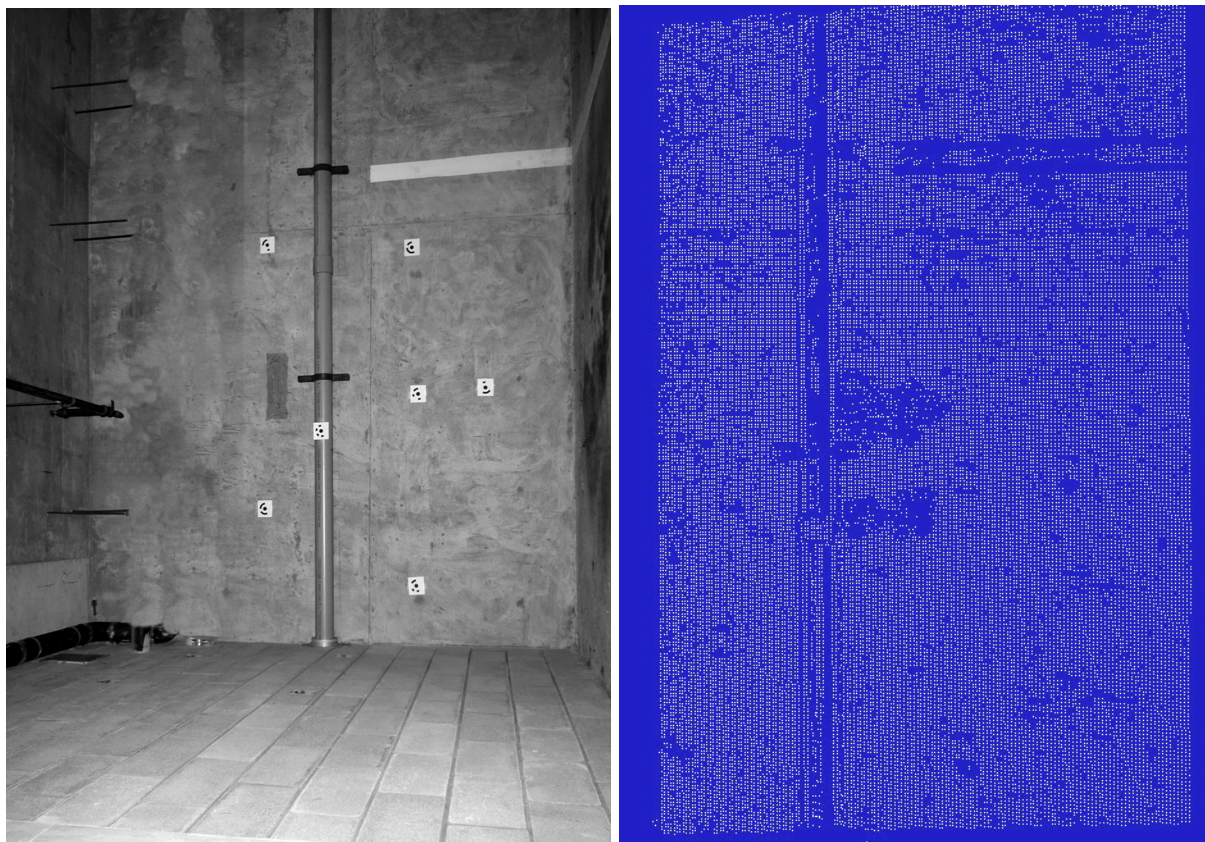


Рис. 5 Результати лазерного сканування поверхні шахти

Загальний розмір отриманого скана склав 28000 точок. Для прикладу наведемо результати обчислення параметрів апроксимуючої площини для однієї з стінок шахти. Значення параметрів площини і оцінку точності їх визначення виконують за стандартною процедурою методу найменших квадратів. В результаті розрахунків було отримано наступні значення:

$$A = 0.7599; m_A = 0.8 \cdot 10^{-5}; B = -0.169; m_B = 0.2 \cdot 10^{-4}; C = -0.6277; m_C = 0.1 \cdot 10^{-4}; D = -12.1326; m_D = 0.1 \cdot 10^{-3}.$$

Середня квадратична похибка одиниці ваги дорівнює 0,006 м. В результаті опрацювання встановлено, що максимальне значення відхилення поверхні шахти від вертикалі складає +22 мм і -21 мм відповідно. При цьому встановлено, що 1216 точок мають відхилення більше 15 мм, що вказує на наявність нерівностей поверхні ліфтової шахти, які можуть бути визначені за допомогою методу наземного лазерного сканування.

Після знаходження шляхом сегментації всіх площин, які утворюють шахту, визначаємо лінії перетину між площинами. Для цього необхідно знайти

рівняння прямої, як результат перетину двох площин. У векторній формі рівняння просторової прямої має вигляд $\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}_0 + \mathbf{V}t$. В координатній формі рівняння записують як:

$$X(t) = X_0 + lt, \quad Y(t) = Y_0 + mt, \quad Z(t) = Z_0 + nt.$$

Якщо пряма визначається як результат перетину двох площин, які задані $F_1 = [N_1 \ D_1]$ та $F_2 = [N_2 \ D_2]$ то пряма по якій вони перетинаються має невідомі вектори $\mathbf{P}_0, \mathbf{V}$.

Скористаємось алгоритмом який розповсюджений в обчислювальній геометрії [6]. Запишемо систему рівнянь двох площин:

$$\begin{bmatrix} p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^T & N_2^T \\ D_1 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow p \begin{bmatrix} N_1^T & N_2^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_1 & -D_2 \end{bmatrix}.$$

Отримане векторне рівняння є еквівалентним невизначеній системі двох рівнянь з трьома невідомими. Рішення системи знаходять використовуючи множники Лагранжа. Функція Лагранжа має вигляд:

$$L(p, \lambda) = \frac{1}{2} (p \cdot p^T) + \lambda \cdot \varphi(p)^T,$$

де λ – вектор множників Лагранжа; $\varphi(p) = p \begin{bmatrix} N_1^T & N_2^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 & D_2 \end{bmatrix}$ – векторна функція зв'язку координат точки p .

Вектор множників Лагранжа отримують як:

$$\lambda = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^T & N_2^T \end{bmatrix} \right)^{-1}.$$

Координати точки p знаходять

$$p = -\begin{bmatrix} D_1 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \cdot N_1^T & N_1 \cdot N_2^T \\ N_2 \cdot N_1^T & N_2 \cdot N_2^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Якщо рівняння двох площин задані у вигляді:

$$\begin{aligned} A_1 X + B_1 Y + C_1 Z + D_1 &= 0 \\ A_2 X + B_2 Y + C_2 Z + D_2 &= 0, \end{aligned}$$

то напрямні косинуси прямої по якій перетинаються площини визначають за виразами (9).

$$l_1 = B_1 C_2 - B_2 C_1, \quad m_1 = C_1 A_2 - C_2 A_1, \quad n_1 = A_1 B_2 - A_2 B_1. \quad (9)$$

Отриманий таким чином набір прямих:

$$\begin{aligned}
 X(t) &= X_{01} + l_1 t, & Y(t) &= Y_{01} + m_1 t, & Z(t) &= Z_{01} + n_1 t \\
 &\dots & & & & \\
 X(t) &= X_{04} + l_4 t, & Y(t) &= Y_{04} + m_4 t, & Z(t) &= Z_{04} + n_4 t
 \end{aligned}
 \quad (10)$$

дозволяє за проекціями цих прямих на площину XOY визначити найбільш вузьке місце шахти і встановити її придатність до монтажу ліфтового устаткування.

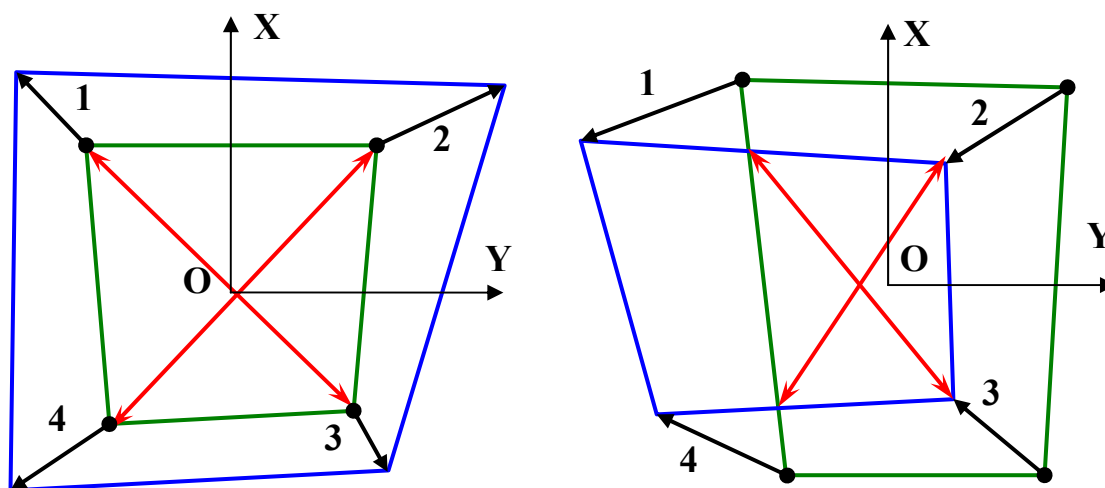


Рис. 6 Варіанти горизонтальної проекції ребер ліфтової шахти

У виразах (10) t можна інтерпретувати, як номер перерізу, в якому визначають відхилення шахти від проектних розмірів.

Висновки. Запропоновано методику визначення геометричних параметрів ліфтових шахт за допомогою методу наземного лазерного сканування. Дана методика дозволяє в комплексі за допомогою однієї технології визначити одночасно проектний контур шахти, відхилення стінок шахти від вертикалі та нерівність поверхні шахти.

Література

1. *Лифты* электрические пассажирские и грузовые. Правила организации, производства и приемки монтажных работ ГОСТ 22845-85 М., Госстройиздат, 1986.
2. *Лифты* электрические грузовые. Основные параметры и размеры. ГОСТ 8823-83 М., Госстройиздат, 1983.
3. ВСН 210-80 Инструкция по монтажу лифтов. Министерство монтажных и специальных строительных работ СССР. М. 270 с.
4. Неумывакин Ю.К., Сухов А.Н., Шмелин Н.А. Геодезический контроль качества строительно-монтажных работ. – М.: Стройиздат, 1988. – 224с.