

Б.Р. Сосса, нач. ВТП

ТОВ «Укргео-Проект», м. Київ, Україна

**ПОРІВНЯЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ КООРДИНАТ ТОЧКОВИХ МАРОК,
ОТРИМАНИХ СПОСОБОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ****Б.Р. Сосса**, нач. ОТП

ООО «Укргео-Проект», г. Киев, Украина

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ КООРДИНАТ ТОЧЕЧНЫХ МАРОК,
ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ****Bohdan Sossa**, Head of TS

Ukrgeo-Proekt LLC, Kyiv, Ukraine

**COMPARATIVE ESTIMATION OF THE ACCURACY OF POINT-BASED TARGETS
COORDINATES, OBTAINED WITH TERRESTRIAL LASER SCANNING**

Виконано емпіричний розрахунок точності тривимірних координат точкових марок, що використовуються при наземному лазерному скануванні для реєстрації сканів і калібруванні наземних лазерних сканерів. Створено дослідний полігон та проведено цикл вимірювань з визначенням координат марок за допомогою високоточного електронного тахеометра та наземним лазерним сканером двома способами – ручним та автоматичним. Здійснено статистичний аналіз отриманих результатів. Проведено порівняння двох вказаних способів визначення координат центра марки. За допомогою статистичного аналізу оцінено вплив вибору способу визначення на кінцеву точність та, як результат, – на точність реєстрації сканів або калібрування сканерів.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, калібрування сканерів, реєстрація сканів, точність, точкові марки.

Сделан эмпирический расчет точности трехмерных координат точечных марок, используемых при наземном лазерном сканировании для регистрации сканов и калибровки наземных лазерных сканеров. Создан исследовательский полигон и проведен цикл измерений с определением координат марок с помощью высокоточного электронного тахеометра и наземного лазерного сканера двумя способами – ручным и автоматическим. Выполнен статистический анализ полученных результатов. Проведено сравнение указанных способов определения центра марки. С помощью статистического анализа проведена оценка влияния выбора способа определения на окончательную точность и, как результат, – на точность регистрации сканов или калибровки сканеров.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, калибровка сканеров, регистрация сканов, точность, точечные марки.

An empirical accuracy calculation of point-based targets' spatial coordinates is made. Those targets are using at terrestrial laser scanning for several scan registration and terrestrial laser scanners calibration. A research polygon was created where target coordinates were obtained with precision total station as well as terrestrial laser scanner using two methods – manual and automatic. A statistical analysis of obtained data was fulfilled and comparing of two mentioned methods of target center coordinates determination was done. Using the statistical analysis, an effect of coordinates determination method choice for eventual accuracy was estimated and, as a result – its direct effect on scan registration accuracy and scanners calibration.

Key words: terrestrial laser scanning, scanners calibration, scan registration, accuracy, point-based targets.

Постановка проблеми. Розповсюдження технологій наземного лазерного сканування (НЛС) для вирішення прикладних задач останніми роками значно пришвидшилось, а подекуди сканери навіть замінюють традиційні геодезичні прилади [5], бо точність визначення просторових координат деякими фазовими сканерами наближається до кількох міліметрів.

Аналізуючи дані провідних виробників апаратної частини технології НЛС (Sokkia, Topcon, Zoller-Fröhlich, Surphaser, Faro, Riegl, Callidus), можна помітити, як постійно підвищується точність обладнання. Однак деякі види інженерно-геодезичних робіт, передусім, високоточні, поки можна виконати лише традиційними методами [2]. Підвищення точності НЛС перш за все дозволить вирішувати задачі інженерної геодезії, пов'язані з високоточними вимірюваннями, наприклад, проводити високоточне вивчення знімання, моніторинг об'єктів підвищеної категорії складності тощо.

Для підвищення точності систем НЛС застосовують калібрування, яке можна визначити як «процес визначення параметрів, за допомогою яких мають бути виправлені виміряні величини для отримання їхніх дійсних значень» [12]. Найчастіше калібрування пов'язане з визначенням інструментальних похибок, а саме розбіжностей між реальним та ідеальним інструментом, які виникають через недосконалість механічних й електрон-

них компонентів. Калібрування НЛС зазвичай проводять, використовуючи різні типи марок: точкові (плоскі або сферичні) або площинні.

Крім того, при реєстрації (зшиванні) сканів також використовують марки – у цьому випадку тільки точкові. Реєстрація відбувається або в умовній системі координат, коли скани трансформуються відносно декількох відомих точок (марок, що наявні на сусідніх хмарах точок, створюючи перекриття), або завдяки використанню відомих координат марок, визначених традиційними геодезичними методами та наступним виконанням просторової оберненої засічки для кожного скана у системі координат користувача. Були спроби використання площинних марок, проте точність реєстрації в такому випадку погіршується [9].

Отже, постає питання, з якою точністю можливо визначити координати марок під час використання наземного лазерного сканування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні питання калібрування НЛС та реєстрації сканів досліджено досить широко. Це питання досліджують учені за кордоном, в університетах Калгарі (Канада), Штутгарта, Ганновера (Німеччина), Стокгольма (Швеція), Цюриха (Швейцарія), Сіднея (Австралія), [7; 8; 10–13] та в Україні – у Київському національному університеті будівництва і архітектури [3; 4].

Незважаючи на деякі розбіжності щодо вибору математичних моделей калібрування та реєстрації, методику та алгоритми цих процесів розроблено досить добре. Проте питанню точності визначення координат точкових марок не приділялось достатньої уваги [6].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Недоліком методів калібрування та реєстрації, що використовують точкові марки, є необхідність вручну вимірювати їх положення на хмарі. Проте це стосується далеко не всіх сучасних НЛС. У деяких сканерах, наприклад, виробництва Sokkia Торсон (Японія) та Zoller + Frohlich (Німеччина) наявна апаратна або програмна функція розпізнавання плоских марок. Такі марки достатньо розставити в області сканування, щоб потім в автоматичному або напівавтоматичному режимі розпізнати їх за допомогою програмного забезпечення та отримати координати. На рис. 1 показано марку для сканерів виробництва Z+F, а на рис. 2 – для сканерів Торсон.



Рис. 1. Схема точкової марки, що використовується зі сканерами Z+F

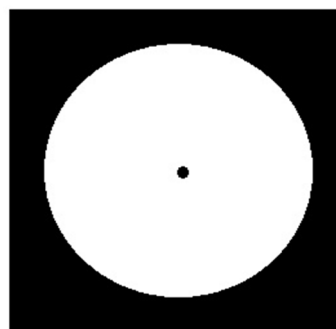


Рис. 2. Схема точкової марки, що використовується зі сканерами Торсон

У разі ручного визначення координат береться точка, найближча до геометричного центра марки. У цьому випадку використовується комбінація контрастних сегментів з різною відбивною здатністю. Цей спосіб забирає більше часу, проте традиційно залишається основним.

У разі автоматичного визначення користувач не знає алгоритму визначення геометричного центра через патентні обмеження, використовуючи сканер як «чорну скриньку» [4].

Мета статті. Головною метою цієї роботи є отримання точності визначення тривимірного положення точкових марок, визначених за допомогою наземних лазерних сканерів у двох режимах (ручному й автоматичному) та їх порівняння. На підставі порівняльного аналізу запропоновано оптимальний спосіб визначення координат марок під час проведення калібрування та/або реєстрації.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження використовувався наземний лазерний сканер Topcon GLS-1500. Під час роботи з ним використовуються спеціальні марки, які мають поверхню з великим альбедо на фоні поверхні з малим альбедо. Схему такої марки наведено на рис. 2. Розміри такої марки можуть бути 50x50, 100x100, або 200x200 мм залежно від того, на якій відстані від сканера передбачається її використовувати.

У меню сканера наявна опція “Scan Target”, за допомогою якої сканується область навколо марки для наступного визначення координат її центра.

Для порівняння точності визначення координат центра опорної марки в ручному й автоматичному режимі проведемо вимірювання у двох режимах. Дослідження було проведено на двох полігонах.

Принцип вимірювання на обох полігонах був такий:

1. Фіксація марок у полі зору сканера (360° по горизонталі, 70° по вертикалі).
2. Сканування марок у режимі скан (ручне вимірювання) або в режимі сканування марок (автоматичне вимірювання).
3. Вимірювання марок високоточним електронним тахеометром повним прийманням з подальшим врівноваженням отриманих даних в умовній системі координат.

У результаті було отримано два набори координат тих самих точок. У першому випадку було знято 8 точок, у другому – 12. Їх наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Координати опорних марок, виміряні електронним тахеометром і сканером

| Ручне вимірювання координат | № тт | Тахеометр | | | Сканер | | |
|-----------------------------------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 01 | 39,559 | 57,904 | 1,732 | 19,452 | 2,030 | 0,320 |
| 02 | 41,396 | 57,876 | 0,358 | 17,869 | 2,961 | -1,053 | |
| 03 | 42,706 | 54,685 | 1,339 | 15,093 | 0,915 | -0,074 | |
| 04 | 61,908 | 41,808 | 1,552 | -8,006 | -0,106 | 0,139 | |
| 05 | 56,667 | 43,681 | 1,564 | -2,557 | -1,230 | 0,151 | |
| 06 | 51,925 | 49,752 | 1,709 | 4,650 | 1,489 | 0,298 | |
| 07 | 51,485 | 49,246 | 2,481 | 4,765 | 0,829 | 1,063 | |
| 08 | 51,534 | 49,298 | -0,118 | 4,753 | 0,904 | -1,529 | |
| Автоматичне вимірювання координат | 1 | 3,628 | -0,174 | -0,905 | 2,986 | -2,247 | -0,841 |
| | 2 | 2,586 | 1,349 | -0,116 | 3,003 | -0,401 | -0,052 |
| | 3 | 1,258 | 3,284 | 0,590 | 3,019 | 1,945 | 0,654 |
| | 4 | -0,373 | 3,076 | -1,419 | 1,562 | 2,709 | -1,355 |
| | 5 | -2,123 | 1,873 | -0,132 | -0,561 | 2,724 | -0,068 |
| | 6 | -3,730 | 0,771 | 0,681 | -2,511 | 2,738 | 0,745 |
| | 7 | -3,426 | -0,197 | -1,394 | -2,814 | 1,77 | -1,329 |
| | 8 | -2,335 | -1,796 | -0,138 | -2,835 | -0,166 | -0,074 |
| | 9 | -1,070 | -3,599 | 0,689 | -2,828 | -2,368 | 0,752 |
| | 10 | 0,104 | -3,344 | -1,294 | -1,718 | -2,831 | -1,229 |
| | 11 | 1,671 | -2,196 | -0,092 | 0,223 | -2,787 | -0,028 |
| | 12 | 3,481 | -0,965 | 0,585 | 2,413 | -2,812 | 0,649 |

Для оцінювання точності координат марок було використано непрямий спосіб — порівняння відстаней між усіма точками. Відстані між марками визначались як функції координат: $S = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$, де ΔX , ΔY , ΔZ — прирости відповідних координат.

Після цього порівнювались відповідні відстані. У випадку з 8 марками цих відстаней було 28, а у випадку з 12 — 66.

За еталонні марки і відстані було прийнято ті, що виміряні за допомогою електронного тахеометра.

Апріорна точність визначення координат. Результати дослідження точності електронного тахеометра на спеціалізованому обладнанні дали таку точність: вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів — $1''$; вимірювання відстаней у режимі «на плівку» і «без відбивача» — 0,9 мм. Заявлені виробником технічні характеристики сканера ста-

новлять, відповідно, 6'' та 4 мм. Для апріорного оцінювання точності скористаємось виразами, наведеними в [2] для апріорного оцінювання точності наземного лазерного сканування. У результаті отримуємо 1 мм для електронного тахеометра та 4 мм для сканера. Тому при розрахунках координати, визначені за допомогою тахеометра, брались з точністю до 4 знака, а зі сканера – до 3 знака після коми. Відстані визначались з точністю до 4 знака після коми, а різниці відстаней, відповідно, – до десятих часток міліметра. Через значний об'єм даних в табл. 2 наведено фрагмент зведеної таблиці з розрахунку значень різниць відстані як функції від вимірних координат.

Таблиця 2

Розрахунок значень різниці відстані як функції від координат (фрагмент)

| Назва лінії | Тахеометр | | | Сканер | | | S, м | | ΔS , мм |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|--------|-----------------|
| | ΔX | ΔY | ΔZ | ΔX | ΔY | ΔZ | Тахеометр | Сканер | |
| 1-2 | -1,042 | 1,523 | 0,789 | 0,017 | 1,846 | 0,789 | 2,0069 | 2,0076 | 0,7 |
| 1-3 | -2,370 | 3,458 | 1,495 | 0,033 | 4,192 | 1,495 | 4,4508 | 4,4507 | -0,1 |
| 1-4 | -4,001 | 3,250 | -0,514 | -1,424 | 4,956 | -0,514 | 5,1802 | 5,1821 | 1,9 |
| 1-5 | -5,751 | 2,047 | 0,773 | -3,547 | 4,971 | 0,773 | 6,1532 | 6,1555 | 2,3 |
| 1-6 | -7,358 | 0,945 | 1,586 | -5,497 | 4,985 | 1,586 | 7,5861 | 7,5883 | 2,2 |
| 1-7 | -7,054 | -0,023 | -0,489 | -5,800 | 4,017 | -0,488 | 7,0710 | 7,0721 | 1,1 |

Статистичний аналіз отриманих даних. Оскільки точність визначення координат електронним тахеометром, як видно з різниць ΔS та апріорного розрахунку точності, одного порядку з точністю визначення координат сканером, то приймати ці значення, як істинні, буде некоректно. Тому згідно з [1] стандартне відхилення для значень ΔS визначалось за формулою Бесселя:

$$m_{\Delta S} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta S_i - \overline{\Delta S})^2}{n-1}}, \text{ де } \overline{\Delta S} - \text{середнє значення } \Delta S, n - \text{кількість ліній.}$$

Для ручного способу визначення координат величина $m_{\Delta S}$ становила 2,72 мм, а для автоматичного – 1,10 мм.

Середня квадратична похибка середньої квадратичної похибки обчислюється за формулою $m_m \approx \frac{m}{\sqrt{2(n-1)}}$ і становить 0,4 мм для ручного визначення і 0,1 мм для автоматичного визначення.

Середня квадратична похибка арифметичної середини визначається за формулою $M = \frac{m}{\sqrt{n}}$ і становить 0,51 мм для ручного визначення і 0,14 мм для автоматичного визначення.

СКП середньої квадратичної похибки арифметичної середини визначається за формулою $m_M \approx \frac{m}{\sqrt{2n(n-1)}}$ і становить 0,07 мм для ручного визначення і 0,01 мм для автоматичного визначення.

Для перевірки виконання умови [1] $m_{\Delta S} \geq t_{\beta} m_m$ визначимо t за таблицями розподілу Стьюдента, залежно від заданої імовірності β та числа ступенів вільності n . Зведемо дані для обох типів визначення в табл. 3.

Таблиця 3

Визначення ступеня довіри по t -розподілу Стьюдента при ручному й автоматичному визначенні координат опорних марок (СКП)

| Задана ймовірність | 95 % | 98 % | 99 % | 99,5 % | 99,8 % | 99,9 % |
|--|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Ручне визначення ($m_{\Delta S}=2,72$ мм, $m_m=0,4$ мм) | | | | | | |
| t_{β} | 2,052 | 2,473 | 2,771 | 3,057 | 3,421 | 3,690 |
| $t_{\beta} m_m$ | 0,821 | 0,989 | 1,108 | 1,223 | 1,368 | 1,476 |
| Автоматичне визначення ($m_{\Delta S}=1,10$ мм, $m_m=0,1$ мм) | | | | | | |
| t_{β} | 2,000 | 2,390 | 2,660 | 2,915 | 3,232 | 3,460 |
| $t_{\beta} m_m$ | 0,200 | 0,239 | 0,266 | 0,292 | 0,323 | 0,346 |

Як видно, в обох випадках отримані значення вказують на високий ступінь довіри до результатів – 99,9 %, що свідчить про те, що оцінка m отримана достатньо надійно.

Надійність визначення СКП арифметичної середини проконтролюємо за допомогою умови $M \geq t_{\beta} m_M$. Аналогічно зведемо дані в таблицю (табл. 4).

Таблиця 4

Визначення ступеня довіри по t -розподілу Стьюдента при ручному й автоматичному визначенні координат опорних марок (СКП арифметичної середини)

| Задана ймовірність | 95 % | 98 % | 99 % | 99,5 % | 99,8 % | 99,9 % |
|--|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Ручне визначення ($M=0,51$ мм, $m_M=0,07$ мм) | | | | | | |
| t_{β} | 2,052 | 2,473 | 2,771 | 3,057 | 3,421 | 3,690 |
| $t_{\beta} m_M$ | 0,144 | 0,173 | 0,194 | 0,214 | 0,240 | 0,258 |
| Автоматичне визначення ($M=0,14$ мм, $m_M=0,01$ мм) | | | | | | |
| t_{β} | 2,000 | 2,390 | 2,660 | 2,915 | 3,232 | 3,460 |
| $t_{\beta} m_M$ | 0,020 | 0,024 | 0,027 | 0,030 | 0,032 | 0,035 |

Як видно, аналогічно попередній таблиці, отримані значення вказують на високий ступінь довіри до результатів – 99,9 %, що свідчить про те, що оцінка M отримана надійно.

Визначимо довірчі інтервали для можливого значення істинної величини та можливих значень результатів вимірів: $\bar{X} - t_{\beta} M \leq X \leq \bar{X} + t_{\beta} M$; $\bar{X} - t_{\beta} m \leq x_i \leq \bar{X} + t_{\beta} m$.

Для можливого значення істинної величини довірчий інтервал становить $-2,64 \leq X \leq 1,12$ – для ручного визначення і $0,39 \leq X \leq 1,35$ – для автоматизованого.

Для можливих значень результатів вимірів довірчий інтервал становить $-10,80 \leq x_i \leq 9,28$ – для ручного визначення і $-2,94 \leq X \leq 4,68$ – для автоматизованого.

Порівнюючи отримані дані з результатами вимірів, бачимо, що всі результати вимірів належать розрахунковому інтервалу, а тому є доброякісними.

Для визначення довірчого інтервалу дисперсії та стандарту арифметичної середини, а також стандартного відхилення ΔS , скористаємось виразами [1]:

$$\gamma_1 M^2 \leq M^2 \leq \gamma_2 M^2; \gamma_1 m \leq m \leq \gamma_2 m; \gamma_1 m_{\Delta S} \leq m_{\Delta S} \leq \gamma_2 m_{\Delta S},$$

$$\text{де } \gamma_1 = \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi_2^2}}, \gamma_2 = \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi_1^2}}.$$

Статистики (квантили) χ_1^2 і χ_2^2 вибираються з таблиць розподілу Пірсона за числом ступенів вільності $n-1$ та заданій імовірності β при: $p_2 = \frac{(1-\beta)}{2}$ і $p_1 = 1 - p_2$.

Для отриманої раніше імовірності 99,9 % та відомих ступенях вільності значення для ручного й автоматичного визначення рівні і становлять: $p_1 = 0,9995$; $p_2 = 0,0005$.

Отже, значення статистик χ^2 становлять:

$$\chi_1^2 = 9,8028; \chi_2^2 = 55,4760 \text{ – для ручного визначення і}$$

$$\chi_1^2 = 35,3616; \chi_2^2 = 105,9881 \text{ – для автоматичного визначення.}$$

Відповідно, розраховуємо коефіцієнти:

$$\gamma_1 = 0,6976; \gamma_2 = 1,6596 \text{ – для ручного визначення і}$$

$$\gamma_1 = 0,7832; \gamma_2 = 1,3558 \text{ – для автоматичного визначення.}$$

Тепер визначимо довірчі інтервали. Дисперсія арифметичної середини M^2 становить $0,182 \leq 0,260 \leq 0,432$ – для ручного визначення і $0,015 \leq 0,020 \leq 0,027$ – для автоматичного.

Стандарт середнього арифметичного M становить $0,36 \leq 0,51 \leq 0,85$ – для ручного визначення і $0,11 \leq 0,14 \leq 0,19$ – для автоматичного.

Для стандартного відхилення ΔS величина $m_{\Delta S}$ становить $1,90 \leq 2,72 \leq 4,51$ – для ручного визначення і $0,86 \leq 1,10 \leq 1,49$ – для автоматичного.

Зведемо зазначені дані в одну таблицю (табл. 5):

Зведена таблиця статистичного оброблення результатів вимірів при ручному й автоматичному визначенні координат опорних марок

| Назва параметра | Позначення | Значення | |
|--|----------------|------------------|------------------------|
| | | Ручне визначення | Автоматичне визначення |
| Середня квадратична похибка ΔS | $m_{\Delta S}$ | 2,72 мм | 1,10 мм |
| СКП середньої квадратичної похибки | m_m | 0,4 мм | 0,1 мм |
| СКП арифметичної середини | M | 0,51 мм | 0,14 мм |
| СКП СКП арифметичної середини | m_M | 0,07 мм | 0,01 мм |
| Ступінь довіри по t-розподілу Стьюдента | β | 99,9 % | 99,9 % |
| Довірчий інтервал для можливого значення істинної величини | X | -2,64...1,12 | 0,39...1,35 |
| Довірчий інтервал для можливих значень результатів вимірів | x_i | -10,80...9,28 | -2,94...4,68 |
| Реальні значення результатів вимірів | x_i | -7,10...4,81 | -1,40...3,11 |
| Довірчий інтервал дисперсії арифм. середини | M^2 | 0,182...0,432 | 0,015...0,027 |
| Довірчий інтервал СКП арифм. середини | M | 0,36...0,85 | 0,11...0,19 |
| Довірчий інтервал стандартного відхил. ΔS | $m_{\Delta S}$ | 1,90...4,51 | 0,86...1,49 |

Визначення похибки вимірювання координат опорної марки. Для визначення похибки вимірювання координат опорної марки m_{OM} скористаємось тим, що виміри обох точок, що утворюють лінію, рівноточні:

$$m_{\Delta S} = \sqrt{m_{OM1}^2 + m_{OM2}^2} = \sqrt{2m_{OM}^2} = m_{OM}\sqrt{2},$$

отже, $m_{OM} = \frac{m_{\Delta S}}{\sqrt{2}}$.

Таким чином, точність визначення координат вручну становить 1,9 мм, а розпізнавання в автоматичному режимі – 0,8 мм.

Висновки і пропозиції. З результатів статистичного дослідження отриманих даних чітко видно, що для зазначеної моделі наземного лазерного сканера оптимальніше використовувати автоматичне визначення координат геометричного центра точкової марки під час проведення калібрування або реєстрації сканів. За поданою методикою зручно визначати реальну точність систем наземного лазерного сканування та ступінь довіри до отриманих даних.

У випадку, якщо апаратна чи програмна частина системи НЛС не дозволяє отримати координати марок автоматично, доцільно провести порівняльне дослідження точності даних, отриманих за допомогою вимірювань у ручному режимі та під час використання площинних марок. Враховуючи принципи розбіжності вказаних способів, це можливо зробити тільки опосередковано. Таким чином, це може слугувати темою для подальших досліджень у цьому напрямку.

Список використаних джерел

1. *Войтенко С. П.* Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів / С. П. Войтенко. – К. : КНУБА. – 2003. – 216 с.
2. *Катушков В. О.* Співвідношення між очікуваною точністю наземного лазерного сканування та вимогами до точності виконання інженерно-геодезичних робіт / В. О. Катушков, Р. В. Шульц, Б. Р. Сосса // Містобудування та територіальне планування : науково-технічний збірник. – 2012. – № 44. – С. 238–248.
3. *Шульц Р. В.* Аналіз методів та моделей калібрування наземних лазерних сканерів / Р. В. Шульц // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л. : Вид-во Львівської політехніки, 2011. – Вип. II. – С. 128–133.
4. *Шульц Р. В.* Теорія і практика використання наземного лазерного сканування в задачах інженерної геодезії : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.24.01 / Р. В. Шульц ; Київський національний університет будівництва і архітектури. – К., 2012. – 36 с.
5. *Шульц Р. В.* Технологія визначення деформацій опор резервуарів за даними наземного лазерного сканування / Р. В. Шульц, Б. Р. Сосса // Вісник геодезії та картографії. – К., 2012. – Вип. 5. – С. 14–17.

6. *Alba M.* Investigations about the accuracy of target measurement for deformation monitoring / Alba M., Roncoroni F., Scaioni M. // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Vol. XXXVII. Part B5. – Beijing, 2008. – P. 1053–1059.

7. *Bae K.* On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners / K. Bae, D. Lichti // The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W52). – Espoo, Finland, 2007. – P. 14–19.

8. *Block-to-Point Fine Registration in Terrestrial Laser Scanning* [Електронний ресурс] / J. Wang // REMOTE SENSING. – 2013. – № 5. – P. 6237–6921. – Режим доступу : <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/12/6921>.

9. *Chow J.* In-situ Self-calibration of Terrestrial Laser Scanners and Deformation Analysis Using Both Signalized Targets and Intersection of Planes for Indoor Applications / Jacky C. K. Chow, William F. Teskey and J.W. (Bill) Lovse // 14th FIG Symposium on Deformation Measurements and Analysis, 5th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, and 2nd International Workshop on Spatial Information Technologies for Monitoring the Deformation of Large-Scale Man-Made Linear Features Hong Kong, China, November 2–4, 2011. – Hong Kong, 2011. – P. 2–16.

10. *Lichti D.* Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment / D. D. Lichti, M. G. Licht // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 5). – Newcastle upon Tyne, 2006. – P. 155–160.

11. *Rabbani T.* An integrated approach for modelling and global registration of point clouds / T. Rabbani, S. Dijkman, F. van den Heuvel, G. Vosselman // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – ELSEVIER B.V., 2007. – № 61 (6). – P. 355–370.

12. *Reshetyuk Y.* Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning: Doctoral thesis in Infrastructure / Y. Reshetyuk, Geodesy. Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy, Sweden, Stockholm, January 2009. – Stockholm, 2009. – 173 p.

13. *Schultz T.* Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy: Dissertation for the degree of Doctor of Sciences / T. Schultz. ETH Zurich. – Zurich, 2007. – 172 p.

УДК 658.512.4:519.237

А.В. Топал, магістрант

О.А. Сергієнко, магістрант

С.П. Вислоух, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ЗАСОБАМИ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

А.В. Топал, магістрант

А.А. Сергиенко, магістрант

С.П. Вислоух, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА СРЕДСТВАМИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Artur Topal, Master's Degree student

Oleksandr Serhiienko, Master's Degree student

Serhii Vysloukh, PhD in Technical Sciences

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

SOLVING PROBLEMS OF TECHNOLOGICAL PREPRODUCTION BY METHODS OF NEURAL NETWORKS

Розглянуто метод використання засобів штучних нейронних мереж при автоматизації процесу технологічної підготовки виробництва. Розроблено алгоритм та методіку використання цього методу під час вирішення задач такого типу, а також програму, що реалізує цей метод. Виконано апробацію розроблених програм при вирішенні задач прогнозування технологічних параметрів оброблення матеріалу та перевірено правильність розрахунків за