УДК 528.48

Анатолій ВІВАТ[1a], Сергій ПЕТРОВ[1b], Валерія ВОЛКОВА[2]

[1] Кафедра інженерної геодезії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: anatolii.y.vivat@lpnu.ua; serhii.l.petrov@lpnu.ua; [1a] https://orcid.org/0000-0002-6114-5911;
[1b] https://orcid.org/0000-0002-1045-8125
[2] Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВСТАНОВЛЕННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО ОБЛАДНАННЯ У ПРОЄКТНЕ ПОЛОЖЕННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОННИХ ТАХЕОМЕТРІВ

Сьогодні в Україні перебувають в експлуатації десятки турбогенераторів (ТГ), значна частина яких експлуатується понад 35÷50 років, що перевищує термін їх служби відповідно до нормативної документації. Фактичний технічний стан ТГ визначається багатьма геометричними параметрами, серед яких вирішальними є ті, що характеризують його як механічну систему (вісь агрегату та вісь статора). Нині контроль положення осей повинен виконуватись із точністю 0,5 мм та здійснюється переважно трьома способами (за допомогою струни, за допомогою оптичної авторефлексної системи (ППС-11), із використанням перевіряльного вала). Мета цих досліджень – розроблення методики контролю геометричних параметрів статора ТГ у разі його заміни геодезичними методами із використанням високоточних електронних тахеометрів та її апробація на об'єкті. Виконавши попередні дослідження, пропонуємо вирішувати такі завдання просторовим методом електронної тахеометрії із використанням високоточного тахеометра Leica TCRP1201R300. Ми здійснили апріорну оцінку точності та низку експериментів (дослідження із визначення похибки перефокусування, визначення похибки вимірювання віддалі на коротких довжинах із використанням сферичного відбивача, дослідження впливу неперпендикулярності вимірювального лазера до відбивача) з метою розроблення методики підвищення точності вимірювання за умови застосування електронного тахеометра. Цю методику апробовано на об'єкті під час ремонту (заміни) статора генератора. Виконавши робити, ми визначили просторове положення осей агрегату та статора із точністю 0,3 мм, які зафіксовано в умовній системі координат чотирма марками. Методикою передбачено вибір оптимальних умов вимірювань електронним тахеометром, за яких компенсуються похибки вихідних даних, інструментальні, зовнішніх умов, візування, центрування та фіксування. Методикою передбачено також контроль кожного етапу робіт за стандартним відхиленням до 0,2 мм. Кількість прийомів вимірювань визначається досягненням точності кожного етапу 0,2 мм.

Ключові слова: вивірка великогабаритного обладнання; турбогенератор; просторовий метод електронної тахеометрії; вісь генератора та агрегату; підвищення точності вимірювань електронними тахеометрами.

Вступ

Надійна та економічна робота електроенергетичної галузі визначається трьома взаємопов'язаними складовими: технічним станом обладнання, кваліфікацією персоналу й ефективною організацією виробництва на всіх його етапах. Всі ці питання тісно пов'язані із широким упровадженням передових сучасних технологій [Хоменко, 2020]. Технічний стан обладнання гідро- та атомних електростанцій залежить не тільки від правильної експлуатації, але й від своєчасного та фахового ремонту. Це особливо актуально, оскільки зношення обладнання є значним [Суходолята ін., 2014].

Сьогодні в Україні перебувають в експлуатації 30 турбогенераторів (ТГ) типу ТГВ-200, 4 ТГ типу ТГВ-200Д, 11 одиниць ТГВ-200М потужністю 200 МВт та 41 ТГ типу ТГВ-300 потужністю 300 МВт, велика частина яких експлуатується понад 35÷50 років, що значно перевищує термін їх служби відповідно до нормативної документації. Повна заміна такої кількості генераторів, які відпрацювали свій ресурс, новими в стислий термін в умовах світової економічної кризи та пандемії надто проблематична. Тому важливий контроль фактичного стану. Фактичний технічний стан ТГ визначається багатьма параметрами, серед яких вирішального значення набувають ті,

що характеризують його як механічну систему [Зайцев, Панчик, 2021].

Ситуація у країнах Європи та в усьому світі значно краща стосовно термінів експлуатації, ремонту та заміни ТГ, проте велику увагу нині звертають на питання безпечної експлуатації обладнання, зокрема геодезичними методами [Лехнер, 2012].

Аналіз останніх досліджень

Контроль за збереженням геометричних параметрів особливо важливий під час ремонту чи заміни основних вузлів ТГ, а саме ротора та статора, валів турбіни. Нині вивіряння положення окремих вузлів ТГ повинно забезпечувати точність 0,5 мм та здійснюється переважно трьома способами:

- за допомогою струни;
- за допомогою оптичної авторефлексної системи (ППС-11);
- із використанням перевіряльного вала.

В першому способі струною слугує дріт діаметром 0,6 мм, що використовується під час виробництва рояльних струн. Вона закріплена з одного кінця штативом, а другим прикріплена до блока із вантажем. Уздовж струни переміщується шток зі спеціальною вилкою для фіксації положення обладнання, яке контролюється. Останнім часом для задавання осі замість струни використовують лазерні випромінювачі.

Оптична система ППС–11 дає змогу вимірювати нестворність окремих вузлів генератора чи турбіни за допомогою авторефлексії за трьома контрольними точками. До складу цієї системи входить зорова труба (можна використати зорову трубу теодоліта, автоколімаційну трубу) та центрувальна візирна марка, яку спочатку встановлюють у контрольних точках (розточках), а потім – у базових. Для встановлення візирної марки використовують спеціальні центрошукачі (НИИТМАШ, автоцентрошукач КНУБА) [Баран, 2012]. Звісно, забезпечити точність співвісності системою ППС-11 доволі складно, це потребує значних затрат часу, особливо для відновлення центра двометрового діаметра статора із ізоляційною обмоткою.

Перевіряльний вал – це окрема деталь із опорними поверхнями, які імітують шийки ротора з високою точністю (стандартний допуск діаметра деталі становить 0,03 мм, а овальність безпосередньо розточок ротора – 0,01 мм).

Усі перелічені способи є механічними, чи оптико-механічними і потребують значних затрат часу, людських ресурсів, а головне – не дають змоги автоматизувати процес контролю фізичних параметрів ТГ під час ремонту чи заміни.

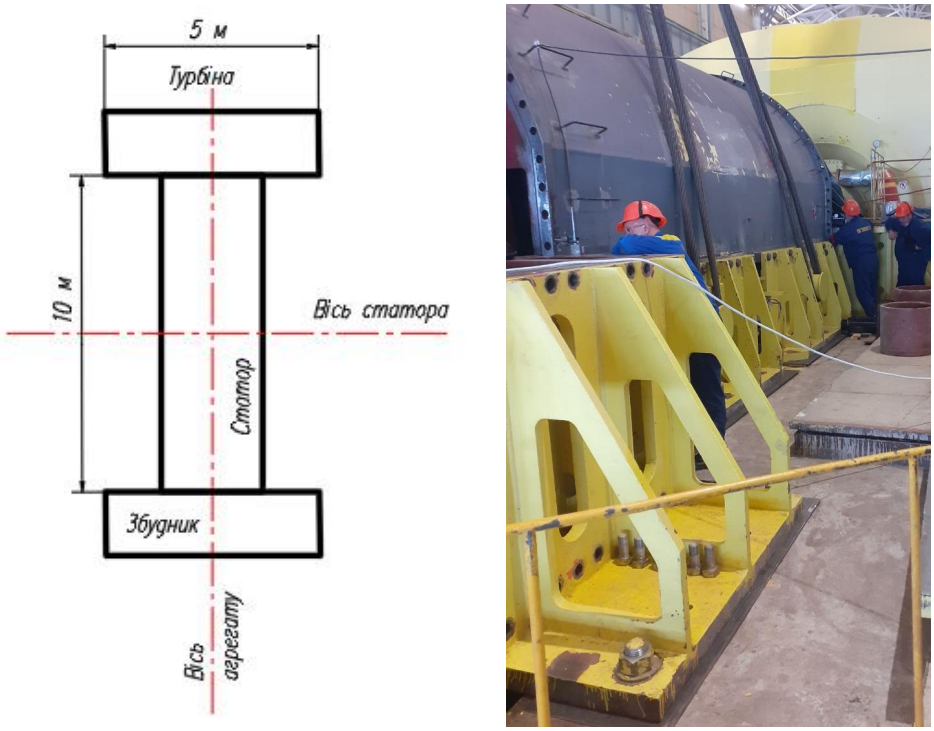
У світовій практиці такі завдання вирішують координатними машинами типу “рука” [Petrakov & Shuplietsov, 2018]. Ці машини з точністю вимірювання декілька мікрон можуть визначити центр за необхідною кількістю точок. Але залишається питання фіксування визначеного центра для подальшого його відтворення. У роботі [Zobrist, et al., 2009] високої точності – декілька сотих міліметра у визначенні поверхні сферичного дзеркала досягнуто із використанням лазерних трекерів та спеціальних сферичних відбивачів. Лазерний трекер – це дещо удосконалений електронний тахеометр із точнішим віддалеміром та стабільнішою установкою. Згідно із [Leica TS30 White Paper] система зчитування кутів лазерного трекера та електронного тахеометра співрозмірні за точністю. У роботі [Бурак, 2011] досліджено точність електронних тахеометрів для виконавчих знімань. Показано можливість підвищення точності вимірювань на коротких віддалях. У роботі [Lityns’kyy, et al., 2014] запропоновано метод лінійно-кутових вимірювань для підвищення точності визначення невеликих відрізків, а також запропоновано методику оптимального планування точності визначення відрізка. У роботі [Літинський, 2015] апробовано методику [Lityns’kyy, et al., 2014] на взірцевому базисі другого розряду. Досліджено можливість підвищення у три рази точності визначення десятиметрових відрізків електронними тахеометрами. У роботі [Vivat, et al., 2018] вивчено можливість використання електронних тахеометрів зі сферичними відбивачами для визначення геометричних параметрів інженерних споруд. Також у цій роботі запропоновано використання візирних цілей на світловідбивній основі для підвищення точності візування. Усі ці дослідження можуть стати підґрунтям для розроблення методики контролю геометричних параметрів статора ТГ.

Постановка завдання

Мета цих досліджень – розроблення методики контролю геометричних параметрів статора ТГ у разі його заміни геодезичними методами із використанням високоточних електронних тахеометрів та її апробація на конкретному об’єкті.

Експериментальна частина

Згідно із технологічною картою на монтаж статора генератора ТВВ-1000 середньоквадратична похибка центрування внутрішньої частини обмотки становить 0,5 мм. Також у цьому документі наведено геометричну схему генератора, на якій позначено основні осі та складові частини генератора (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Статор генератора ТВВ-1000 (б) та його основні осі (а)

Завдання геодезичного забезпечення заміни статора генератора має два етапи:

- відновлення осей агрегату та фіксування просторового положення статора, що демонтується, – “старого статора”;
- встановлення “нового статора” у те саме положення, яке займав “старий статор”.

На основі попередніх досліджень ми пропонуємо вирішувати такі завдання просторовим методом електронної тахеометрії із використанням високоточного тахеометра. З досвіду виконання високоточних інженерно-геодезичних робіт для вирішення цього завдання ми використали високоточний електронний тахеометр швейцарської фірми Leica-Geosystems. Перед початком робіт здійснено апріорну оцінку точності та низку досліджень із метою розроблення методики підвищення точності вимірювання за умови використання тахеометра Leica TCRP1201R300.

Для апріорної оцінки точності використаємо формули зв’язку вимірюваних величин та просторових координат:

$$X_p = X_0 + S \times \cos_a \times \cos_v$$
$$Y_p = Y_0 + S \times \sin_a \times \cos_v \qquad (1)$$
$$Z_p = Z_0 + S \times \sin_v$$

де S, v, a – виміряна віддаль, вертикальний та горизонтальний кути. Продиференціювавши формули (1), ми обчислили середні квадратичні похибки (СКП) визначення просторового положення точок, які розташовані на різних відстанях (S), за різних значень вертикального кута (v) та азимута (a) (табл. 1). Для обчислень СКП вимірювання віддалі та кутів взято з технічних характеристик приладу, вона дорівнює 1 мм та 1" відповідно.

Таблиця 1

Апріорні середні квадратичні похибки визначення просторового положення точок

S, м	*v*, °	*a*, °	*mx*, мм	*my*, мм	*mz*, мм	*M*, мм
10	0	0	1,0	0,0	0,0	1,0
50	0	0	1,0	0,0	0,2	1,0
100	0	0	1,0	0,0	0,5	1,1
10	30	0	0,9	0,0	0,5	1,0
50	30	30	0,8	0,4	0,5	1,0
100	30	60	0,4	0,8	0,7	1,1

Аналізуючи дані табл. 1, можна зробити висновки, що похибка визначення просторового положення залежатиме від зміни кута, віддалі та положення тахеометра. Також необхідно зазначити, що на загальну похибку *M* впливатимуть інструментальна похибка, похибки зовнішніх умов, геометрії мережі та візування. Усі перелічені похибки у підсумку можуть додатково спотворити результати ще на 1–2 мм. Тому ми виконали дослідження, спрямовані на підвищення точності вимірювань електронними тахеометрами на коротких віддалях та компенсації додаткових похибок.

Здійснено дослідження похибки перефокусування на зміну візирної осі електронного тахеометра у діапазоні довжин від 2 до 100 м. За значеннями колімаційної похибки (*C*) та місця нуля (*MO*) на різних віддалях ми визначили коливання візирної осі у вертикальній та горизонтальній площинах та їх стандартне відхилення (*СТВ*) (див. рис. 2, 3).

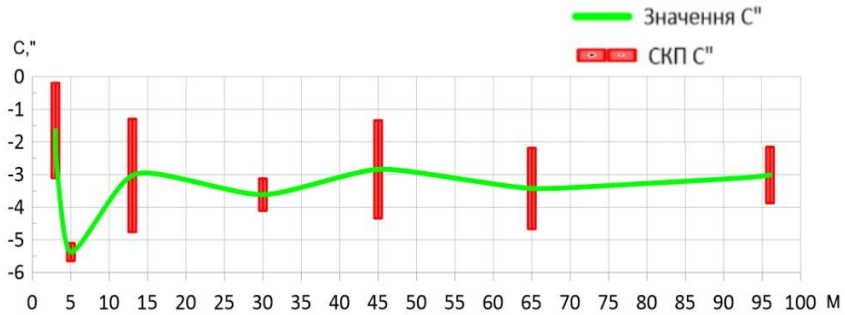


Рис. 2. Коливання візирної осі електронного тахеометра у горизонтальній площині

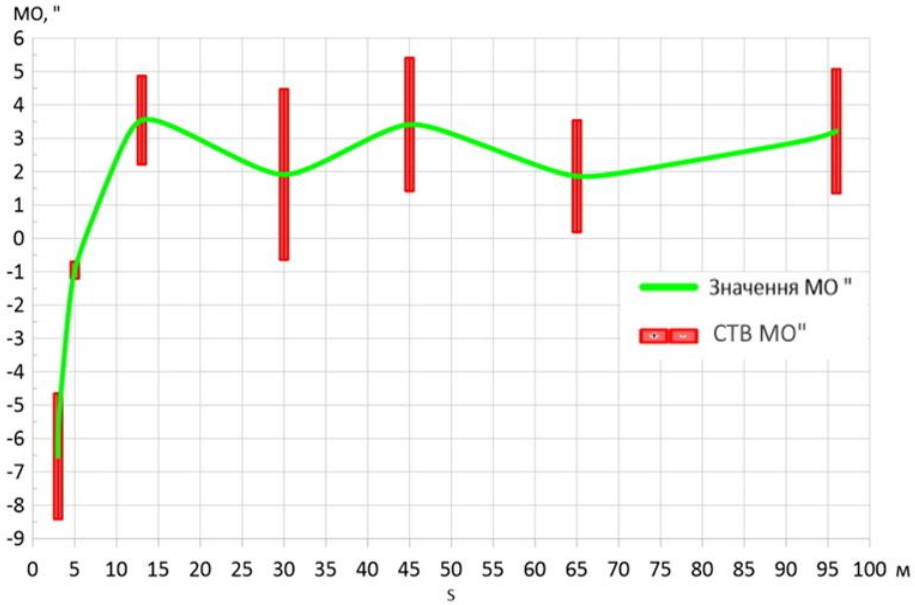


Рис. 3. Коливання візирної осі електронного тахеометра у вертикальній площині

На рис. 2 та 3 спостерігається істотний вплив перефокусування на зміну *C* та *MO* електронного тахеометра на віддалі до 10 м. На віддаль понад 10 м та до нескінченності впливу перефокусування на зміну *C* та *MO* не виявлено. На графіках спостерігаються залишкові похибки візування та зовнішніх умов, які є випадковими величинами.

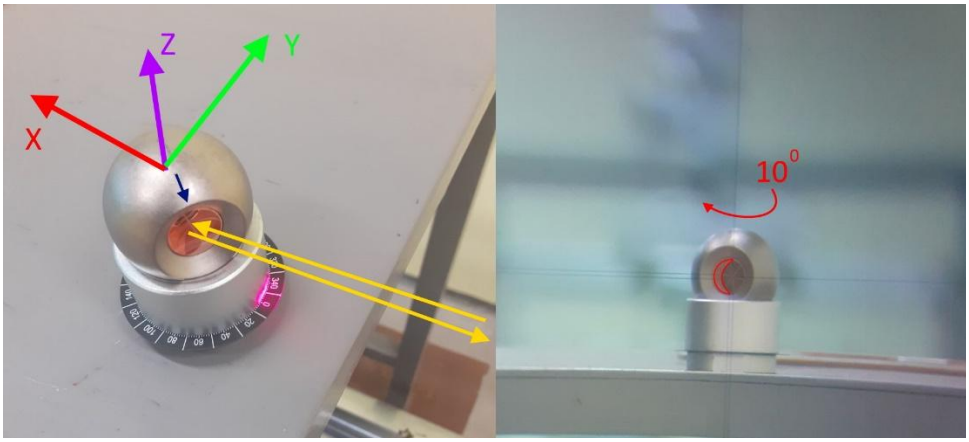
У табл. 2 зведено стандартні відхилення коливань візирної осі, визначені із трьох повних прийомів, а також стандартне відхилення віддалі для діапазону довжин 10–100 м. Вимірювання виконано на світловідбивні марки, які ми розробили [Віват, 2018]. Кут падіння вимірювального лазера на марку дорівнював 90°.

Подальші дослідження полягали у визначенні похибки вимірювання віддалі на коротких довжинах із використанням сферичного відбивача (рис. 4). Використання такого відбивача під час вимірювань повинно виключити похибку фіксації, центрування та горизонтування візирної цілі. Виконано контрольні вимірювання довжин у діапазоні 6–16 м. Як еталон використано лазерний інтерферометр переміщень. Під час вимірювань кут падіння лазера на відбивач дорівнював 90°. У табл. 3 подано вибірку статистичних даних різниць відхилень тахеометр – інтерферометр (мінімальне $_{MIN}$, максимальне $_{MAX}$ значення та стандартне відхилення σ) у прямому та зворотному ходах.

Таблиця 2

Стандартні відхилення C, MO та віддалі, визначені на різних довжинах від 2 до 10 м

СТВ	*C*, "	*MO*, "	*d*, мм
σ_{MIN}	0,3	0,3	0,1
σ_{MAX}	1,7	2,6	0,2
σ_{MEAN}	0,5	0,5	0,1



а *б*

Рис. 4. Пояснення до дослідження похибки вимірювання віддалі на сферичний відбивач

Таблиця 3

Характеристики точності визначення коротких відрізків електронним тахеометром

Різниці	$\delta_{ПР}$, мм	$\delta_{ЗВ}$, мм
MIN	–0,28	–0,23
MAX	0,16	0,22
σ	0,17	0,16

На рис. 5 подано значення різниць для прямого та зворотного ходів для діапазону віддалей від 6 до 16 м. З одержаних результатів можна зробити висновок, що *СТВ* визначення коротких віддалей у діапазоні довжин 6–16 м у разі використання сферичного відбивача становить 0,17 мм. Крім того, ми дослідили вплив неперпендикулярності вимірювального лазера до відбивача. Для цього на підставку відбивача закріпили радіальну шкалу (рис. 4, *а*). Для дослідження відбивач повертали від –40° до +40° із дискретністю 10°. На (рис. 4, *б*) подано поле зору тахеометра на відбивач, повернутий на 10° у горизонтальній площині.

Рис. 5. Різниці віддалей, визначених тахеометром та інтерферометром

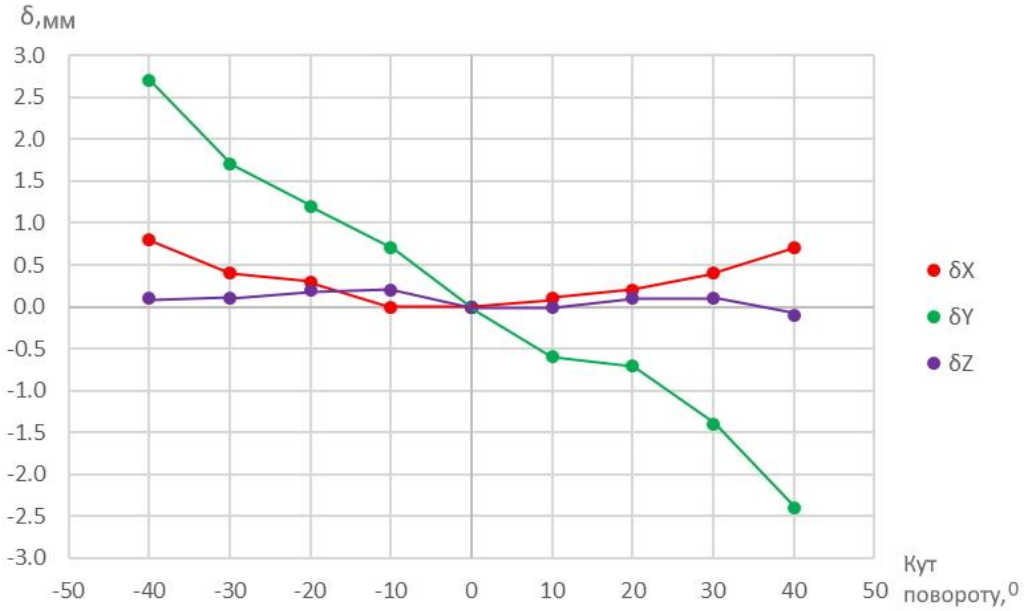
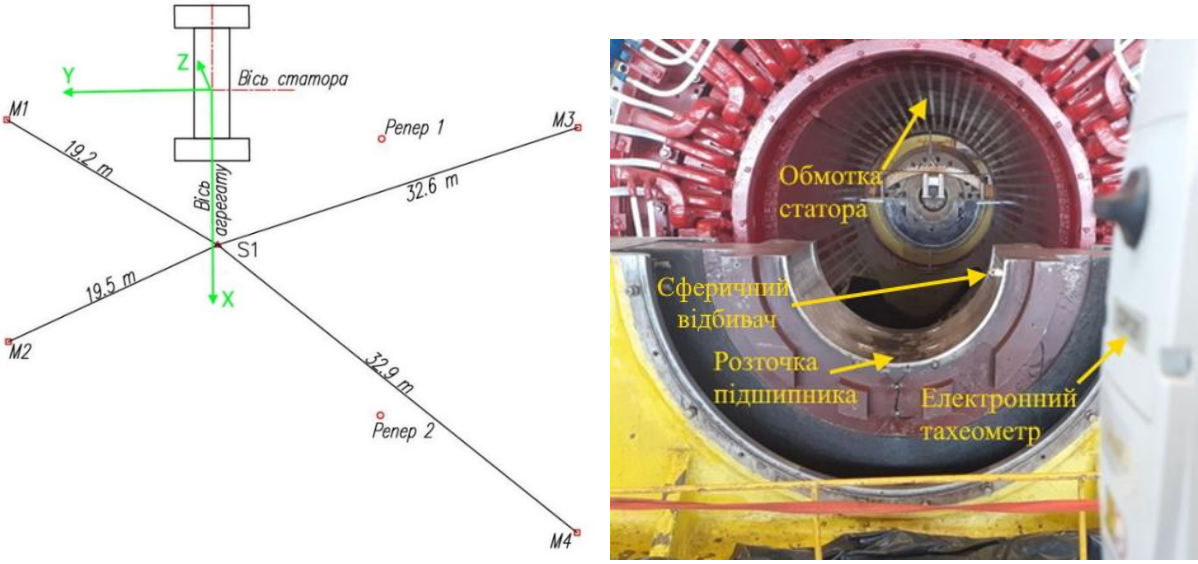


Рис. 6. Вплив неперпендикулярності вимірювального лазера на координати визначуваної точки

Аналізуючи графік на рис. 6, можна зробити висновок, що використання відбивача з трипель-призмою діаметром 12,5 мм потребує забезпечення перпендикулярності до 5°. Така похибка неперпендикулярності не спотворюватиме просторові координати визначуваної точки.

Для мінімізації впливу зміни зовнішніх умов (температури, тиску, вологості), а відтак горизонтальної та вертикальної рефракції, ми виконали запис через окуляр електронного тахеометра потенційних місць закладання вихідної геодезичної основи на спеціальну шкалу [Літинський, 2005]. Також для виключення похибки центрування пропонуємо використати метод вільної станції та визначення координат лінійно-кутовими вимірюваннями. За допомогою методики [Віват, Назарчук, 2019] ми розрахували горизонтальні та вертикальні кути фіксування 3Д-марок для забезпечення перпендикулярності вимірювального лазера. Відповідно до досліджень [Fys, 2021] положення марок основи планували так, щоб станція встановлення приладу була найближче до середини базисів із вихідною геодезичною основою (рис. 7, *а*). Усі три етапи робіт виконано із однієї станції встановлення приладу, щоб не допустити похибки геометрії геодезичної мережі.



а *б*

Рис. 7. Схема геодезичної мережі (а) та прилад на станції S1(б)

Встановивши електронний тахеометр на штативі на пункт S1, ми виконали вимірювання на двох розточках підшипників ротора із боку збудника та турбіни (по п'ять точок на кожний повним прийомом), а також на обмотках статора з боку збудника (по десять точок на кожний повним прийомом) (рис. 7, *б*). У результаті визначено вісь агрегату з похибкою 0,3 мм. Вісь статора визначили відніманням половини проєктного розміру від початку обмотки. Координати двох аналітично розрахованих точок (початку системи координат та напрямку осі X) введено у пам'ять електронного тахеометра. Щоб не допустити двозначності просторових координат агрегату, значення початку умовної системи координат задано різними (X = 1000 м, Y = 500 м, Z = 100 м). Визначення просторових координат головної точки тахеометра (перехрестя вертикальної, горизонтальної та візирної осей) у системі координат агрегату виконано аналітично за допомогою прикладної програми "базова лінія". Потім цю систему координат (рис. 7, *а*) ми зафіксували вимірюванням на закріплені чотири 3Д світловідбивні марки. Вимірювання просторової віддалі, вертикального та горизонтального кутів виконали у три повні прийоми на кожну марку. Перевірку точності закріплення геодезичної основи здійснено методом оберненої просторової засічки трьома повними прийомами. Стандартне відхилення визначення просторового положення головної точки тахеометра було у межах 0,2 мм. Кожен раз під час вимірювань ми встановлювали прилад та визначали координати головної точки тахеометра методом оберненої лінійно-кутової засічки від марок геодезичної основи. Стандартне відхилення визначених координат не перевищувало 0,2 мм. Стандартне відхилення визначених координат точки S1 було критерієм точності на першому та другому етапах робіт. Крім того, для контролю висотного положення ми заклали два репери та виконали нівелювання згідно із програмою першого класу за характерними точками статора (рем-лапами).

Результатом першого етапу робіт було виконавче знімання просторового положення характерних точок статора, який демонтували; результатом другого – відновлення положення нового 300-тонного статора відповідно до осей, визначених на першому етапі.

Наукова новизна і практичне значення

У результаті виконання робіт розроблено методику забезпечення просторового положення статора генератора відносно осі ТГ під час його ремонту (заміни). Здійснено апріорну оцінку точності та низку експериментів (дослідження із

визначення похибки перефокусування, визначення похибки вимірювання віддалі на коротких довжинах з використанням сферичного відбивача, дослідження впливу неперпендикулярності вимірювального лазера до відбивача) з метою розроблення методики підвищення точності вимірювання за умови використання тахеометра Leica TC1201R300. Ця методика апробована на об'єкті під час ремонту статора генератора і забезпечила точність взаємного встановлення окремих його вузлів 0,5 мм.

Висновки

У роботі розроблено та апробовано методику контролю геометричних параметрів статора генератора із його заміною геодезичними методами та використанням електронного тахеометра виробництва швейцарської фірми Leica-Geosystems TCRP1201R300.

Аналізуючи результати досліджень, можна зробити певні висновки:

· методикою передбачено вибір оптимальних умов вимірювань електронним тахеометром, за яких компенсуються похибки вихідних даних, інструментальні, зовнішніх умов, візування, центрування та фіксування;

· дослідження впливу перефокусування на зміну візирної осі показало, що на коротких віддалях до 10 м ця похибка змінює положення візирної осі до 5" (див. рис. 1–2). На віддалях від 10 до 100 м стандартне відхилення зміни колімації та місця нуля відповідає технічним характеристикам приладу і дорівнює 1". Методикою рекомендовано використовувати віддалі від 10 до 100 м;

· дослідження точності вимірювання коротких відрізків у діапазоні 6–16 м показали можливість досягнення стандартного відхилення 0,17 мм;

· використання сферичного відбивача із трипельпризмою діаметром 12,5 мм потребує забезпечення перпендикулярності вимірювального лазера до 5°, що не спотворить просторове визначення положення;

· розроблення спеціальної методики здійснення вимірювань та дослідження дало змогу підвищити точність визначення геометричних параметрів статора до 0,5 мм;

· додаткові вимірювання перевищень контрольних точок лап статора за допомогою геометричного нівелювання підтвердили одержані результати із використанням електронного тахеометра

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Баран П. Інженерна геодезія: монографія. Київ: Віпол, 2012. 618 с.

Бурак К. Технологія розпланувальних робіт і виконавчих знімань з використанням TPS. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011. Вип. 75. С. 53–57. https://science.lpnu.ua/istcgcap/all-volumes-and-issues/volume-75-2011/technology-lay-out-works-and-executive-survey-using

Віват А., Назарчук Н. Дослідження методики застосування скануючого тахеометра Topcon IS 301 для побудови просторових моделей архітектурних форм. *Інженерна геодезія*. 2019. (67). С. 35–45. https://doi.org/10.32347/0130-6014.2019.67.35-45

Зайцев Є., Панчик М. Термометричні методи дослідження стану спресованості осердя статора потужного турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2021. Вип. 59. С. 086–086. https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.086

Иржи Л., Карел Р. Автоматизированная гидростатическая система на объектах атомной электростанции Темелин. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2012. С. 168–175. file:///C:/Users/%D0%93%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0/Downloads/avtomatizirovannaya-gidrostaticheskaya-sistema-na-obektah-atomnoy-elektrostantsii-temelin.pdf

Літинський В., Кіселик О., Літинський С. Врахування нівелірної рефракції з використанням ПЗЗ. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів. 2005. Вип. II. С. 71–75. http://science.lp.edu.ua/sites/default/files/Papers/gka_69_2007_14.pdf

Літинський В., Віват А., Перій С., & Літинський С. Спосіб вимірювання взірцевого базису 2-го розряду для еталонування електронних тахеометрів. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2015. Вип. 81. С. 59–65. https://doi.org/10.23939/istcgcap2015.01.059

Суходоля О., Сидоренко А., Бєгун С., Білуха А. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку гідроенергетики України: аналітична доповідь. НІСД, 2014, 54 с.

Хоменко І., Плахтій О., Нерубацький В., Стасюк І. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації: монографія. Харків: НТУ "ХПІ", 2020, 131 с.

Fys, M., Litynskyi, V., Vivat, A., Litynskyi, S. (2021). Investigation of formulas determination of a point's plane coordinates by the invers linear-angular resection. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, (94), 20–28. https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.94.020

Leica TS30 White Paper [Електронний ресурс]. URL: https://www.gefosleica.cz/ftp/White_papers/Total_stations/Leica_TS30_White_Paper_0904_766425_en.pdf

Lityns'kyy, V., Fys, M., Pokotylo, I., & Lityns'kyy, S. (2014). Calculation of optimal values of measured lenghts for accurate determination of small segments. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography.* Вип. 79. С. 42–47. https://science.lpnu.ua/istcgcap/all-volumes-and-issues/volume-79-2014/calculation-optimal-values-measured-lenghts-accurate

Petrakov, Y., & Shuplietsov, D. (2018). Accuracy control of contour milling on CNC machines. https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.132223

Vivat, A., Tserklevych, A., & Smirnova, O. (2018). A study of devices used for geometric parameter measurement of engineering building construction. *Geodesy, cartography and aerial photography*, (87), 21–29. https://doi.org/10.23939/istcgcap2018.01.021.

Zobrist, T. L., Burge, J. H., & Martin, H. M. (2009, August). Laser tracker surface measurements of the 8.4 m GMT primary mirror segment. In *Optical Manufacturing and Testing VIII*, Vol. 7426, p. 742613). International Society for Optics and Photonics. https://doi.org/10.1117/12.826706

Anatolii VIVAT[1a], Sergii PETROV[1b], Valeria VOLKOVA[2]

[1] Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: anatolii.y.vivat@lpnu.ua, serhii.l.petrov@lpnu.ua; [1a] https://orcid.org/0000-0002-6114-5911;
[1b] https://orcid.org/0000-0002-1045-8125
[2] Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine

DEVELOPMENT METHODS OF LARGE-EQUIPMENT INSTALLATION IN DESIGN POSITION USING ELECTRONIC TOTAL STATIONS

Today in Ukraine there are dozens of turbogenerators (TG) in operation, a significant part of which have been in operation for over 35÷50 years, which exceeds their service life in accordance with regulatory documents. The actual technical condition of the TG is determined by many geometrical parameters, among which the crucial ones are those that characterize it as a mechanical system (axis of the aggregate and the axis of the stator). Today, the control of the position of the axes must be performed with an accuracy of 0.5 mm, and is carried out in three ways (using a string, using an optical autoreflex system (PPS-11), using a test shaft). The purpose of these studies is to develop a method for monitoring the geometric parameters of the TG stator when replacing it with geodetic methods using high-precision electronic total stations and its testing on site. Based on previous research, we propose to solve the following problems by the spatial method of electronic total station using a high-precision total station Leica TCRP1201R300. We performed a priori estimation of accuracy and a number of experiments (research to determine refocusing error, determination of distance measurement error at short lengths using a spherical reflector, study of the effect of non-perpendicularity of the measuring laser to the reflector) to develop methods for improving measurement accuracy using electronic total station. This technique has been tested on site during the repair (replacement) of the generator stator. As a result of the work carried out, the spatial position of the axes of the aggregate and the stator was determined with an accuracy of 0.3 mm, which were fixed in the conditional coordinate system by four marks. The method provides for the selection of optimal conditions for electronic tacheometer measurements, which compensate for errors in the initial data, instrumental, external conditions, sighting, centering and fixing. Also, the method provides for the control of each stage of work on a standard deviation of up to 0.2 mm. The number of measurement methods is determined by achieving the accuracy of each stage of 0.2 mm.

Key words: calibration of large equipment; turbogenerator; spatial method of electronic total station; axis of generator and aggregate; increase of accuracy of measurements by electronic total stations.

Надійшла 03.03.2022 р.