

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Географічний факультет  
Кафедра землевпорядкування та кадастру

**Калинич І.В., Радиш І.П., Ваш Я.І.**

# **ЕЛЕКТРОННІ ГЕОДЕЗИЧНІ ПРИЛАДИ**

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

Ужгород 2021

**УДК 528.5+528.02**

Електронні геодезичні прилади. Конспект лекцій /уклад. Калинич І.В., Радиш І.П., Ваш Я.І.– Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2021р. – 156 с.

**Рецензенти:**

Каблак Н.І., – доктор технічних наук, професор кафедри «Міського будівництва і господарства» ДВНЗ «УжНУ»

Рябій В.В. – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри геодезії НТУ «Дніпровська політехніка»

**Укладачі:**

Калинич І.В.- доцент кафедри землевпорядкування та кадастру, к.т.н.

Радиш І.П.- доцент кафедри землевпорядкування та кадастру, к.т.н.

Ваш Я.І.- старший викладач кафедри землевпорядкування та кадастру

В навчальному посібнику викладено основні положення теорії і практики віддалеметрії оптичного та радіодіапазонів; приведені методи визначення швидкості електромагнітних коливань в оптичному та радіодіапазоні; описані призначення, будова та принцип дії світловіддалемірів, радіовіддалемірів, електронних тахеометрів, супутникових систем позиціонування. Викладено принцип будови, режими роботи та аналіз джерел помилок при виконанні вимірювань електронними тахеометрами та геодезичними GNSS-приймачами.

Посібник призначений для студентів ДВНЗ «УжНУ», які навчаються за спеціальністю 193. «Геодезія та землеустрій».

*Розглянуто на засіданні кафедри землевпорядкування та кадастру  
(протокол № 7 від 23 лютого 2021 року)*

*Рекомендовано до друку методичною комісією географічного  
факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет»  
(протокол № 5 від 9 березня 2021 р.).*

© Калинич І.В., 2021 рік

© Радиш І.П., 2021 рік

© Ваш Я.І., 2021 рік

© УжНУ, 2021 рік

## ЗМІСТ

Лекція 1. Введення в дисципліну. Історичний екскурс в розвиток електронних геодезичних пристроїв.....	4
Лекція 2. Призначення, класифікація, класи точності геодезичних приладів .....	21
Лекція 3. Основні поняття і визначення електромагнітних коливань і хвиль .....	25
Лекція 4. Гармонійні коливання, поляризація та інтерференція. Спектри та сигнали .....	28
Лекція 5. Основні методи вимірювання віддалей. Часовий метод вимірювання.....	31
Лекція 6. Фазовий метод вимірювання віддалей .....	35
Лекція 7. Виключення багатозначності при фазовому методі вимірювання віддалей .....	40
Лекція 8. Частотний метод вимірювання віддалей. Ефект Доплера.....	50
Лекція 9. Перетворення гармонійних коливань. Модуляція, демодуляція. Гетеродинування. Гетеродинна схема вимірювання різниці фаз.....	55
Лекція 10. Функціональні схеми світловіддалемірів.....	60
Лекція 11. Лазери. Принципові схеми лазерів .....	68
Лекція 12. Лазерні візири. Лазерні далекоміри (рулетки) .....	73
Лекція 13. Методи вимірювання кутів.....	79
Лекція 14. Електронні теодоліти .....	91
Лекція 15. Геодезичні додаткові пристрої (гіроскопічне обладнання, датчики і т.п.).....	102
Лекція 16. Цифрові та лазерні нівеліри.....	111
Лекція 17. Електронні тахеометри.....	124
Лекція 18. Лазерні сканери.....	139
Лекція 19. Супутникове геодезичне обладнання. GPS та базові станції.....	145
Література .....	154

# Лекція 1. ВВЕДЕННЯ В ДИСЦИПЛІНУ. ІСТОРИЧНИЙ ЕКСКУРС В РОЗВИТОК ЕЛЕКТРОННИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИСТРОЇВ

## 1. Введення в дисципліну. Предмет і задачі курсу, його зв'язок з іншими дисциплінами

Предмет курсу – це інженерно-технічна прикладна дисципліна, яка вивчає теорію й устрій електронних геодезичних приладів, а також елементи їх конструювання, виготовлення, юстування і дослідження. Геодезичні прилади в більшості застосовуються в геодезії, але мають значне використання і в інших інженерно-технічних дисциплінах таких як:

- землеустрій;
- лісоустрій;
- дорожні вишукування;
- меліорація та інші.

У своїй більшості це оптико-механічні прилади, які здатні працювати в різних кліматичних умовах (від  $-40^{\circ}$  до  $+50^{\circ}$  C), при вібраціях та інших метеорологічних факторах. Особливим фактором в геодезії є рефракція.

Останніми роками поряд з традиційними геодезичними приладами з'явилися спеціальні геодезичні прилади, які мають застосування в машинобудуванні, приладобудуванні, спеціальних будівельних роботах та іншому.

Це такі геодезичні прилади, як лазерні геодезичні прилади, автоколімаційні прилади, GPS-приймачі.

Найважливішою характеристикою кожного геодезичного приладу є точність. Тому задачами курсу є:

1. Навчитися елементам конструювання приладів, технології їх виготовлення.
2. Ознайомитися з різними методиками вимірювання.

3. Навчитися методам визначення поправок, введення їх в результати досліджень.

4. Знати особливості дослідження приладів, юстування окремих параметрів.

## **2.Історичний екскурс в розвиток електронних геодезичних пристроїв**

Із історичних документів відомо, що першими геодезичними приладами користувались ще біля 3 тис. років до н.е. при будівництві зрошувальних каналів у Вавилоні, Єгипті і Китаї. Це були мірні мотузки, мірні рейки, ватерпаси з виском і компаси.

Значний вклад в розвиток техніки землемірної справи і геодезичних вимірювань в стародавні часи внесли представники арабської, грецької і римської науки. Тут досить назвати роботу Герона Олександрійського «Про діоптру» (100 років до н.е.), де він запропонував кутомірний прилад з діоптрами і поворотною лінійкою, астролябію Гіппарха з лімбом діаметром 10-20 см з градусними поділками, яку по праву можна рахувати прообразом теодолітів та римський землемірний хрест (прообраз еккера) для розбивки прямих кутів на місцевості, удосконалений арабами китайський компас для цілей кутових вимірювань. Приблизно до цього часу відносяться виконані Ератосфеном за допомогою гномона (сонячного годинника) перші інструментальні визначення кола Землі.

Арабський вчений Біруні (973-1048рр.) сконструював пристрій для поділу лімбів через 5', що широко використовувався для астрономічних спостережень.

Розвиток науки в Європі в період проголошення матеріалістичного уявлення про розвиток Всесвіту гальмувався церквою та інквізицією.

Великі географічні відкриття дали новий поштовх розвитку науки. Нові пізнання в галузі фізики і механіки вплинули на розвиток і удосконалення геодезичних приладів. Леонардо Да Вінчі (1452-1519рр.) сконструював возик

для вимірювання пройденого шляху, лічильник кроків, а також запропонував для компасу круглий корпус. Француз Фурнель в 1525р. для визначення радіусу Землі застосував мірне колесо, при цьому 17024 оберти колеса відповідали  $1^\circ$  дуги меридіана.

У другій половині XVI ст., а саме в 1552р., на основі астролябії англієць Діггс створив прилад для вимірювання горизонтальних кутів і вперше запропонував термін «теодоліт». Для встановлення на місцевості геодезичних приладів з'явилися штативи. Німецький професор Преторіус винайшов мензулу з лінійками і діоптрами, яка пізніше уже використовувалась в сполученні з кіпрегелем.

В 1609р. італійський вчений Галілео Галілей (1564-1642рр.) створює зорову трубу, що складалась з скляних лінз. Вона отримала назву голландської зорової труби або труби Галілея. В 1611 році Іоган Кеплер (1571-1630рр.) запропонував два варіанти зорової труби з сіткою ниток – з прямим (земна труба) і зворотнім (астрономічна труба) зображенням. Це дало можливість практичного застосування лінзових зорових труб в вимірювальних геодезичних і астрономічних приладах, хоча збільшення труб було невеликим (від 9 до 30 крат).

Одночасно удосконалювалися відлікові улаштування. Запропонований в 1583р. німецьким математиком Клавіусом принцип ноніуса в 1631р. вперше реалізує голландець Петер Вернер (1580-1637рр.) під назвою «верньєр». Пізніше, в середині XVIII ст. англієць Джесс Рамсен (1735-1800рр.) винайшов мікроскоп з гвинтовим мікрометром для точного відліку по шкалах.

Запропонований в 1662р. французом Жевено циліндричний рівень сприяв розвитку нівелірів з рівнями. В 1770р. І. Меєр в Геттінгені вперше застосовує круглий рівень з металевим резервуаром для горизонтування приладу.

Велике значення для удосконалення геодезичних приладів мали розробки нових типів осьових систем. В 1770р. французький астроном Борда,

а в 1830р. гамбурзький механік Репсольд запропонували нові осьові системи для обертання рухомої частини інструмента відносно нерухомої. В 1804р. Георг Рейхенбах (1772-1826рр.) сконструював повторювальний теодоліт. Він же в 1810р. ввів у зорову трубу далекомірні нитки для визначення похилих відстаней по вертикальній рейці. Застосування далекомірних ниток для отримання горизонтальних прокладень привело в 1900р. до реалізації принципу Гаммера-Феннеля в конструкції першого номограмного тахеометра з зоровою трубою італійця Порро (1801-1875рр.).

На початку ХІХ ст. з'явилися зразки оптичних віддалемірів з базисом при інструменті. Віддалеміри працювали на принципі подвійного зображення або в стереоскопічному варіанті. Більш легкі і компактні прилади з'явилися завдяки застосуванню чехами Іозефом і Яном Фрич в 1886р. скляних лімбів.

Значні заслуги в модернізації геодезичних приладів належить швейцарцю Генріху Вільду (1877-1951рр.), головними винаходами якого є:

- 1) труба з внутрішнім фокусуванням;
- 2) контактний рівень;
- 3) мікрометр нівеліра з плоскопаралельною пластинкою;
- 4) оптичний мікрометр;
- 5) осьова система на шарикопідшипниках;
- 6) інварні рейки;
- 7) віддалемір подвійного зображення у вигляді насадки на об'єктив труби.

ХІХ і ХХ ст. ознаменувалися тим, що замість невеликих майстерень, де розроблялись і виготовлялись геодезичні прилади, з'явилися великі фірми і заводи. Найбільш відомі серед них – швейцарські фірми «Акціонерне товариство Керн і К<sup>о</sup>» (1819р.), «Акціонерне товариство Вільд» (1921р.); німецькі фірми «Карл Цейс» (1846р.), «Оптон», «Асканія», заводи: «Отто Френель і К<sup>о</sup>», «Точної механіки Ертеля»; шведська фірма АГА; англійські фірми «Теллуrometer», «Віккерс-лімітед», «Віккерс Інструментс»; японська фірма «Сокіа»; французький завод «Товариство оптики, точних приладів,

електроніки і механіки»; фірма США «Спектрафікс»; угорські оптичні заводи МОМ; чеський завод «Меопта»; «Польські заклади оптичні» та інші.

Парк геодезичних приладів в XVII-XVIII ст. в Росії в основному поповнювався за рахунок їх ввезення із західної Європи.

Перша російська державна оптична майстерня була створена при дворі Петра I спочатку в Москві, а потім у Петербурзі. В майстерні видатні російські оптики І.Є. Беляєв і Д. Колосов виготовляли і ремонтували астролябії, квадранти, нівеліри та інші геодезичні і астрономічні інструменти.

В 1725р. була створена Російська Академія Наук, при якій відкрилась оптична майстерня. В ній майстри І.Є. Беляєв та І.І. Калмиков самостійно виготовляють геодезичні та оптичні інструменти, зорові труби і дзеркальні телескопи.

В 1736р. Академічною майстернею керує один із кращик спеціалістів механічної та інструментальної справи того часу А.К. Нартов (1694-1756рр.). На станках Нартова обробляються механічні деталі геодезичних інструментів, а в майстерні виготовляють астролябії, ватерпаси з трубою (нівеліри), зорові та астрономічні труби, оптичне скло і дзеркала. Астролябія, наприклад, складалась з компаса, розташованого в центрі горизонтального кола, поділеного на  $360^\circ$ , двох пар діоптрій і штатива. Точність візування через діоптри досягала 15-20". В майстерні виконувались замовлення М.В. Ломоносова.

З 1769р. видатний російський механік-самоука І.П. Кулібін (1735-1818рр.) більше тридцяти років керував майстернями Академії Наук, розробляв і удосконалював технологію виготовлення геодезичних приладів.

Значення творчості російських вчених і винахідників XVIII ст. для розвитку оптичних інструментів, в тому числі і геодезичних приладів, важко переоцінити. Проте виготовлення і впровадження геодезичних приладів було обмежено вузькими рамками розвитку виробничих сил того часу. «Хвороба»



плазування перед авторитетом іноземних вчених стала причиною закриття на початку XIX ст. майстерень Академії Наук.

У той час міжнародні обставини Росії вимагали забезпечення армії і морського флоту топографічними картами. Це сприяло створенню в 1797р. спеціальної служби – Депо карт. В 1811р. Депо карт організує механічну майстерню, де в значній кількості виготовляли астролябії, бусолі, зорові труби, мензули, стрічки та інші прилади для геодезичних і топографічних робіт. В 1821р. майстерню реорганізують в механічний заклад Головного штабу. В 1822р. при Головному штабі заснували Корпус військових топографів.

З 1823р. механічний заклад виготовляє удосконалений повторювальний теодоліт з повірочною трубою, що позитивно позначилось на результатах вимірювань. Для робіт геодезиста і астронома академіка В.Я. Струве був виготовлений повторювальний теодоліт з зоровою трубою, що мала фокусну відстань 400 мм і збільшення  $35^{\times}$ . Відлікове улаштування теодоліта – верньєр 4" точності.

В 1868р. механічний заклад виготовляє кіпрегель і мензулу нових зразків. Їх конструкція мала всі ознаки сучасних і майже 100 років не зазнавала суттєвих змін. Кіпрегель мав лінійку, на одному кінці якої знаходився рівень, а на другому поперечний масштаб. На колонці, закріпленій посередині лінійки, розташовувалась зорова труба з сіткою ниток і «круг висот» з поділками через  $1^{\circ}$  і рівнем. Всі основні деталі кіпгеля виготовляли із сплавів міді, що виключало вплив заліза на положення магнітної стрілки бусолі. В конструкцію «мюнхенської» мензули внесли зміни: змінили зв'язок мензульної дошки з штативом і надали їй мікрометричного руху.

За ініціативи військового геодезиста Д.Д. Гедеонова (1854-1908рр.) в 1883р. введені зміни в конструкції нівелірів: покращено зв'язок рівня з зоровою трубою і застосували бокове плоске дзеркало при рівні. Нівеліри подібної конструкції застосовувались на геодезичних роботах до 1940р.

Д.Д. Геденов розробляє і впроваджує конструкцію малого вертикального круга для астрономічних спостережень.

Заснована в 1839р. академіком В.Я. Струве Пулковська обсерваторія з її механічною майстернею стала другим важливим закладом по виготовленню високоточних геодезичних і астрономічних інструментів. Кутомірні прилади з великими діаметрами горизонтальних кутів тут замінюють на менші за габаритами, але з більш точними поділками. Відлікові улаштування – ноніуси, замінюють на мікроскоп – мікромметр, що значно підвищило точність вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів.

З 1845р. механічною майстернею Пулковської обсерваторії завідував Г.К. Брауер (1796-1882рр.) Під його керівництвом розроблено багато оригінальних приладів: 1) універсальні прилади 2" і 10" точності; 2) точні рівні і екзаменатори для визначення їх ціни поділки; 3) нівелір – теодоліт; 4) диференціальні барометри, виготовлені на замовлення Д.І. Менделєєва і з успіхом застосовані геодезистами для нівелювання; 5) астрономічні пасажні прилади і малі вертикальні круги з ламаною зоровою трубою; 6) ділильну машину для лімбів.

Справу великого майстра продовжили його учні В.Ф. Гербер (1842-1909рр.) і Г.А. Фрейберг-Кондратьєв (1854-1943рр.) Перший удосконалює осьові системи, технологію шліфування цапф. За його способом цапфи виготовляли з точністю до 10мкм за 2 дні (замість 2-х тижнів раніше). Його майстерності належать 13 переносних пасажних інструментів для Росії і деяких обсерваторій світу (Кембридж, Швеція, Німеччина), 2 базисних прилади і 3 компаратори, 5-ти футовий віддалемір, багато рівнів різної точності та інше. Другий удосконалює ділильні машини і процес нанесення поділок на лімб, створює новий тип переносного зеніт-телескопа з ламаною трубою, подібних якому не було за кордоном.

Таким чином, майстерні Військово-топографічного відділу Головного штабу і Пулковська механічна майстерня були передовими підприємствами того часу. Їх прилади за якістю не тільки не поступались закордонним, а в

деяких випадках і перевершували зразки відомих фірм. Але промислового розвитку геодезичне приладобудування за часів царської Росії не отримало і парк приладів поповнювався значною мірою за рахунок німецької фірми «Гільдебранд».

Розвиток радянського геодезичного приладобудування розпочався з підписаного в 1919 році Декрету Раднаркому «Про заснування Вищого Геодезичного Управління». В 1923 році на базі майстерень Корпусу військових топографів створюється завод «Геодезія», який швидко поповнює парк приладів серійним випуском теодолітів, нівелірів, мензул, нівелірних рейок. До речі, рейки для точного нівелювання були кращі за рейки німецької фірми «Гільдебранд». Другий завод «Геофізика» з 1927 року випускає теодоліт-тахеометр ТТ-3 з трубою, що має внутрішнє фокусування, а в 30-х роках – оптичні теодоліти ОТ і ОТ-10. Великі заслуги в розробці оптичних систем і технологічних процесів виготовлення оптичних приладів належать Державному оптичному інституту, організованому ще в 1918 році.

Створений в 1928 році Державний інститут геодезії і картографії (тепер ЦНДІГ і К) проектує і досліджує нові зразки геодезичних приладів, випуск яких веде організований в 1934 році завод «Аерогеоприлад». Це – триангуляційні теодоліти ТТ 2" / 6" і ТТ 5" / 10", астрономічний універсал АУ 2" / 10" і високоточний нівелір «Аерогеоприлад». Завод з 1935 року виготовляє ампули рівнів ціною поділки 2-5", які по якості перевершували рівні найбільш відомої європейської фірми «Песлер», що виготовляла їх більше 60 років.

В 30-х і 40-х роках конструкції приладів удосконалюються такими нововведеннями, як зорові труби з внутрішнім фокусуванням, циліндричні осі, контактні рівні, оптичний мікрометр з сполученим відліком, тангенціальні шкали в тахеометрах, нові види настановних пристосувань, нанесення поділок на скляні лімби. В 1947 році серійно виготовлено портативні і зручні теодоліти ОТС, ОТМ і ОТБ з скляними лімбами і оптичними мікрометрами. З'являються нові типи геодезичних приладів:

оптичні теодоліти ТБ-1 і ОТ-02, високоточні нівеліри НПГ і НБ, нівелір з оптичним компенсатором Г.Ю. Стодолкевича, Кіпрегель КА-2, віддалемірна насадка ДНБ В.А. Беліцина та інші.

Характерною рисою геодезичного приладобудування з 50-х років є широке застосування досягнень оптики, механіки, фізики, електроніки, металургії. Використання досягнень науки і техніки створило нові можливості розробки геодезичних приладів з підвищеними експлуатаційними характеристиками, в першу чергу, для лінійних і кутових вимірювань.

Значними досягненнями засобів лінійних вимірювань є розробки серії світловіддалемірів для визначення великих, середніх і малих відстаней. Розроблений і виготовлений в 1936 році в Державному оптичному інституті під керівництвом А.А. Лебедева перший в світі світловіддалемір для вимірювання ліній довжиною до 3,5 км мав похибку 2-3 м. В 1953 році В.П. Васильєв і В.А. Величко розробили світловіддалемір СВВ-1 для вимірювання відстаней до 15 км. В ЦНДІ і К в 1967 році розроблений світловіддалемір «Кварц» з гелій-неоновим лазером, дальність дії якого досягала 30 км з похибкою вимірювання  $(2+2 \cdot 10^{-6}D)$  см, де  $D$  повинно було бути в км.

Особливо швидко знайшли впровадження на виробництві топографічні світловіддалеміри СТ-61, розроблені в «МПГА і К» під керівництвом В.Д. Большакова, і «Кристал» (ЦНДІПГА і К), а також світловіддалеміри серії СМ. Наприклад, світловіддалемір СМ-3 з дальністю 1,6 км мав похибку вимірювання 2-3 см, а в удосконалених 2СМ-2, СМ-5 і 3СМ2 відповідно з дальністю дії 2 км, 0,5 км і 3-5 км інструментальна похибка не перевищувала 1 см. Більшість сучасних світловіддалемірів постачається автоматичною системою обробки інформації з видачею результатів вимірювання на табло.

Слід відзначити успішні розробки топографічних світловіддалемірів закордонними фірмами Оптон Оберкохен, «Карл Цейс, Ієна» (Німеччина), АГА (Швеція), «Вільд Хербруг» (Швейцарія), «Хьюлет Паккард» (США) та

іншими. В діапазоні до 2-3 км більшість приладів мали інструментальну похибку 1-2 см.

Під керівництвом А.А. Геніке (ЦНДІГА і К) в 60-х роках розроблені і знайшли застосування геодезичні радіодалекоміри ВРД і серійні РДГ і РДГВ, а також «Промінь» для великих відстаней і «Хвиля» для топографічних цілей. Перші три прилади працюють в 10-сантиметровому діапазоні несучих радіохвиль, а наступні два – в 3-сантиметровому.

Синтез топографічного світловіддалеміра з теодолітом (візуальним або кодовим) привів до створення електронних тахеометрів (напівавтоматичних або автоматичних), що по суті є універсальним геодезичним приладом. Разом з вбудованими мікропроцесорами такі прилади забезпечують автоматизацію кутових вимірювань.

Автоматизація окремих операцій в геодезичних приладах реалізована, наприклад, при стабілізації візирної осі нівелірів і оптичного індекса вертикального круга за допомогою різних конструкцій компенсаторів. У розвиток цього важливого напрямку значний вклад внесли В.І. Чуриловський, Г.Ю. Стодолкевич, Н.А. Гусєв, І.М. Монченко, А.В. Мещеряков, М.С. Черемісін, Ф.Г. Кочетов. В 60-70-х роках А.І. Захаровим були розроблені і впроваджені в серійне виробництво найбільш сучасні конструкції приладів з компенсаторами при вертикальному крузі типів Т5К, Т15К, 2Т5К. Серійне виробництво точних теодолітів типів Т2, Т5 і їх модифікацій (автоколімаційні та інші) здійснювалися Уральським оптико-механічним заводом в м. Єкатеринбург.

В Україні розробка і виготовлення геодезичних приладів в післявоєнний період велись на двох великих заводах – Київський завод «Арсенал» і Харківський завод маркшейдерських інструментів.

В 1948 році на «Арсеналі» розроблена більш жорстка, легка і стійка металева підставка для мензули. Нова підставка широко застосовувалась на топографічних роботах замість мензули МШВ виробництва заводу «Геофізика». З 1958 році в серійне виробництво запуснені мензульний

комплект з кіпрегелем-автоматом КА-2, розроблений під керівництвом І.М. Монченка, який і до цього часу застосовується при топографічних зйомках крупних масштабів.

В 60-х роках на «Арсеналі» розроблений теодоліт ТБ-1, який по своєму призначенню, конструкції і точності стоїть в одному ряду з точними теодолітами типу Т2. Модифікацією теодоліту ТБ-1 став теодоліт ТБ-3 з автоколімаційним окуляром Монченко з переривистими штрихами, який широко застосовувався в точному машинобудуванні. Автоколімаційні окуляри конструкції Монченко мають і сьогодні впровадження в автоколімаційних теодолітах типу Т2А.

На початку 70-х років завод «Арсенал» освоїв випуск технічних нівелірів. Нівеліри НЛС-1 і НЛ-3 застосовувалися для інженерних вишукувань і проектних робіт, де перевищення визначались як горизонтальним, так і похилим променем візування. Середня квадратична похибка на 1 км ходу не перевищувала відповідно  $\pm 30$  мм і  $\pm 50$  мм; в діапазоні температур від  $-40^{\circ}$  до  $+50^{\circ}$  С. Для нівелювання при висотному забезпеченні топографічних зйомок, при інженерно-геодезичних вишукуваннях і будівництві випускались технічні нівеліри НТ, НТК, НТСК, Н-10, Н-10КЛ. Останній з компенсатором і горизонтальним лімбом для вимірювання кутів з похибкою відліку  $0,1^{\circ}$  забезпечує середню квадратичну похибку вимірювання перевищення на 1 км подвійного ходу 10мм.

В кінці 70-х років значна номенклатура геодезичних приладів розробки заводу «Арсенал» передається для виготовлення на Ізюмський приладобудівний завод у Харківській області. «Арсенал» продовжує спеціалізуватись на розробці і виготовленні спеціальних геодезичних приладів. На заводі розробляються оптичні квадранти КО-6,0, КО-10, КО-2, гоніометри Г5, Г2 і Г1, а під керівництвом канд. техн. наук О.І. Ванюрихіна створюється лазерний гоніометр з середньою квадратичною похибкою вимірювань кутів  $0,1''$ . Особливо значний вклад в створення фотоелектричних автоколіматорів, автоматичних систем горизонтування і

гіротеодолітів різних по конструкції і точності вніс доктор технічних наук С.П. Пазняков. Наприклад, десятки типів фотоелектричних автоколіматорів забезпечували автоматичне вимірювання кутів (в діапазоні  $\pm 2,5^\circ$ ) з середньою квадратичною похибкою в межах 1", а комплекти гірокомпасів і гіротеодолітів для автономного визначення астрономічних азимутів орієнтирних або заданих напрямків на місцевості мали середню квадратичну похибку від 30" (гірокомпас 1Г17) до 3" (гіротеодоліт ГТЗ).

В 90-х роках завод удосконалив і успішно освоїв випуск геодезичних приладів нового покоління:

1) високоточного нівеліра Н-05К з оптичним мікрометром для визначення перевищень з середньою квадратичною похибкою 0,2 мм на 50 м, що застосовується при вимірюваннях деформацій споруд, фундаментів, зміщень земної кори в місцях гірничих розробок, при монтажі кораблів, літаків, турбін;

2) точного нівеліра Н-3КЛ для визначення перевищень з похибкою 2 мм на 100 м при нівелюванні в полігонометрії і інших інженерно-геодезичних роботах;

3) приладу високоточного вертикального проектування (ПВВП) з компенсатором і відносною похибкою передачі координат 1:200000;

4) лазерних приладів: нівелірів, приладів вертикального проектування та інших на базі власної розробки малогабаритного лазера.

На Харківському заводі маркшейдерських інструментів розроблений ряд теодолітів для роботи в маркшейдерії: малий оптичний теодоліт ТОМ; теодоліт гірничий ТГ-5; оптичний маркшейдерський теодоліт ОМТ-30; теодоліт Т-20 та інші. Там же під керівництвом А.В. Мещерякова виготовляють конструкції нівелірів НСМ-2, НСМ-2А, НЗК-1 з компенсаторами, що мали широке впровадження в підземних і наземних роботах. Для зйомки підземних камер виготовляють далекомір подвійного зображення з змінним базисом при інструменті (Д1М) і деякі конструкції кутомірів – тахеометрів гірничих.

На початку 90-х років в м. Вінниці створено завод «Аерогеоприлад», який виготовляв велику номенклатуру комплектуючого приладдя і спеціальних геодезичних приладів.

В історії розвитку методів і засобів геодезичних вимірювань за останні півстоліття відбулися дві революції. Перша з них здійснилась в сорокових – п'ятдесятих роках ХХ сторіччя і полягала вона в тому, що в геодезію прийшла електроніка. До цього всі геодезичні прилади були виключно оптико-механічними пристроями. Електроніка почала свій тріумфальний хід в геодезії з лінійних вимірювань, потім проникла в кутові вимірювання, а згодом і в найконсервативнішу область – нівелювання. Інтенсивна розробка світловіддалемірів, радіовіддалемірів, електронних тахеометрів, радіогеодезичних систем для визначення координат рухомих об'єктів означала настання нової ери в геодезії. Величезну роль зіграла поява в 1960 році лазерів, бурхливий розвиток мікроелектроніки і обчислювальної техніки, що забезпечила створення сучасних комп'ютерних технологій. До вище перелічених електронних засобів геодезичних вимірювань додалися лазерні інтерферометри і балістичні (лазерні) гравіметри.

Друга революція, початок якої відноситься до сімдесятих років – це створення глобальних супутникових навігаційно-геодезичних систем. Хоча розробка і використання супутникових систем типу «Транзит» (США) і «Цикада» (СРСР) для мети навігації почалися ще в 60-х роках, переворот в геодезії вчинили саме глобальні системи GPS (США) і ГЛОНАСС (Росія). Ці системи називаються глобальними тому, що вони забезпечують отримання координат в будь-якій точці Землі в будь-який довільний момент часу. В них реалізовані принципово нові методи вимірювань і ці системи дозволяють здійснити абсолютно нові підходи до виконання геодезичних робіт.

Роль глобальних супутникових систем важко переоцінити. Визначення координат точок на земній поверхні за допомогою цих систем отримало широке застосування в найрізноманітніших областях людської діяльності. Координати потрібні не тільки геодезістам – вони потрібні і морякам, і



авіаторам, і військовим, і учасникам різних експедицій, і багатьом іншим споживачам. Раніше, щоб отримати координати, доводилося виконувати трудомісткі геодезичні роботи на місцевості, виміряючи геометричні величини – відстані, кути і перевищення між точками на земній поверхні. Для передачі координат треба було будувати мережі різних конфігурацій, закріплені на місцевості спеціальними центрами, що закладаються у верхньому шарі земної поверхні. Над центрами зводились геодезичні знаки (піраміди, сигнали) – дерев'яні або металеві «наглядні вежі», часто значної висоти (до 30 м), для забезпечення взаємної видимості між пунктами. Поява супутникових систем зробила, в принципі, непотрібними всі ці роботи. Маючи супутниковий приймач, ми маємо можливість зразу ж визначити координати місця його установки з точністю порядку десяти метрів, що достатньо для багатьох навігаційних задач, а за наявності двох приймачів отримати «геодезичну точність» визначення їх взаємного положення до сантиметрів і навіть міліметрів. Це дозволяє створювати опорні мережі, виконувати знімальні і прив'язочні роботи набагато ефективніше в порівнянні з традиційними методами.

Історично появи глобальних супутникових систем передувала розробка методу радіоінтерметрії з наддовгою базою (РНДБ) і створення лазерних супутникових віддалемірів для вимірювання відстаней до штучних супутників Землі (ШСЗ). Саме цими засобами побудована глобальна геодезична мережа, яка постійно вдосконалюється, і є опорною для мереж, створених всіма іншими методами.

В результаті вказаних революцій і еволюцій вимірювальної техніки, що відбувалася між ними, сучасна геодезія є областю, в якій вимірювання виконуються переважно електронними засобами. Геодезія в нас час є головним джерелом вихідних даних для геоінформаційних систем.

Геоінформаційні системи містять дані про результати виконаних робіт на тій або іншій ділянці топографо-геодезичних і кадастрових робіт. Вони дозволяють оперативно вносити зміни в банки даних: результати нових

вимірювань, відомості про виявлені грубі помилки у виконаних раніше роботах, результати порівняння, дані про знову створені і втрачені опорні пункти і т.д. В деяких регіонах з використанням супутникових систем удосконалюється геодезична мережа, створена колись наземними методами. Отримання більш точних координат вимагає внесення виправлень в топографічні і кадастрові матеріали. Ця процедура легко виконується за наявності геоінформаційної системи на конкретний регіон або об'єкт.

Найефективнішим засобом створення геоінформаційної системи, яка об'єднує результати геодезичних, топографічних і кадастрових робіт, є поєднання супутникових методів і електронної тахеометрії, причому на частку супутникових вимірювань припадає від 50 до 90 % об'єму робіт.

І супутникова апаратура, і електронні тахеометри за останні 10-15 років удосконалювалися надзвичайно швидкими темпами. За ці роки електронний тахеометр пройшов шлях від приладу, що є оптичним теодолітом з світловідалемірною насадкою і окремим обчислювальним пристроєм, до «роботизованої станції», що має можливість дистанційного керування. Вона оснащена сервоприводами, мікрокомп'ютером з багатофункціональним пакетом програм. Є можливість автоматичного наведення на ціль і її відстежування, передбачена передача інформації по телеметричному каналі зв'язку. Розроблена модульна геодезична система, яка об'єднує супутниковий приймач, електронний тахеометр і потужний польовий комп'ютер.

Існує ще один напрям розвитку електронних приладів, що має велике значення для прикладної геодезії. Це створення просторово-координатних систем (ПКС) для прецизійного (з помилкою 10-50мм) визначення координат контрольних точок складних поверхонь (таких, як крило літака або елементи антени радіотелескопу). Такі системи називають 3D-системами – від англійського 3-Dimension (тривимірні, трьохкоординатні). Існуючі системи використовують або електронні стежачі теодоліти, що виконують пряму кутову засічку, або стежачі лазерні інтерферометри, що здійснюють

лінійну засічку. Їх робота керується комп'ютером і виконується в просторі об'ємом до декількох кубічних метрів.

Що стосується вимірювань за допомогою глобальних супутникових систем, то ця технологія безперервно і стрімко вдосконалюється. До числа останніх досягнень входять такі, як розробка двохсистемних приймачів GPS/ГЛОНАСС, можливість отримання диференціальних поправок з геостаціонарного супутника зв'язку і радіомаяків, можливість роботи в режимі кінематики в реальному часі, яка не вимагає постобробки, поєднання супутникового приймача з електронним тахеометром. Поява супутникових систем зробила непотрібним застосування радіовіддалемірів, які широко використовувалися раніше, поставивши крапку в їх виробництві, і сильно вплинула на роль світловіддалемірів. Корисно відзначити, що до недавнього часу була загальноприйнятою класифікація світловіддалемірів, відповідно до якої вони ділилися на три групи:

- світловіддалеміри групи Г (геодезичні), що мають дальність дії до 15-50 км і точність порядку  $[(5-10) \text{ мм} + (1-2) \text{ мм/км}]$ , призначені для вимірювання сторін в державних геодезичних мережах і базисів тріангуляцій вищих класів.
- світловіддалеміри групи Т (топографічні), з дальністю дії до декількох кілометрів і точністю  $5 \text{ мм} + 5 \text{ мм/км}$  (типове значення), призначені для вимірювання відстаней в геодезичних мережах згущування і для топографічних зйомок.
- світловіддалеміри групи П (вживані в прикладній геодезії), з дальністю дії до 0,3-3 км (в окремих випадках і більше), що характеризуються підвищеною і найвищою точністю вимірювань (помилка близько 2 мм і менше). Їх часто називають також прецизійними віддалемірами.

Приведену класифікацію в даний час можна вважати застарілою. З появою глобальних супутникових систем геодезичні світловіддалеміри практично витіснені з сцени, а топографічні світловіддалеміри, як правило,

використовуються не як окремі прилади, а у складі електронних тахеометрів. Фактично зберегли своє значення лише прецизійні віддалеміри з їх високою точністю, які використовуються для вирішення спеціальних задач прикладної геодезії (при монтажі і експлуатації прискорювачів заряджених частинок, антен радіотелескопів і інших унікальних споруд).

Не слід, проте, вважати, що супутникові системи є якоюсь «панацеєю», яка може бути використана у всіх випадках. В реальних умовах вимірювань часто зустрічаються ситуації, коли робота супутникових систем утруднена, а іноді і просто неможлива через несприятливі умови спостережень, коли місцеві перешкоди екранують пряме проходження радіосигналів від супутників або створюють численні відзеркалення радіохвиль від будівель, металевих конструкцій і т.п., порушуючи стійку роботу супутникових приймачів (особливо характерно це при роботі в міських умовах). Неможливо використовувати супутникові системи при маркшейдерських роботах. Все це враховується при плануванні супутникових вимірювань, і у ряді випадків доводиться використовувати і «традиційні методи» світловіддалеметрії та електронної тахеометрії.

## Лекція 2. ПРИЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ, КЛАСИ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИЛАДІВ

### 1. Призначення і класифікація геодезичних приладів

Геодезичні прилади призначені для вирішення наукових і практичних завдань, таких як:

1. Побудова опорної геодезичної мережі, інженерних вишукувань, роботи в будівництві і експлуатації інженерних споруд.
2. Інженерні роботи при:
  - а) землеустрої;
  - б) лісоустрої;
  - в) геологічних роботах;
  - г) гідромеліоративних роботах та інше.
3. Контроль геометричних параметрів на машинобудівних заводах, де геодезичний прилад використовується як зразковий засіб атестації.

Всі геодезичні прилади можна умовно розбити на 6 груп (класів):

1. Теодоліти – прилади для вимірювання горизонтальних та вертикальних кутів (зенітних відстаней);
2. Нівеліри – прилади, що застосовуються для вимірювання перевищень (висот);
3. Віддалеміри (далекоміри) – прилади для вимірювання довжин ліній;
4. Комбіновані прилади:
  - а) тахеометри – прилади для вимірювання горизонтального і вертикального кутів, довжин ліній і перевищень;
  - б) кіпрегелі – прилади для вимірювання вертикальних кутів, відстаней, перевищень і графічної побудови напрямків при топографічній зйомці.
5. Комплектуючі приладдя: штативи, рейки, масштабні лінійки, центрири, рівні, орієнтир-бусолі, рулетки, транспортири та інші.

6. Спеціальні геодезичні прилади: візуальні і фотоелектричні автоколіматори, гіртеодоліти (прокомпаси), лазерні прилади, прилади для вимірювання створів, для горизонтування.

Розглянемо особливості кожної з цих груп електронних геодезичних приладів.

Так, теодоліти виготовляються трьох типів:

1. Високоточні (Т1);
2. Точні (Т2,Т5);
3. Технічні (Т15, Т30).

Всі ці теодоліти в своєму позначенні можуть мати букви А, К, П і М.

Вони означають: А – автоколімаційний теодоліт; К – теодоліт з компенсатором при вертикальному крузі; П – пряме зображення зорової труби; М – маркшейдерські теодоліти.

Типовим позначенням теодоліта може бути: 3Т2КП. Кожна з цих позначень означає наступне: цифра 3 – третя модифікація приладу; Т – теодоліт; 2 – середньоквадратична похибка (СКП) вимірювання горизонтального круга одним прийомом (2"); К – з компенсатором; П – пряме зображення зорової труби.

Державним стандартом для теодолітів є ДСТУ 8955:2019. Згідно ДСТУ допускається виготовлення більш точних теодолітів. Тому при вимірюваннях в проектах можна застосовувати більш точний теодоліт Т05, СКП якого 0,5".

Нівеліри відповідно до ДСТУ 8926:2019 за точністю поділяються на:

1. Високоточні, в яких похибка вимірювання перевищення менша 1мм.
2. Точні – похибка вимірювання перевищення не більша 3мм.
3. Технічні – похибка вимірювання перевищення більша 3мм.

Відповідно до точності випускаються наступні нівеліри: високоточний нівелір Н05 для нівелювання I та II класу; точний нівелір Н3 для нівелювання III та IV класу, а також його різновиди НЗК (з компенсатором), НЗКЛ (з компенсатором і лімбом для вимірювання горизонтального кута); технічний

нівелір Н10 та інші. Відповідно до класифікації нівелірів виготовляються рейки трьох типів: РН05, РН3, РН10.

Прилади для вимірювання довжин ліній можуть бути механічними та оптико – електронними. Механічні – це сталеві рулетки, мірні стрічки. Оптико-електронні – оптичні далекоміри, світловідалеміри.

Оптичні далекоміри виготовляються, як правило, у вигляді насадок зорової труби або у вигляді самостійних приладів. Насадки вимірюють паралактичний кут і постійну базу. База може бути як при приладі, так і при рейці. Самостійні оптичні далекоміри характеризуються СКП в сантиметрах на кожні 100 м відстані. Наприклад, Д2 – далекомір, який дає СКП 2 см на 100 м.

Світловідалеміри підрозділяються на 4 групи в залежності від застосування:

СГ – світловідалеміри геодезичні, що застосовуються в основних геодезичних мережах і мають діапазон вимірювання від 0,1 до 20 км.

СП – світловідалеміри, що застосовуються в прикладній геодезії. Діапазон – від 0,001 до 5 км.

СТ – світловідалеміри, що застосовуються в топографічних зйомках. Діапазон – від 0,001 до 15 км.

СТД – світловідалеміри топографічні по дифузійному відбиттю. Діапазон- до 10 км.

Тахеометри поділяються не за точністю вимірювання, а за конструктивними ознаками, що даються в їх шифрі. І все таки, тахеометри Т-2, ТЕ є точні, а ТаН і ТВ – технічні.

ТЕ – тахеометр електрооптичний для вимірювання відстаней до 2 км з середньоквадратичною похибкою (СКП) – 2 см, для вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів відповідно 3-5".

ТД – тахеометр подвійного зображення, який вимірює кути: горизонтальні - 8"; вертикальні - 12".

ТаН – тахеометр номограмний, в полі зору якого ми бачимо криві, по яких визначають відстань і перевищення.

ТВ – тахеометр внутрішньобазовий.

Кіпрегелі виготовлялись згідно ГОСТу 10813-64 одного типу: КН – кіпрегель номограмний. Виготовляють один тип мензули.

## **2. Спеціальні прилади.**

В залежності від геодезичних робіт застосовують спеціальні геодезичні прилади:

Автоколіматори АК-02Н; АК-05; АК-1. Число в позначці означає СКП зняття відліку, У – уніфікований (дає виміри як по горизонталі, так і по вертикалі). Є велика група фотоелектронних автоколіматорів, які в діапазоні декількох градусів мають точність 0,01". Фотоелектронні автоколіматори повністю автоматизовані.

До спеціальних приладів також відносяться квадранти: КО-2 (квадрант оптичний; 2 – означає, що похибка дорівнює 2" визначення нахилу), КО-10, КО-60М (М – магнітний).

Великим класом спеціальних приладів є лазерні геодезичні прилади: лазерні теодоліти, лазерні візири, лазерні нівеліри і лазерні прилади вертикального проектування.

До спеціальних приладів відносяться гоніометри (в тому числі і лазерні) – прилади для атестації оптичних деталей приладів.

Останньою розробкою приладів для визначення місцеположення є GPS-приймачі, особливості застосування яких ми розглянемо нижче.



### Лекція 3. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ І ХВИЛЬ

#### 1. Основні поняття і визначення

1. Серед безлічі коливальних процесів особливе місце займають періодичні коливання, для яких виконується рівність

$$S(t) = S(t + NT), \quad (1)$$

де  $S(t)$  – значення величини сигналу, що коливається,  $t$  – час,  $N$  – будь-яке ціле число,  $T$  – деякий якнайменший кінцевий проміжок часу, через який повторюються значення всіх фізичних величин, що характеризують коливальний рух. Цей проміжок часу називається *періодом* коливання. Зворотна періоду величина  $f$

$$f = 1/T \quad (2)$$

виражає число коливань в одиницю часу і називається частотою. Частота вимірюється в герцах. 1 герц (Гц) – це одне коливання в секунду. Вживаються також наступні одиниці частоти:

- Кілогерц (кГц) –  $10^3$  Гц;
- Мегагерц (МГц) –  $10^6$  Гц;
- Гігагерц (ГГц) –  $10^9$  Гц;
- Терагерц (ТГц) –  $10^{12}$  Гц.

2. Найпростішим, але практично найважливішим випадком періодичних коливань є гармонійні (синусоїдальні і косинусоїдальні) коливання, які можна описати наступними рівняннями

$$S(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

або

$$S(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (4)$$

Косинусоїда – це та ж синусоїда, тільки зсунута на чверть періоду. Величина  $A$  називається амплітудою коливання,  $\omega=2\pi f$  – кутовою або круговою частотою,  $\varphi_0$  – початковою фазою. Ці три параметри повністю характеризують гармонійне коливання. Аргумент синуса і косинуса в (3) або (4), тобто величину  $\varphi=(\omega t+\varphi_0)$ , називають поточною фазою, миттєвою фазою або просто фазою коливання. Таким чином, фаза і початкова фаза – це різні речі. Початкова фаза – це фаза коливання у момент часу  $t=0$ .

Записавши рівняння (3) у вигляді  $S(t) = A \sin \varphi$ , можна дати йому наочну геометричну інтерпретацію, представивши коливальний процес у вигляді вектора, що обертається (рис. 1).

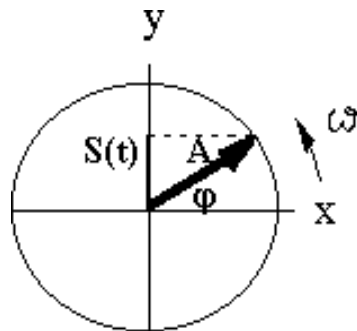


Рис. 1. Представлення гармонійного коливання вектором, що обертається

Довжиною (модулем) вектора є амплітуда  $A$ , кут між вектором і віссю  $x$  – фаза  $\varphi$ , а кутова швидкість обертання (проти годинникової стрілки) – кругова частота  $\omega$ . Фаза – це кутова величина, вона вимірюється в градусах або радіанах.

При обертанні вектора величиною  $S(t)$ , що викликає коливання, є проекція вектора на вісь  $y$ . Її значення (величина сигналу) змінюється в інтервалі від  $+A$  до  $-A$ . Можна наочно переконатися, що це коливання синусоїдальне. Проекція кінця вектора на вісь  $y$  дає точку, що безперервно рухається «туди і назад» по осі  $y$ . Уявімо собі, що до цієї точки прикріплений який-небудь пишучий пристрій (скажімо, олівець або перо з чорнилом), а

перед ним протягується паперова стрічка з постійною швидкістю. Тоді на стрічці викреслюватиметься синусоїда – розгортка коливання в часі.

3. При суперпозиції (складанні) двох гармонійних коливань однакової частоти результуюче коливання також є гармонійним і виконується з тією ж частотою. Його амплітуда і початкова фаза залежать від співвідношення амплітуд і початкових фаз коливань, що складаються.

При суперпозиції двох гармонійних коливань з різними частотами результуюче коливання вже не буде гармонійним. Якщо частоти близькі, то результуючий коливальний процес називається биттям. При цьому амплітуда і фаза результуючого коливання періодично міняються в часі з частотою, що дорівнює різниці частот початкових коливань, які називаються частотою биття.

Так, якщо одночасно схвилювати дві струни, одна з них видає звук з частотою 440 Гц, а інша, трохи меншої довжини, з частотою 444 Гц, причому амплітуда цих звукових коливань, тобто їх гучність, буде однаковою, то ми почуємо звук з середньою частотою 442 Гц, але його гучність періодично змінюватиметься, стаючи то більше, то менше гучності початкових звуків, і ця зміна проходитиме з частотою 4 Гц.

## Лекція 4. ГАРМОНІЙНІ КОЛИВАННЯ, ПОЛЯРИЗАЦІЯ ТА ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ. СПЕКТРИ ТА СИГНАЛИ

1. Будь-яке негармонійне (складне) але періодичне коливання з періодом  $T$  можна представити у вигляді суми простих гармонійних коливань з частотами, кратними частоті  $f = 1/T$  складного коливання (ряд Фур'є). Сукупність складових гармонійних коливань називають спектром складного коливання, а самі складові – гармоніками. Гармоніки з частотами відповідно  $f, 2f, 3f$  і т.д. називаються відповідно першою (основною), другою, третьою і т.д. гармоніками. Різні гармоніки мають різну амплітуду і фазу. Чим вище номер гармоніки, тим, звичайно, менше її амплітуда.

Таким чином, будь-яке періодичне коливання має дискретний спектр, що складається з гармонік. Якщо ж коливання неперіодичне, то воно представляється не рядом, а інтегралом Фур'є і має суцільний (безперервний) спектр, що складається з нескінченного числа синусоїд з безперервною послідовністю частот.

2. Коливання, що розповсюджуються в просторі або в якому-небудь середовищі, називаються хвилями. Вони характеризуються довжиною хвилі  $\lambda$ , пов'язаної з частотою коливань  $f$  співвідношенням

$$\lambda = v/f, \tag{5}$$

де  $v$  – швидкість розповсюдження коливань.

3. Окремим випадком коливальних процесів є гармонійні коливання – напруженість електричного і магнітного полів, які створюють змінне електромагнітне поле. Розповсюджене в просторі електромагнітне поле називають електромагнітними хвилями. Електромагнітні хвилі є поперечними: вектори напруженості електричного  $E$  і магнітного  $H$  полів взаємно перпендикулярні і лежать в площині, перпендикулярній вектору швидкості розповсюдження хвилі.

Електромагнітні хвилі поділяють по довжинах хвиль на ряд діапазонів, сукупність яких утворює спектр електромагнітних хвиль. Більшу частину цього спектру займають радіохвилі, довжина яких може складати від 0,1 мм до більше 100 км. Невеликою, але дуже важливою ділянкою спектру є оптичний діапазон хвиль. Він ділиться на три області. Центральна з них – видима область спектру (видиме світло), що займає приблизно від 0,4 мкм (фіолетове світло) до 0,75 мкм (червоне світло). Зліва від неї (у бік зменшення довжин хвиль) знаходиться ультрафіолетова (УФ) область, а справа (у бік збільшення довжин хвиль) – інфрачервона (ІЧ) область. Ультрафіолетова і інфрачервона області оптичного діапазону спектру є невидимими для ока.

4. Електромагнітні хвилі володіють властивістю, що носить назву поляризації. Якщо коливання вектора  $\mathbf{E}$  (тобто напруженості електричного поля) в площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження хвилі, відбуваються в різних, змінюваних випадковим чином напрямках в цій площині, хвиля називається лінійно поляризованою. Перетворити неполяризовану хвилю в лінійно поляризовану можна за допомогою спеціальних пристроїв – поляризаторів, які пропускають коливання тільки одного напрямку.

5. Рівняння лінійно поляризованої монохроматичної (тобто породженої коливанням строго однієї частоти) хвилі, що розповсюджується упродовж осі  $x$  із швидкістю  $v$ , має вигляд

$$S(t,x) = A \cos [\omega(t-x/v)+\varphi_0] = A \cos (\omega t-kx+\varphi_0), \quad (6)$$

де  $k = \omega/v = 2\pi/\lambda$  – параметр, що називається хвильовим числом.

6. Хвилі однакової частоти, що зберігають різницю фаз постійної, називаються когерентними. При складанні двох когерентних монохроматичних хвиль, лінійно поляризованих **в одній площині**, амплітуда сумарної хвилі залежатиме від різниці фаз хвиль, що складаються. Така

взаємодія хвиль називається інтерференцією. При цьому результуюча хвиля лінійно поляризована в тій же площині, що і хвилі, які складаються.

7. При складанні двох когерентних монохроматичних хвиль, лінійно поляризованих у взаємно перпендикулярних площинах, інтерференції не відбувається. В загальному випадку (тобто при різних амплітудах хвиль і довільному зсуві фаз між ними) проекція кінця електричного вектора на площину, перпендикулярну напрямку розповсюдження, описує еліпс. Така хвиля називається еліптично поляризованою. Якщо амплітуди хвиль, що складаються, рівні, то вид еліпса залежить тільки від різниці фаз  $\phi$  цих хвиль. Це ілюструється в таблиці 1.

З таблиці видно, що при різниці фаз  $90^\circ$  і  $270^\circ$  еліпс перетворюється на круг і хвиля називається поляризованою по колу або циркулярно поляризованою. При різниці фаз  $0^\circ$  або  $180^\circ$  еліпс вироджується в пряму лінію і хвиля буде лінійно поляризованою. Таким чином, лінійна і кругова поляризація є окремими випадками еліптичної поляризації.

Еліптична поляризація Табл. 1

$\phi^\circ$	0	45	90	135	180	225	270	335	360
поляризація									

## Лекція 5. ОСНОВНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВІДДАЛЕЙ. ЧАСОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ

Визначення віддалей за допомогою електромагнітних хвиль є можливе тому, що ці хвилі розповсюджуються із задалегідь визначеною швидкістю. Якщо виміряти проміжок часу, за який електромагнітні хвилі пройшли шлях  $d$ , то можна визначити його довжину за відомою з фізики формулою  $d = v \cdot \tau$ . Тут  $\tau$  – час проходження хвилями шляху  $d$ , а  $v$  – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль.

Швидкість електромагнітних хвиль велика і становить біля 300000 км/с. Тому проміжки часу проходження хвилями ліній, які зустрічаються в геодезичних роботах, є дуже малими. Так, лінію довжиною 6 км електромагнітні хвилі проходять за  $2 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 20 \text{ мкс}$ . Для визначення цього проміжку часу потрібно зафіксувати моменти проходження хвилями початку та кінця шляху, тобто віддалені між собою точки. Це важливо здійснити при такому проміжку часу та потрібній точності його визначення (порядку  $1 \cdot 10^{-10} \text{ с} = 0,1 \text{ нс}$ ).

Набагато простіше визначити такий малий проміжок часу, коли його початок і кінець фіксується практично в одній точці. Це є можливе, коли електромагнітні коливання проходять лінію 2 рази: з одного кінця лінії до другого, а потім повертаються назад. Тому на одному кінці ліній хвилі повинні відбиватись. Тоді довжина лінії  $S$ , яку ми вимірюємо, дорівнює половині шляху електромагнітних хвиль. Якщо хвилі проходять весь шлях за час  $\tau$ , то довжина лінії  $S$  визначається за формулою

$$S = \frac{d}{2} = \frac{v \cdot \tau}{2} \quad (7)$$

Тепер неважко уявити, з яких основних вузлів складаються електронні віддалеміри. Очевидно, що на одному кінці, позначимо його як **A**, вимірюваної лінії в них є передавач електромагнітних хвиль, їх приймач та вимірювальний пристрій, а на другому кінці **B** – відбивач (рис. 2). Ці вузли у віддалемірі є основними.

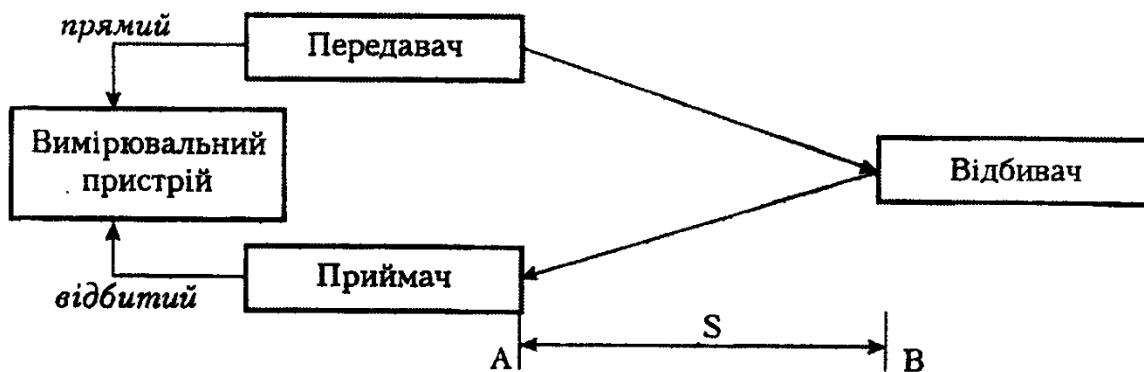


Рис. 2. Основні вузли електронного віддалеміра

Замість проміжку часу  $\tau$  можна виміряти зміну відомої функції часу, яка відбулася за час дворазового проходження хвилями вимірюваної лінії. Це приводить до змін в конструкції та функціонуванні віддалеміра. У зв'язку з цим класифікацію методів вимірювання ліній за допомогою електромагнітних хвиль проводять за тією фізичною величиною, зміну якої визначає вимірювальний пристрій. Тому і розрізняють три основні методи вимірювання віддалей: часовий, фазовий і частотний.

**Часовий метод** найбільш наочний. При цьому методі передавач випромінює імпульси електромагнітних коливань. Тому його нерідко називають імпульсним. Невелику частину кожного імпульса, випромінюваного передавачем в напрямку відбивача, подають на вимірювальний пристрій. Цю частину називаємо прямими, або опорними імпульсами. Основна частина імпульсів проходить два рази вимірювану лінію: від передавача до відбивача і від відбивача до приймача, який їх приймає і передає на вимірювальний пристрій.



Вимірювальний пристрій визначає час  $\tau$  запізнення приходу на нього відбитих імпульсів відносно прямих. Визначивши час  $\tau$ , за формулою (7) обчислюють довжину вимірюваної лінії. Ця формула є *основною формулою часового методу*. Отже, для отримання лінії потрібно виміряти час  $\tau$  та знати швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль в повітрі під час проведення вимірювань.

Нерідко визначення часу  $\tau$  виконують за допомогою електронно-променевої трубки, на лінійній або круговій розгортці якої отримують помітки під впливом прямих і відбитих імпульсів. Період розгортки  $T_{роз}$  є завжди більшим від часу, який потрібний хвилям на проходження подвійної вимірюваної лінії максимальної довжини, тобто  $T_{роз} > \tau_{max}$ . За віддалю між цими помітками визначають час запізнення відбитих імпульсів відносно прямих.

Похибка  $m_\tau$  у визначенні часу  $\tau$  приводить до похибки  $M_\tau$  довжини лінії, обчисленої згідно (7). З цієї формули випливає, що похибка

$$M_\tau = \frac{v \cdot m_\tau}{2} \quad (8)$$

Як бачимо, похибка  $M_\tau$  не залежить від довжини лінії, вона є прямопропорційною до помилки визначення часу  $\tau$ .

В польових умовах час  $\tau$  визначають з точністю  $1 \cdot 10^{-8} \text{с} = 10 \text{нс}$ . Згідно (8) ця похибка визначення часу дасть похибку в довжині лінії 1,5 м. Таке значення похибки матиме місце на довгих і коротких лініях, що обмежує застосування імпульсних віддалемірів в геодезії. Вказана точність може задовільнити геодезистів тільки при вимірюванні ліній не коротших 100 км. Лінії такої довжини вимірюють радіогеодезичні та супутникові системи, тому в деяких з них використовують цей метод.

До переваг часового методу треба віднести велику потужність в випромінюваному імпульсі при порівняно низькій потужності живлення

віддалеміра. Тому при однаковій потужності живлення радіус дії імпульсного віддалеміра є завжди більшим від віддалеміра з безперервним випромінюванням. Значна потужність імпульсу дозволяє при випромінюванні порівняно коротких ліній працювати без відбивача, тобто використовувати імпульс, відбитий тим об'єктом, до якого визначають віддаль. Так працюють радіовисотоміри, приймач яких приймає імпульси, відбиті від поверхні землі. Тепер знаходять застосування лазерні імпульсні віддалеміри, які дозволяють вимірювати з невисокою точністю значні відстані до будь-якого об'єкта.

Імпульсні віддалеміри знайшли застосування при визначеннях відстаней до Місяця та штучних супутників Землі (ШСЗ). В них джерелом короткочасних імпульсів електромагнітних коливань є рубінові лазери, а проміжки часу  $\tau$  визначають стаціонарними високоточними методами з точністю порядку  $1 \cdot 10^{-9} \text{с} = 1 \text{ нс}$ , що відповідає віддалі 15 см. Для вимірювання віддалей до Місяця на останньому був встановлений кутниковий відбивач. Передавач, приймач і вимірювальний блок з високоточним кварцовим годинником встановлюють в обсерваторіях.

## Лекція 6. ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВІДДАЛЕЙ

*Фазовий метод* вимірювання вимагає того, щоб передавач віддалеміра безперервно випромінював вздовж лінії вимірювання гармонічні коливання. Нагадаємо, що гармонічні коливання – це група періодичних коливань, які описуються рівняннями

$$x = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_0), \text{ або } x = A \cdot \cos(2\pi ft + \varphi_0),$$

де  $A$  – амплітуда гармонічного коливання, а аргумент синуса або косинуса – його поточна фаза, яка є лінійною функцією часу і визначає стан гармонічно змінюваної величини в момент часу  $t$ . Фаза вимірюється в кутових величинах. Величини  $\varphi_0$  і  $\varphi_0'$  називають початковими фазами. Їх значення обумовлене вибором початку відліку часу. Фаза коливань є пропорційною до частоти коливань.

Частота  $f$  – це кількість циклів коливань, які здійснюються за одну секунду. Одиницею частоти є герц ( $1\text{Гц} = 1/\text{с}$ ). Частота коливань є оберненою пропорційною до періоду коливання:  $T = 1/f$ .

Період – це час, за який здійснюється один повний цикл коливання. Відрізок, на який розповсюджується хвиля за час рівний одному періодові, називають довжиною хвилі коливання  $\lambda = v \cdot T = v/f$ .

Коливання, які випромінює передавач, проходять лінію вимірювання, відбиваються, другий раз проходять цю лінію і приймаються приймачем. Коливання з приймача та частина коливань, що випромінює передавач, тобто прямі та відбиті коливання, ідуть на вимірювальний пристрій, роль якого в фазовому методі вимірює фазометр. Він вимірює різницю фаз коливань, які потрапляють на нього.

Знайдемо залежність між вимірюваною різницею фаз та довжиною лінії  $S$ . Для цього запишемо рівняння фаз коливань, які йдуть на фазометр в момент часу  $t$ . Фаза прямих коливань, які випромінює передавач,

$$\varphi_n = 2\pi ft + \varphi_0,$$

де  $f$  – частота випромінюваних коливань, або вимірювальна частота, а  $\varphi_0$  – їх початкова фаза. В цей же момент часу на фазометр ідуть коливання з приймача. Вони випромінювались передавачем раніше на проміжок часу  $\tau = 2 \cdot S/v$ . Тому їх фаза

$$\varphi_B = 2\pi f(t - \tau) + \varphi_0.$$

Різницю фаз прямих і відбитих коливань  $\Delta\varphi$  можна представити як

$$\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_B = 2\pi f\tau \quad (9)$$

Як бачимо, різниця фаз  $\Delta\varphi$  пропорційна до часу  $\tau$  та вимірюваної частоти  $f$ . Визначивши з (9) час  $\tau$  і підставивши його значення в формулу (7), отримаємо значення довжини вимірюваної лінії  $S$ :

$$S = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{v}{2f} \quad (10)$$

Отриманий вираз (10) називають основною формулою фазового методу.

Із (10) бачимо, що для визначення довжини лінії фазовим методом необхідно виміряти різницю фаз та знати частоту і швидкість розповсюдження коливань в повітрі.

Виміряна різниця фаз містить похибку  $m_{\Delta\varphi}$ . В зв'язку з цим ми згідно (10) обчислимо похибку вимірювання довжини лінії  $M_{\Delta\varphi}$ , яку можна визначити за формулою

$$M_{\Delta\varphi} = \frac{m_{\Delta\varphi}}{2\pi} \cdot \frac{v}{2f}.$$

Вплив похибки вимірювання різниці фаз на точність визначення  $S$  згідно (10) не залежить від довжини лінії, а тільки від частоти, або від половини довжини хвилі вимірюваної частоти. Для зменшення впливу похибки вимірювання різниці фаз на точність визначення довжини лінії потрібно збільшувати частоту.

Фазометри, які використовують в віддалемірах, дозволяють одержати довжини ліній з достатньою для геодезистів точністю при вимірювальних

частотах не менших від 10 МГц, тому такі вимірювальні частоти використовують в фазових віддалемірах.

Коливання з частотою порядку 10 МГц розповсюджується в атмосфері непрямолинійно. Тому у віддалемірах вимірювальні частоти переносяться вздовж вимірювальних ліній на надвисокочастотних несучих коливаннях, траєкторією яких в атмосфері можна вважати прямолинійною. У великій групі віддалемірів несучими коливаннями є коливання оптичного діапазону, частота яких є більшою від 1000 ГГц. Ці прилади називають світловіддалемірами. Є група віддалемірів, в яких використовують ультракороткохвильові несучі коливання, частота яких є від 3 до 30 ГГц. Їх прийнято називати радіовіддалемірами. Вимірювальні коливання модулюють частоту, амплітуду, або інший параметр несучих коливань. Модуляцією називають закономірну зміну будь-якого параметра коливань (її визначення та характеристики ми розглянемо нижче). Частота коливань, які модулюють, повинна бути в багато разів меншою від частоти несучих коливань.

Формулу (10) можна записати у виді

$$S = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (11)$$

де  $\lambda/2$  – півдовжина хвилі коливання вимірювальної частоти. При такій формі запису видно, що півдовжина хвилі вимірювальної частоти є своєрідною одиницею міри довжини лінії, бо саме з нею порівнюють довжину вимірюваної лінії.

Коефіцієнт  $\Delta\phi/2\pi$  показує, скільки разів півдовжина хвилі вклалася у вимірюваній лінії, або в скільки разів довжина лінії вимірювання є більшою від  $\lambda/2$ . При  $f=10$  МГц півдовжина хвилі дорівнює 15 м. Лінії, які вимірюють віддалеміром, є, як правило, більшими від 15 м. Вони можуть містити в собі десятки, сотні і навіть тисячі 15-ти метрових відрізків. Отже різниця фаз теж містить в собі десятки, сотні, а навіть і тисячі цілих періодів. Тому різницю фаз можна записати у виді

$$\Delta\phi = (N+\delta) \cdot 2\pi, \quad (12)$$

де  $N$  – ціле число,  $\delta$  - дробова частина періоду, яку називають фазовим доміром. Підставивши значення різниці фаз  $\Delta\phi$  з (12) в (11), отримуємо

$$S = (N+\delta) \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{\lambda}{2} + l, \quad (13)$$

де  $l = \delta \cdot \lambda/2$ . Цю величину називають лінійним доміром. Це є залишок, отриманий після того, як в лінії помістити ціле число  $N$  півдовжин хвиль вимірювальної частоти. Очевидно, що завжди  $l < \lambda/2$  коливань тієї частоти, на якій вимірюється фазовий домір.

Фазометри віддалемірів дозволяють вимірювати різницю фаз тільки в межах одного періоду, тобто вони вимірюють тільки фазовий домір. Ціле число  $N$  фазометри не визначають. При різниці фаз, наприклад,  $25^\circ$ ,  $385^\circ$ ,  $3625^\circ$  покази фазометра є однаковими і рівними  $25^\circ$ . Коли змінити довжину лінії на півдовжину хвилі, то різниця фаз зміниться на один період, а показ фазометра залишиться без змін. Це є причиною того, що, провівши вимірювання різниці фаз на одній частоті, ми маємо багатозначність, тобто багато значень довжини вимірюваної лінії, які відрізняються між собою на півдовжини хвилі вимірювальної частоти. Це великий недолік фазового методу. Для виключення багатозначності потрібно виконати вимірювання на двох, або більше вимірювальних частотах.

Якщо довжина вимірюваної лінії є меншою від  $\lambda/2$ , то фазовий віддалемір виміряє її однозначно. Тому  $l_{одн} = \lambda/2$  називають однозначно визначуваною віддаллю на даній вимірювальній частоті.

Незважаючи на цей недолік, фазовий метод знайшов дуже широке застосування. Він використовується практично у всіх світло- і радіовіддалемірах, а також в радіогеодезичних і супутникових системах.

Фазометри мають шкалу, з якої під час вимірювань знімають відліки. Вони є фазовими домірами в поділках шкали. Щоб отримати фазовий домір в частинах періоду, що необхідно для обчислень довжин ліній за формулою (13), потрібно зчитаний з фазометра відлік  $a$  поділити на ціну всієї шкали фазометра  $A_{шк}$ . Наприклад, якщо відлік є в градусах, то фазовий домір в

періодах дорівнює відліку, поділеному на 360, коли ж відлік є в градах, то його слід ділити на 400. В загальному  $\delta = a/A_{\text{шк}}$ .

Існує різновидність фазового методу, в якій вимірювальними коливаннями є самі електромагнітні коливання оптичного діапазону. Тому їх не модулюють. Цей метод вимірювань названо інтерференційним.

## Лекція 7. ВИКЛЮЧЕННЯ БАГАТОЗНАЧНОСТІ ПРИ ФАЗОВОМУ МЕТОДІ ВИМІРЮВАННЯ ВІДДАЛЕЙ

При фазовому методі вимірювання ліній виникає багатозначність, яка викликана двома причинами. Перша з них пов'язана з тим, що фазометри дозволяють вимірювати різницю фаз тільки в межах одного періоду. Другою причиною є те, що для досягнення потрібної точності вимірювання ліній використовують вимірювальні частоти, при яких різниця фаз містить в собі певну кількість цілих періодів, які фазометром визначити не можна.

Для визначення кількості цілих періодів  $N$ , тобто виключення багатозначності, необхідно проводити вимірювання різниці фаз на декількох частотах. При цьому змінювати частоту можна плавно або дискретно. Цим двом способам змінювання частоти відповідають два способи виключення багатозначності: одноступеневий і багатоступеневий.

**Одноступеневий спосіб** застосовують, коли вимірювальна частота у віддалемірах змінюється плавно в заданому діапазоні. В цьому діапазоні вибирають не менше двох частот  $f_i$  і  $f_k$ , на яких вимірюють фазові доміри.

При виведенні формули виключення багатозначності цим способом припустимо, що  $f_i < f_k$ . Виходячи з формули (13) можемо записати два рівняння довжини лінії:

$$S = (N_i + \delta_i) \cdot \frac{v}{2 \cdot f_i} \quad \text{та} \quad S = (N_k + \delta_k) \cdot \frac{v}{2 \cdot f_k}, \quad (14)$$

де  $\delta_i$  і  $\delta_k$  – фазові доміри, визначені фазометром відповідно на частоті  $f_i$  і  $f_k$ , а  $N_i$  і  $N_k$  – кількість цілих періодів, що міститься в різницях фаз відповідно  $\Delta\varphi_i$  та  $\Delta\varphi_k$  на цих частотах. В записаних рівняннях є три невідомі величини, а саме  $S$ ,  $N_i$  і  $N_k$ .

Нагадаємо, що різниця фаз визначається за формулою  $\Delta\varphi = 2\pi f t$  і, очевидно, знаходиться в лінійній залежності від частоти. При плавному збільшенні частоти плавно збільшується різниця фаз, а також покази



фазометра. Якщо частоту збільшити плавно на стільки, щоб різниця фаз збільшилась на один період, тобто кількість цілих періодів збільшити на 1, то покази фазометра пройдуть всі можливі значення і повернуться до початкового значення, тобто пройде один цикл зміни показів фазометра. Порахувавши кількість циклів зміни показів фазометра при переході від частоти  $f_i$  до частоти  $f_k$ , будемо знати, на скільки відрізняється число  $N_k$  від числа  $N_i$ , тобто будемо знати величину їх різниці

$$n_{ki} = N_k - N_i. \quad (15)$$

Підставимо в друге рівняння системи (14) значення  $N_k$ , одержане із (15), і прирівняємо праві частини рівнянь. З цієї рівності отримаємо значення  $N_i$ :

$$N_i = \frac{n_{ki} f_i}{f_k - f_i} + \frac{\delta_k f_i - \delta_i f_k}{f_k - f_i}. \quad (16)$$

Таким чином згідно (16) ми отримали загальну формулу виключення багатозначності одноступеневим способом.

Для виключення багатозначності в формулу (16) підставляємо виміряні значення фазових домірів та частот. Ці величини містять в собі похибки вимірювання. Тому із обчислень маємо не ціле число, а змішане. Точне значення числа  $N_i$  матимемо, коли результат обчислень закруглимо до найближчого цілого. Відхилення від цілого обчисленого значення числа  $N_i$  дозволяє зробити висновок про точність проведених вимірювань. При якісних вимірюваннях вони не перевищують величину 0,1 - 0,2.

Щоб похибки вимірювання фазових домірів та частот якнайменше спотворювали результат обчислень, різниця частот  $f_k - f_i$ , тобто знаменник в (16), має бути якомога більшою. Тому рекомендують проводити фазові вимірювання на частотах, які є близькими до меж діапазону зміни частоти у віддалемірі.

Величина  $(f_k - f_i) / n_{ki} = \delta f$  є змінною вимірювальною частотою, яка приводить до зміни фаз рівно на один період. Покажемо, що ця величина є функцією довжини вимірюваної лінії. Припустимо, що на частоті  $f_i$  різниця фаз дорівнює  $\Delta\varphi_1$ . Коли друга частота  $f_2 = f_1 + \delta f$ , то різниця фаз на цій частоті  $\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_1 + 2\pi$ . Згідно (9)

$$\Delta\varphi_1 = 2\pi \cdot f_1 \cdot \tau \text{ і } \Delta\varphi_2 = 2\pi \cdot f_2 \cdot \tau$$

Віднімемо від першого рівняння друге і отримаємо

$$\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 2\pi \cdot (f_2 - f_1) \cdot \tau.$$

Підставивши в останнє рівняння значення  $\tau = 2 \cdot S/v$  і  $f_2 - f_1 = \delta f$ , отримаємо

$$\Delta f = \frac{v}{2S}. \quad (17)$$

Звідси випливає, що півдовжина хвилі частот  $\delta f$  дорівнює довжині вимірюваної лінії.

Одноступеневий спосіб виключення багатозначності використовують у всіх віддалемірах з компенсаційною коміркою Керра. В них фіксують фазові доміри, що дорівнюють нулю, тобто  $\delta_i = \delta_k = 0$ . Тому формула (16) виключення багатозначності спрощується і приймає вигляд:

$$N_i = \frac{n_{ki} f_i}{f_k - f_i} = \frac{f_i}{\delta f}. \quad (18)$$

Зазначимо, що при одноступеневому способі виключення багатозначності в комплекті віддалеміра потрібно мати прилад для вимірювання частоти. Недоліком цього способу є також те, що нижня межа довжин ліній, які можна вимірювати віддалеміром, залежить від діапазону зміни частоти, яка визначається як

$$S_{min} = \frac{v}{2Df}, \quad (19)$$

де  $S_{min}$  – найкоротша лінія, яку може виміряти віддалемір з діапазоном зміни частоти  $Df$ .

**Багатоступеневий спосіб** виключення багатозначності вимагає, щоб у віддалемірах було декілька постійних вимірювальних частот. Їх значення повинні бути вказані в паспорті віддалеміра. На кожній з частот проводять вимірювання фазових домірів. Маючи значення частот та фазових домірів, можемо скласти для кожної частоти рівняння довжини лінії у вигляді (14). Таким чином отримуємо систему рівнянь, кількість яких дорівнює кількості частот, що є у віддалемірі. В кожному з цих рівнянь невідомим є кількість цілих періодів  $N_i$ . А крім цього невідома сама довжина лінії  $S$ . Отже кількість невідомих величин є на 1 більша від кількості рівнянь в системі. Для розв'язання цієї системи рівнянь потрібно мати додаткову вихідну величину, якою є наближене значення довжини лінії  $S_{\text{набл}}$ .

При виключенні багатозначності найчастіше ставлять собі за мету визначити кількість цілих періодів для однієї, найбільш стабільної з вимірювальних частот, яку називають основною. На ній найточніше визначають фазові доміри (найбільшою кількістю вимірювань).

Кількість цілих періодів, що міститься в різниці фаз на основній частоті визначають не відразу за однією формулою, а прирівнюють її до багаточлена, в якому поступово визначають невідомі коефіцієнти. Звідси і пішла назва цього способу виключення багатозначності. Кількість членів в багаточлені дорівнює кількості частот, які є у віддалемірі. Коли у віддалемірі є чотири частоти, багаточлен має вигляд

$$N_1 = \frac{f_1}{f_4} \cdot a + \frac{f_1}{f_3} \cdot b + \frac{f_1}{f_2} \cdot c + d, \quad (20)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$  - невідомі коефіцієнти, які мають бути цілими додатніми числами. При цьому їх значення знаходяться в межах

$$0 \leq d \leq \frac{f_1}{f_2} - 1, 0 \leq c \leq \frac{f_2}{f_3} - 1, 0 \leq b \leq \frac{f_3}{f_4} - 1, 0 \leq a .$$

Для того, щоб багаточлен був простим, вимірювальні частоти вибирають так, щоб всі відношення частот в (20) та значення меж коефіцієнтів  $b$ ,  $c$  і  $d$  були цілими числами. Тому другу вимірювальну частоту вибирають в ціле число разів меншою від основної, тобто першої, третю частоту – в ціле число разів меншою від другої частоти, а також від першої і т.д.

Для прикладу наведемо значення частот, які зустрічаються в сучасних віддалемірах:  $f_1 = 15\ 000$  кГц,  $f_2 = f_1/10 = 1\ 500$  кГц,  $f_3 = f_2/10 = f_1/100 = 150$  кГц,  $f_4 = f_3/10 = f_2/100 = f_1/1000 = 15$  кГц. При цих значеннях частот багаточлен приймає такий вигляд

$$N_1 = 1000 \cdot a + 100 \cdot b + 10 \cdot c + d \quad (21)$$

В цьому випадку число  $N_1$  практично подане в десятковій системі, кожний невідомий коефіцієнт може приймати значення від 0 до 9 і є цифрою у відповідному розряді цього числа. Так, при  $N_1 = 1453$ , коефіцієнти відповідно мають значення  $a = 1$ ,  $b = 4$ ,  $c = 5$ ,  $d = 3$ .

Кількість періодів в різницях фаз на частотах  $f_2$ ,  $f_3$  і  $f_4$  можна виразити через коефіцієнти багаточлена (20). Число  $N_i$  є цілою кількістю укладень в довжині лінії півдовжини хвилі вимірювальної частоти  $f_i$ . Якщо частота  $f_i$  є в  $k$  разів меншою від першої частоти, то півдовжина хвилі цієї частоти є в  $k$  разів більшою. Тому ціла кількість укладень півдовжини хвиль цієї частоти є в  $k$  разів меншою від  $N_1$  і  $N_i$  дорівнює цілій частині від результату ділення  $N_1$  на  $k$ . Отже для отримання  $N_2$  потрібно  $N_1$  поділити на  $f_1/f_2 = k$ , для отримання  $N_3$  потрібно  $N_2$  поділити на  $f_2/f_3$ , а для одержання  $N_4$  потрібно  $N_3$  поділити на  $f_3/f_4$  і в кожному випадку відкинути дробову частину. Таким чином

$$N_2 = \frac{f_2}{f_4} \cdot a + \frac{f_2}{f_3} \cdot b + c, \quad N_3 = \frac{f_3}{f_4} \cdot a + b, \quad N_4 = a. \quad (22)$$

Для наведених в прикладі частот

$$N_2 = 100 \cdot a + 10 \cdot b + c, N_3 = 10 \cdot a + b, N_4 = a. \quad (23)$$

Тепер перейдемо до визначення невідомих коефіцієнтів багаточлена. Для отримання значення коефіцієнта  $d$  використаємо результати вимірювань на першій і другій частотах. В рівняння віддалі (14) підставимо замість  $N_1$  багаточлен (20), а замість  $N_2$  перший із багаточленів (22)

$$S = \left( \frac{f_1}{f_4} \cdot a + \frac{f_1}{f_3} \cdot b + \frac{f_1}{f_2} \cdot c + d + \delta_1 \right) \cdot \frac{v}{2f_1}$$
$$S = \left( \frac{f_2}{f_4} \cdot a + \frac{f_2}{f_3} \cdot b + c + \delta_2 \right) \cdot \frac{v}{2f_2}. \quad (24)$$

Прирівняємо праві частини цих рівнянь, отриману рівність помножимо на  $2/v$  і відкриємо дужки. Після скорочення, отримаємо

$$\frac{1}{f_1} \cdot d + \frac{1}{f_1} \cdot \delta_1 = \frac{1}{f_2} \cdot \delta_2.$$

В цьому рівнянні є тільки одна невідома величина – коефіцієнт  $d$ . Визначимо його

$$d = \frac{f_1}{f_2} \cdot \delta_2 - \delta_1. \quad (25)$$

Записавши рівняння віддалі для частот  $f_2$  і  $f_3$  і повторивши такі ж дії, як вище, отримаємо

$$c = \frac{f_2}{f_3} \cdot \delta_3 - \delta_1. \quad (26)$$

Таким же шляхом отримаємо

$$b = \frac{f_3}{f_4} \cdot \delta_4 - \delta_3. \quad (27)$$

Для визначення коефіцієнта  $a$  використаємо рівняння віддалі для частоти  $f_4$ , яке прирівнюємо до наближеного значення довжини лінії.

$$S = (a + \delta_4) \cdot \frac{v}{2f_4} \cong S_{\text{табл}}$$

Звідси

$$a = \frac{S_{\text{табл}}}{\frac{v}{2f_4}} - \delta_4. \quad (28)$$

Для частот, які наведені в прикладі, формули для визначення коефіцієнтів мають вигляд

$$d = 10 \cdot \delta_2 - \delta_1, c = 10 \cdot \delta_3 - \delta_2, b = 10 \cdot \delta_4 - \delta_3, a = \frac{S_{\text{табл}}}{10_{(\text{км})}} - \delta_4. \quad (29)$$

Із обчислень отримуємо значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$ , які є змішаними числами. Для отримання точних значень цих коефіцієнтів потрібно одержані із обчислень значення заокруглити до найближчого цілого. Щоб коефіцієнт  $a$  визначався надійно, похибка наближеного значення довжини лінії не повинна бути більшою від одної восьмої частини довжини хвилі найменшої частоти. Для наведених в прикладі значень частот наближене значення довжини лінії потрібно знати з точністю до 2.5км. Визначення наближеного значення довжини лінії з такою точністю не викликає труднощів. Значення коефіцієнтів, заокруглені до цілого, підставляємо в многочлен (20) і обчислюємо значення  $N_1$ , тобто виключаємо багатозначність. Аналогічно виключають багатозначність, коли у віддалемірі

є інша кількість частот. Наприклад, коли є три вимірювальні частоти, то багаточлен має вигляд

$$N_1 = \frac{f_1}{f_3} \cdot a + \frac{f_1}{f_2} \cdot b + c.$$

Невідомі коефіцієнти визначають за формулами

$$c = \frac{f_1}{f_2} \cdot \delta_2 - \delta_1, b = \frac{f_2}{f_3} \cdot \delta_3 - \delta_2, a = \frac{S_{\text{табл}}}{2f_3} - \delta_4.$$

При багатоступеневому способі потрібні вимірювальні частоти, які відрізняються між собою в десятки, сотні і тисячі разів, тобто високі, середні та низькі частоти. Для генерування кожної з тих частот необхідний окремий генератор, що збільшує масу та габарити віддалеміра.

Близькі за значенням вимірювальні частоти можна отримувати з одного генератора, послідовно під'єднуючи до нього один із декілька коливних контурів. В цьому випадку відліки з фазометра на середніх і низьких частотах отримують посередньо, тобто обчислюють за відліками, знятими на близьких за значеннями високих частотах, які є у віддалемірі.

Припустимо, що у віддалемірі крім основної частоти  $f_1$  є близька до неї частота  $f'_i$  і що  $f_1 > f'_i$ . Різниці фаз в періодах на цих частотах можна записати у виді

$$\frac{\Delta\varphi_1}{2\pi} = f_1 \cdot \tau = N_1 + \delta_1, \quad \frac{\Delta\varphi'_i}{2\pi} = f'_i \cdot \tau = N'_i + \delta'_i. \quad (30)$$

Віднімемо від верхнього рівняння нижнє і отримаємо

$$\frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi'_i}{2\pi} = (f_1 - f'_i)\tau = (N_1 - N'_i) + (\delta_1 - \delta'_i). \quad (31)$$

Із рівняння (31) бачимо, що різниця фаз, отриманих на двох різних високих частотах  $f_1$  і  $f'_i$ , дорівнює різниці фаз на частоті, що дорівнює різниці цих двох частот, тобто на середній чи низькій частоті  $f_i = f_1 - f'_i$ . При цьому кількість цілих періодів в різниці фаз на низькій частоті дорівнює різниці цілих чисел періодів, які містились в різниці фаз на кожній з високих

частот. Фазовий домір на середній чи низькій частоті можна обчислити, взявши різницю фазових домірів, отриманих на двох високих частотах. Фазовий домір – це показ фазометра. Він не може бути від’ємним. Коли фазовий домір на першій частоті є меншим від фазового доміру на частоті  $f'_i$ , то перед відніманням до фазового доміру на першій частоті слід додати 1, тобто збільшити його на один період. При цьому на 1 зменшиться кількість цілих періодів в різниці фаз.

Аналогічними будуть дії, коли фазові доміри є в поділках фазометра. Коли різниця відліків, отриманих на високих частотах, є від’ємною, то до неї потрібно додати ціну всієї шкали фазометра. Наприклад, нехай на частоті  $f_1 = 15$  МГц отримано показ фазометра 124, а на частоті  $f'_i = 13.5$  МГц – 301. На шкалі фазометра є 400 поділок. Показ фазометра на частоті 1.5 МГц дорівнює  $124 - 301 + 400 = 223$ .

Фазовий домір в періодах на цій частоті є рівним  $223/400 = 0.5578$ .

Ми припустили, що перша частота є більшою від  $i$ -ої частоти. Але може бути і навпаки, тобто може мати місце нерівність  $f_1 < f'_i$ . В цьому випадку від фазового доміру на частоті  $f'_i$  потрібно віднімати фазовий домір на першій частоті. При обчисленні фазових домірів на середніх та низьких частотах дотримуються правила, що від фазового доміру на більшій частоті завжди віднімають фазовий домір на меншій частоті.

Вияснимо, як отримати значення допоміжних високих частот при застосування посереднього способу визначення фазових домірів. Коли для виключення багатозначності нам потрібна частота, наприклад  $f_1/10$ , то у віддалемірі можна мати замість неї частоту рівну  $0.9 \cdot f_1$ , або  $1.1 \cdot f_1$ . Так само у випадку коли потрібна частота  $f_1/100$ , то її можна замінити частотою  $0.99 \cdot f_1$ , або  $1.01 \cdot f_1$ . В загальному вигляді можна написати, що для отримання посереднім шляхом фазового доміру на частоті  $f_1/k$  потрібно крім першої частоти мати у віддалемірі одну з двох частот  $f'_i = f_1 + f_1/k$  або  $f'_i = f_1 - f_1/k$ .

Позитивною стороною багатоступеневого способу виключення багатозначності є те, що при ньому нема нижньої межі вимірюваних



віддалеміром довжин ліній. Крім цього процес виключення багатозначності цим способом можна автоматизувати. Але фазометр мусить вимірювати будь-яке значення різниці фаз в межах періоду, не так як при одноступеневому способі, коли фазометр може реєструвати лиш якесь одне постійне значення фазового доміру.

Існує спосіб виключення багатозначності, який об'єднує в собі додатні сторони одно- і багатоступеневого способів. Його називають *способом плавальної частоти*. Цей спосіб використаний в світловіддалемірах Distomat фірми Vild. В них є дві постійні вимірювальні частоти  $f_1$  і  $f_2$ . Їх значення є відомими. При цьому передбачена можливість плавного переходу від однієї до другої частоти, під час якого лічильник реєструє кількість обертів стрілки фазометра. Таким чином визначається  $n_{12} = N_2 - N_1$ . На обидвох частотах з фазометра зчитують покази, за якими отримують фазові доміри  $\delta_1$  і  $\delta_2$ . Вони можуть мати будь-яке значення в межах одного періоду. Маючи ці дані, за формулою (16) виключають багатозначність. В віддалемірах Distimat не треба знати наближеного значення довжини лінії і нема нижньої межі довжин ліній, вимірюваних віддалеміром.

## Лекція 8. ЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВІДДАЛЕЙ. ЕФЕКТ ДОПЛЕРА

**Частотний метод** може ґрунтуватися на двох різних принципах: один на використанні частотно-модульованих несучих коливань, а другий – ефекту Доплера.

В першому варіанті цього методу несучу частоту модулюють так, щоб вона змінювалась згідно лінійного закону, тобто так, щоб була простою залежністю між зміною частоти та часом, за який ця зміна відбулася. Половина періоду частоти модуляції несучих коливань  $T/2 = 1/2f$  повинна бути більшою від часу проходження електромагнітними хвилями подвійної лінії у всьому радіусі дії віддалеміра, тобто щоб  $T/2 > 2 \cdot S_{\max}/v$ . Коливання, які два рази пройшли вимірювану лінію, приймає приймач і разом з частиною прямих коливань передає їх на вимірювальний пристрій. У вимірювальному пристрої визначають різницю частот прямих і відбитих коливань, тобто  $\Delta f = f_n - f_b$ , де  $f_n$  – частота коливань, які випромінює передавач в момент часу  $t$ , а  $f_b$  – частота коливань, які приймає приймач в цей же момент часу. Різниця частот залежить від довжини лінії або часу  $\tau$ .

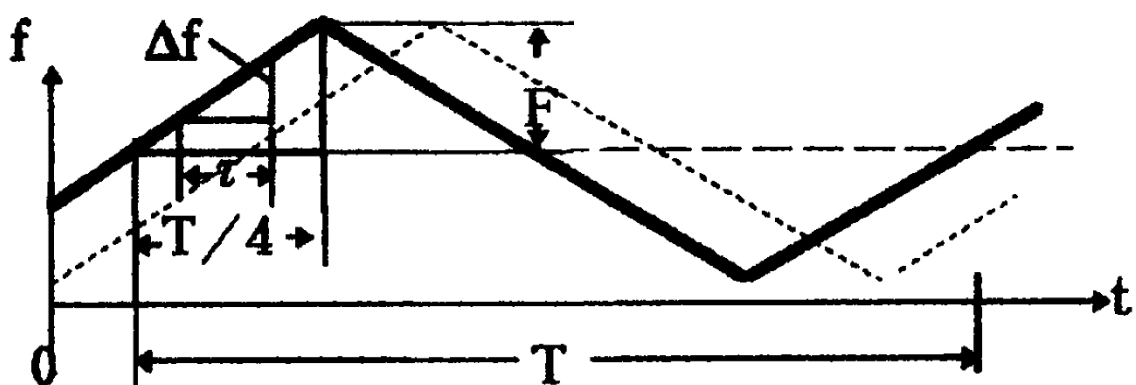


Рис. 3. Графік зміни частоти в частотному віддалемірі

На рисунку 3 суцільною лінією показаний графік зміни частоти прямих коливань, модульованих за законом «трикутника». Штриховою лінією

нанесений графік зміни частоти відбитих коливань. Як видно з рисунка, різниця частот прямих і відбитих коливань є постійною, за винятком дуже малого проміжку часу, чим нехтують. На підставі рисунка можна записати таку рівність

$$\frac{\tau}{\Delta f} = \frac{T}{4F},$$

де  $\Delta f$  – виміряне значення різниці частот,  $F$  – амплітуда зміни частоти,  $T$  – період частоти модуляції несучих коливань. З цієї рівності визначимо час проходження коливаннями подвійної вимірюваної лінії

$$\tau = \frac{\Delta f}{4 \cdot F \cdot f},$$

де  $f=1/T$ .

Підставивши значення  $\tau$  у формулу (7) величину вимірюваної відстані можна представити як

$$S = \frac{v \cdot \Delta f}{8 \cdot F \cdot f}. \quad (32)$$

Це є основна формула частотного методу при модуляції несучих коливань за законом трикутника. При іншому законі модуляції формула є також інша.

Варіант частотного методу з модульованими коливаннями застосовують в радіовисотомірах, а також в системах м'якої посадки космічних апаратів.

Другий варіант частотного методу базується на ефекті Доплера. Його використовують тільки в тих випадках, коли віддаль між передавачем і приймачем швидко змінюється. Він передбачає, що рухомий передавач

безперервно випромінює електромагнітні коливання постійної частоти  $f_B$ . Отже, при цьому методі не модулюють коливання, які випромінює передавач.

Нерухомий приймач на поверхні землі приймає ці коливання. Через те, що віддаль між передавачем і приймачем швидко змінюється, частота коливань, які приходять на приймач, відрізняється від частоти випромінюваних передавачем коливань. Ця зміна частоти є **виявленням ефекту Доплера**. Частота прийнятих приймачем коливань визначається як

$$f_{\Pi} = f_B \cdot \frac{1 \pm \frac{V_{\text{пер}} \cdot \cos \theta}{v}}{\sqrt{1 - \frac{V_{\text{пер}}^2}{v^2}}}, \quad (33)$$

де  $f_B$  – частота коливань, які випромінює передавач;  $V_{\text{пер}}$  – швидкість передавача;  $\theta$  – кут між напрямком руху передавача та напрямком випромінювання з передавача на приймач;  $v$  – швидкість електромагнітних коливань. У зв'язку з тим, що швидкість  $V_{\text{пер}}$  передавача, навіть у випадках його розміщення на штучних супутниках Землі (ШСЗ), в багато разів менша від  $v$ , то значення підкорінного виразу є дуже близьким до 1. Величина  $V_{\text{пер}} \cdot \cos \theta$  є складовою швидкості передавача в напрямі на приймач, або **радіальною швидкістю  $V$** . Приймаючи до уваги все вище сказане, можемо записати

$$f_{\Pi} = f_B \pm f_B \cdot \frac{V}{v},$$

або

$$f_{\Pi} \pm f_B = f_D = \pm f_B \cdot \frac{V}{v}. \quad (34)$$

Різницю частот  $f_D$  коливань, випромінюваних передавачем та тих, які приходять до приймача, називають **частотою Доплера**. Цю різницю вимірює частотомір на наземній станції віддалеміра.

Знак частоти Доплера залежить від напрямку руху передавача відносно приймача. Якщо він рухається до приймача, то віддаль між передавачем і приймачем зменшується, тому значення частоти Доплера має знак плюс. Якщо він віддаляється від приймача, то значення частоти Доплера є від'ємним.

Схема доплерівського віддалемірного пристрою відрізняється від загальної схеми електронного віддалеміра (рис. 2). В ньому нема відбивача, а передавач і приймач розташовані на віддалі  $S$ : передавач може бути встановленим на літаку, кораблі, або на супутнику, а приймач – на наземній станції (рис. 4). Слід зазначити, що доплерівський віддалемір може працювати теж з відбивачем. Але в наш час частотний метод, оснований на ефекті Доплера, широко застосовують в супутникових системах, в яких відбивач відсутній. Тому розглядаємо саме таку схему (рис.4).

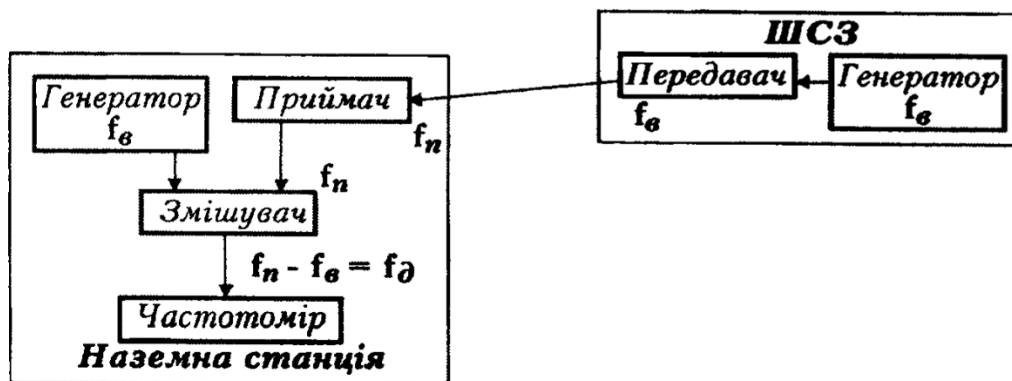


Рис. 4. Схема доплерівського віддалемірного пристрою

Для визначення частоти Доплера на наземній станції є генератор, який генерує коливання такої ж частоти, яку випромінює передавач, тобто  $f_B$ . Коливання з приймача частотою  $f_n$  і з генератора ідуть на змішувач. З нього

отримують коливання, частота яких дорівнює різниці частот  $f_{\Pi} - f_{\text{В}} = f_{\text{D}}$ .  
Частоту цих коливань вимірює частотомір.

Знаючи частоту Доплера, можна, виходячи з (34), визначити радіальну швидкість передавача відносно приймача

$$V = \pm \frac{v}{f_{\text{В}}} \cdot f_{\text{D}} = \pm \lambda_{\text{В}} \cdot f_{\text{D}}. \quad (35)$$

Ця швидкість дозволяє отримати зміну віддалі  $\Delta S$  між передавачем та приймачем, яка відбулася за проміжок часу  $\tau$  за формулою

$$\Delta S = \pm \int_{t=0}^{\tau} V(t) dt = \pm \frac{v}{f_{\text{В}}} \cdot \int_{t=0}^{\tau} f_{\text{D}}(t) dt$$

Зміни віддалей практично отримують чисельним інтегруванням, визнаючи середні значення частоти Доплера в коротких інтервалах часу.

**Лекція 9. ПЕРЕТВОРЕННЯ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ.  
МОДУЛЯЦІЯ, ДЕМОДУЛЯЦІЯ. ГЕТЕРЕДИНУВАННЯ.  
ГЕТЕРОДИННА СХЕМА ВИМІРЮВАННЯ РІЗНИЦІ ФАЗ**

**Модуляція.** Модуляцією називається зміна параметрів коливання в часі за певним законом. Відповідно до того, який параметр з формул (3) або (4) модулюється ( $A$ ,  $\omega$  або  $\varphi_0$ ), розрізняють відповідно амплітудну (АМ), частотну (ЧМ) і фазову (ФМ) модуляцію. В світловіддалемірах іноді використовують ще один вид модуляції – поляризаційну (ПМ), при якій змінюється стан поляризації світлових коливань. Коливання, параметр якого модулюється, називається несучим коливанням, а його частота  $f = \omega/2\pi$  – несучою частотою. Модуляція полягає в тому, що вибраний параметр піддається дії модулюючого коливання, яке задає закон зміни параметра. В найпростішому випадку модуляція здійснюється за гармонійним законом. При цьому модульований параметр  $P$  представляється у вигляді

$$P(t) = P_0 + \Delta P \cos \Omega t = P_0(1+m \cos \Omega t), \quad (36)$$

де  $P_0$  – відповідний параметр немодульованого коливання,  $\Delta P$  – амплітуда зміни параметра,  $\Omega = 2\pi F$  – кругова частота модуляції ( $F$  – частота модуляції, тобто частота модулюючого коливання). Величину  $m = \Delta P/P_0$  називають коефіцієнтом модуляції. Частота модуляції завжди набагато менша несучої частоти, тобто  $F \ll f$  (відповідно  $\Omega \ll \omega$ ).

В наземних віддалемірних пристроях найбільш часто застосовується амплітудна модуляція за гармонійним законом. Розглянемо цей випадок докладніше.

Хай немодульоване (несуче) коливання має вигляд (4), в якому для простоти приймемо початкову фазу як  $\varphi_0 = 0$ :

$$S = A_0 \cos \omega t \quad (37)$$

При гармонійній амплітудній модуляції амплітуда коливання у відповідності з (36) змінюється в часі (38) і прийме вид, представлений на рисунку 5.

$$A(t) = A_0 + \Delta A \cos \Omega t = A_0(1 + m \cos \Omega t), \quad (38)$$

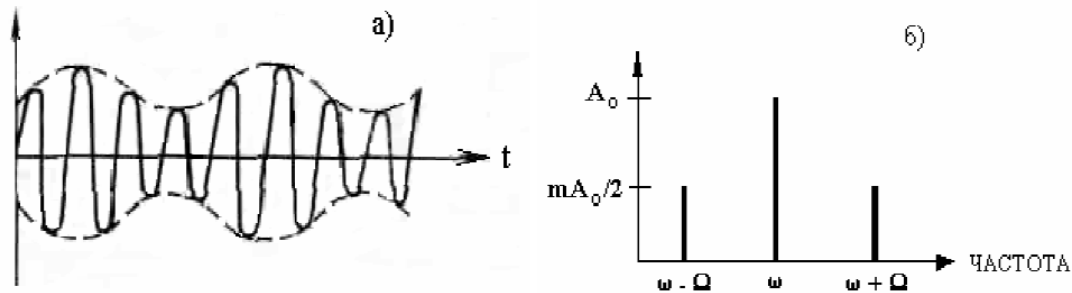


Рис. 5. а) АМ-коливання, в якому амплітуда змінюється за гармонійним законом, б) Частотний спектр АМ-коливання

Відповідно значення величини АМ коливання буде

$$S_{AM} = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t \quad (39)$$

Графік такого коливання і показаний на рис. 5. Застосувавши до (39) відому з тригонометрії формулу для добутку косинусів:

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = (1/2) [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

можна представити величину сигналу у вигляді

$$S_{AM} = A_0 \cos \omega t + (mA_0/2)\cos(\omega - \Omega)t + (mA_0/2)\cos(\omega + \Omega)t \quad (40)$$



Формула (39) показує, що **АМ**-коливання – це коливання однієї (несучої) частоти  $\omega$ , але із зміною амплітуди  $A_0(1 + m \cos \Omega t)$ , величина якої міняється в часі з частотою модуляції  $\Omega$ . А з формула (40) впливає, що **АМ**-коливання складається з трьох гармонійних складових з частотами  $\omega$ ,  $\omega - \Omega$ ,  $\omega + \Omega$  і постійними амплітудами ( $A_0$ ,  $mA_0/2$ , і  $mA_0/2$  відповідно). Питання «що ж є **АМ**-коливання насправді?» некоректне: обидва уявлення еквівалентні. В одних випадках доцільно використовувати запис (39), в інших (40). Вираз (40) показує частотний характер спектру **АМ**-коливання. Частоти  $\omega - \Omega$  і  $\omega + \Omega$  називаються боковими частотами. Таким чином амплітудно-модульоване коливання складається в загальному випадку з несучої частоти і двох бокових частот.

Цікавим окремим випадком є биття, про яке згадувалося вище, яке є результатом складання двох близьких частот  $\omega_1$  і  $\omega_2$ . Биття – це теж **АМ**-коливання, але його спектр складається з двох частот.

Окрім гармонійної модуляції, часто використовується модуляція по прямокутному закону, коли значення модульованого параметра стрибкоподібно міняється від  $P_1$  до  $P_2$  і через деякий час повертається назад, і цей процес повторюється через однакові або різні інтервали часу. Модуляцію по прямокутному закону називаються маніпуляцією. Маніпуляція фази використовується, наприклад, в глобальних супутникових навігаційних системах.

**Демодуляція.** Демодуляцією або детектуванням називається процес, в результаті якого з складного модульованого коливання виділяється модулююче коливання, Це процедура, зворотна модуляції. Існують детектори **АМ**-, **ЧМ**- і **ФМ**-коливань. Звичайно **ЧМ**- і **ФМ**-коливання перетворюються в **АМ**-коливання, яке детектується в найбільш просте. Детектування **АМ**-коливання є нелінійною операцією, в процесі якої відбувається перемноження цього коливання або на несуче коливання, або саме на себе. Перший варіант називають синхронним детектуванням, другий – квадратичним детектуванням. В обох випадках в результаті перемноження виходить сума додатків (спектр), один з яких і буде

коливанням модулюючої частоти, яке виділяють за допомогою відповідного фільтру, що пропускає тільки цю частоту.

**Гетеродинування.** Так називають операцію перетворення частоти коливання з метою отримання коливання іншої частоти. Зазвичай ця операція використовується для пониження частоти. Для здійснення гетеродинування початкове коливання частоти  $f$  змішується в радіотехнічному змішувачі з коливанням, частота якого відрізняється від  $f$  на невелику величину  $\Delta f$ . Це коливання одержують від гетеродина – допоміжного генератора. Під змішуванням звичайно розуміється перемножування коливань. В результаті перемножування утворюється спектр частот, що містить, зокрема, коливання різницевої частоти  $\Delta f$ , яке можна виділити за допомогою фільтру. Таким чином, коливання високої частоти  $f$  перетвориться в коливання низької частоти  $\Delta f$ . При цьому фаза низькочастотного коливання дорівнює різниці фаз змішуваних коливань.

Гетеродинування широко використовується в геодезичних фазових віддалемірах, в яких виникає задача вимірювання різниці фаз двох високочастотних сигналів.

Розглянемо це на наступному прикладі. Хай є два коливання однакової частоти  $f$ , які можна представити, як:

$$S_1 = A_1 \cos (2\pi f t + \varphi_1) \quad (41)$$

та

$$S_2 = A_2 \cos (2\pi f t + \varphi_2), \quad (42)$$

різниця фаз  $\varphi$  яких становить

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (43)$$

Змішавши кожне з цих коливань з коливаннями гетеродина частоти  $f_r$

$$S_r = B \cos (2\pi f_r t + \varphi_r) \quad (44)$$

в змішувачах СМ1 і СМ2 і направивши вихідні сигнали змішувачів в підсилювачі низької частоти 1 і 2 (рис.6), отримаємо на виходах підсилювачів коливання різницевої частоти  $|f - f_r| = \Delta f$  у вигляді

$$S_1 = C_1 \cos [2\pi \Delta f t + (\varphi_1 - \varphi_r)] \quad (45)$$

і

$$S_2 = C_2 \cos [2\pi \Delta f t + (\varphi_2 - \varphi_r)] \quad (46)$$

Різниця фаз цих коливань

$$(\varphi_2 - \varphi_r) - (\varphi_1 - \varphi_r) = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi, \quad (47)$$

тобто різниця фаз коливань низької (різницевої) частоти  $\Delta f$  дорівнює різниці фаз початкових коливань високої частоти  $f$ , або, іншими словами, при гетеродинуванні фазові співвідношення не змінюються. Цей вельми важливий висновок говорить про те, що вимірювання різниці фаз двох коливань високої частоти можна, застосувавши гетеродинування, замінити вимірюванням різниці фаз двох низькочастотних коливань, що виконується технічно простіше і точніше.

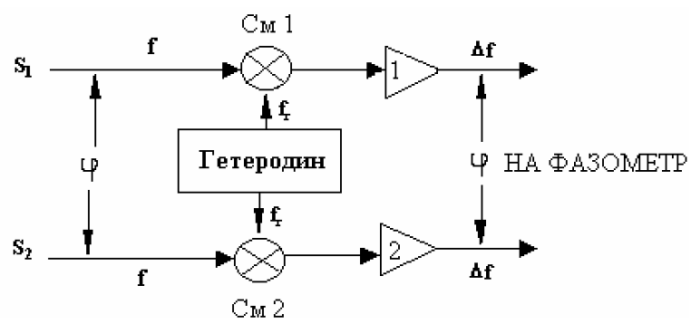


Рис. 6. Гетеродинна схема вимірювання різниці фаз

## Лекція 10. ФУНКЦІОНАЛЬНІ СХЕМИ СВІТЛОВІДДАЛЕМІРІВ

Всі фазові віддалеміри складаються із чотирьох основних вузлів: передавача, приймача, фазовимірювального пристрою та відбивача. Три перші вузли розміщують на одному кінці лінії, а відбивач – на другому.

Передавач випромінює високочастотні несучі коливання, які є модульовані вимірювальними коливаннями. В світловіддалемірах несучими є електромагнітні коливання оптичного діапазону, джерелом яких може бути лампа, світлодіод або лазер. Джерелом вимірювальних коливань є генератор, напруга з якого прикладається до модулятора, Світловий промінь з джерела проходить через модулятор і в ньому під впливом вимірювальної напруги відбувається модуляція світлового променя. В світловіддалемірах використовують тільки два види модуляції: за інтенсивністю або за формою еліпса поляризації.

Передавальна оптична система висилає модульований промінь вздовж лінії, яку вимірюють. Таким чином передавач світловіддалеміра складається із джерела світла, модулятора, генератора вимірювальних коливань і передавальної оптичної системи (рис. 7). Якщо джерелом світла є світлодіод, то модуляцію інтенсивності його випромінювання проводять прикладанням вимірювальної напруги безпосередньо до світлодіода.

Відбивачі світловіддалемірів пасивні, бо вони тільки відбивають світловий промінь в напрямку на приймач, який знаходиться біля передавача. Основною їх частиною є дзеркальна поверхня, яка відбиває присланий промінь.

Приймачем світловіддалемірів є приймальна оптична система. Вона вловлює світло, відбите відбивачем, і скеровує його на фазовимірювальний пристрій.

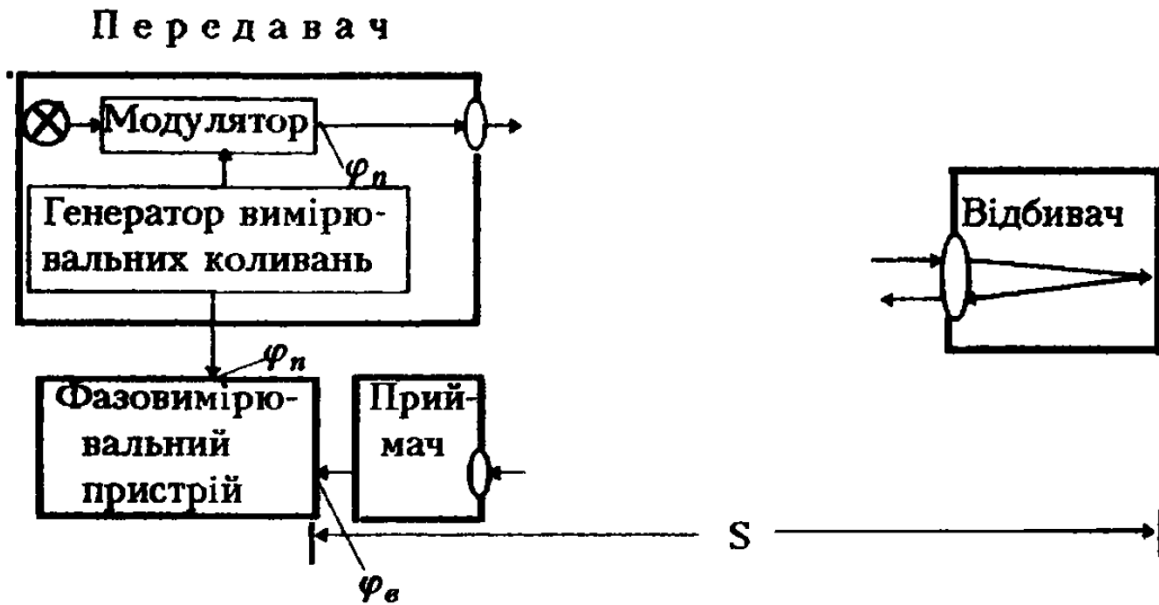


Рис. 7. Загальна функціональна схема світловіддалеміра

На фазовимірювальний пристрій крім коливань з приймача подають вимірювальну напругу із генератора передавача. Біжуча фаза цієї напруги дорівнює фазі модуляції  $\varphi_n$  променя на початку його шляху. Фаза модуляції світлового потоку дорівнює фазі модулюючої напруги в точці його виходу з модулятора. Тому початком вимірювання лінії в світловіддалемірах є вихід з модулятора. Фазою  $\varphi_v$  вважають фазу модуляції відбитого світлового променя на вході в фазовимірювальний пристрій, бо там закінчується шлях променя. Завданням фазовимірювального пристрою є виміряти різницю біжучих фаз  $\varphi_n - \varphi_v = \Delta\varphi$ .

Істотне значення в принципі дії та конструкції світловіддалеміра має його фазовимірювальний пристрій. Тому в основі поділу світловіддалемірів на три покоління лежить спосіб вимірювання різниці фаз або тип фазометра, застосований в пристрої.

В *світловіддалемірах першого покоління* використовують оптичні фазометри, які вимірюють різницю фаз на частоті модуляції світла. Основною частиною оптичного фазометра є модулятор, який працює синхронно з модулятором передавача (рис. 8).

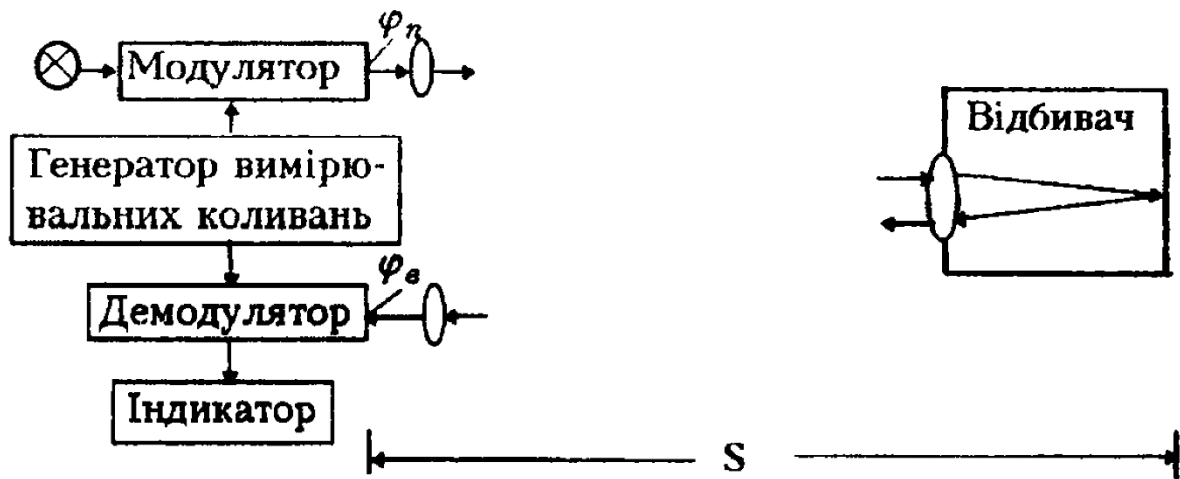


Рис. 8. Загальна схема світловіддалеміра першого покоління

Модулятор фазометра називають **демодулятором**. Синхронність роботи модулятора і демодулятора полягає в тому, щоб їх частота роботи була однаковою. Це забезпечується тим, що вони працюють під впливом напруги від одного генератора, а саме генератора вимірювальних коливань. Крім цього обов'язково мусить бути відомою різниця фаз  $\alpha$  роботи модулятора і демодулятора. Отже мусять виконуватись дві вимоги:

$$f_d = f_m, \quad \varphi_d - \varphi_m = \alpha, \quad (48)$$

де  $f_d$  і  $f_m$  – частота роботи відповідно демодулятора і модулятора;  $\varphi_d$  і  $\varphi_m$  – фаза їх роботи;  $\alpha$  – відома величина, яка може бути постійною змінною.

При виконанні рівностей (48) сила сигналу після проходження через модулятор і демодулятор є функцією різниці фаз  $\varphi_n - \varphi_e$ . Вона може мати, наприклад такий вигляд:

$$I = A + B \cdot \cos(\varphi_n - \varphi_e + \alpha),$$

де  $A$  і  $B$  – коефіцієнти. Якщо визначити силу сигналу  $I$ , то отримаємо потрібну нам різницю фаз  $\varphi_n - \varphi_e$ . В цьому полягає суть роботи фазометрів віддалемірів першого покоління.

Силу сигналу на виході з демодулятора вимірює або реєструє індикатор. Ним може бути око спостерігача, тоді реєстрація є візуальною. Коли ж індикатором служать прилади, то реєстрація є приладовою. Відповідно до цього світловіддалеміри першого покоління поділяють на дві групи: з візуальною та приладовою реєстрацією різниці фаз.

При візуальній реєстрації роль демодулятора і модулятора виконують однакові пристрої, які модулюють світло або за інтенсивністю, або за формою еліпса поляризації. Візуально можна реєструвати тільки екстремальні значення інтенсивності світла, тобто максимуми або мінімуми, які відповідають визначеним значенням фазових домірів, наприклад, такі, що дорівнюють нулю. Для встановлення екстремальних інтенсивностей світла, або потрібних значень фазових домірів найчастіше плавно змінюють вимірювальну частоту, рідше – плавно змінюють різницю фаз роботи модулятора і демодулятора, тобто  $\alpha$ . Слід відзначити, що віддалеміри першого покоління з візуальною реєстрацією різниці фаз мають просту будову, але зустрічаються вже рідко. Інколи візуальна реєстрація використовується для грубого вимірювання ліній (наприклад, у світловіддалемірі СГ 3).

У віддалемірах з приладовою реєстрацією фаз індикатором служить мікроамперметр, тому необхідно світловий потік перетворити в фотострум. Це можна зробити після його демодуляції (як у світловіддалемірах СГ 3), або перед нею (наприклад, у геодиметрі NASM 2). В першому випадку модулятором і демодулятором у віддалемірі є однакові пристрої, які можуть модулювати як інтенсивність випромінювання, так і форму еліпса його поляризації. Перетворення світлового потоку після проходження демодулятора виконують з допомогою фотоелектронного помножувача (ФЕП). Якщо перетворення світлового потоку в фотострум проходить перед демодуляцією, то демодулювати потрібно фотострум, сила якого змінюється за гармонічним законом з частотою модуляції світла і фазою  $\varphi_{\text{в}}$ . Для перетворення в фазовимірювальному пристрої відбитого світлового потоку в

фотострум і його демодуляції теж використовують ФЕП. В цьому варіанті віддалемірів першого покоління світловий потік потрібно модулювати тільки за інтенсивністю.

У віддалемірах з приладовою реєстрацією різниці фаз вимірювальна частота може змінюватись плавно або дискретно.

Зараз поширені віддалеміри першого покоління з приладовою реєстрацією, в яких світловий потік перетворюють в фотострум після демодуляції. При цьому застосовують модуляцію світла тільки за формою еліпса поляризації. Процес вимірювань цими віддалемірами вдалося значною мірою автоматизувати.

У *світловіддалемірах другого покоління* в фазовимірювальних пристроях використовують радіоелектронні аналогові фазометри. В них перед вимірюванням різниці фаз перетворюють відбитий модульований світловий промінь в струм, сила якого змінюється з частотою і фазою, що дорівнюють частоті і фазі модуляції відбитого світлового потоку. Це перетворення відбувається в ФЕП, тому в віддалемірах другого покоління світло може бути модульованим тільки за інтенсивністю (рис. 9). Роль коливання з фазою, що дорівнює  $\varphi_n$ , виконує вимірювальна напруга, яку подають на фазометр.

Аналогові фазометри можуть точно вимірювати різницю фаз двох коливань тільки на низьких частотах. Тому виникає необхідність зниження частоти прямого і відбитого коливань перед подачею їх на фазометр, що у віддалемірах виконують способом гетеродинування. У цьому способі зберігається різниця фаз коливань, тобто різниця фаз коливань після зниження їх частоти є такою ж, як перед зниженням.



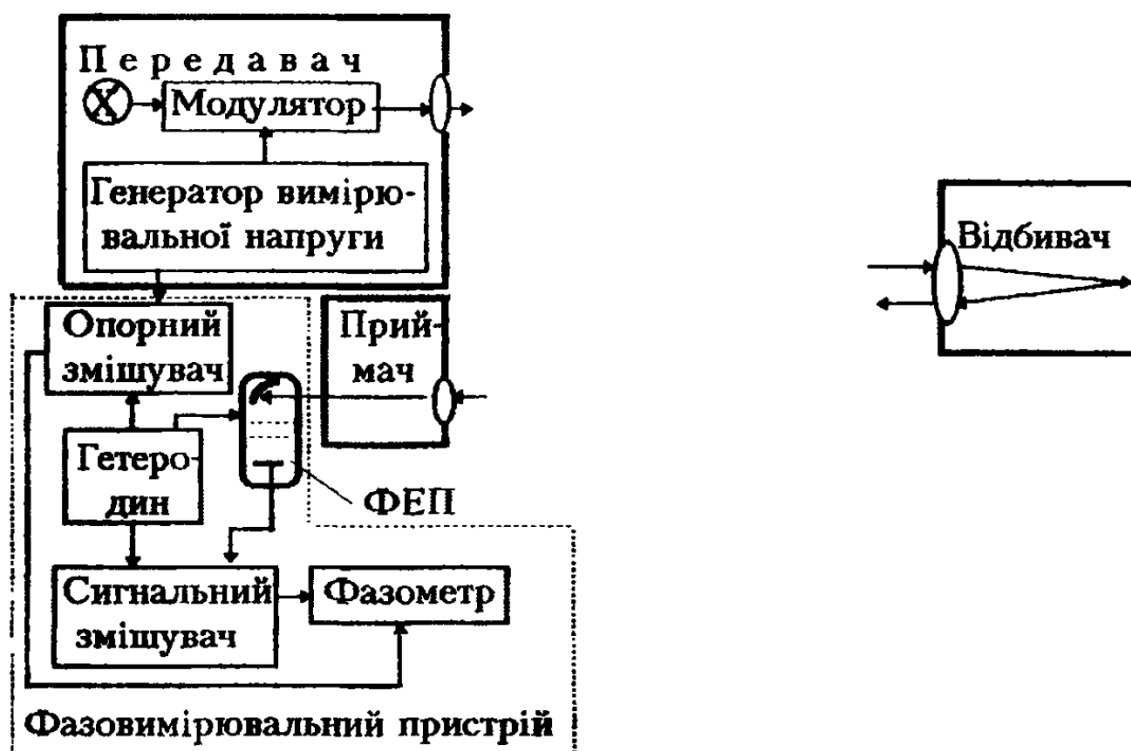


Рис. 9. Загальна функціональна схема віддалемірів другого і третього поколінь

Для гетеродинування в фазовимірювальному пристрої потрібно мати допоміжний генератор, який називають *гетеродином*, і два змішувачі: опорний і сигнальний. Частота гетеродина є близькою до вимірювальної частоти. Різницю цих частот вибирають такою, на якій найкраще працює фазометр, застосований у віддалемірі. Це частіше є низька частота, що дорівнює декільком кілогерцам.

На *опорний змішувач* подають коливання з генератора вимірювальної напруги і з гетеродина. З опорного змішувача отримують коливання низької різничної частоти, фаза яких є прямо пропорційною до фази  $\varphi_n$ .

*Сигнальний змішувач* змішує коливання з ФАП та з гетеродину. З цього змішувача виділяють коливання з частотою, яка дорівнює різниці частот вимірювальних коливань, отримуваних з ФАП, і коливань гетеродину, тобто такої ж частоти, як з опорного змішувача. Їх фаза є прямо пропорційною до фази  $\varphi_v$ . Фазометр визначає різницю коливань з опорного і сигнального змішувача, яка дорівнює  $\varphi_n - \varphi_v$ .

*Віддалеміри третього покоління* відрізняються від віддалемірів другого покоління в основному тим, що в них замість аналогового використовують цифровий фазометр, яким вимірюють різницю фаз коливань теж після зниження їх частоти способом гетеродинування. Але ця на перший погляд незначна різниця істотно змінила світловіддалемірну техніку, дала змогу перейти на економний імпульсний режим роботи та автоматизувати процес вимірювань, а також процес опрацювання. Це стало можливим завдяки тому, що процес вимірювань цифровими фазометрами триває дуже малі проміжки часу, а результат вимірювань є в кодовій формі.

У віддалемірах другого і третього поколінь багатозначність виключають багатоступеневим способом. При цьому у віддалемірах другого покоління використовують посереднє визначення фазових домірів для частот, які потрібні для виключення багатозначності. У віддалемірах третього покоління генератор коливання вимірювальних частот, потрібних для виключення багатозначності, отже фазові доміри вимірюють безпосередньо.

Передавач, прифмач і фазовимірювальний пристрій віддалемірів монтують звичайно в одному блоці, який називають *прийомопередавачем*. Прийомопередавач і відбивач – це основні блоки віддалеміра, які під час вимірювань встановлюють на кінцях вимірюваної лінії.

Якщо у віддалемірі вимірювальну частоту змінюють плавно, то в його комплекті є частотовимірювальний пристрій. Якщо частоти змінюють дискретно, тобто їх перемикають, тоді значення частот приводять в паспорті віддалеміра і частотомір непотрібний.

Прийомопередавач, а також частотомірний пристрій, коли він є, живиться від акумуляторної батареї, або бензоагрегата через перетворювач і розподільник напруги. Перетворювач і розподільник нерідко оформляють окремим блоком, який прийнято називати *блоком живлення*. У віддалемірах з малим радіусом дії блок живлення вбудовують в прийомопередавач.

Вимірювання з допомогою перелічених вузлів віддалеміра дає можливість визначити в формулі (10) дві величини: різницю фаз і вимірювальну частоту. Для обчислення довжини лінії потрібна ще швидкість несучих коливань. Вона залежить від значень метеорологічних величин, які мали місце під час вимірювання лінії. Тому *в комплект світловіддалемірів обов'язково входять ще метеорологічні прилади*. Вони дають можливість отримати третю невідому величину в (10), а саме швидкість несучих коливань.

Світловіддалеміри визначають половину довжини шляху світлового променя від модулятора в передавачі до відбиваючої поверхні відбивача і від неї до входу в фазовимірювальний пристрій. Ця половина шляху не дорівнює відстані між вертикальними осями обертання прийомопередавача і відбивача, які встановлюють над центрами геодезичних знаків. Тому в обчислене значення довжини лінії вводять поправку **k**, значення якої залежить від розміщення деталей в середині прийомопередавача і відбивача, тобто від їх конструкції. Цю поправку називають *приладовою*, або *постійною*. З її врахуванням формула (13) за якою практично обчислюють довжини виміряних ліній має вигляд

$$S = (N + \delta) \cdot \frac{v}{2f} + k. \quad (49)$$

Точне значення цієї поправки для кожного віддалеміра отримують з досліджень.

## Лекція 11. ЛАЗЕРИ. ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ ЛАЗЕРІВ

Лазер – це джерело оптичного випромінювання з високим ступенем когерентності. В самому загальному значенні термін «когерентність» означає «узгодженість». Світло називається когерентним, якщо всі атоми речовини випускають світлові хвилі, що мають строго однакову амплітуду, частоту, фазу, поляризацію і напрям розповсюдження. Такого ідеально когерентного джерела не існує, але лазер є якнайкращим його наближенням.

Будь-який лазер складається з трьох основних елементів (рис. 10): активного середовища (твердого, рідкого або газоподібного), джерела накачування і відкритого резонатора, утворюваного двома паралельними дзеркалами, між якими поміщається активне середовище. Одне з дзеркал робиться частково прозорим для виходу випромінювання з лазера.

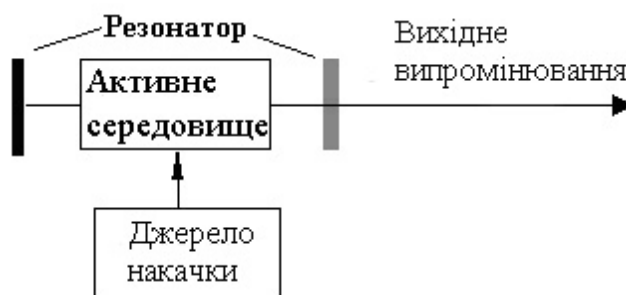


Рис. 10. Принципова схема лазера

Принцип роботи лазера зводиться до наступного. Активне середовище, одержуючи енергію від джерела накачування, переходить в так званий стан з інверсною населеністю енергетичних рівнів – збуджений стан, при якому число атомів речовини, «перекинутих» на більш високий енергетичний рівень, стає більше числа атомів, що залишилися на нижчому (основному) енергетичному рівні. Цей стан є нестійким: будь-який з атомів, що виявилися на верхньому рівні може мимовільно перейти назад на основний рівень, випускаючи при цьому квант світла (фотон) певної частоти, залежної від різниці енергії рівнів. Так і відбувається, причому моменти народження

різних фотонів, ініційованих переходами тих або інших атомів, випадкові, не злагоджені один з одним, фотони при цьому розлітаються в різних напрямках, спрямовуючись «хто куди». Таке випромінювання називається *спонтанним* (мимовільним), і воно некогерентне.

І ось тут вступає в гру оптичний резонатор. Спонтанні фотони, що народились у напрямі осі резонатора, пройдуть уздовж нього порівняно великий шлях, багато разів циркулюючи між відбиваючими дзеркалами. При цьому виникає дуже важлива обставина. Вона полягає в тому, що циркулюючі фотони, взаємодіючи на своєму шляху з атомами, що нагромадилися на верхньому енергетичному рівні, ініціюють їх перехід на нижній рівень з випуском фотонів. Оскільки ці переходи виникають не випадково, а вимушено, під дією циркулюючих уздовж осі резонатора фотонів, то фотони, що народжуються при цих переходах будуть точною копією того фотона, що «вимушує», - вони матимуть ту ж енергію, той же напрям руху і інші абсолютно ідентичні характеристики. Виникає могутня лавина злагоджених фотонів. Таке випромінювання називається (на відміну від спонтанного) вимушеним (а також стимулюючим або індукованим) і є, як легко зрозуміти, когерентним. Та обставина, що в лазері має місце стимулююче випромінювання, відображено в самому слові «лазер» - це слово (LASER) є аббревіатурою, складеною з перших букв англійської фрази Light Amplification Stimulated Emission Radiation – «посилення світла за допомогою стимулюючого випромінювання». В цій фразі, правда, мовиться про посилення світла, тоді як лазер – це генератор світла, проте це не має принципового значення, оскільки будь-який підсилювач можна, як відомо, перетворити на генератор введенням ланцюга зворотного зв'язку з виходу на вхід підсилювача. Таким ланцюгом і є дзеркала резонатора (підсилювачем служить збуджене активне середовище). Після кожного подвійного проходу довжини резонатора частина випромінювання виходить з лазера через напівпрозоре дзеркало.

Лазер може генерувати не будь-які довжини хвиль  $\lambda$ , а тільки такі, які укладаються в ціле число раз  $q$  на подвійній довжині резонатора  $2L$ , тобто задовольняють умові резонансу:

$$2L = q \lambda \quad (50)$$

Ці резонансні довжини хвиль називаються *повздовжніми модами*, і якщо в смугу посилення активного середовища потрапляє багато таких довжин хвиль, то вони генеруються одночасно, тобто в спектрі випромінювання лазера може міститися багато повздовжніх мод, віддалених один від одного по частоті на однаковий інтервал  $\Delta\nu = c_p/2L$ , де  $c_p$  – швидкість світла в резонаторі. Такі лазери називаються багатомодовими. Спеціальними методами селекції можна виділити тільки одну моду, і тоді лазер називають одномодовим або одночастотним.

Лазерне випромінювання володіє наступними властивостями, що відрізняють його від випромінювання всіх інших джерел:

- високим ступенем просторової і часової когерентності;
- (як наслідок) високим ступенем монохроматичності, тобто зосереджено в дуже вузькому спектральному інтервалі (ідеально монохроматичного джерела не існує, але лазер є найкращим до нього наближенням);
- надзвичайною вузьконаправленістю (малою шириною пучка);
- високою спектральною густиною потужності (густина потужності – це потужність, що доводиться на одиницю площі, наприклад, на  $1\text{см}^2$ ; спектральна густина потужності – густина потужності, віднесена до одиничного спектрального інтервалу, наприклад, до  $1\text{мкм}$ ).

Залежно від виду активного середовища розрізняють твердо тільні лазери, рідинні (лазери на розчинах органічних фарбників), газові і напівпровідникові.

**Твердотільні лазери.** До них відносяться лазери на рубіні, на неодимовім склі і на натрій-алюмінієвому гранаті. Вони працюють в імпульсному режимі, випромінюючи короткі оптичні імпульси великої потужності (лазер на гранаті може працювати в безперервному режимі). З них в геодезії в даний час використовуються могутні пікосекундні лазери на гранаті з довжиною хвилі вимірювання 1,06мкм – в лазерних віддалемірах для вимірювання відстаней до ШСЗ часовим методом, про що вже згадувалося вище. Останнім часом освоюється застосування лазерів на титан-сапфірі, від яких можна одержати імпульси фемтосекундного діапазону ( $1\text{фс}=10^{-15}\text{с}$ ) тривалістю в сотні і десятки фемтосекунд.

**Газові лазери** генерують безперервне випромінювання. Окрім вже згаданого гелій-неонового (He-Ne) лазера, що використовується в наземних світловіддалемірах і випромінюючого червоне світло з довжиною хвилі 0,63 мкм, в двоххвильових світловіддалемірах можуть використовуватися гелій-кадмієвий (He-Cd) лазер з довжиною хвилі 0,44 мкм (синє світло) і аргонівий (Ar) лазер, що може одночасно генерувати випромінювання на двох довжина хвиль: 0,46 мкм (синє світло) і 0,51 мкм (зелене світло). Газові лазери мають найбільший ступінь монохроматичності випромінювання.

**Лазери на фарбниках** володіють чудовою властивістю – можливістю перебудови хвилі в широкому діапазоні, але геодезичного застосування вони поки що не отримали.

**Напівпровідникові лазери** складають особливий клас лазерів, зважаючи на їх вельми специфічні властивості, вони широко використовуються в сучасних наземних світловіддалемірах і електронних тахеометрах. Однією з найпривабливіших їх якостей є дуже малі розміри (менше 1см) і маса. Напівпровідниковий лазер на арсеніді галію, частіше всього вживається у віддалемірній техніці, є лазерним діодом, виконаним у вигляді кристала, складеного з двох «половинок» з різними типами провідності – електронної (*n*-провідність) і дірчастої (*p*-провідність). Між ними утворюється зона, що називається *p-n*-переходом. Якщо на ці

«половинки» подати постійну напругу живлення (підключивши позитивний плюс до **p**-області), то в зоні **p-n**-переходу утворюються фотони і звідти виходить випромінювання. Так виходить світлодіод, але його випромінювання некогерентне. Щоб перетворити світлодіод на лазерний діод, треба відполірувати торцеві грані кристала, які служитимуть дзеркалами резонатора, і збільшати густину струму через діод. Тоді випромінювання стає когерентним – ми одержуємо напівпровідниковий лазер.

Окрім малих габаритів, такий лазер володіє ще однією цінною властивістю – можливістю внутрішньої модуляції випромінювання. Тобто якщо в віддалемірі джерелом випромінювання служить напівпровідниковий лазер, то модулятора, як окремого пристрою нетреба – достатньо подати напругу живлення на лазерний діод, як змінну модулюючу напругу від генератора і випромінювання, що виходить з діода буде модульованим. При цьому можлива модуляція з дуже високою частотою – до 1 ГГц.



## **Лекція 12. ЛАЗЕРНІ ВІЗИРИ. ЛАЗЕРНІ ДАЛЕКОМІРИ (РУЛЕТКИ)**

### **Лазерні візир**

Лазерний візир – світлопроекційний прилад для створення опорної лінії в просторі. Застосовується для задання напрямку похилим гірничим виробкам у підземних умовах. Забезпечує можливість оперативного контролю прямолінійності виробки, визначення відхилення від заданого напрямку у горизонтальній та вертикальній площинах. Складається з газового (гелій-неонового) лазера з телескопічною колімуючою системою і підставки з підймальними гвинтами і відліковими механізмами. Моделі Л.В. мають пристрої стабілізації і зміни напрямку світлового пучка. Прилад встановлюється на стандартну підставку на штативі, має вертикальну і горизонтальну осі обертання випромінювача. Граничні значення кутів повороту в горизонтальній площині –  $180^\circ$ , у вертикальній –  $20^\circ$ . Опорна лінія (вісь світлового пучка, випромінюваного лазерним приладом), орієнтована в просторі по заданому напрямку.

Розглянемо прилад ЛВ-5 (рис. 11), що працює в багатомодовому режимі, і є універсальним приладом. У деяких випадках його називають лазерним теодолітом або лазерним візиром. Прилад може бути встановлений на стандартному штативі, має оптичний візир для попереднього наведення лазерного пучка на ціль. Плавне наведення мікрометровими гвинтами дозволяє його фіксувати в заданому напрямку з високою точністю.



Рис. 11. Лазерний візир ЛВ-5

Робота у виробничих умовах показала, що дальність дії і потужність випромінювання при маркшейдерських підземних роботах не відіграють значної ролі. Легше переставити прилад в міру необхідності в тунелі, ніж забезпечити видимість на значні відстані у стиснутих умовах при веденні прохідницьких робіт, до того ж часто проводяться по криволінійних трасах. Крім того, лазерну пляму можна бачити стійко і чітко на відстанях 120-150м. Далі зображення лазерного пучка стає безформним і пульсуючим і точність визначення його положення в просторі без застосування спеціальних методів стає скрутним.

Лазерний візир ЛВ-5 створений на основі лазера ОКГ-13. Прилад має підставку аналогічну конструкції геодезичного трегера та вертикальну і горизонтальну осі обертання. Кінематична схема котирування механізмів візира дозволяє повертати прилад у вертикальній площині в межах  $20^\circ$  і в горизонтальній в межах  $180^\circ$ .

Мікрометрові гвинти дозволяють наводити промінь лазера на об'єкт в горизонтальній і вертикальній площинах в межах  $5^\circ$ . Вертикальна вісь приладу приводиться в прямовисне положення трьома підйомними гвинтами

трегера. Конструкція приладу забезпечує юстування телескопічної колімуючої оптичної системи щодо резонатора лазера і точне сполучення горизонтальній осі приладу з напрямком поширення променя ОКГ.

Не зважаючи на вік, лазерний візир ЛВ-5 використовується і в цей час для зйомки профілю поверхні злітно-посадкових смуг аеродромів, зйомки підкранових колій і в інших інженерно-геодезичних роботах. Прилад характеризується високою точністю та надійністю. До недоліків можна віднести великі габарити прилада.

### Лазерні рулетки

Для того, щоб з великою точністю дізнатися величину відстані було придумано вимірювальний пристрій, який без зусиль людини виконає вимірювання з високою точністю і швидкістю. Такими приладами стали лазерні рулетки, вони ж далекоміри (рис. 12).



Рис. 12. Лазерна рулетка (далекомір)

Саме вони стали тим інструментом, який зробить вимірювання відстані до 200м з максимальною похибкою всього лише в декілька міліметрів. Принцип дії такого приладу це використання лазерного променя. У народі він іменується лазерною рулеткою. Такі прилади сьогодні використовуються в різних сферах людської діяльності.

Добре себе зарекомендували лазерні рулетки:

- у будівництві,
- при збірних роботах,
- застосовуються в ремонтних роботах,
- в лісовому господарстві,
- у ландшафтному дизайні,
- у геодезії,
- у військовій справі,
- в полюванні і багато в чому іншому.

Такі прилади бувають імпульсні і фазові. Принцип роботи імпульсних далекомірів вимірювання часу, за який лазерний промінь дійде до необхідного предмета і відіб'ється назад. Такий розрахунок здійснюється за формулою швидкості світла. Фазовий далекомір порівнює фазу відправленого і відбитого сигналу. Ці прилади показують найбільш точну відстань, і вона досить велика.

Більшості фахівців сподобалися лазерні далекоміри виробництва компанії Leica.

Взагалі компанія Leica наприкінці 2015 року представила до уваги модель рулетки Leica DISTO D510, яка практично може функціонувати як тахеометр.

Сучасні лазерні рулетки володіють функціоналом для обчислення площі прямокутних і трикутних ділянок, об'ємів, розмірів приміщень. В них передбачений режим «відкладеного» виміру, а пам'ять приладу підтримує запис декількох десятків результатів.

Основні переваги рулетки полягають у тому, що вони дуже точні і мають високу надійність. Чим новіша модель цієї рулетки, тим краща точність. В нове покоління приладів впроваджуються сучасні науково-технічні досягнення. Серед звичайних людей великою популярністю користуються прості моделі. Вони зручні і не вимагають спеціальних знань. Нимиможна виміряти відстані, розрахувати площу і об'єм.

Фахівці ж, користуються більш складними моделями з безліччю різних допоміжних функцій, наприклад:

- вбудована в приладі камера,
- датчик нахилу кута на 360°,
- бездротова передача даних,
- захист від зовнішніх чинників,
- пам'ять для 30 вимірювальних даних,
- елеваційний штатив,
- поворотний адаптер.

### **Лазерні рулетки складаються з наступних компонентів:**

**Корпус** лазерної рулетки зазвичай виготовляють з міцного пластику, з гумовими або латексними вставками, адже його так легко впустити. Лінзи мають ефект протизапотівання. Є спеціальні чохла, що охороняють інструмент від пилу, бруду. Добрий далекомір не боїться ні підвищеної вологості, ні великого коливання температури, однак чим вище показники опору природному середовищу, тим вище ціна.

**Випромінювач** – це отвір з оптикою, через яку випускається світловий промінь.

**Відбивач** – оптичний фільтр, який приймає промінь світла, який відбився від об'єкта.

**Мікропроцесор** – мініатюрний комп'ютер в тілі рулетки, він перетворює світловий сигнал в електронний і цифровий, щоб програма могла його обробити й вивести на дисплей.

**Програмне забезпечення** кожної лазерної рулетки залежить від її призначення. Звичайний побутовий прилад може вимірювати відстані відрізків, складати і віднімати ці відстані, визначати площі, об'єми приміщень, обчислювати висоту будівлі через функцію Піфагора.

**Штатив** потрібен для надійної фіксації рулетки оскільки рука часто мимоволі трясеться, чим порушується точність вимірювань.

**Візор** або оптичний приціл – це пристосування для направлення лазерного променя. У звичайних рулетках він відсутній. Його наявність свідчить про те, що інструмент призначений для фахівця. Цей приціл може зменшувати відстань в 7-10 разів і забезпечити відмінну видимість для початку вимірювання.

**Ватерпас** – це вбудований в далекомір рівень, що дозволяє бачити, наскільки точно розташований прилад без додаткових пристосувань.

## Лекція 13. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

Електронні вимірювання кутових величин реалізуються в електронних теодолітах і електронних тахеометрах.

Електронний теодоліт є пристроєм, в якому проводиться автоматичне прочитування кутових величин з перетворенням їх в електричні сигнали. Ця операція здійснюється за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). В електронних теодолітах застосовуються два основних АЦП, які відрізняються методом отримання інформації про кут у вигляді електричних сигналів (рис. 13). Ці два методи отримали назву кодового і інкрементального, останній часто називають просто цифровим.



Рис. 13. Приклад кодованого круга в електронному теодоліті

**Кодовий метод.** При цьому методі лімба, з якого обраховується кутова величина, є скляним диском, на якому нанесена система концентричних кодових доріжок, що складаються з окремих елементів типу «так - ні» (наприклад, прозорих і непрозорих ділянок), які забезпечують можливість створення сигналів 1 і 0 в двійковій системі обчислення. Розташування цих елементів таке, що вони в певному коді зашифровують підлягаючу вимірюванню куту величину, причому кожна доріжка звичайно відповідає певному розряду в значенні кутової величини, що вимірюється. Кількість

доріжок і послідовність розташування елементів в них залежать від вибраного коду і бажаної точності отримання величини кута. Можуть використовуватися різні числові коди – двійковий, двійково-десятковий, циклічний і ін. На рис. 13 показаний вид кодового круга в електронному теодоліті, що є складовою частиною одного з електронних тахеометрів фірми «Х'юлетт-Паккард» (США).

Кодовий метод є абсолютним методом, тобто таким, при якому значенню кутового напрямку (певному кутовому положенню кодового диска) однозначно відповідає певний кодовий вихідний сигнал. Для прочитування інформації з кодових дисків використовується, як правило, оптичний (фотоелектричний) спосіб: кодовий диск просвічуються світловим пучком, який потім поступає на фотоприймальний пристрій, наприклад, на матрицю фотодіодів, що дозволяє отримати на виході різні комбінації електричних сигналів при зміні кутового положення кодового диска. Таким чином кожна комбінація відповідає певному значенню кутового напрямку, далі електричні сигнали поступають в логічні схеми обробки, що здійснюють декодування і відтворення величини, що вимірюється, в цифровому вигляді на табло.

**Інкrementальний метод.** Він заснований на використанні штрихового растру – системи радіальних штрихів, що наносяться звичайно на зовнішньому краю лімба або алідади через однакові інтервали. Густина растру може бути дуже високою (до сотень штрихів на 1 мм), що забезпечує високу точність вимірювань. Непрозорі штрихи і прозорі інтервали між ними (звичайно рівні товщині штрихів) утворюють послідовність елементів «так – ні», які в цьому випадку називають інкрементами. Кут повороту такого растрового круга може бути оцінений по кількості інкрементів, що пройшли через фіксовану точку. Прочитування проводиться також оптичним методом і кількість пройдених інкрементів виражається числом імпульсів світла, що поступили на фотоприймач. При цьому для забезпечення реверсивного рахунку імпульсів, тобто відліку з урахуванням напрямку обертання круга, застосовуються два фотоприймачі (фотодіода), що сприймають імпульсні



сигнали, зсунуті по фазі на  $90^\circ$ . Цього може бути досягнуто або відповідним розміщенням фотодіодів щодо растру, або застосуванням двох однакових растрових послідовностей, зсунутих на  $\frac{1}{4}$  інкремента. Принципи зчитування кутів по горизонтальному і вертикальному кругах ідентичні.

Одним з можливих варіантів є використання відображуючого растра, в якому інтервали між штрихами не пропускають, а відбивають світло. Принцип системи відрахування в цьому випадку, який використаний, наприклад, у високоточних теодолітах Теомат і тахеометрах Тахимат швейцарської фірми «Вільд», ілюструється на рисунку 14.

В реальних системах має місце не імпульсна, а приблизно синусоїдальна зміна інтенсивності світла на фотоприймачах при обертанні растрового круга і імпульси формуються з одержуваних на виході фотоприймачів сигналів відомими електронними способами.

Інкрементальний метод є відносним методом, при якому визначаються тільки зміни кутового положення круга, тобто вимірюються кути, тоді як при кодовому методі вимірюються напрямки, а кути обчислюються як різниця напрямів.

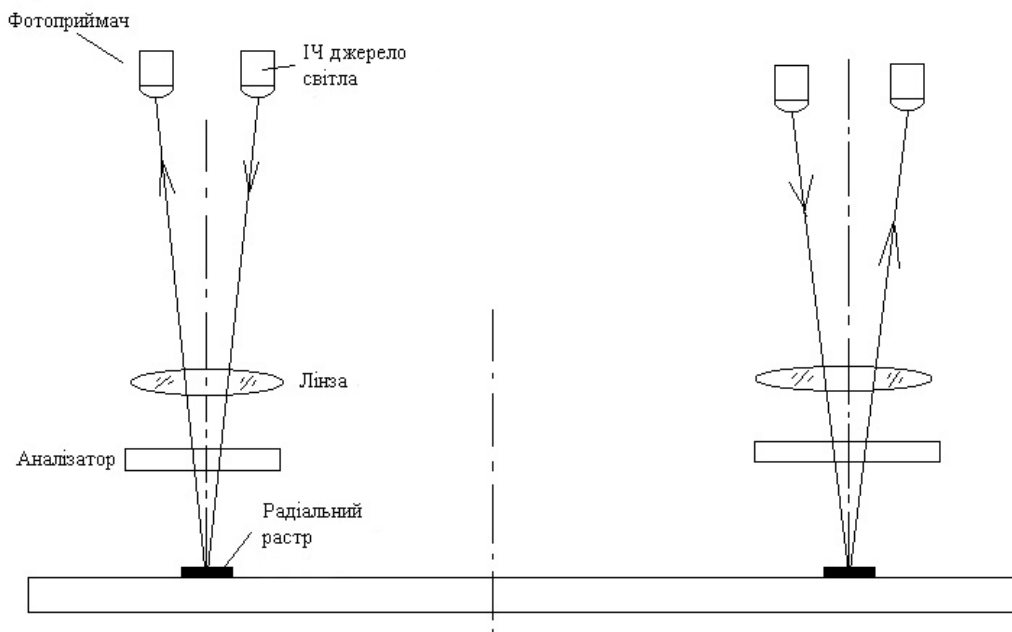


Рис. 14. Принцип прочитування при використанні відбивного растру

Як при кодовому, так і при інкрементальному методі для підвищення точності прочитування кутів застосовуються інтерполятори – системи, що містять декілька, розташованих певним чином по відношенню до кутового круга пар фотодіодів, сигнали від яких зсунуті по фазі на певну величину. Ці сигнали обробляються спільно, що дозволяє отримати високий кутову здатність.

Прикладом інтерполятора може служити система, зображена на рисунку 14. Тут аналізатор, на якому також нанесені штрихи, грає роль дифракційних решіток, що дозволяють отримати в площині зображення 4 пучки і використати 4 фотоприймачі, які розташовані таким чином, що вони при обертанні круга створюють чотири електричні сигнали, зсунуті по фазі один до одного на  $90^\circ$ . За допомогою їх складання і віднімання утворюються ще 4 сигнали і всі ці сигнали обробляються спільно.

В сучасних електронних теодолітах (рис. 15) точність вимірювання кутів може бути дуже високою, досягаючи  $0,2''$ .

Зовнішньо електронні теодоліти і електронні тахеометри майже не відрізняються. Але, не зважаючи на поступову заміну електронних теодолітів електронними тахеометрами, перші все ще тримаються на ринку геодезичних приладів, тому, що є значно дешевшими.



Рис. 15. Електронний теодоліт

Електронно обчислювальна техніка практично вирішила проблему автоматизації опрацювання результатів геодезичних вимірювань. Проте, оскільки відліки в оптичних приладах фіксують «на око», результати вимірювань не можна ввести у комп'ютер автоматично безпосередньо з приладу. Тому виникла необхідність у приладах, результати вимірювань яких можна подати у такій формі, щоб їх можна було застосувати безпосередньо як вхідну інформацію для автоматичного опрацювання. Такими приладами стали електронні (кодові) теодоліти, в яких використовують кодову систему визначення напрямків, яка дала можливість автоматизувати вимірювання кутів і одночасно відображати результати вимірювань на носії інформації. Для цього застосовують спеціальну систему поділу кругів не на штрихові шкали, а, наприклад, на прозорі та непрозорі смужки, які чергуються. Вони відповідають знакам двійкової системи 0 та 1. Коли повертати автоматичний просвітлювальний пристрій по кругу, під час просвічування останнього виникають два сигнали, коли світло є, і коли світла немає. Якщо порахувати кількість сигналів, можна зробити висновок про величину кута, наприклад, між двома дискретними положеннями просвітлювального пристрою. Така інформація, яку сприймають спеціальні приймальні пристрої, може бути виведена на носій інформації.

Систему поділу круга на прозорі та непрозорі смужки називають кодовою. Відліки у цій системі одержують автоматично електронними зчитувачами, які встановлені в теодоліті. Коли застосовують двійкову кодову систему, на круг наносять концентричні кільця, які називають доріжками. На кожному наступному кільці-доріжці кількість прозорих і непрозорих смужок сегментів подвоюється (рис. 16).

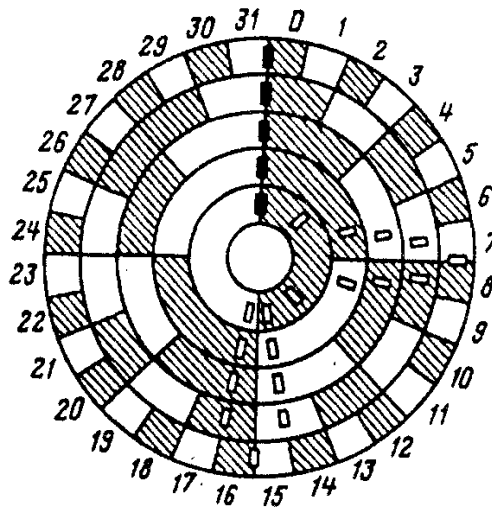


Рис.16. Колова двійкова кодова шкала

Коду нуля відповідають непрозорі (заштриховані) смужки, коду одиниці – прозорі. Молодшому порядку двійкових чисел відповідає ближче до краю круга зовнішнє кільце, а старшому – ближче до центра круга – внутрішнє кільце. У двійковій системі, щоб одержати  $n$ -розрядне число, треба  $n$  кодових доріжок-кілець. Кількість прозорих  $N_{\text{пр}}$  та непрозорих  $N_{\text{нп}}$  смужок у кожному кільці за порядковим номером  $k$ , починаючи з першого внутрішнього визначають згідно із залежністю

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{нп}} = 2^{k-1}. \quad (51)$$

Так, перше кільце ( $k-1=0$ ) має один прозорий і один непрозорий сегмент, друге ( $k-1=1$ ) два прозорі і два непрозорі, третє – по чотири прозорі та непрозорі тощо.

Смужку-сегмент крайнього зовнішнього кільця приймають за елемент квантування кута, що є межею роздільної здатності  $\Delta x_p$  перетворювача світлового сигналу (під час просвітлювання круга) у електричний, яку можна представити як

$$\Delta x_p = \frac{360^\circ}{2^n}. \quad (52)$$

Наприклад, коли  $n=12$ ,  $\Delta x_p=5'16''$ , якщо  $n=20$ ,  $\Delta x_p=1,25''$ , а коли  $n=24$ ,  $\Delta x_p=0,08''$ . Проте частота чергування смужок обмежена технологічними можливостями нанесення найтоншого штриха (наприклад,  $1''$ ) та діаметром круга (до 400 мм). Кількість розрядів у такому разі  $n_{max} = 19$ .

Елементи зчитування колової кодової шкали встановлюють по радіусу. На виході перетворювача з такою шкалою одержують код двійкового числа. На рисунку 17 подана принципова схема фотоелектричного перетворювача зчитування.

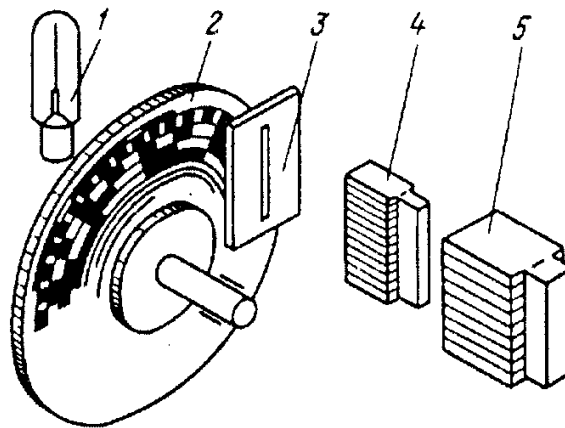


Рис. 17. Принципова схема фотоелектричного зчитувача-перетворювача:  
1 – джерело світла, 2 – круг з кодом (кодова шкала), 3 – діафрагма з прорізю,  
4 – блок фотоприймачів, 5 – електронний блок

Перетворювач діє у такий спосіб. З одного боку кодової шкали 2 встановлено джерело світла 1, а з іншого – діафрагму 3 з прорізю і фотоелектричні приймачі 4, кількість яких дорівнює кількості кодових доріжок. Під час знімання інформації промені світла, що пройшли крізь прозорі сегменти доріжки, потрапляють на фотоелектричні приймачі, сигнали з яких відповідають одиницям двійкової системи і у колі приймача з'являється струм. З приймачів, що перекриті непрозорими сегментами, сигнали відсутні, що відповідає нулям двійкової системи. Тоді у колі приймача струму немає. Зміни положення кодової шкали відносно прорізу на

діафрагмі (або діафрагми відносно шкали) на якусь дискретну величину відповідає нова комбінація прозорих та непрозорих сегментів на кодовій шкалі. У результаті кутове положення круга або діафрагми кодується. Щоб виміряти кут, необхідно зафіксувати два відліки, не встановлюючи початковий відлік на нуль. Формують числовий еквівалент вимірюваної безперервної величини, круга повороту – зчитуванням з фотоелектричних приймачів і опрацюванням одержаних з них сигналів. Зчитування може бути як одночасним, так і почерговим.

Проте такі перетворювачі мають недолік, пов'язаний із невизначеністю зчитування на межі прозорої та непрозорої смужок. Це виникає внаслідок кінцевої ширини променя зчитування. Під час проходження меж сегментів відбувається поступова зміна енергії променевого потоку, що потрапляє на поверхні чутливих елементів всіх розрядів, тобто з'являється інтервал, у якому рівномірні значення одиниці й нуля. Цей інтервал називають зоною невизначеності.

Щоб запобігти цьому, вдаються до «V»-подібного розташування приймачів, як вказано на рисунку 16, або застосовують спеціальні шкали, як, наприклад, шкала Грея (рис. 18).

Коди ґрунтуються на тому, що крок шкали кодової доріжки кожного старшого розряду вдвічі більший порівняно з кроком кодової доріжки попереднього розряду. Непрозорі смужки сусіднього старшого розряду розташовані посередині непрозорої і прозорої смужок доріжки молодшого розряду. Невизначеність зчитування на межі смужок не перевищує одиниці молодшого розряду.

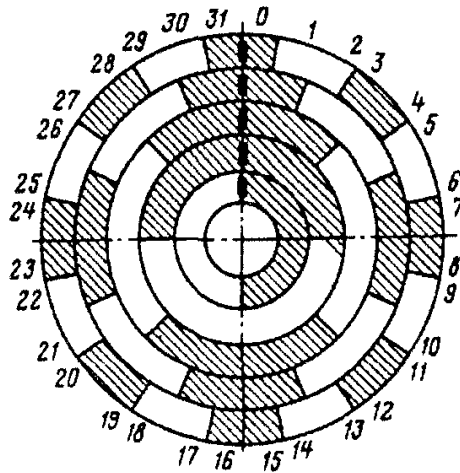


Рис. 18. Колова шкала з кодами Грея

Кругами з кодовою системою облаштовані, наприклад, тахеометри Recota і Reta (обидва Carl Zeiss Jena). Середня квадратична похибка вимірювання кута тахеометром Recota становить 1,6", а Reta – 3,2".

Роздільну здатність фотоелектричних перетворювачів підвищують, застосувавши замість кодових масок растри або растрові спряження. Растр – це доріжка з прозорих та непрозорих роздільно розташованих штрихів однакової ширини, яка нанесена на край круга (на рисунку 19 показано частину растра круга). Прозорий і непрозорий сусідні штрихи є елементом квантування круга, який у кутовому вимірі є центральним кутом цих двох штрихів. Власне зчитувач складається із світлодіода 1, маски 2 і фотодіода 3. На масці нанесено фрагмент растра круга 4, що має 100 елементів квантування. Маска встановлена так, що її растр розташований точно над растром круга. Коли прозорі штрихи маски та круга збігаються, то на фотодіод потрапляє половина випромінювання світлодіода. Якщо прозорі штрихи маски і круга зміщені один відносно одного, на фотодіод потрапляє менша частина випромінювання. Коли непрозорі штрихи круга встановлюються навпроти прозорих штрихів маски, випромінювання на фотодіод не потрапляє.

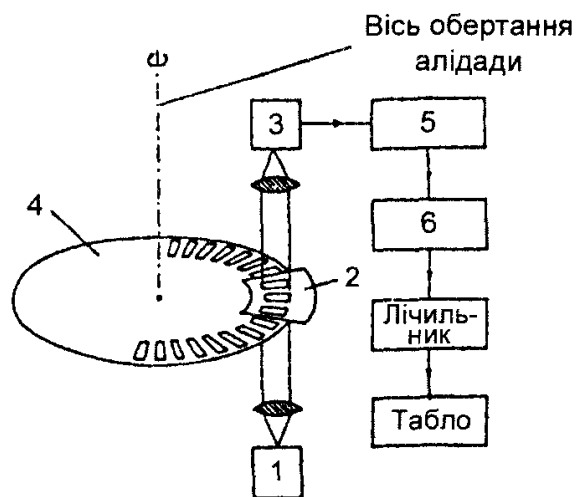


Рис. 19. Схема імпульсної системи відлічування круга: 1 – світлодіод, 2 – маска, 3 – фотодіод, 4 – круг із шкалою у вигляді растра, 5 – підсилювачі; 6 – формувач імпульсів

Під час обертання круга на фотодіод потрапляє випромінювання, що є модульованим практично за гармонійним законом. За тим самим законом змінюється сила струму на виході з світлодіода. Період зміни сили струму відповідає повороту круга на один елемент квантування. Струм з фотодіода підсилюється підсилювачем 5 і подається на формувач імпульсів 6, в якому формуються короточасні імпульси кожного періоду коливань. Кількість імпульсів, а, власне, на скільки елементів квантування повернувся круг, фіксує лічильник. На табло висвітлюється величина виміряного кута в кутових одиницях.

Щоб розрізнити напрямок обертання круга, на нього наносять дві растрові доріжки, зміщені між собою на половину товщини штриха. Зчитувач має два фотодіоди відповідно. У результаті одержують два імпульсні сигнали, зміщені один відносно іншого на чверть круга.

Щоб визначити дробову частку елемента квантування, використовують електронні мікрометри різноманітної конструкції. Наприклад, він може складатися із оптичного клина, на якому нанесено відрізок кодових доріжок, який відповідає, наприклад, 1 граду і має 1000 поділок. Під час точного



наведення зорової труби навідним гвинтом клин також переміщується на віддаль пропорційну дробової частки 1 град. Зображення доріжок, збільшене оптичною системою, проектується на фотодіоди зчитувача. Дешифровані сигнали з фотодіода дають можливість оцінювати дробові частки града.

Імпульсну систему відлічування використовують у сучасних електронних теодолітах, наприклад, Eth3 і Eth4 (Carl Zeiss), ETL1 (Topcon, Японія).

Крім імпульсної, сьогодні застосовують динамічну систему відлічування та визначення кутових величин (рис. 20).

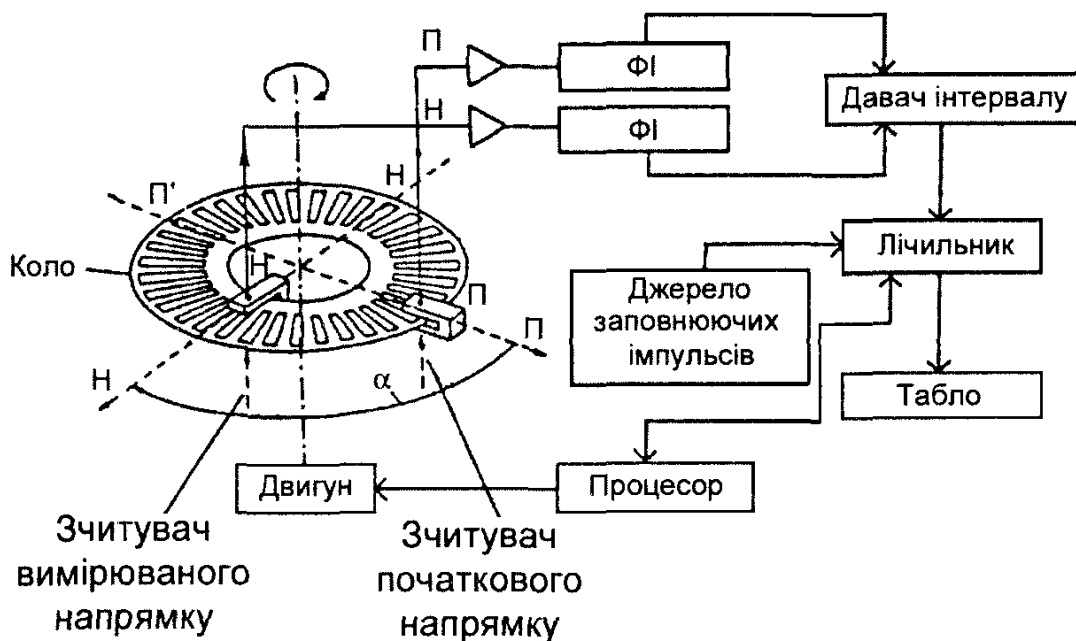


Рис. 20. Схема динамічної системи відлічування та визначення напрямків

Як і для імпульсної, для динамічної системи застосовано поділ круга растровою доріжкою з таким самим елементом квантування. Під час вимірювань двигун рівномірно обертає круг, внаслідок чого на фотодіод зчитувача потрапляє модульоване випромінювання світлодіода. Період модуляції відповідає повороту круга на один елемент квантування. Динамічна система має два зчитувачі: початкового (П-П) і вимірювального (Н-Н) напрямку. Сила струму на виході з кожного фотодіода змінюється з

однаковою частотою згідно із гармонійним законом. Струм з фотодіодів потрапляє на цифровий фазометр, який дає можливість з великою точністю визначити дробову частку квантування різниці початкового і вимірюваного напрямків. Щоб визначити кількість цілих елементів квантування різниці напрямків, на круг додатково наносять мітки. Застосування інтергравального цифрового фазометра дає змогу, наприклад, у теодоліті T2000 (Leica, Швейцарія), вимірювати кути з точністю не менше ніж 1".

## Лекція 14. ЕЛЕКТРОННІ ТЕОДОЛІТИ

Випуск електронних теодолітів почався порівняно недавно – на початку дев'яностих років минулого сторіччя. Першою фірмою, що опанувала випуск нової продукції, була Wild.

Електронному теодоліту притаманні всі ознаки теодоліта як приладу для вимірювання горизонтальних та вертикальних кутів. Конструкції електронних та оптичних теодолітів мають багато спільного. Принаймні механічні вузли електронних теодолітів, а саме: осьові системи, закріпні та навідні пристрої, а також рівні та компенсатори можуть бути конструктивно традиційними або мати деякі відмінності. Разом з тим, електронні теодоліти обладнані автоматизованою системою відлічування кругів під час визначення кутів та напрямків на відміну від своїх попередників – оптичних теодолітів, які мають візуальну систему відлічування. На кругах електронних теодолітів нанесено не традиційні для оптичних теодолітів колові шкали з поділками, а кодові або растрові шкали. Для їхнього відлічування в електронних теодолітах встановлені фотоелектричні пристрої, електронні зчитувачі, процесори, засоби нанесення, опрацювання та передавання інформації, а також її відтворення. В електронних теодолітах кути, зазвичай, вимірюють у гонах (1 гон дорівнює  $1/400$  частці кола).

Зважаючи на вимоги ДСТУ до оптичних приладів, електронні теодоліти за точністю здебільшого можна охарактеризувати як точні та високоточні. На рисунку 21 подано точний електронний теодоліт 2Т5Э (УОМЗ, РФ), сконструйований на базі точного оптичного теодоліта типу 3Т5КП.

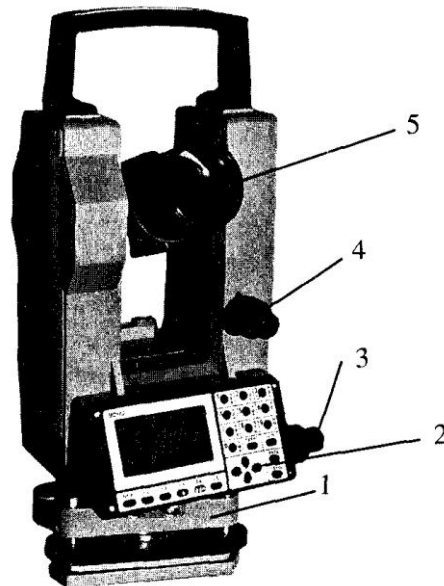


Рис. 21. Точний електронний теодоліт 2Т5Э: 1 – підставки, 2 – дисплейна панель керування, 3 – навідний та закріпний гвинти алідади, 4 – навідний та закріпний гвинти зорової труби, 5 – зорова труба

Конструкція механічних вузлів та спряжень теодоліта 2Т5Э за своїми характеристиками не відрізняється від аналогічного згаданого оптичного теодоліта. Як і 3Т5КП, електронний теодоліт 2Т5Э застосовується для вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів (зенітних віддалей) у теодолітних ходах, розмітки планових і висотних знімальних мереж, геодезичних мереж згущення, виконання вишукувальних та інженерно-геодезичних робіт тощо. Результати вимірювань можна заносити до внутрішньої пам'яті і передавати до персонального комп'ютера через інтерфейс RS-232С. Деякі технічні дані 2Т5Э наведено в таблиці 2.

Табл. 2

Технічна характеристика теодоліта 2Т5Э

Середня квадратична похибка вимірювання одним прийомом:	
горизонтального кута	5"(1,5м гон)
вертикального кута	5"(1,5м гон)

Діапазон вимірів:	
зенітної віддалі	Від 45° до 135° (+50...150гон)
вертикального кута	Від +45° до -45° (+50...-50гон)
Збільшення зорової труби, крат	30 <sup>×</sup>
Межа роздільної здатності	3,24"
Кут поля зору	1°30'
Межі візування	Від 1,5м до ∞
Джерело живлення:	
напруга, В	Від 6,5 до 8,56
ємність	1,6 А год
час заряджання	1,5 год
Межі робочих температур	-20°С до +50°С
Маса (із джерелом живлення)	4,5 кг

Електронні теодоліти такого ж класу точності випускають відомі у світі фірми, наприклад, ДТ 102 (Торсон, Японія), Eth 50 (Trimble-Zeiss), Leica, Kern та інші. У таблиці 3 з метою порівняння наведено технічні дані теодолітів Eth50 і ДТ 102.

Табл. 3

Технічна характеристика теодолітів Eth50 і ДТ 102

	Eth 50	ДТ 102
1	2	3
Середня квадратична похибка вимірювання горизонтального та вертикального кута одним прийомом	2,0мгон/6"	1,5мгон/5"
Збільшення зорової труби, крат	26 <sup>×</sup>	30 <sup>×</sup>
Світловий діаметр об'єктива, мм	40	45
Довжина зорової труби, мм	195	145
Межа роздільної здатності	-	2,5"

1	2	3
Найменша віддаль візування, м	0,8	0,9
Межі дії компенсатора вертикальної осі	-	±3'
Панель дисплея	Одностороння	Одностороння
Рівні, точність:		
рівень аліади горизонтального круга	30"	40"
сферичний рівень	10'	10'
рівень зорової труби	30"	-
Джерело живлення:		
тип	НІН акумулятор	Сухі батареї
ємність	1 А год	
напруга	6 В	6 В
Час безперервної роботи, год	25	24
Маса (з джерелом живлення), кг	3,5	4,1



Рис. 22. Точний електронний теодоліт Eth 50

За характеристикою фірми-виробника теодоліт Eth 50 є надійним, простим та зручним приладом і рекомендований для виконання інженерно-геодезичних робіт, зокрема, у будівництві.

Він устаткований електронним відлічуванням кругів з безперервною цифровою індикацією на чотирирядковому дисплеї. Керування всіма вимірювальними функціями виконують сімома кнопками. Похибка нахилу осі обертання зорової труби, колімаційна похибка компенсуються автоматично. Так само автоматично приводиться місце нуля вертикального круга до нуля. У накопичувачі пам'яті теодоліта закладено програми для переведення вертикальних кутів до значень кутів нахилу у відсотках і навпаки, встановлення початкового (нульового) горизонтального напрямку, розмічування прямих кутів, виконання операцій центрування та провішування. Крім того, є можливість задавати напрямки під час кутових вимірювань, вибирати точність відлічування і нульовий напрямок під час вимірювання вертикальних кутів. У разі необхідності за допомогою Eth 50 можна виконувати нескладні роботи з нівелювання, для чого він може бути обладнаний рівнем на зоровій трубі.

Теодоліт ДТ 102, як і Eth 50, облаштований двохсторонньою динамічною системою відліку горизонтального круга, має два однакові пульти керування, розташовані з діаметрально протилежних боків горизонтального круга, а також рідинний компенсатор вертикальної осі. За програмним забезпеченням він не поступається теодоліту Eth 50. Фірма-виробник, як одну з переваг ДТ 102, виділяє його вологостійкість.

Електронні теодоліти серії 100 (T105, T110), як новітню серію теодолітів такого класу, пропонує фірма Leica. Середня квадратична похибка вимірювання кутів, наприклад, теодолітом T105, становить 5". Прилади обладнані електронними компенсаторами прямоковисності вертикальної осі, а також компенсаторами вертикального круга. Фірма рекомендує теодоліти серії 100 як прості, зручні та надійні в експлуатації. Для потреб будівництва ця сама фірма випускає теодоліти серії BUILDER T100 і T200, які мають середню квадратичну похибку вимірювання 9" і 6" відповідно.

Високоточні електронні теодоліти однією з перших розпочала виготовляти вже згадувана фірма Wild. На рисунку 23 зображено електронний теодоліт фірми Wild T2000S з серії T2000.

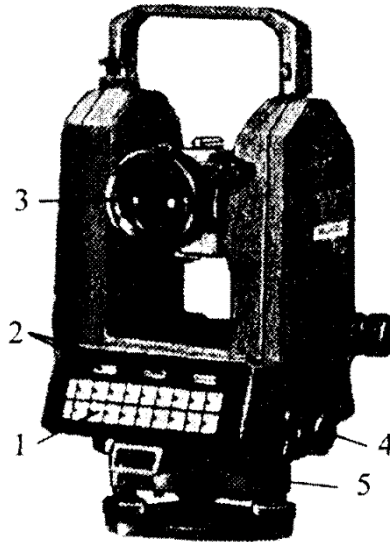


Рис. 23. Високоточний теодоліт T2000S: 1 – дисплейна панель керування, 2 – табло результатів вимірювань, 3 – зорова труба, 4 – навідний та закріпний гвинти алідади горизонтального круга, 5 – підставка

Зорова труба теодоліта, що має світловий діаметр об'єктива 52 мм, а збільшення  $43\times$  (може бути  $26\times$ ,  $35\times$ ,  $59\times$ ), будує пряме зображення візирної цілі. У теодоліті передбачено два режими вимірювання кутів: традиційний з наведенням на нерухомі цілі (середня квадратична похибка вимірювання кута одним прийомом  $0,5''$  без урахування атмосферних впливів) та режим відстеження для наведення приладу на рухомі цілі. Діапазон робочої температури від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Теодоліт обладнано компенсатором вертикального круга. У відліки горизонтального круга автоматично вводять поправки за ексцентриситет алідади, колімаційну похибку та за нахил осі обертання зорової труби. Відлічувати можна як у градусній мірі, так і в гонах. На теодоліті встановлено дисплейну панель керування, до якої під'єднують реєстратор. На екран дисплея можна вивести значення виміряних горизонтальних кутів та зенітних віддалей. У пам'ять реєстратора



можна ввести результати вимірювань, час спостережень, номер пункту, який спостерігається, його координати та позначку, віддалі до пунктів. Опрацювання результатів та врівноваження вимірювань виконує комп'ютер, до якого під'єднують реєстратор. Теодоліт має індивідуальне живлення від батарей. Без підзаряджання батарей за допомогою теодоліта можна виконати 1500 кутових вимірювань. Сам прилад із джерелом живлення важить 10,5 кг.

Подальшим вдосконаленням високоточних електронних теодолітів стало обладнання їх двома однаковими пультами керування, розташованими на діаметрально протилежних ділянках горизонтального круга. В один із пультів керування вставляють заміну електронну дискету для записування результатів вимірювань. Останні моделі високоточних теодолітів фірм Leica, Trimble-Zeiss, Topcon, Sokkia облаштовані рідинними компенсаторами нахилу вертикальної осі теодоліта здебільшого у межах  $\pm 3'$ . Вертикальну вісь приладу встановлюють приблизно прямовисною за допомогою сферичного та циліндричного рівнів, а для точного більш встановлення ( $0,1 \dots 0,3''$ ) користуються показами рідинного компенсатора. У сучасних електронних теодолітах зазвичай застосовують двохсторонню динамічну систему визначення (відлічування) напрямків.

У теодоліті T3000 фірми Leica використана панфокальна зорова труба. Із зменшенням віддалі до цілі у зоровій трубці збільшується поле зору, зокрема із зменшенням віддалі до цілі від нескінченності до мінімальної віддалі візування – 0,6 м, кут поля зору збільшується від  $1^{\circ}10'$  до  $3^{\circ}47'$ . У програмному забезпеченні приладу передбачена можливість багаторазового вимірювання круга (до дев'яти прийомів), усереднення результатів вимірювання, обчислення середньої квадратичної похибки вимірювання кута, занесення результатів вимірювань та обчислень до пам'яті носія інформації. У разі необхідності інформація відтворюється на екрані дисплея. Теодоліт обладнаний пристроєм для примусового центрування.

Високоточний електронний теодоліт Eth 2 (Trimble-Zeiss) (рис. 24) призначений для вимірювання кутів у триангуляції, виконання геодезичних

вимірювань деформацій промислових споруд та обладнання. Деякі технічні дані приладу подано у таблиці 4.

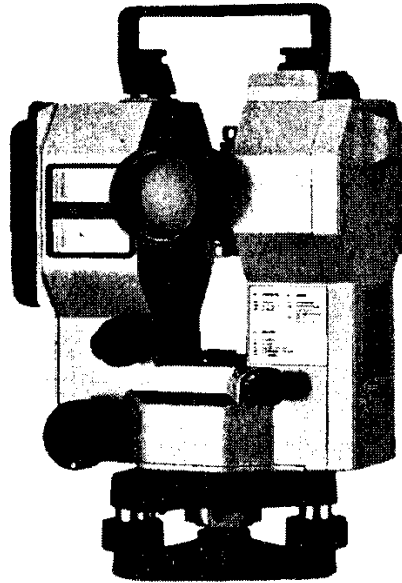


Рис. 24. Високоточний електронний теодоліт Eth 2

Табл. 4

Технічна характеристика теодоліта Eth 2

Середня квадратична похибка вимірювання горизонтального та вертикального кута одним прийомом	0,2мгон/0,5"
Збільшення зорової труби, крат	30×
Світловий діаметр об'єктива, мм	45
Довжина зорової труби, мм	170
Найменша віддаль візування, м	1,0
Межі дії компенсатора вертикальної осі	±3'
Панель дисплея	Двостороння
Рівні, точність:	
рівень аліади горизонтального круга	30"
сферичний рівень	10'
Джерело живлення:	
тип	NiCd батарея
ємність	1,8 А год
напруга	4,8 В
Час безперервної роботи, год	8,0
Маса (з джерелом живлення), кг	4,7

Фірма-виробник підкреслює якості теодоліта Eth 2, які є в цілому характерними для приладів такого класу. У приладі має місце діаметрально протилежне двостороннє розташування системи відлічування кругів, облаштування теодоліта двоосьовим компенсатором встановлення вертикальної осі, автоматичне компенсування похибок осі обертання зорової труби, колімаційної похибки та приведення місця зеніта, наявність вбудованого інтерфейсу для зберігання результатів вимірювань та опрацювання їх.

Комбінація теодоліта Eth 2 з віддалеміром Eldi 10 (Trimble-Zeiss) дає змогу виконувати кутові та лінійні вимірювання, використовуючи наявні програми для електронних тахеометрів. Комбінація двох електронних теодолітів Eth 2, об'єднаних в одну систему спільним комп'ютером, монітором та іншим устаткуванням, дає змогу здійснювати високоточні інженерно-геодезичні вимірювання під час встановлення, монтажу та складання великогабаритного обладнання та машин, наприклад, у літако- та суднобудуванні, ракетобудуванні, монтажі обладнання прискорювачів електронних частинок, антен радіотелескопів тощо.

Необхідно зауважити, що дві останні з перерахованих якостей теодоліта Eth 2 притаманні також іншим сучасним високоточним електронним теодолітам, які випускають фірми Leica, Sokkia та інші. Для виконання високоточних інженерно-геодезичних вимірювань теодоліти встановлюють на невеликій віддалі між собою на жорстко закріплених пунктах, планові координати та висоти яких відомі. Необхідне примусове центрування теодолітів на пунктах, точність вимірювання кутів яких має бути не нижчою від 0,6".

Деякі сучасні моделі високоточних теодолітів таких як, наприклад, ТМ 3000 фірми Leica облаштовані автоматизованою системою наведення зорової труби на ціль, причому технічні характеристики названої моделі залишилися такими самими, як і у базової Т 3000. Зорова труба теодоліта ТМ 3000 за допомогою серводвигунів автоматично орієнтується у заданому напрямку. В

пам'ять теодоліта вводять значення потрібних горизонтального і вертикального кутів. Вони слугують вихідними даними для обчислення кута нахилу зорової труби та кута, на який потрібно повернути алідаду. Серводвигуни з швидкістю  $50^\circ$  на секунду обертають на обчислені кути одночасно алідаду і зорову трубу. Під час винесення проекту в натуру після встановлення приладу над вихідним пунктом і приведення його в робоче положення наводять зорову трубу на початковий напрямок, вводять у пам'ять заданий напрямок і натискають відповідну клавішу пульта керування. Під час вимірювання кутів способом кругових прийомів у першому напівприйомі наводять трубу на всі пункти, які спостерігають, і вводять у пам'ять значення вимірюваних кутів. Після переведення зорової труби через зеніт, у другому напівприйомі серводвигуни почергово грубо наводять теодоліт на відповідні цілі. Точне наведення виконує спостерігач. Відлічування, введення у пам'ять результатів вимірювань, а також їхнє виведення на дисплей виконується автоматично.

Необхідно зауважити, що ТМ 3000 не є єдиним теодолітом, який облаштований автоматизованою системою наведення. Фірма Leica виготовляє також інші теодоліти такі як ТМ 1100, ТМ 1800, що обладнані такими ж системами. Загалом літера М у назві теодоліта означає, що він «моторизований», тобто обладнаний автоматизованою системою наведення.

Деякі останні моделі високоточних електронних теодолітів фірми Leica із самонаведенням є відеотеодолітами, наприклад ТМ 3000 V. У трубі теодоліта розміщена малогабаритна відеокамера і оптична система, що проектує зображення предметів, які є у полі зору, на матрицю світлочутливих елементів відеокамери розмірами 8,8 x 6,6 мм. Зображення предметів, що є у полі зору оптичної системи, скануються і після відповідних перетворень створюється цифрова модель зображення поля зору оптичної системи. ЕОМ теодоліта аналізує цю модель, виділяє ціль, на яку має бути наведена зорова труба, і визначає її координати відносно центра матриці. За цими

координатами визначають кути, на які треба повернути алідаду і трубу, і серводвигуни наводять теодоліт на ціль.

У таблиці 5 наведено деякі технічні дані теодоліта ТМ 3000 V.

Табл. 5

Технічна характеристика теодоліта ТМ 3000 V

Середня квадратична похибка вимірювання горизонтального та вертикального кута одним прийомом (звичайним наведенням)	0,15 mgon; 0,5"
автоматизованим наведенням	0,15 mgon; 0,5"
Швидкість автоматизованого наведення	50° за секунду
Межі дії двоосьового рідинного компенсатора нахилу вертикальної осі	0,055 mgon; 3'
Похибки встановлення осі обертання теодоліта прямовисно	0,1"
Збільшення зорової труби, крат	43×
Світловий діаметер об'єктива, мм	52
Найменша віддаль візування, м	1,5
Розміри матриці світлочутливих елементів відеокамери:	
мм	6,6 x 8,8
пікселі	500, x 582
Маса, кг	12,5

Треба зауважити, що більшість технічних даних теодоліта ТМ 3000 V притаманна теодолітам серії Т 3000.

## Лекція 15. ГЕОДЕЗИЧНІ ДОДАТКОВІ ПРИСТРОЇ

### Гіроскопічне обладнання

Гіроскопічне обладнання призначено для контролю напрямку в гірській промисловості і при будівництві тунелів. Основа роботи з гіроскопом – орієнтування географічної півночі. За допомогою гіроскопічної насадки GYROMAX™ можна визначити азимут протягом 15 хвилин. Управління може здійснюватися за допомогою блоку дистанційного керування, при цьому передача даних на комп'ютер або реєструючий пристрій забезпечується за допомогою кабелю або Bluetooth.

Гіроскопічна насадка Gyromax АК-2М в комплекті з електронним тахеометром є багатофункціональним інструментом і може використовуватися в підземному будівництві – у тунелях метрополітену, гідротехнічних і транспортних тунелях. Gyromax АК-2М (рис. 25) дає можливість визначити дирекційний кут в підземних умовах, де супутникові методи GPS неможливо застосувати.



Рис. 25. Гіроскопічна насадка Gyromax АК-2М.

**Системи автоматичного нівелювання Leica PowerGrade** для грейдерів і бульдозерів (рис. 26) – це програмно-апаратний комплекс, що використовує геодезичні автоматизовані технології тахеометрії і GPS технології, а також різні типи датчиків для забезпечення часткової автоматизації виконання робіт. Тобто, це набір додаткових датчиків, гідравліки та елементів контролю та управління, що забезпечує установку робочих елементів машини в просторі так, як цього вимагає завдання або проект.



Рис. 26. Програмно-апаратний комплекс Leica PowerGrade для грейдерів і бульдозерів

Залежно від розв’язування завдань існує три основні різновиди рішень: 1D система Leica PowerBlade – автоматична робота в одній площині (просто витримування певного рівня або ухилу робочого елемента), 2D система Leica PowerGrade 2D – робота в похилій площині (установка перевищення та ухилу, робота в площині з подвійним ухилом) і 3D система Leica PowerGrade 3D – автоматична установка перевищення та ухил з урахуванням положення і напрямку руху машини.

Leica PowerGrade володіє максимальною для свого сегменту гнучкістю конфігурації, тобто може працювати в різних режимах (1D, 2D, 3D),

використовуючи різні комбінації датчиків (лазерні приймачі, у/з датчики, датчики ухилу, датчики зсуву і повороту), тим самим забезпечуючи саме той режим робіт, який є оптимальний для виконавця, крім цього сумісна з широким спектром іншого обладнання.

Однією з унікальних особливостей системи PowerGrade від Leica Geosystems є функція автоматичного бокового зміщення. У цьому випадку положення леза щодо базової лінії (струни, бордюру) встановлюється автоматично під час руху, використовуючи при цьому свої власні датчики з технологією TriSonic, що дозволяють максимально точно орієнтуватися на опорний об'єкт. Звідси ж – зменшення втоми оператора, спрощення точності. Використання 3D датчиків (GPS і відбивачів з роботизованим тахеометром) дозволяє з максимальною точністю і в реальному часі встановлювати бічний зсув відвала навіть при поворотах (рис. 27) (тобто при роботі з непрямолінійними ділянками).

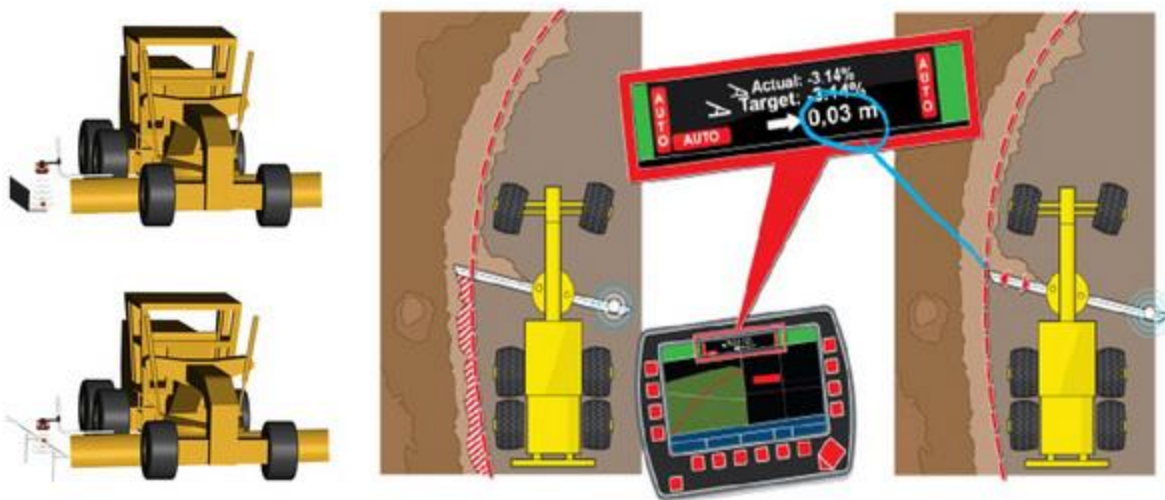


Рис. 27. Програмно-апаратний комплекс Leica PowerGrade для грейдерів і бульдозерів на повороті

Переваги, які можна отримати завдяки використанню системи Leica PowerGrade, наступні:



- виключення переробок. Всі роботи виконуються точно і з першого проходу. Звідси: мінімізація геодезичного забезпечення, виключення перевірок після кожного проходу;
- підвищення рентабельності за рахунок економії матеріалів. Точне виконання вирівнювання виключає необхідність перевитрат матеріалів покриття в подальшому для досягнення потрібного результату;
- автоматичне управління робочим елементом значно скорочує помилки через людський фактор і знижує втому оператора;
- економія часу на майданчику. Там, де раніше йшов час на прохід, геодезичну перевірку, повторний прохід і повторну перевірку, все виконується з першого разу, тобто за мінімально можливий часовий проміжок;
- економія палива. Один з найважливіших факторів, який впливає з мінімізації роботи даної техніки на ділянці;
- поліпшення якості і точності оцінки поверхні безпосередньо забезпечує загальну якість майбутнього елемента інфраструктури (дороги, залізничної смуги і т.п. ).

### **Програмно-апаратний комплекс Power Digger для екскаваторів**

Система загалом являє собою набір датчиків (рис. 28), розташованих на кожній рухомій частині екскаватора (датчики положення секції стріли, положення ковша, а також датчик положення корпусу екскаватора) і контролера, які спільно обробляють дані від всіх датчиків і графічно зображують поточний стан роботи. Також система може оснащуватися додатковими датчиками (локаційним – для виявлення комунікацій і додатковим датчиком ухилу, якщо ківш може працювати в режимі подвійного ухилу).

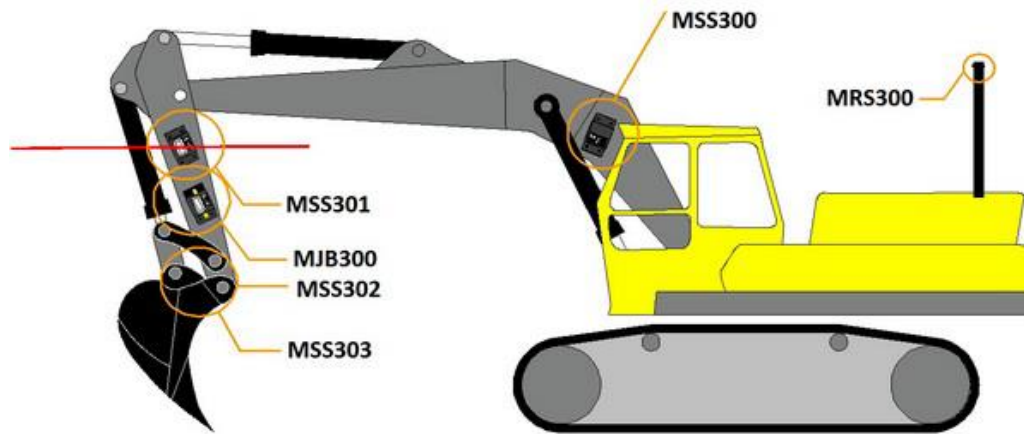


Рис. 28. Програмно-апаратний комплекс PowerDigger для екскаваторів

**Датчики базової системи.** Кутовий датчик MSS300 використовується як датчик стріли, рукояті або ковша. Зазвичай він використовується тільки як датчик стріли. Кутовий датчик MSS301 з лазерним приймачем є комбінованим – він з лазерним датчиком і датчиком кута стріли. Цей датчик є компактним і просто встановлюється в будь-якому місці. Інший датчик MSS302 360° встановлюється на ковші. Його робочий діапазон дорівнює 360°. Малі розміри дозволяють встановити його в захищеному місці, щоб запобігти пошкодженню датчика і кабелю.

**Система датчиків.** В основі роботи датчиків системи PowerDigger лежить принцип гравітації. Технологія та програмне забезпечення датчиків були розроблені і введені в дію в 1996. З тих пір датчики удосконалювалися і зараз на ринку представлені найбільш точні і чутливі рішення. Відзначимо їх надійність і те, що всі датчики і кабелі вологозахищені. Вони допускають занурення у воду на глибину до 20 м, таким чином немає необхідності в дорогому спеціальному обладнанні для облаштування донних екскаваторів. Завдяки використанню локальної мережі контролерів (CAN шини) встановлення і налаштування системи датчиків відбувається досить швидко. Всі датчики поставляються зі спеціальними пластинами з простим кріпленням для швидкої установки. Звичайний час установки і калібрування для базових систем становить менше трьох годин.

### **Додатки в залежності від типу рішення:**

- 1D системою можна вирішувати стандартні завдання (влаштування траншей, базові земляні роботи, просте вирівнювання);
- 2D система надає можливість виконання більш розширених завдань (режим вирівнювання для бульдозера/грейдера, робота з комплексними профілями, робота під водою і т.д.);
- 3D система передбачає вирішення всіх просунутих завдань, включаючи комплексне вирівнювання, ландшафтний дизайн, робота на непідготовлених поверхнях і т.д.

### **Основні переваги системи Power Digger:**

- вона становлюється на будь який екскаватор;
- максимально оптимізує земляні розкопачні роботи (мінімізує надлишкові і недостатні роботи);
- мінімізується кількість персоналу (потрібен тільки один оператор);
- знижуються витрати на винос проектів в натуру;
- підвищується продуктивність;
- максимальна точність – 1 см;
- простота у використанні;
- високий ступінь захищеності (IP68) при роботі в бруді і під водою.

**Шукач підземних комунікацій** (рис. 29) – це прилад для визначення планового і висотного положення підземних комунікацій, який ґрунтується на принципі індукції (низько- та високочастотної, вихрової), аномалометрії та акустики.



Рис. 29. Шукач підземних комунікацій

Під землею, як правило, зосереджена велика кількість різноманітних підземних комунікацій. Отримання точної інформації про їх становище абсолютно необхідне до початку виїмки ґрунту. Виробник робіт цілком і повністю несе відповідальність за пошкодження комунікацій.

При пасивному (спосіб наведених струмів) способі за допомогою трубокабелешукачів виявляється змінне магнітне поле, що існує навколо струмонесущих кабелів. Виявляються електрокабелі і металеві труби неглибокого закладення. Особливо це важливо на забудованих територіях де можливі багато блукаючих струмів.

При активному способі відшукування навколо підземних комунікацій створюється штучне магнітне поле. Для цього крім трубокабелешукачів необхідний генератор електромагнітного поля звукової частоти.

Вимірюючи аномалію електромагнітного поля, можна визначити місце розташування підземної пустоти, трубопроводу, каналу і т.ін. Похибка визначення планового та висотного положення і глибини для різних модифікацій приладу становить від 0,1 до 0,3 м. Застосовуючи цей метод, створені також інші прилади, якими можна аналізувати профіль місцевості з підземними комунікаціями, записувати їх у пам'яті комп'ютера та видавати профіль на дисплей або плотер.

## Безпілотні літаючі апарати:

**1. Безпілотні аерофотознімальні вертольоти Aibotix X6 (рис. 30)** представляють собою нове покоління літаючих роботизованих вимірників для широкого спектру завдань (від індустріальної інспекції до завдань повітряного картографування).



Рис. 30. Безпілотні аерофотознімальні вертольоти Aibox X6

Поєднання надійного дизайну, сучасних мультироторних технологій, роботизованості, простоти використання і широкого ряду додаткових датчиків використання Aibotix X6 дозволяє виконання різного роду завдань, серед яких можна виділити такі, як:

- індустріальна інспекція – інспекція високовольтних силових ліній, запрограмований шлях польоту для безпечного моніторингу або детектування місця перегріву сонячних акумуляторних панелей, що надає неперевершений рівень безпеки в поєднанні з балансом продуктивності;
- картографування – завдяки найсучаснішим технологіям у сфері безпілотної техніки можливо в найкоротші терміни здійснювати знімання, обробку і отримання ортофотопланів, моделей поверхонь або 3D моделей без попередніх навичок польотів;
- фотограмметрія для цілей знімання, розвідки або реагування на надзвичайні ситуації з необхідною перспективою і якістю.

**2.Аерофотознімальний комплекс GeoScan 101** (рис. 31) призначений для оперативного отримання ортофотопланів, матриць висот і 3D-моделей місцевості та окремих об'єктів. Комплексна технологія призначена для разового або періодичного моніторингу об'єктів великої площі або протяжності (трубопроводи, кар'єри, відвали, будівельні майданчики).



Рис. 31. Аерофотознімальний комплекс GeoScan 101

## Лекція 16. ЦИФРОВІ ТА ЛАЗЕРНІ НІВЕЛІРИ

Цифрові (електронні) нівеліри є новим поколінням приладів для вимірювання перевищень (визначення висот точок). Наявність в конструкції приладів електронних датчиків дає змогу в автоматичному режимі відлічувати рейки зі штриховим кодом, контролювати результати вимірювань, опрацювати їх вмонтованою у прилад ЕОМ і зберігати у накопичувачі.

Для автоматичного відлічування штрих-кової рейки достатньо її тридцятисантиметрового відрізка по 15 см згори і знизу від лінії візування. На одне вимірювання витрачають від трьох до дев'яти секунд. Багаторазові вимірювання усереднюються автоматично. Цифровими нівелірами вимірюють перевищення і довжини плечей нівелювання. Програмне забезпечення цифрових нівелірів дає змогу одразу після наведення приладу на рейки одержати перевищення та відмітки точок нівелювання. Повторні вимірювання практично виключаються внаслідок автоматичного визначення похибок і введення поправок. Програмним забезпеченням деяких сучасних цифрових нівелірів передбачено врівноваження вимірювань. Загалом цифрові нівеліри дають можливість повернутися до перерваних вимірювань. Панелі керування приладів слугують також для алфавітно-цифрового введення номерів та кодів точок і різновидів додаткової інформації. Результати вимірювань та їхнього опрацювання можуть бути занесені до карт пам'яті або до внутрішньої пам'яті приладу. Цифрові нівеліри зазвичай споряджені компенсаторами нахилу.

Разом із автоматичним режимом цифровими нівелірами можна виконувати візуальне нівелювання як оптичними нівелірами, застосовуючи рейки із традиційними шкалами, звичайно, з меншою точністю. Вважають, що використання цифрових нівелірів підвищує продуктивність виконуваних робіт на 50%. За мінімального часу одного вимірювання ємності батарей деяких нівелірів може вистачити на три дні.

Цифрові нівеліри виготовляються провідними фірмами світу такими як Trimble-Zeiss – DiNi 10, DiNi 11, DiNi 11T, DiNi 12, DiNi 12T, DiNi 20, DiNi 21, DiNi 22; Leica – NA 2002, NA 3003; DNA 10, DNA 03; Sprinter 100 (100M); Sprinter 200 (200M); Sokkia – SDL 30 та іншими. За точністю цифрові нівеліри можна характеризувати як високоточні та точні. У таблиці 6 наведено деякі технічні дані високоточних цифрових нівелірів DiNi 12 і DNA 03.

Табл. 6

Технічна характеристика високоточних цифрових нівелірів DiNi 12 і DNA 03

	DiNi 12	DNA 03
1	2	3
Середня квадратична похибка визначення перевищення на 1 км подвійного ходу, мм		
Електронні вимірювання:		
відлічуванням інварної кодової рейки	0,3	0,3
відлічуванням складаної кодової рейки	1,0	1,0
Візуальне відлічування складаної рейки	1,5	2,0
Віддаль нівелювання, м:		
Електронні вимірювання:		
інварна кодова рейка	1,5...100	1,8...110
складана кодова рейка	1,5...100	1,8...110
візуальне відлічування	від 1,3	від 0,6
Точність вимірювання віддалей:		
Довжин плечей нівелювання, мм:		
інварна кодова рейка	20	3...5 мм на 10 м
складана кодова рейка	20	



1	2	3
Точність відлічування електронного вимірювання, мм:		
перевищень	0,01	0,01
довжин плечей нівелювання	1,0	1,0
Час електронного відлічування рейки, с	3	3
Збільшення зорової труби, крат	32 <sup>×</sup>	24 <sup>×</sup>
Світловий діаметр об'єктива, мм	40	36
Поле зору на 100 м (кут поля зору), м	2,2	3,5
Діапазон дії компенсатора	15'	10'
Похибка приведення лінії візування у горизонтальний стан	0,2"	0,2"
Ціна поділки вставного (сферичного рівня)	10'	8'
Горизонтальний круг:		
ціна поділки	1гон/1°	1гон/1°
точність відлічування	0,1гон/0,1°	0,1гон/0,1°
Маса, кг	2,8	2,5

Очевидно, що сучасні високоточні цифрові нівеліри різних фірм, наприклад, DiNi 12 (рис. 32) і DNA 03 (рис. 33) за своїми технічними можливостями незначно поступаються один одному.



Рис. 32. Високоточний нівелір DiNi 12



Рис. 33. Високоточний нівелір DNA 03

Нівелір DiNi 12 є дещо модифікованою моделлю нівеліра DiNi 10 (DiNi 11) і практично збігається з ним за технічними даними.

Високоточні цифрові нівеліри DiNi 12 (DiNi 10, DiNi 11) і DNA 03 слугують для нівелювання I і II класу, а також для прецизійних інженерно-геодезичних вимірювань. Крім стандартних для цифрових нівелірів режимів роботи програмне забезпечення нівелірів DiNi 12 і DiNi 12T передбачає можливість зрівноваження результатів вимірювань. Нівелір DiNi 12T (DiNi 11T) від цифрових нівелірів такого ж класу відрізняється тим, що ним можна визначати координати точок нівелювання, тобто працювати в режимі тахеометра. Коли DiNi 12T працює як тахеометр, точність вимірювання ним віддалей у разі застосування інварної кодової рейки становить  $0,5D \times 0,01$  м, а складної кодової –  $1,0D \times 0,01$  м ( $D$  – віддаль від нівеліра до рейки). Час фіксування кутового вимірювання – 0,3 секунди.

Відмінною рисою приладів DiNi 10, DiNi 11, DiNi 11T, DiNi 12, DiNi 12T є можливість запису результатів вимірювань та опрацювання їх у карті пам'яті PCMCIA ємністю від 256 KB до 8 MB.

Цифрові нівеліри DiNi 20, DiNi 22, NA 2002, DNA 10, SDL 30 за стандартами оптичних нівелірів можна характеризувати як точні. Деякі технічні дані нівелірів DiNi 22, DNA 2002 та SDL 30 наведено у табл. 7.

Табл. 7

Технічна характеристика цифрових  
нівелірів DiNi 22, DNA 10 та SDL 30

	DiNi 22	DNA 10	SDL 30
1	2	3	4
Середня квадратична похибка визначення перевищення на 1 км подвійного ходу, мм			
Електронні вимірювання:			
відлічуванням інварної кодової рейки	0,7	0,9	
відлічуванням фібергласової кодової рейки			1,0
відлічуванням складної кодової рейки	1,3	1,5	
Візуальне відлічування складної рейки	2,0	2,0	1,0
Віддаль нівелювання, м:			
інварна кодова рейка	1,5...100	1,8...110	
фібергласова кодова рейка			1,6...100
складна кодова рейка	1,5...100	1,8...110	
Візуальне відлічування, м	від 1,3	від 0,6	від 1,5
Точність вимірювання віддалей:			
Довжин плечей нівелювання, мм:			
інварна кодова рейка	25	3...5 мм на 10 м	
фібергласова кодова рейка			До 10 м 10 мм 10...50 м 1% D >50 м 0,2% D
складна кодова рейка	30		
Точність відлічування електронного вимірювання, мм:			
перевищень	0,1	0,1	0,1

довжин плечей нівелювання	1,0	1,0	1,0
Час електронного відлічування рейки, с	2	3	3
Збільшення зорової труби, крат	26 <sup>x</sup>	24 <sup>x</sup>	32 <sup>x</sup>
Світловий діаметр об'єктива, мм	40	36	45
Поле зору на 100 м (кут поля зору), м	2,2	3,5	1°20'
Діапазон дії компенсатора	15'	10'	15'
Похибка приведення лінії візування у горизонтальний стан	0,5"	0,8"	0,5"
Ціна поділки встановного (сферичного) рівня	10'	8'	10'
Горизонтальний круг:			
ціна поділки	1гон/1°	1гон/1°	1°
точність відлічування	0,1гон/0,1°	0,1гон/0,1°	0,1°
Маса, кг	2,8	2,5	2,4

Точні цифрові нівеліри, деякі технічні дані яких наведено у табл. 7, як і високоточні, за основними показниками неістотно відрізняються один від одного. Проте, звичайно, кожна з моделей має певні відмінності. Зокрема, в DiNi 22 є можливість записування даних у внутрішню пам'ять приладу, що має ємність у 2200 рядків, якої достатньо для розв'язання різноманітних задач.

Комплект нівеліра SDL 30, який також має внутрішню пам'ять, обладнано фібергласовою рейкою, що відчутно не позначилося на точності вимірювань.

За висновками фірми-виробника надійність та точність вимірювань не погіршується за несприятливих умов нівелювання, а саме нерівномірного освітлення, руху шарів повітря, вібрації. Компенсатор нівеліра, який має магнітний демпфер, стійкий до ударів. Нівелір виконано у водостійкому варіанті. Програмне забезпечення нівеліра SDL 30 здебільшого збігається із забезпеченням двох згаданих разом з ним моделей.

Лазерні нівеліри дещо умовно можна поділити на наступні види. Перший з них – це власне традиційні оптичні нівеліри з лазерними насадками. У другому виді лазер і зорова труба розташовані в одному корпусі. Вісь лазерного випромінювання паралельна до візирної осі зорової труби, але не суміщена з нею. Паралельне розташування візирної осі та осі лазерного випромінювання є істотним недоліком конструкції нівеліра цього виду. Паралельність двох згаданих осей доводиться контролювати під час вимірювань і вводити поправки у їхні результати. Це є додатковим джерелом похибок.

У третьому виді приладів – колімаційного типу цей основний недолік попереднього виду нівеліра подолано. На рисунку 34 подано принципову схему лазерного нівеліра колімаційного типу.

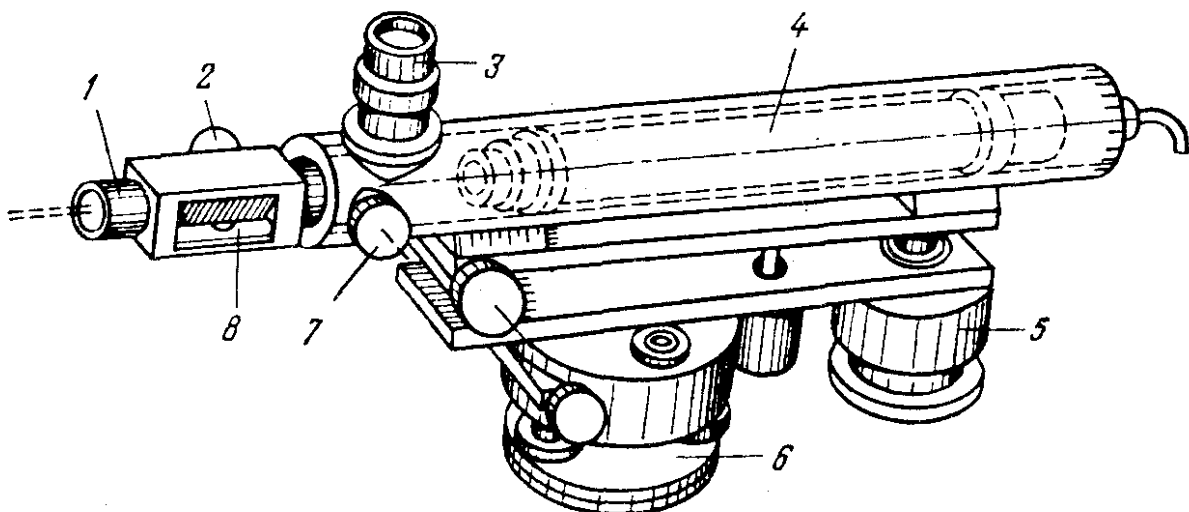


Рис. 34. Принципова схема лазерного нівеліра колімаційного типу:

1 – об'єктив коліматора, 2 – гвинт фокусувального пристрою, 3 – окуляр,  
4 – лазер, 5 – елеваційний пристрій, 6 – підставка з підймальними гвинтами,  
7 – гвинт пристрою відхилення променя, 8 – циліндричний рівень

Для наведення приладу на візирну ціль в оптичний канал гвинтом 7 вводять пристрій відхилення променя, який передає зображення цілі у поле зору окуляра. Після наведення на ціль пристрій відхилення променя виводять з оптичного каналу і промінь лазера скеровується об'єктивом 1 на візирну ціль. Для виведення лазера у горизонтальний стан слугує рівень 8. Прилад з

достатньою мобільністю задає як візуальний, так і лазерний опорний промінь. Для скерування променя лазера у різних напрямках його облаштовують різноманітними насадками.

Для інженерно-геодезичних вимірювань, зокрема у будівництві, широко застосовують лазерні нівеліри, в яких дзеркальні або призмові сканувальні системи розгортають лазерний промінь у площину. Часто для цього використовують пентапризму, що обертається. Спроби створити багатофункціональний прилад, яким одночасно можна контролювати прямолінійність, а також відхилення від площини та прямовисності, привели до появи приладу ЛАГ (СРСР), принципову схему якого подано на рисунку 35.

Блок-схема його містить лазерний випромінювач, оптичну систему, пристрій розгортки лазерного променя у площину та візуальний або фотоелектричний реєструвальний пристрій. Горизонтальну площину «П» створює пентапризма 4, що обертається у осьовій системі 6 гнучким приводом 5 від електродвигуна постійного струму. До верхньої відбивної грані пентапризми, що зроблена напівпрозорою, приклеєно оптичний клин так, що разом з пентапризмою вони утворюють плоскопаралельну платівку. Лазерний промінь, пройшовши вертикальну оптичну систему 7 із світлорозподільним елементом 9, доходить до напівпрозорої грані пентапризми 4. Частина променя, що відбилася цією гранню, утворює лазерну площину пентапризмою, що обертається. Частина променя, що проходить пентапризму з клином як плоскопаралельну платівку, поширюється у напрямку «В» вертикально (прямовисно) вгору.

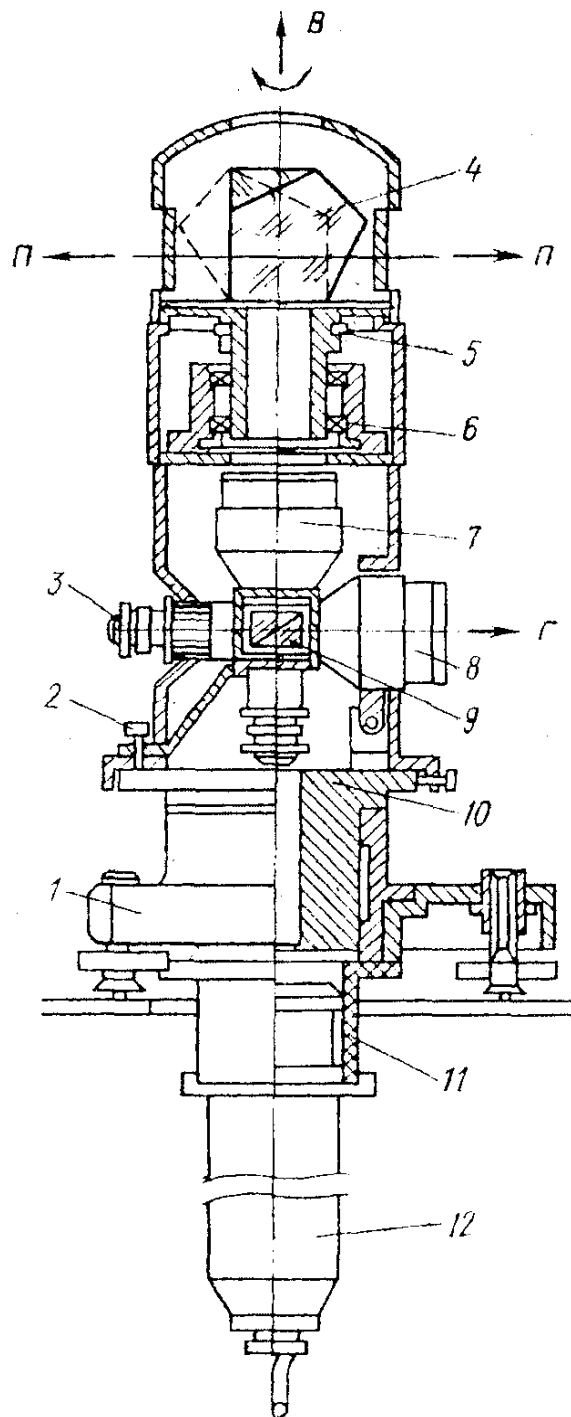


Рис. 35. Принципова схема багатофункціонального лазерного пристрою типу ЛАГ: 1 – підставка, 2 – елеваційний гвинт, 3 – окуляр, 4 – оптична система розгортки лазерного променя у площину, 5 – гнучкий привід, 6 – осьова система, 7 – вертикальна оптична система (зорова труба), що скеровує випромінювання лазера до системи розгортки, 8 – горизонтальна оптична система (зорова труба), що формує горизонтальний промінь, 9 – світлорозподільний елемент, 10 – вертикальна осьова система, 11 – перехідник, 12 – лазер

Частина лазерного променя, проходячи світлорозподільний елемент 9, відбивається ним і горизонтальною оптичною системою 8 як пряма лінія скеровується у горизонтальному напрямку «Г».

Загальний окуляр 3 дає змогу розглядати слід опорної горизонтальної лінії «Г», слід лазерної площини «П» та слід вертикально спрямованого променя. Горизонтальний промінь та площину, у яку розгорнуто лазерний промінь, приводять у горизонтальний стан за допомогою двох контактних циліндричних рівнів, що розташовані перпендикулярно один до одного. Пристрій юстують, переміщуючи світлорозподільний елемент 9, а також елеваційним гвинтом 2.

Лазерні нівеліри, що будують горизонтальні площини, випускають численні фірми, а саме Trimble-Zeiss, YOM3, Sokkia та інші. Дві перші із згаданих фірм називають їх лазерними нівелірами, наприклад, деякі з них ІН52XL (Spectra), Plus (Spectra), НЛ-20К, НЛ30. Фірма Sokkia випускає їх під назвою лазерних будувачів площин, наприклад, LP 30, LP 31 або горизонтальними чи вертикально-горизонтальними планувальниками, наприклад, як А 410 R, LV-205, EAGL-2EL та інші.

Лазерний нівелір-автомат НЛ-20К (рис. 36) створює видиму горизонтальну площину розгорнутим лазерним променем і застосовується у будівництві, для розмічування ділянок, встановлення обладнання, під час виконання вишукувань та у землевпорядкуванні.

Будівельний лазерний нівелір НЛ30 (рис. 37) формує лазерний промінь у двох взаємно перпендикулярних напрямках або будує дві видимі площини: горизонтальну і вертикальну. Положення лазерного променя або лазерних площин може фіксуватися на спеціальній рейці або фотоелектричними пристроями-детекторами.

Деякі технічні дані лазерних нівелірів НЛ-20К і НЛ30 подано у табл. 8.



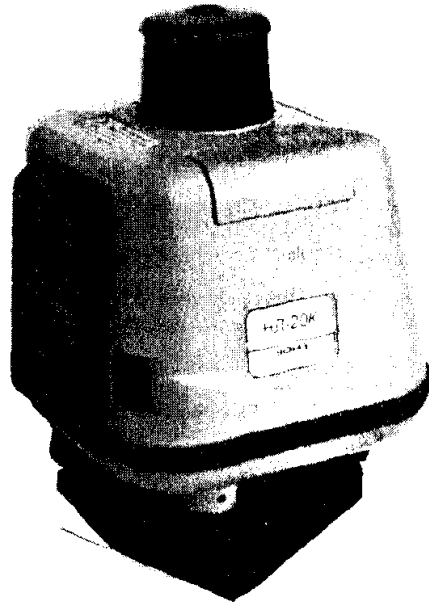


Рис. 36. Лазерний нівелір НЛ-20К

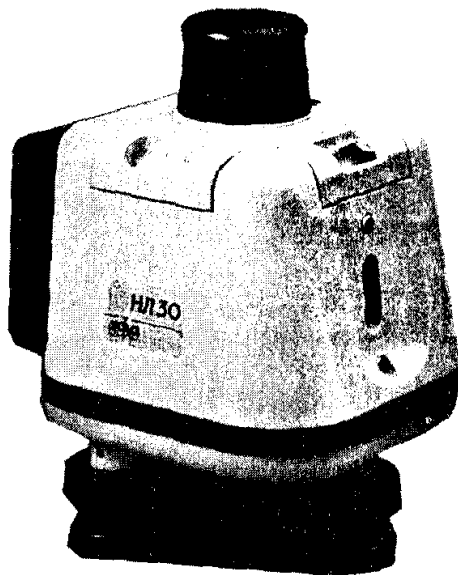


Рис. 37. Будівельний лазерний нівелір НЛ30

Табл. 8

## Технічна характеристика лазерних нівелірів НЛ-20К і НЛ30

	НЛ-20К	НЛ30
Точність	20" ( $\pm 2$ мм на 20 м)	30" ( $\pm 2$ мм на 15 м)
Діаметр лазерної плями на виході, мм	5	5
Джерело випромінювання – діодний лазер	650 Нм	650 Нм
Потужність випромінювання, мВт	2,0	2,0
Гранична віддаль дії, м:		
з приймачем	80	100
без приймача	30	30
Швидкість обертання пристрою розгортки лазерної площини, об/хв	0...350	0...350
Джерело живлення (акумуляторна батарея)	Вмонтована, 4,5 В	Знімна, 4,5 В
Тривалість дії, год	20	20
Діапазон робочих температур	-20...+50°C	-20...+50°C
Маса, кг	1,3	1,5

Фірма Sokkia характеризує прилади LP 30 і LP 31 як такі, що задовольняють вимоги широкого спектра нівелювання у промисловому та цивільному будівництві, а також використовуються під час внутрішніх опоряджувальних робіт. Застосування у комплекті з приладами приймального датчика LR 100 істотно підвищує ефективність нівелювання. LP 30 і LP 31 мають високий ступінь вологоводозахисту, обладнані компенсатором маятникового типу з повітряним демпфером, який забезпечує стабільне положення лазерного випромінювання у вібронебезпечних місцях встановлення приладу.

Деякі технічні дані LP 30 і LP 31 подано у таблиці 9.

Технічна характеристика лазерних побудовувачів  
площин LP 30 і LP 31

		LP 30	LP 31
Точність		10" $\pm$ 1,5 мм на 30 м	15" $\pm$ 2,25 мм на 30 м
Діаметр лазерної плями		15 мм (на максимальній віддалі)	
Джерело випромінювання		Діодний лазер 785 НМ	
Гранична віддаль дії, м	радіус	300	120
	діаметр	600	240
Швидкість обертання пристрою розгортки лазерної площини об./хв		600	
Межі дії компенсатора		$\pm$ 10'	
Джерело живлення		Акумулятор Ni-Cd	
Тривалість дії, год		20	17
Діапазон робочих температур		-10...+50°C	
Маса, кг		2,5	

Технічні характеристики лазерних нівелірів інших фірм відрізняються від наведених граничною віддаллю дії або точністю. Наприклад, лазерний нівелір Plus (Spectra) забезпечує  $\pm$ 1,5 мм на 30 м на віддалі до 600 м, а Ф410R  $\pm$ 1,5 мм на 100 м, маючи граничну віддаль вимірювання 150 м.

## Лекція 17. ЕЛЕКТРОННІ ТАХЕОМЕТРИ

При проведенні більшості геодезичних робіт, як правило, потрібно виконувати як кутові, так і лінійні виміри, для чого зазвичай використовувалися оптичні тахеометри. Ще наприкінці ХХ століття угорський геодезист Тихі ввів поняття «тахеометр», яке в перекладі з грецької мови означає «швидковимірюючий».

У сучасні прилади почали вбудовувати польові комп'ютери для обробки результатів вимірювань і вирішення безпосередньо в полі типових геодезичних задач, розширилися потенційні можливості приладів за рахунок значного поліпшення технічних характеристик.

Таким чином на заключній стадії розвитку електронних геодезичних приладів стоїть універсальний інструмент – електронний тахеометр (рис. 38), який не випадково займає міцне місце в ряду приладів геодезичного обладнання. Тахеометр виробляє будь які кутомірні вимірювання одночасно з вимірюванням відстаней і за отриманими даними проводять інженерні обчислення, зберігаючи всю отриману інформацію. За допомогою електронного тахеометра в польових умовах можна отримати інформацію про вимірювані горизонтальні і вертикальні кути і відстані, автоматично виконати необхідні обчислення по плановому і висотному положенню ситуації. При наявності комп'ютера процес може бути автоматизований, включаючи одержання готової карти місцевості за лічені хвилини. Можливість занесення в запам'ятовуючий пристрій допустимих похибок вимірювань (наприклад, циклічної похибки далекоміра, колімаційної похибки, відхилення від місця нуля, відхилення осі обертання від стрімкої лінії за рахунок введення двокоординатного електронних рівнів та ін.). Це дозволяє підвищити точність і продуктивність вимірювань. Вбудоване програмне забезпечення дозволяє виконати наступні геодезичні завдання: зворотну зарубку, зрівнювання теодолітного ходу, обчислення площ, розбивку кривих і т. д.



Рис. 38. Електронний тахеометр Sokkia SET530R

На Українському ринку тахеометри представляють сьогодні такі відомі фірми, як Leica-Geosystems (Швейцарія), Sokkia, Topcon, Nikon і Pentax (Японія), South (Китай), Trimble Navigation (США), GeoMax (Швеція), а також ФГУП «УОМЗ» (Росія, Єкатеринбург) та ін.

### **Класифікація**

За типом далекоміра та способом реєстрації результатів вимірювань, тахеометри поділяються на:

- оптико-механічні (з власною базою, номограмні, подвійного зображення);
- електронно-оптичні;
- електронні;
- реєструвальні.

В останніх вся інформація автоматично записується на носій. Вони широко застосовуються для виконання зйомок місцевості. В загальній системі автоматичного складання топографічних карт реєструвальні тахеометри є першою ланкою.

За типом далекоміра тахеометри поділяються ще на:

- звичайні (ті, для вимірювання відстаней з якими використовується спеціальні відбивачі: призмові або плівкові);
- безвідбивні (ті, що здатні виконувати вимірювання на точки, розташовані на будь-якій твердій поверхні об'єктів зйомки).

Більшість сучасних тахеометрів є безвідбивними.

За типом механізму обертання електронні тахеометри поділяються на механічні та сервопривідні.

Механічні тахеометри, при роботі з якими геодезист наводить зорову трубу на ціль вручну за допомогою навідних гвинтів, відрізняються більшою простотою в роботі та меншою вартістю. В сервопривідних моделях обертання аліади та зорової труби тахеометра виконують допоміжні механізми (сервоприводи), завдяки чому підвищується продуктивність праці, тому що оператор може керувати приладом дистанційно, знаходячись з боку вешки на значній відстані.

### **Конструкція і принцип дії**

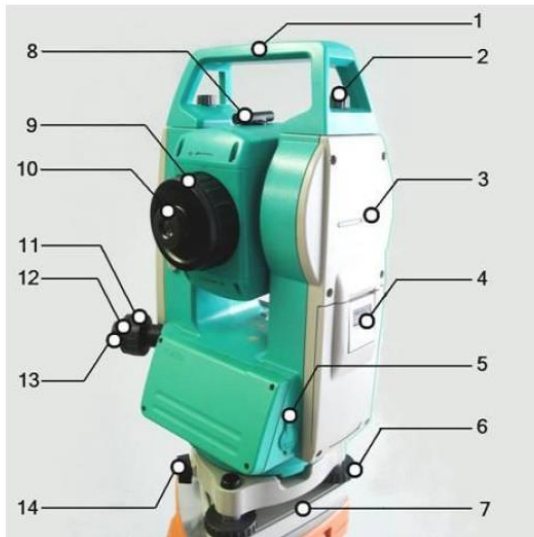
Тахеометр включає в себе:

- електронний теодоліт (кутомір);
- електронний далекомір;
- GPS-приймач (додатково);
- обчислювальний пристрій з пам'яттю, для вимірювання похилих відстаней до заданих точок, горизонтальних і вертикальних кутів, та перетворення результатів із сферичної до декартової системи координат.

У лазерних далекомірах відстані вимірюються:

- по різниці фаз випущеного і відбитого променя (фазовий лазерний далекомір);
- за часом проходження променя лазера до відбивача і назад (імпульсний лазерний далекомір).

Будова електронного тахеометра Sokkia SET610 показана на рисунках 39 та 40.



- 1- ручка
- 2 - закріпний гвинт
- 3 - мітка висоти інструмента
- 4 - слот для батареї
- 5 - розйом введення/виведення даних
- 6 - підйомний гвинт
- 7 – основа трегера
- 8 - грубий візир
- 9 - фокусуюче кільце зорової труби
- 10 - окуляр зорової труби
- 11 - діоптрійне кільце оптичного центриру
- 12 - кришка сітки ниток оптичного центриру
- 13 - окуляр оптичного центриру
- 14 – защолка трегера

Рис. 39. Будова електронного тахеометра Sokkia SET610 (вид спереду)



- 15 - паз для встановлення бусолі
- 16 - навідний гвинт вертикального круга
- 17- закріпний гвинт вертикального круга
- 18- навідний гвинт горизонтального круга
- 19- закріпний гвинт горизонтального круга
- 20- об'єктив
- 21- циліндричний рівень
- 22- юстирувальні гвинти циліндричного рівня
- 23-панель управління

Рис. 40. Будова електронного тахеометра Sokkia SET610 (вид ззаді)

Точність вимірювання залежить від технічних можливостей моделі тахеометра і від зовнішніх параметрів таких, як температура, тиск, вологість тощо.

Діапазон вимірювання відстаней залежить від режиму роботи тахеометра: відбивний чи безвідбивний. Дальність вимірювань при безвідбивному режимі прямо залежить від властивості поверхні, на яку проводиться вимірювання. Для світлої гладкої поверхні (штукатурка, кахельна плитка тощо) вона в кілька разів перевищує максимально можливу відстань, виміряну на темній поверхні. Максимальна дальність лінійних

вимірювань для режиму з відбивачем (призмою) – до п’яти кілометрів (при декількох призмах – ще далі), для безвідбивного режиму – до одного кілометра. Моделі тахеометрів, які мають безвідбивний режим, можуть вимірювати відстані практично до будь-якої поверхні, однак слід з обережністю ставитися до результатів вимірювань, проведених крізь гілки, листя і подібні перешкоди, оскільки невідомо, від чого саме відіб’ється промінь, і, відповідно, відстань до чого він виміряв.

Існують моделі тахеометрів з далекоміром, поєднаним з системою фокусування зорової труби. Переваги таких приладів в тому, що вимірювання відстаней здійснюється саме до того об’єкта, на який в цей час виставлена зорова труба приладу.

Точність кутових вимірів сучасним тахеометром досягає половини секунди ( $0^{\circ}00'00,5''$ ), відстаней – до 0,5 (1) мм + 1 мм на км.

Точність лінійних вимірювань в безвідбивному режимі – до 1 мм + 1 мм на км.

Більшість сучасних тахеометрів обладнані обчислювальним і запам’ятовуючим пристроєм, що дозволяє зберігати виміряні або проектні дані, обчислювати координати точок, недоступних для прямих вимірювань, за приймачем (наприклад, Leica Smart Station).

Крім того, в нових серіях тахеометрів Viva TS представлені моделі з вбудованою ширококутною 5-ти мегапіксельною камерою. З її допомогою можна отримати і вивести на VGA-екран тахеометра панорамні зображення об’єкта для швидкого наведення на точку. Камера здатна робити знімки з чотирикратним наближенням, завдяки чому користувач отримує детальні зображення об’єкта. Кожен знімок може бути прив’язаний до однієї з виміряних точок. Таким чином, в ході тахеометричної зйомки ведеться додаткова документація у вигляді фотозображень з робочими позначками.

Серія Leica Viva TS11 об’єднала в собі декілька модифікацій тахеометрів з інтегрованою ширококутною камерою і кутовою точністю вимірювань від 5" до 1". Leica Viva TS11 – найбільш просунутий



немоторизований тахеометр з новою функцією формування зображень на дисплей тахеометра за допомогою камери високої роздільної здатності та простого у використанні вбудованого ПЗ Leica SmartWorx Viva.

Ринок геодезичних приладів пропонує велику кількість електронних тахеометрів, які випускають найбільш відомі приладобудівні фірми світу такі як: Leica Geosystem, Sokkia, Topcon, Nikon, Foif, Pentax, Spectra Precision, South та інші (див. рис. 41). Крім того кожна з фірм намагається урізноманітнити асортиментний ряд новими моделями приладів додатково доповнюючи їх новими можливостями.

У таблиці 10 простежено тенденції виробництва моделей вищевказаними фірмами в період 2004-2008 рр. Ці електронні тахеометри забезпечують різноманітні вимоги користувачів щодо точності, швидкодії, можливостей програмного забезпечення та ін.

Для вибору потрібного електронного тахеомета (ЕТ) необхідно детально розібратися у можливостях приладу. Перевагу надають точності кутових та лінійних вимірів. За цим показником можна встановити наступну класифікацію (див табл. 11):

- прицезійні – це такі ЕТ, точність вимірювання кутів яких становить  $\leq 1''$ , ліній  $\leq 1$ мм. Їх використовують для високоточних інженерно-геодезичних робіт. Крім цього, їх можна застосовувати в метрології, наприклад, для перевірки ліній взірцевих геодезичних базисів з метою контролю їх стабільності. Еталоном у цьому класі є прилад фірми Trimble 5601 DR Standart, що має точність вимірювання кутових вимірів  $0,5''$ , а лінійних  $0,3$ мм до  $1$ км. Таким приладом, наприклад, користується ДП «Укрметртестстандарт»;

- точні – це ЕТ, точність кутових вимірювань яких коливається в межах від  $1''$  -  $5''$ , а лінійних  $4$ мм на  $1$  км. Такі прилади доцільно використовувати для різноманітних топографо–геодезичних робіт, для створення мережі полігонометрії, землевпорядних та кадастрових робіт.

Такими ЕТ є, наприклад, прилад NPL 632 фірми Nikon, SET X1 фірми Sokkia та інші;

- рутинні – це прилади, точність кутових вимірювань яких може досягати 10", а лінійних 5мм і більше на км. Ці ЕТ використовують для створення знімальної основи, а також їх застосовують для виконання електронних тахеометричних зйомок різних масштабів. До них можна віднести модель Focus 4 фірми Spectra Precision, 326X фірми Pentax тощо;

- безрефлекторні – це прилади, що працюють без відбивача. На сьогоднішній день ця функція постійно розвивається, а прилади цього класу здатні працювати без застосування відбивача на великих відстанях, таких як Leica FlexLine до 1000 м, а Topcon IS – 1 до 2000 м;

- універсальні – спеціальний клас ЕТ, наприклад, з інтегрованим GPS – приймачем. Точність таких кутових і лінійних вимірювань більш висока. Перша такі прилади почала випускати компанія Leica Geosystem моделі SmartStation 1201+, яка забезпечує високу точність вимірювання кутів 1", ліній 1+1.5ppm.

Однією з основних переваг SmartStation є можливість виконувати геодезичні роботи за відсутності розвиненої опорної мережі. Ці прилади доцільно використовувати для визначення меж ділянок, які розташовані на значній віддалі від пунктів опорної мережі, а також для розмічувальних робіт на будівельних майданчиках, де видимість перекривається будівлями, обладнанням та технікою. Реально ЕТ TPS1200 та TPS 1200+ зі встановленим на ньому інтегрованим GPS – приймачем може працювати на відстані до 50 км від базової станції. Крім того, прилад можна розмістити в будь-якому зручному місці, не потрібно прокладати опорних ходів, координати точки стояння визначаються за допомогою RTK (кінематика в реальному часі) з точністю 10мм + 1ppm, а унікальна вбудована система моніторингу цілісності даних відразу дозволяє перевіряти всі отримані результати вимірювання. В даному ЕТ закладена програма автоматичного пошуку та наведення на візирну ціль (призму), що разом із дистанційним управлінням,

яке здійснюється через радіомодем, дозволяє прискорити виконання роботи і зменшити кількість виконавців (оператор з відбивачем може виконувати зйомку сам, без сторонньої допомоги). В залежності від поставлених задач систему Leica SmartStation можна використовувати окремо, як електронний тахеометр так і як GPS – станцію (рис. 42).

Табл. 10

Моделі сучасних електронних тахеометрів

Фірма	Моделі ET
Leica Geosystem	TPS 1201+, 1202+, 1203+, 1205+; TC403, 405, 407; TCR403, 405, 407; TC802, 803, 805; TCR802, 803, 805;
Sokkia	SET230(R3T)/330RT(R3T)/530RT(R3T); SETX1/X2/X3/X5; SRX1/X2/X3/X5;
Pentax	R-332NX/323NX/325NX/326NX; W-822NX/823NX/825NX; V-227N/228N;
Topcon	GTS-751/753/755/102N/105N/901A/903A; GPT-3002LN/3003LN/3005LN/7501/7503/ 7505/9001A/9003A/9003M
Trimble	5601/5602/5603/5605/5503(DR200+); M3/S6(DR300)/S8 High Precision/VX;
Nikon	DTM 362/352/332/522/652; NPL 362/352/332/632;
South	NTS322/325/325R+/355R+/ 352/355/662/665;
Spectra Precision	Focus4/5/10;
FOIF	RTS 705, OTS 600;
Stonex	STS2R, STS5R, STS-02R.



*Leica TPS 1200+*



*Trimble VX*



*Spectra Precision focus*



*Nikon DTM - 352*



*Pentax V300*



*Stonex STS2R*



*FOIF RTS 680*



*YOM3 3Ta5*



*South NTS 355R*



*Sokkia SET X*



*Topcon IS - 1*



*Leica FlexLine*

Рис. 41. Деякі моделі сучасних електронних тахеометрів

## Рекомендована класифікація ЕТ

Клас	Прицезійні	Точні	Рутинні	Безфлект рні	Універсальні
Марка приладу	Trimble 5601 DR Standart/ Leica TDM 5005/ Leica TC 2003	Nikon NPL632/ Sokkia SETX1/ Topcon GPT 3102N	Spectra Precision Focus4/ South 355R+/ Pentax 326EX	Leica FlexLine/ Topcon IS - 1	Leica TPS 1200+
Точність кутових вимірювань	0,5"/0,5"/0,5"	2"/1"/2"	7"/5"/6"	2"/1"	1"
Точність кутових вимірювань (мм + ррм)	0,3-0,5мм до 1 км 1+2/1+2	3+2/1,5+2 / 2+2	3+2/ 2+2/ 2+2	2+1/ 2+1	1+1,5



Рис. 42. Система ЕТ Leica 1200+ для повноцінного використання у будь-яких геодезичних роботах

Окремо зупинемось на точності та дальності вимірювання ліній. Щодо точності, то по суті на сьогоднішній день всі електронні тахеометри близькі за класом точності, яка коливається від 1+1 до 3+2мм на кожен кілометр роботи. Щодо дальності вимірювань, то тут прилади відрізняються, оскільки їх можливості різні. При роботі з однією призмою максимальна віддаль вимірювань досягає 3000 – 4000 м, при трьох призмах – 5000 – 8000 м. Важливою функцією, над удосконаленням якої працюють приладобудівні фірми, є можливість працювати без відбивача, що забезпечує вимірювання нових, раніше недоступних віддалей. На одній із виставок INTERGEO фірма Leica представила свою модель FlexLine, яка за допомогою спеціальної труби може вимірювати відстані без відбивача до 1000 м з точністю  $2+2 < 500$  м та  $4+2 > 500$  м. А фірма Topcon представила прилад IS – 1, що може працювати без відбивача на відстані до 2000м (з точністю  $10+10\text{мм.}>250\text{м.}$ ) (див.табл. 12).

Ще один параметр, який характеризує сучасні ЕТ – це реєстрація даних вимірювань. Переважно прилади можуть реєструвати від 10 до 32 тис. символів, крім того майже всі вони забезпечені картками пам'яті від 32 до 256 МВ (див.табл. 13). Передача інформації від джерела до приладу і навпаки здійснюється за допомогою різних портів вводу/виводу, починаючи від стандартного USB та порту RS-232, закінчуючи сучасними технологіями Bluetooth та Wi-Fi.

Електронні тахеометри переважно комплектуються акумуляторами, які, як правило, забезпечують безперервне вимірювання кутів та ліній впродовж 10 годин. Фірми-виробники приділяють велику увагу температурним показникам роботи приладів їх пило- і водостійкості та масі. Маса сучасних ЕТ знаходяться в межах 6-9 кг (див. табл 14).

Табл. 12

Класифікація сучасних ЕТ за точністю та дальністю вимірювання з  
відбивачем та без відбивача

Марка	Leica FlexLin e TS09	Nikon NPL 632	Sokkia SRX1	Pentax W822NX	South NTS- 662	Topcon IS-1	Trimble S8
Вимір ліній (mm+ppm) з призмою без призми	1+1,5	3+2	1,5+2	2+2	2+2	2+2	1+1
	1+1,5	3+2	3+2	5+2,5	5+3	2+2	3+2
Вимір віддалі в м На 1 призму На 3 призми	3500	5000	5000	4500	1800	4000	3000
	5400	5000	6000	5600	2600	5300	5000
Дальність роботи приладу без відбивача в м	1000	210	500	270	180	2000	800

Табл. 13

Реєстрація даних сучасними ЕТ та можливості передачі інформації

Марка	Leica TDM 5005	Nikon NPL- 632	Sokkia SRX1	Pentax 822NX	South NTS- 662	Topcon GTS- 751	Trimble S8
Реєстрація даних в симв. МВ	36000	10000	64MB	128 MB	16 MB	64 MB	64 MB, 256 MB
Порти вводу\виводу	RS-232	RS-232, USB	RS-232, USB	RS-232, USB, Bluetooth	RS-232	RS-232, USB	RS-232, USB, Bluetooth

Табл. 14.

## Технічні параметри ЕТ (живлення, робоча температура, маса)

Марка	Leica TDM 5005	Nikon NPL- 632	Sokkia SRX1	Pentax 822NX	South NTS- 662	Topcon GTS- 751	Trimble S8
Час роботи в годинах	5,5	6	9,5	8	8	12	11
Робоча температура в градусах С	Від - 20 до +50	Від -20 до +50	Від -20 до +50	Від -20 до +50	Від -20 до +50	Від -20 до +50	Від -20 до +50
Маса в кг	8,7	5,1	6,5	6,3	6	6,1	5,2

Гарантія на прилади надається всіма фірмами – виробниками або їх дистриб'юторами на строк 1– 4 роки. Окремо надається гарантія на оптику – до шести років (див.табл.15). Найбільші гарантії на свою продукцію дають фірми Nikon та Sokkia, відповідно 48 та 36 міс. Проте, які б гарантії не надавали ці фірми, лідером на ринку за якістю та надійністю своєї продукції була і залишається швейцарська фірма Leica GeoSystem. ЕТ її виробництва застосовуються у всіх сферах геодезії, в будівництві, інженерній справі тощо.

Табл. 15.

## Гарантійні строки (без врахування гарантії на оптику) та ціни на деякі моделі сучасних ЕТ

Марка	Leica TDM 5005	Nikon NPL- 632	Sokkia SRX1	Pentax 822NX	South NTS- 662	Topcon GTS- 751	Trimble S8
Гарантія в місяцях	24	48	36	24	24	24	24
Ціна в доларах США	Від 42тис.	Від 16тис.	Від 30тис.	Від 14тис.	Від 7тис.	Від 15тис.	Від 25тис.



Щодо вартості ЕТ то вона в переважно формується за рахунок класу точності кутових вимірів та за функціональними можливостями приладу і його програмного забезпечення. Вартість різних моделей ЕТ складає від 7 до 50 тис.\$.

Щоб привернути увагу фахівця кожен із виробників намагається створити унікальний дизайн, спростити управління системою, наголошуючи при цьому на функціональні можливості приладу, а саме: розмічування колової кривої, визначення недоступної віддалі і висоти споруди, вимірювання у вертикальній та похилій площинах, обчислювання площі та периметру. Прилади в автоматичному режимі вводять поправки на кривизну Землі та рефракцію, реєструють температуру, тиск та ін. Цими можливостями забезпечені практично всі сучасні електронні тахеометри. Основними напрямками удосконалення можливостей сучасних електронних тахеометрів є забезпечення необхідного класу точності, підвищення можливостей і точності вимірювання довжин ліній, а також горизонтальних та вертикальних кутів. Актуальним залишається удосконалення можливостей роботи приладів без застосування відбивачів, автоматизація вимірювань, розширення функціональних можливостей приладів через удосконалення і розширення програмного забезпечення та інтегруванням їх, як вже зазначалось, з системами GPS, спрощення управління цими системами та можливість здійснення обробки узагальнюючих результатів аналізу виконаних вимірювань.

Особливим попитом електронні тахеометри користуються в інженерній геодезії. Так, наприклад, ЕТ фірми Leica (моделі Leica TCR 405power та Leica TCR802power) завдяки вбудованому програмному забезпеченню і набору прикладних програм дозволяє прискорити та полегшити ці роботи. Програма “Виносу відносно ліній та дуг” дозволяє виконувати винос або перевірку положення точок відносно заданих ліній та дуг. Елементи точки, що виносяться, обчислюється за допомогою перпендикуляра відносно вибраної базової лінії або дуги. Базова лінія може бути зміщена паралельно або

повернута в залежності з вимогами розмічування. Програма "Обернена засічка" дозволяє встановити інструмент в будь-якому місці та визначити координати точки стояння, висотну відмітку та орієнтування горизонтального круга. Програма "Положення недоступної точки" (наприклад така, що знаходиться під мостом) дозволяє визначати цю точку за допомогою результатів вимірів допоміжної точки, що знаходиться під тією, що визначається, з подальшим візуванням на визначувану точку. Функція "Визначення прихованої точки" дозволяє визначити координати точки, яка перекрита будівлями або технікою, за допомогою спеціальної віхи, на кінцях якої розміщені відбивачі. При вимірах віха розташовується під будь-яким кутом, а програма проводить виміри прихованої точки так, ніби вимірювання проводиться прямим візуванням на неї. Окрім того, в даних електронних тахеометрах включено програми "Шляховик", яка дозволяє виконувати розмічування і контроль положення траси при будівництві доріг та інших криволінійних об'єктів, а також опція "Координатна геометрія", що включає в себе ряд функцій таких як обчислення прямої та оберненої геодезичної задачі, трасування, різноманітні комбінації перетинів (азимут-азимут, відстань-відстань по 4-х точках) визначення ортогональних та подовжніх відступів. Координати обчислених точок можуть бути відразу винесені в натурі.

## Лекція 18. ЛАЗЕРНІ СКАНЕРИ

Окремо слід виділити мультистанції та наземні лазерні сканери.

**Мультистанція** - передовий інженерний інструмент, об'єднуючий в собі функціонал роботизованого тахеометра, сканера, фотограмметричної станції і з можливістю доповнення GNSS приймачем. Орієнтовані на виконання найбільш складних, комплексних завдань. Скануючий тахеометр Leica Nova MS60 (рис. 43) з революційним польовим програмним забезпеченням Leica Captivate перетворює складний набір просторових даних в прості та зручні для роботи 3D моделі. Використовуючи зрозумілі прикладні програми і сенсорні технології, всі типи вимірювань і проектні дані можна переглядати у трьох площинах. Польове ПО Leica Captivate може застосовуватися в різних сферах і галузях незалежно від того, з яким інструментом Ви працюєте – з GNSS приймачем, тахеометром, або і з тим, і іншим.



Рис. 43. Скануючий тахеометр Leica Nova MS60

**Наземне лазерне сканування (НЛС)** - на сьогоднішній день найбільш оперативний і продуктивний спосіб отримання точної і якнайповнішої

інформації про просторові об'єкти. Суть технології полягає у визначенні точних просторових координат точок поверхні об'єкту.

### **Що таке тривимірний сканер?**

Принцип роботи лазерного сканера аналогічний принципу роботи безвідбивного електронного тахеометра і полягає у вимірюванні часу проходження лазерного променя від випромінювача до поверхні, що відбиває, і назад до приймача. Шляхом ділення цього часу на швидкість поширення лазерного променя визначається відстань до об'єкта.

Сканер складається з лазерного далекоміра, адаптованого для роботи з високою частотою, і блоку розгортки лазерного променя. В якості блоку розгортки в сканері виступають сервопривід і полігональне дзеркало або призма. Сервопривод відхиляє промінь на задану величину в горизонтальній площині, при цьому повертається вся верхня частина сканера, яка називається голівкою. Розгортка у вертикальній площині здійснюється за рахунок обертання або гойдання дзеркала.

У процесі сканування фіксується напрямок поширення лазерного променя і відстань до точок об'єкта. Результатом роботи сканера є растрове зображення – скан, значення пікселів якого являють собою елементи вектора з наступними компонентами: вимірною відстанню, інтенсивністю відбитого сигналу і RGB-складової, що характеризує реальний колір точки. Для більшості моделей НЛС характеристики реального кольору для кожної точки сполучено за допомогою неметричної цифрової камери.

Іншою формою представлення результатів наземного лазерного сканування є масив точок лазерних віддзеркалень від об'єктів, що знаходяться в полі зору сканера, з п'ятьма характеристиками, а саме просторовими координатами (x, y, z), інтенсивністю і реальним кольором.

В основу роботи лазерних далекомірів, використовуваних у сканерах, покладені імпульсний і фазовий безвідбивні методи вимірювання відстаней, а також метод прямої кутової розгортки (триангуляційний метод).

Системи HDS дозволяють значно знизити витрати кількома шляхами:

- зменшення вартості виконавчої та топографічної зйомки;
- зниження або повне виключення повторних додаткових зйомок об'єкта;
- більш точні креслення і звіти виконавчої зйомки. Це означає, по-перше, зменшення конструктивних робіт завдяки завчасній зйомці і виключення пересічень основних магістралей і конструкцій, і, по-друге, можливість заводського будівництва великих конструкцій, а не добудова їх «по місцю»;
- зниження робіт за рахунок швидкої і неруйнуючої зйомки і мінімального часу польових робіт.

Крім зниження прямих витрат системи HDS надають додаткові переваги:

- швидке отримання результатів;
- зменшення загального циклу робіт над проектом;
- більш якісний результат;
- менше неоднозначностей - велика повнота;
- високий рівень деталізації;
- безпеку робіт при зйомці;
- неруйнівного методика зйомки;
- хмари точок можуть бути використані іншими фахівцями з більшою ефективністю.

Де можна використовувати лазерне сканування?

Основні сфери застосування тривимірного сканування:

- створення тривимірних моделей складних інженерних споруд та технологічного обладнання з високим ступенем деталізації і точності;
- зйомка фасадів історичних будівель, пам'ятників і унікальних об'єктів для їх реконструкції;
- дорожня зйомка;
- гірничча справа;

- моніторинг будівель і споруд;
- визначення обсягів земляних робіт та/або технологічних ємностей;
- документування надзвичайних ситуацій.

Цей список далеко не повний, оскільки з кожним роком користувачі сканерів виконують все більше унікальних проектів, які розширюють сфери застосування технології.

**Наземний лазерний сканер Leica Scanstation P20** (рис. 44) – це знімальна система, яка вимірює з високою швидкістю відстані від сканера до поверхні об'єкту і реєструє відповідні напрями з подальшим формуванням тривимірного зображення у вигляді хмари точок. Це новітнє обладнання для проведення будь-яких геодезичних робіт.



Рис. 44. Наземний лазерний сканер Leica Scanstation P20

Тривимірний лазерний сканер вимірює відстані до всіх визначуваних точок за допомогою лазерного безвідбивного далекоміра. Вимірювання проводяться з дуже високою швидкістю – кілька тисяч вимірювань в секунду. У лічені хвилини прилад вимірює мільйони точок, точно повторюють поверхню об'єкту сканування. В результаті одного сеансу сканування утворюється хмара точок відображень лазерного променя. Для

кожної точки реєструється 3 координати (XYZ) і інтенсивність прийнятого сигналу. На рисунках 45 та 46 показано фрагменти сканування Києво–Печерської лаври.

У липні 2007 р. фахівцями НВП «Навігаційно-геодезичний центр» було виконано лазерне сканування комплексу Дальніх і Варязьких печер Києво–Печерської Лаври. Мета проекту – створення TIN-поверхні моделі об'єкта, отримання топографічного плану масштабу 1:500 в місцевій системі координат, побудова профілів і перетинів коридорів і приміщень печер.

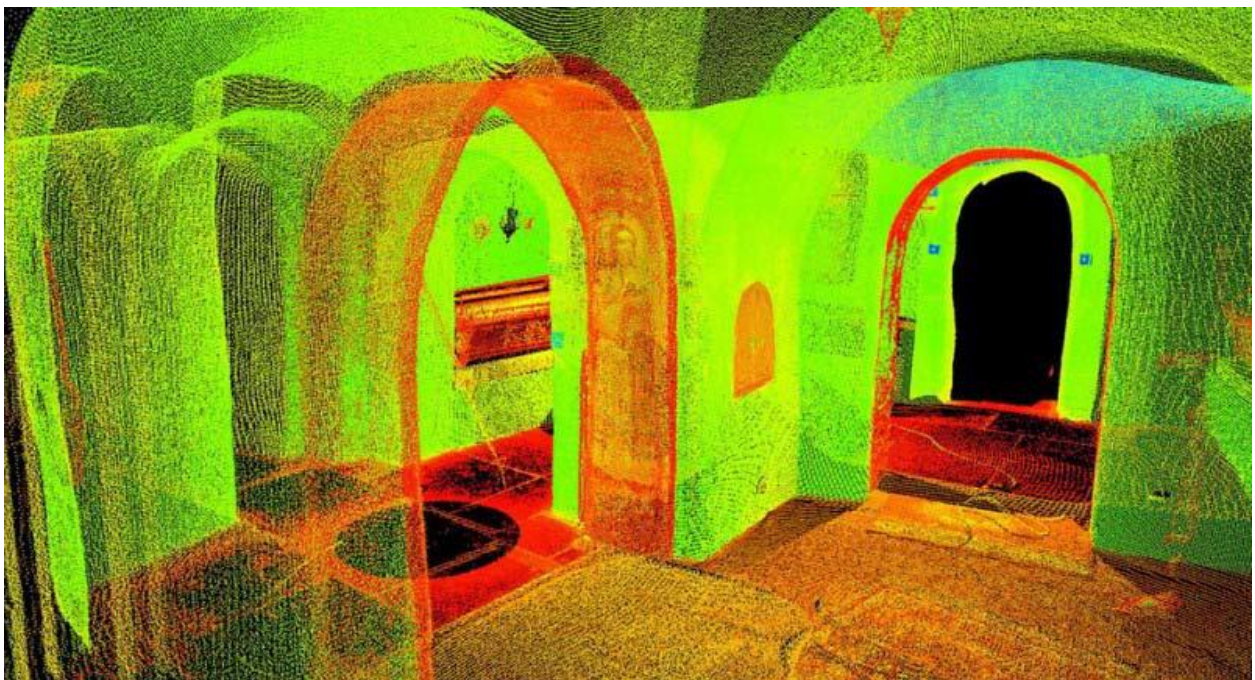


Рис. 45. Фрагмент сканування Києво-Печерської лаври. Внутрішні приміщення

Геодезичні роботи по створенню знімального обґрунтування проводило ДП «Укргеодезмарк» ВАТ «Київметробуд». Роботи по лазерному скануванню виконувалися лазерної скануючої системою Leica ScanStation (Leica Geosystems, Швейцарія), обробка результатів – в програмному комплексі Leica Cyclone.

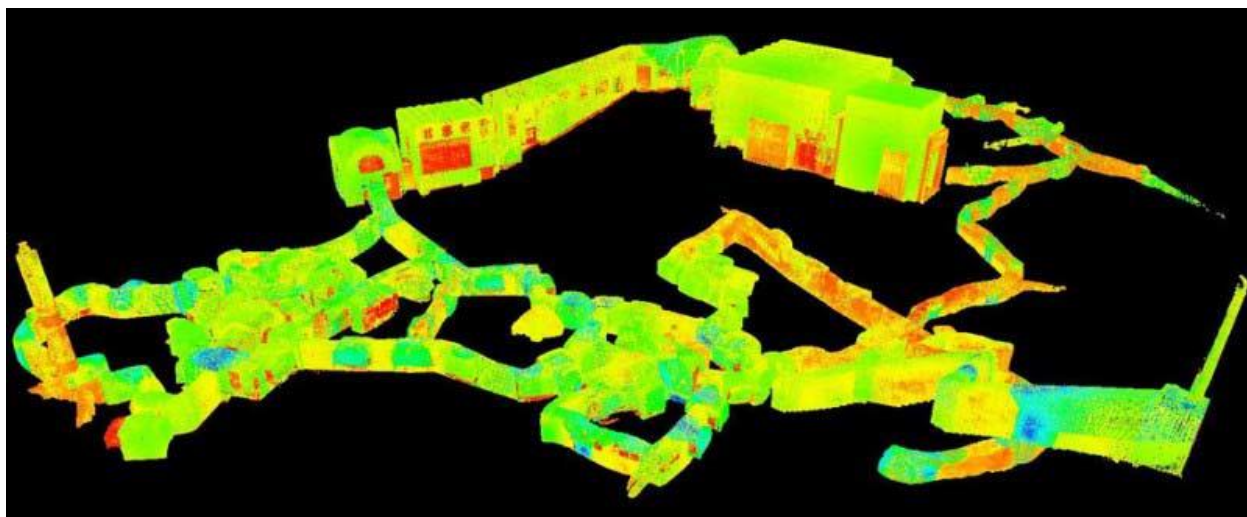


Рис. 46. Фрагмент сканування Києво-Печерської лаври. Загальний вигляд



## Лекція 19. СУПУТНИКОВЕ ГЕОДЕЗИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ

### Структура систем і режими роботи

Як GPS (Global Positioning System), так і ГЛОНАСС (Глобальна Навігаційна Супутникова Система) складаються з трьох секторів (в зарубіжній літературі їх іменують сегментами, а у вітчизняній часто називають підсистемами). Ці сектори показані на рисунку 47.

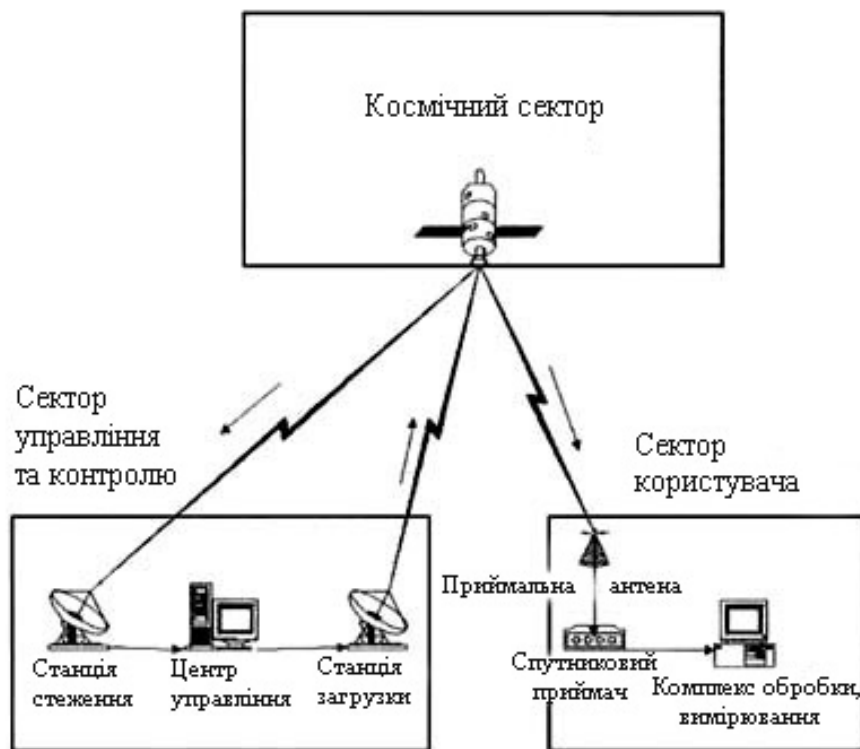


Рис. 47. Загальна структура глобальних супутникових систем

Космічний сектор – це сукупність супутників, що входять в систему, яку часто називають "сузір'ям" або "орбітальним угрупованням". На кожному супутнику встановлені атомні еталони частоти і апаратура, що передає необхідні для вимірювань радіосигнали, до складу яких входить так зване навігаційне повідомлення, що містить відомості про положення супутників, мітки часу, різні поправки і іншу необхідну інформацію. Окрім передаючої апаратури, супутник містить і радіоприймальний пристрій для прийому команд і сигналів від наземного комплексу управління і контролю. Кожний супутник забезпечений панелями сонячних батарей живлення, руховою

установкою для корекції траєкторії руху супутника за командами із Землі і системами орієнтації та стабілізації.

Як в GPS, так і в ГЛОНАСС повне сузір'я складається з 24 супутників. В GPS вони розташовані в шести орбітальних площинах, розгорнутих через  $60^\circ$ , а в ГЛОНАСС – в трьох площинах через  $120^\circ$ . Орбіти супутників вельми близькі до кругових.

Сектор управління і контролю включає станції стеження, службу точного часу, головну станцію з обчислювальним центром і станції завантаження інформації на супутники. В GPS п'ять станцій стеження розподілені рівномірно по земній кулі, одна з яких суміщена з центральною управляючою станцією в Колорадо-Спрінгс (США). Отримана на цих станціях інформація про елементи орбіт і прогнозовані координати супутників передаються за допомогою трьох завантажуючих станцій на супутники. Існує також та, що не входить в систему управління і контролю, але більш глобальна і точна мережа слідкуючих станцій – Об'єднана міжнародна мережа GPS під назвою CIGNET (Cooperative International GPS Network), що знаходиться у віданні Національної геодезичної служби (NGS) США. Створена також Міжнародна мережа служби GPS для геодинаміки (мережа IGS).

В ГЛОНАСС мережа станцій стеження розташована на території Росії. Станції обладнані радіолокаторами і лазерними віддалемірами, а супутники – відбивачами. Під Москвою розташований Центр управління системою (ЦУС), який включає центральний синхронізатор (ЦС) з водневим стандартом частоти.

Сектор користувача включає супутникові приймачі, число яких і модифікації не обмежені, а також камеральний комплекс обробки вимірювань (“постобробки”, виконуваної після польових спостережень).

**Режими роботи систем.** Глобальні супутникові системи можуть працювати в двох основних режимах, що отримали назву кодових вимірювань і фазових вимірювань. При кодових вимірюваннях виконується

вимірювання часу розповсюдження кодово-модульованого сигналу від супутника до приймача, а при фазових – вимірювання зміщення фази коливання несучої частоти за час розповсюдження. Слід зазначити, що для цих режимів часто використовують інші назви, що характеризують їх, так би мовити, з іншого боку. Режим кодових вимірювань називають навігаційним, а також абсолютними визначеннями, а режим фазових вимірювань – геодезичним, а також відносними визначеннями. Така термінологія використовується тому, що кодові вимірювання дають меншу точність, прийнятну при рішенні задач навігації, і при цьому забезпечують безпосереднє отримання самих координат (абсолютних величин). Фазові ж вимірювання дають високу точність, придатну для геодезичної мети, але при цьому дозволяють отримати не самі координати, а різниці однойменних координат двох (або більш) точок, в яких встановлені одночасно працюючі приймачі.

Іноді в окремий (третій) режим виділяють так званий інтегральний доплерівський рахунок, який здійснюється, по суті справи, одночасно з режимом фазових вимірювань. Він дозволяє одержувати швидкість зміни відстані до супутника і фіксувати моменти послідовних положень супутника.

GPS-приймач – радіоприймальної пристрій для визначення географічних координат розташування антени приймача, на основі даних про тимчасові затримки приходу радіосигналів, випромінюваних супутниками групи NAVSTAR. У Росії з розвитком системи ГЛОНАСС почався серійний випуск ГЛОНАСС – приймачів.

### **Точність вимірювання**

Існує два принципових джерела помилок. Перший, це те, що в приймачі, на відміну від супутника, використовуються менш точні кварцеві годинники, що вимагають регулярної синхронізації. Усунути помилку можна, якщо використовувати атомні годинники, аналогічні розміщеним на супутнику. Але, по-перше, це громіздко, а по-друге, дорого, адже їх вартість становить близько 100000 доларів. Інше рішення – математично відняти

похибку годинника приймача, прийнявши сигнали точного часу від мінімум чотирьох супутників. Цей метод і застосовується в системах супутникової навігації.

Друге джерело помилки – час обробки сигналу в приймачі, так званий біт-тайм. Для звичайних GPS-пристроїв закладена точність в один відсоток від біт-тайму, це відповідає 10 наносекунд, для швидкості світла - це відстань 3 метри. Така точність достатня для орієнтування на місцевості, але не годиться для будівництва. Більш просунуті приймачі в професійних геодезичних пристроях або для військових цілей мають точність на кілька порядків вище і визначають положення з точністю до 300 мм.

Решта похибки набирається при проходженні сигналом атмосфери, тобто залежить від хмарності і погоди, від різних перешкод, таких як ліс, будівлі, тіло самого власника приладу та ін. На практиці максимальна точність вимірювання побутових приймачів завжди обмежена біт-таймом і становить 3-5 м навіть при використанні систем SBAS і місцевих систем передачі поправок від наземної станції на 1 км відстані між станціями (диференційний метод). До нашого часу точність штучно занижують шляхом внесення в сигнали, передані супутником, помилкових поправок.

Дуже частою помилкою є порівняння різних навігаторів проносом їх в «в одній кишені» зі спробою порівняти отримані треки. Крім того, що тіло людини закриває частину супутників, тут проявляється сильна інтерференція гетеродинів приймачів – вони працюють на одній частоті (схожий ефект спостерігається у двох FM-приймачів, налаштованих на одну станцію). При правильному тестуванні навігатори розташовуються на відкритому майданчику не ближче 4 метрів один від одного.

### **Класифікація**

Пристрої, що використовують у своїй роботі сигнал із супутників GPS, можна розділити на професійні, що володіють високою точністю визначення місцеположення і побутові. Перші в основному використовуються у

військових цілях, для геодезії і картографії, а другі отримали широке застосування в різних сферах сучасного життя.

Професійне GPS обладнання (рис. 48) відрізняється якістю виготовлення компонентів (особливо антен), використанням програмним забезпеченням (ПЗ), підтримуваними режимами роботи (наприклад RTK, binary data output), робочими частотами (L1 + L2), алгоритмами придушення інтерференційних залежностей, сонячної активності (вплив іоносфери), підтримуваними системами навігації (наприклад NAVSTAR GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou), збільшеним запасом електроживлення і зрозуміло, ціною.



Рис. 48. GPS обладнання Leica NetRover GS08

**Професійні GPS-приймачі класифікуються як приймачі геодезичного класу та приймачі ГІС-класу:**

- геодезичні приймачі – пристрої, що використовуються для геодезичних робіт. Складаються з приймального блоку (геодезичної антени, поєднаної з приймально-передавальним пристроєм) і контролера (портативного комп'ютера в промисловому виконанні). Загальна назва для таких приймачів – польовий комплект або ровер;

- приймачі ГІС-класу - являють собою промисловий варіант КПК, в який вбудовано приймально-передавальний пристрій і антена, з передвстановленим спеціалізованим ПЗ.

В цілому геодезичні приймачі дають кращу точність визначення координат, однак розвиток технологій дозволяє деяким моделям ГІС-класу успішно їх замінювати.

Основа будь-якого GPS-приймача – це чіпсет, на якому він працює. Довгий час усі приймачі випускалися з 12-канальними чіпсетами. Крім того, що 12 каналів не достатньо для швидкого «Холодного старту» - первісного визначення свого місця розташування, такі приймачі потребували відкритого неба, так як працювали тільки з прямою видимістю супутників (мінімум 3, і чим більше, тим точніше). На сьогоднішній день всі подібні приймачі вважаються застарілими і зняті з виробництва. На даний момент максимальне число каналів на професійному приймачі – 440 (два чіпсети по 220 каналів в приймачі). Оскільки навігаційні супутники віщають на різних частотах, для підвищення точності професійне обладнання визначає координати за допомогою всіх доступних каналів всіх видимих в даний момент часу супутників. Незважаючи на те, що теоретично кількість каналів професійного геодезичного обладнання як вітчизняного, так і зарубіжного, можна підвищувати за рахунок встановлення додаткових чіпсетів, в найближче десятиліття це недоцільно, оскільки 440 каналів вистачить на одночасне стеження за всіма наявними супутниками (що в принципі неможливо, тому приймач отримує сигнал від супутників, які знаходяться в обмеженому секторі небесної сфери).

**GPS приймачі для широкого кола користувачів можна класифікувати наступним чином:**

- портативні пристрої – автомобільні (окремий портативний пристрій або вбудований в транспортний засіб в якості бортового комп'ютера (онбордера), туристичні, спортивні;

- вбудовані як функціональний вузол в інші пристрої – в КПК, ноутбук або мобільний телефон;
- GPS-трекери, GPS-логгери, які ведуть запис і передачу координат на серверний центр і використовуються для супутникового моніторингу автомобілів, людей, інших об'єктів.

Перші мають власний процесор для виконання навігаційних функцій, а другі, навіть будучи оснащеними власними GPS чіпсетами, використовують для своєї роботи навігаційні програми, призначені для конкретної операційної системи основного пристрою. Як правило GPS-трекери і GPS-логгери не оснащуються власними дисплеями для відображення інформації і служать виключно для збору, передачі та зберігання даних, які згодом можуть бути оброблені і використані в найрізноманітніших цілях, наприклад, для супутникового моніторингу автомобілів.

**Мережа базових станцій** представлена на рисунку 49.

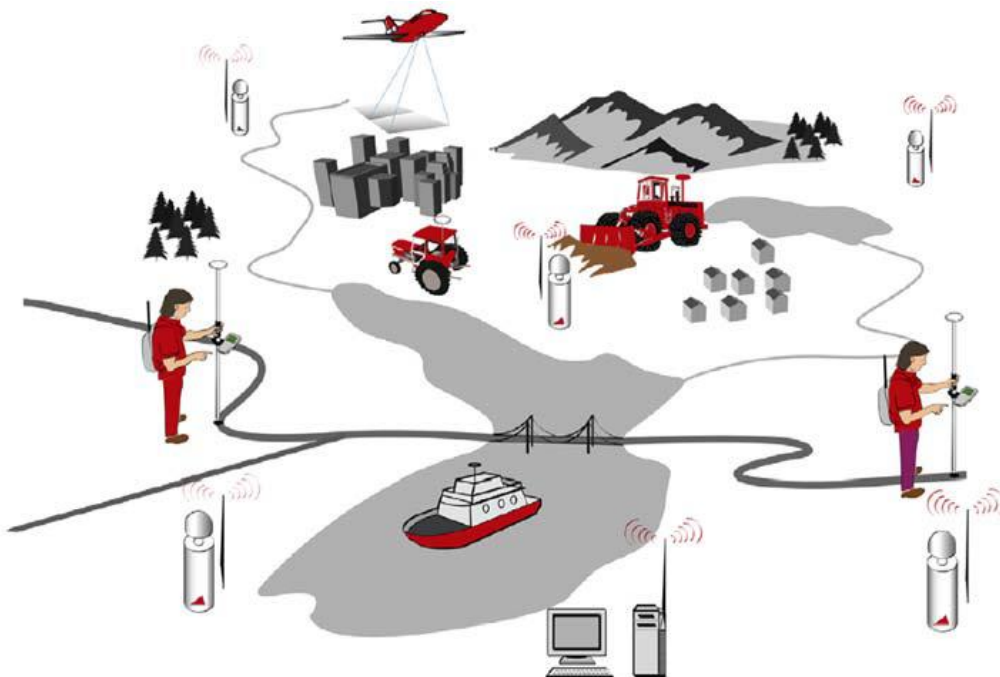


Рис. 49. Схема роботи мережі базової станції

### **Призначення мережі базових станцій**

Постійно діюча супутникова базова станція може служити як для забезпечення точними координатами при проведенні геодезичних вимірювань, топографічних зйомок, виносів в натуру і розбивки при

будівництві об'єктів і споруд, інженерних зйомок, для контролю просторового положення зведених конструкцій, так і для безперервного моніторингу всієї споруди під час його експлуатації.

Супутникові базові станції можуть служити основою геодезичної інфраструктури об'єкта, закріплюючи систему координат споруджуваного об'єкта. При цьому вони можуть забезпечувати точними диференціальними поправками супутникові геодезичні приймачі, використовувані при виконанні розбивки осей споруди, винесення в натуру і монтажу конструкцій.

Постійно діюча супутникова базова станція включає в себе GNSS приймач, супутникову антену, джерело безперебійного живлення, засоби зв'язку, які встановлюються стаціонарно на спеціально підготовленому місці. Базова станція може керуватися автоматично з персонального комп'ютера (ПК) та спеціалізованого програмного забезпечення. Вона може працювати автономно без участі оператора.

В даний час зі створенням мереж базових станцій RTK (Network RTK) з'явилася можливість працювати з ровером в мережі базових станцій замість того, щоб створювати свою власну базу.

Користувач платить за користування сервісом отримання поправок, які приймає його ровер (замість того, щоб вкладати гроші у власну базову станцію).

RTK-поправки можуть формуватися різними способами:

- Master-Auxiliary corrections (MAX);
- індивідуальні MAX (i-MAX);
- віртуальна базова станцій (VRS);
- Flächen-Korrektur-Parameter (FKP) - метод майданних поправок.

### **Мережа RTK базових станцій**

Мережа базових станцій RTK являє собою деяку кількість постійно діючих GPS або GNSS приймачів (рекомендується мати мінімум п'ять базових станцій), які об'єднують накопичені супутникові дані і формують



RTK поправки для роверів. Відстань між станціями не повинна перевищувати 70 км. Такі мережі і називаються мережами RTK.

### **Принципи роботи мережі базової станції RTK:**

Основний принцип такий – всі базові станції в мережі постійно передають супутникові вимірювання на центральний пульт управління (сервер), на якому працює спеціальне програмне забезпечення, наприклад Leica GNSS Spider.

Основна мета функціонування мережі – зменшити до мінімальних значень вплив помилок, що залежать від відстані між базовими станціями і ровером, на координати, які обчислюються ровером, працюючим всередині мережі.

Раніше в якості прикладів мережевого RTK, були згадані методи MAX і VRS, які зараз доступні на ринку. У кожному з цих методів виконується мінімізація (або моделювання) помилок з використанням різних концепцій. Залежно від обраного методу даний процес моделювання виконується або центральним сервером або безпосередньо ровером. Тому принцип обміну даними між RTK мережею і ровером для кожного методу різний, що може призводити до деяких відмінностей в ефективності, точності і надійності отримання результатів.

### **Перевагами мережевого RTK:**

- зникає необхідність в установці тимчасових базових станцій на вихідних пунктах;
- точне визначення координат ровера;
- забезпечення високоточних результатів при значних відстанях між базовими станціями і ровером;
- необхідно меншу кількість станцій для покриття однієї і тієї ж території в порівнянні з кількістю станцій при використанні звичайного RTK;
- більш висока надійність і доступність отримання RTK-поправок (навіть, якщо одна з базових станцій по якійсь причині перестає функціонувати, інша станція продовжує підтримувати роботу ровера)

## ЛІТЕРАТУРА

1. Євдокімов А. А. Текст лекцій з дисципліни «Електронні геодезичні прилади» (для студентів денної та заочної форм навчання напряму підготовки 6.080101 «Геодезія, картографія та землеустрій») / А. А. Євдокімов; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 64 с.
2. Костецька Я.М. Геодезичні прилади. Частина II. Електронні геодезичні прилади. – Львів, 2006. – 324 с.
3. Мацко П.В. Введення в геотроніку : навч. посібник / П. В. Мацко, А. М. Голубєв. – Херсон : ХДУ, 2006.–100 с.
4. Сайт ТОВ НВП «Навігаційно-геодезичний центр» - офіційного дистриб'ютера Leica Geosystems в Україні. [Електронний ресурс] : – Режим доступу : <https://ngc.com.ua/ua/index.html>
5. Тревого І.С. Сучасні тенденції розвитку та класифікації електронних тахеометрів [Текст] / І. Тревого, А. Баландюк // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. — Львів: Нац. ун-т "Львівська політехніка", 2009. — Вип. I (17). — С. 109-115.
6. Тревого І.С., Шевченко Т.Г., Мороз О.І. Геодезичні прилади. Практикум: навчальний посібник / За загальною редакцією Шевченка Т.Г. – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2012. -240 с.
7. Шануров Г.А. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ : Учебн. пособие / Г. А. Шануров, С. Р. Мельников – Москва : ЧПП «Репрография» МИИГАиК, 2001. – 136 с.
8. Шевченко Т.Г., Мороз О.І., Тревого І.С. Геодезичні прилади: Підручник / за редакцією Т.Г.Шевченка – Львів: Видавництво національного університету „Львівська політехніка”, 2009. – 484 с.



Формат 60x84/16. Умовн. друк. арк. 9,06. Зам. № 31. Наклад 100 прим.  
Видавництво УжНУ «Говерла».  
88000, м. Ужгород, вул. Капітульна, 18. E-mail: hoverla@i.ua

*Свідоцтво про внесення до державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції –  
Серія 3т № 32 від 31 травня 2006 року*