

Тема: ВІДЛІКОВІ ПРИСТРОЇ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИЛАДІВ

Геодезичні прилади призначені для порівняння вимірюваних величин з робочими мірами приладів. У геодезичних приладах робочі міри найчастіше відтворюють одиниці довжини, кутові одиниці, одиниці частоти й часу.

Шкали геодезичних приладів

Призначення шкал. Вимоги до них

Шкали є невід'ємними частинами геодезичних приладів. Вони слугують мірами, з якими порівнюють вимірювані величини.

Шкала являє собою систему штрихів, що нанесені на будь-якій поверхні і розташовані нормально до лінії, яку називають осью. Залежно від форми та розташування осью лінії шкали поділяють на *лінійні* та *криволінійні*. У геодезичних приладах з криволінійних шкал, зазвичай, використовують колові. Прикладом лінійної шкали може бути рейка або рулетка, а колової – шкала круга кутомірного приладу, наприклад, теодоліта. Розрізняють *рівномірні* та *нерівномірні* шкали. Нерівномірні шкали застосовують, зокрема, у вимірних електротехнічних приладах, наприклад, у вольтметрах та амперметрах. У геодезичних приладах використовують зазвичай рівномірні шкали. У таких шкалах штрихи розташовані на однаковій віддалі один від одного. Один штрих шкали вважають *початковим*. У лінійних шкалах він розташований на початку (кінці) шкали, а у колових безперервних ним може бути будь-який штрих шкали.

Інтервали між суміжними штрихами шкали називають *поділками*, а різницю значень двох суміжних штрихів – *ціною поділки*. Для зручності відрахування штрихи шкали підписують через певні проміжки. Частіше підписують штрихи, які відповідають цілій кількості значень, наприклад, сантиметрів, дециметрів, мінут, градусів тощо. Зазвичай підписують штрихи, що кратні 5 або 10. Підписані штрихи виконують довгими за решту штрихів. Для зручності коротшими від підписаних, але довгими від рядових можуть бути й непідписані штрихи, наприклад, півградусні. Якщо шкалу, яку відраховують, розглядають через мікроскоп, штрихи підписують так, щоб у полі зору мікроскопа було видно одночасно не менше від двох підписаних штрихів. У виняткових випадках у полі зору мікроскопа видно лише один штрих, хоча це може бути причиною помилки у відліку. Зазвичай, на шкалах кругів, коли відліковим пристроєм слугує мікроскоп, підписують кожний градус.

На кругах оптичних теодолітів шкали наносять у вигляді однієї доріжки штрихів, рівновіддалених один від одного. На кругах кодових (електронних) теодолітів наносять декілька, наприклад, концентричних доріжок. Інтервали між штрихами на доріжках функціонально пов'язані. Кожна доріжка – це комбінація із прозорих та непрозорих смужок. Звичайно кількість смужок подвоюється на кожній наступній доріжці, якщо рахувати від центра круга.

До шкал геодезичних приладів ставлять такі основні вимоги:

1. Всі поділки основних вимірних шкал повинні бути рівними. Нерівномірними можуть бути лише другорядні додаткові шкали, наприклад, такі, що містять поправки до основних вимірних шкал.

2. Загальна довжина шкали має дорівнювати номінальній величині, а різниця між ними повинна бути настільки малою, щоб нею можна було знехтувати. У протилежному випадку у відлік шкали необхідно вводити поправки. (Очевидно, що для колових шкал це не обов'язково).

3. Якість матеріалу шкал повинна забезпечити можливість нанесення штрихів потрібної товщини.

4. Матеріал, на який нанесена шкала, повинен забезпечити збереження всіх початкових параметрів шкали впродовж тривалого часу.

5. Центр колової шкали, який розміщений у точці перетину напрямків всіх штрихів, має збігатися з віссю обертання шкали.

Призначення відлікових пристроїв

Щоб виміряти будь-яку величину, наприклад, довжину лінії або кут, необхідно відлічити відповідну шкалу. **Відліком** називають величину лінійного відрізка або дуги від нульового штриха до індексу, що дотикається до шкали, або спроектований на неї. Штрихи шкали, між якими розміщений індекс або його проекція, називають **молодшим** та **старшим** за мірою їхнього віддалення від початкового (нульового) штриха шкали. На *рис. 1* *a* – молодший, *b* – старший штрих, відповідно. Відлік *S* рівномірної шкали, наведеної на *рис. 1*, такий

$$S = (N + x) \cdot \lambda = N\lambda + x\lambda, \quad (1)$$

де *N* – кількість цілих поділок шкали між початковим (нульовим) штрихом шкали та індексом (фактично це номер молодшого штриха *a*); *x* – дробова частка поділки між молодшим штрихом та індексом *I*; λ – ціна поділки шкали. Як звичайно, під час відлічування індекс найчастіше не збігається з будь-яким штрихом. Для визначення $\Delta = x\lambda$, власне, дробової частки шкали призначені відлікові пристрої. Найчастіше відлікові пристрої застосовують у кутомірних приладах, оскільки їхні колові шкали кругів (лімба) мають невеликий діаметр. Точність відлічування, а фактично й вимірювання, залежить від точності визначення дробової частки поділки Δ . Чим точніше потрібно виміряти кут, тим точніше необхідно виміряти або визначити дробову частку поділки – Δ .

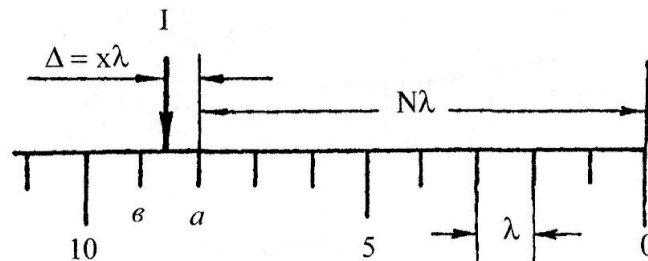


Рис. 1. Принцип відлічування шкали

За способом вимірювання кутової величини Δ відлікові пристрої кутомірних приладів поділяють так.

1. Верньєри, в яких використовують здатність ока визначати суміщення штрихів як продовження один одного.

2. Штрихові мікроскопи. Вони ґрунтуються на можливості людського ока з великою точністю відлічувати десяті частки поділки.

3. Шкалові мікроскопи, в яких для відлічування дробової частки поділки застосовують спеціальні шкали.

4. Мікроскопи з гвинтовими мікрометрами.

5. Мікроскопи з оптичними мікрометрами, в яких використовують як компенсатори оптичні деталі.

6. Відлікові пристрої електронних приладів.

Верньєр

Верньєр – це сектор колової шкали алідади, що дотикається до шкали круга. На *рис. 2* крайні поділки шкали верньєра (алідади) збігаються з двома поділками шкали круга. Між крайніми поділками верньєра міститься n поділок круга (три поділки) і $n+1$ поділок верньєра (чотири поділки). На *рис. 2* λ – ціна поділки круга; μ – ціна поділки верньєра; t – різниця між величинами поділки круга і верньєра, яку називають точністю верньєра

$$t = \lambda + \mu. \quad (2)$$

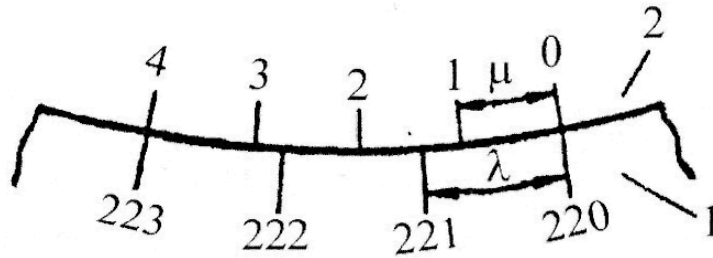


Рис. 2. Верньєр: 1 – круг; 2 – алідада

Згідно з *рис. 3.2* $\mu(n+1) = \lambda n$, звідки

$$\mu = \frac{\lambda n}{n+1}. \quad (3)$$

Підставляючи значення μ із залежності (3) у (2), одержимо

$$t = \frac{\lambda}{n+1}. \quad (4)$$

Точність верньєра дорівнює ціні найменшої поділки круга, поділеної на кількість поділок на верньєрі, наприклад, для верньєра, зображеного на *рис. 2*, $\lambda = 1^\circ$, $n+1 = 4$. Тому $t = 1^\circ/4 = 15'$. Штрихи верньєра також оцифровують, а нульовий штрих називають покажчиком верньєра. На *рис. 3* показано приклад відлічування верньєра технічного теодоліта. Шкала круга має підписані штрихи десятків градусів (140, 150), на шкалі верньєра підписано нульовий штрих (покажчик) і десятки хвилин (10, 20), ціна поділки круга $\lambda = 20'$; ціна поділки верньєра $\mu = 30''$ (точність верньєра згідно із залежністю (4) $t = 20'/40 = 30''$). Відлік складається з відліку круга за покажчиком верньєра та відліку власне верньєра. Покажчик верньєра розташований між штрихами круга – молодшим – $141^\circ 40'$ і старшим – $142^\circ 00'$, тобто відлік круга $140^\circ 40'$. Відліком верньєра є той його штрих, що збігається з будь-яким штрихом круга. Це менший штрих за штрихом $11'$, тобто відлік верньєра $11'30''$. Відлік на *рис. 3*: $140^\circ 40' + 11'30'' = 140^\circ 51'30''$.

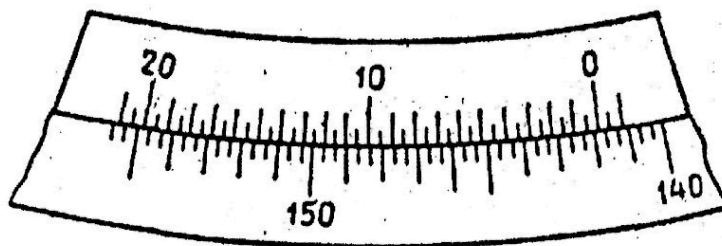


Рис. 3. Приклад відлічування верньєра (відлік $141^\circ 51'30''$)

Такий самий спосіб відлічування застосовують і для лінійних шкал (наприклад, штангенциркулів), а відліковий пристрій називають ноніусом.

Верньєри застосовували для відлічування у кутомірних приладах з металевими кругами, які виявилися дуже довговічними. Нині такі прилади не виготовляють, проте їх можна зустріти не тільки в музеях. Відлікові пристрої типу верньєра або ноніуса використовують у найпростіших геодезичних приладах.

Штриховий мікроскоп

Штриховий мікроскоп – це відліковий пристрій, який слугує для окомірного оцінювання дробової частки поділки шкали між її молодшим штрихом та індексом. У штриховому мікроскопі в площині зображення, яке будує об'єктив мікроскопа, розміщують скляну плоскопаралельну платівку, на якій вигравіювано як індекс штрих-показчик. У полі зору окуляра мікроскопа одночасно видно ділянки шкал кругів (наприклад, теодолітів горизонтального і вертикального) та спроектований на них індекс – штрих-показчик, який паралельний до штрихів шкал (рис. 4). Це дає змогу відлічувати горизонтальний та вертикальний круги одночасно, але тільки одну сторону круга, що не виключає впливу ексцентриситету аліади та круга на результати вимірювань. Відлік штрихового мікроскопа

$$S = N\lambda + \Delta = N\lambda + x\lambda, \quad (5)$$

де, як звичайно, N – кількість цілих поділок шкали круга; x – дробова частка поділки; λ – ціна поділки шкали круга.

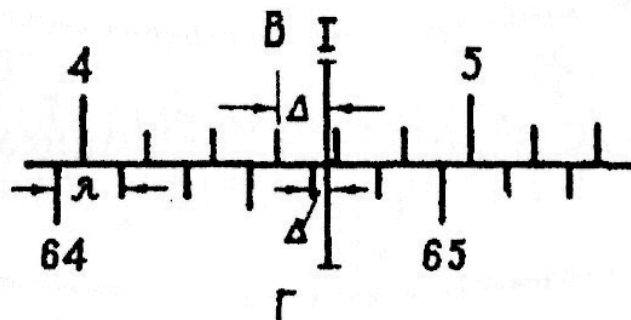


Рис. 4. Принцип відлічування штрихового мікроскопа (горизонтальний круг $64^{\circ}43'$, вертикальний круг $04^{\circ}38'$)

У прикладі (рис. 4) на шкалах підписано кожний градус, тому ціла поділка шкали круга $\lambda = 10'$. Видиме зображення поділки круга окомірно ділять на десять частин і відлічують дробову частку поділки Δ у її десятих частках. Наприклад, для горизонтального круга (Г) $S = 64^{\circ}40' + 10' \cdot 0,3 = 64^{\circ}43'$, для вертикального (В) $S = 4^{\circ}30' + 10' \cdot 0,8 = 4^{\circ}38'$. Номінальна точність відлічування, звичайно, близька до $0,1\lambda$. Щоб забезпечити сприятливе окомірне оцінювання відліку до $0,1\lambda$ необхідно, щоб видима величина поділки становила $1,5 \dots 2$ мм, а штрих був завтовшки не більше ніж $0,1 \dots 0,15$ мм. Ергономічні дослідження показали, що такі умови є найсприятливішими для окомірного оцінювання десятих часток поділки. Підвищенню точності відлічування сприяє чіткість зображення штрихів шкал кругів, паралельність індексу штрихам шкал, а також суміщення зображень штрихів шкал з площиною скляної платівки з вигравіюваним штрихом-індексом.

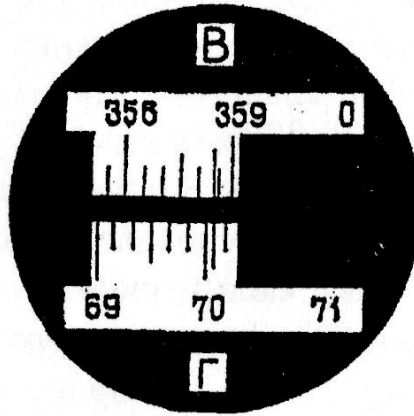


Рис. 5. Поле зору штрихового мікроскопа теодоліта Т30 (відлік горизонтального круга $70^{\circ}02'$, вертикального круга $358^{\circ}48'$)

Штриховими мікроскопами обладнують зазвичай технічні теодоліти, наприклад, типу Т30 (СРСР, РФ), Theo 080 (Carl Zeiss Jena) тощо. На рис. 5 показано поле зору штрихового мікроскопа теодоліта Т30 ($\lambda = 10'$).

Шкаловий мікроскоп

За конструкцією шкаловий мікроскоп подібний до штрихового. Головна їхня відмінність у тому, що на такій самій скляній плоскопаралельній платівці нанесена спеціальна шкала, що слугує для оцінювання дробових часток поділки круга. Розмір, власне, довжину шкали підбирають так, щоб видима величина однієї поділки круга дорівнювала довжині шкали. Порушення цієї умови викликає рен мікроскопа, який негативно впливає на результати вимірювань.

За відсутності рена відлік шкалового мікроскопа (рис. 6) такий

$$S = N\lambda + k\mu + y\mu, \quad (6)$$

де N – кількість цілих поділок шкал круга, що задіяні у відліку; λ – ціна поділки шкали круга; μ – ціна поділки шкали мікроскопа; k – кількість цілих поділок шкали мікроскопа, які відлічують; y – дробова частка найменшої поділки шкали мікроскопа.

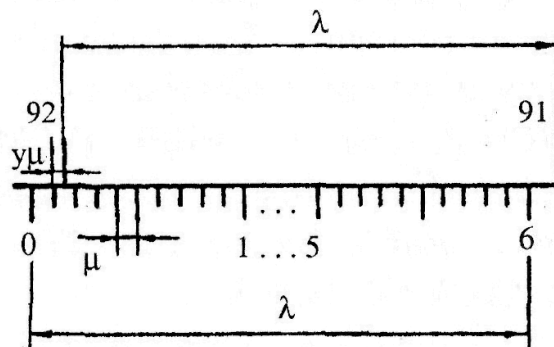


Рис. 6. Принцип відлічування шкалового мікроскопа (відлік $92^{\circ}01,5$)

Якщо шкала мікроскопа має n поділок, ціну її поділки визначають за залежністю

$$\mu = \frac{\lambda}{n}, \quad (7)$$

Для *рис. 6* $\lambda = 1^\circ$, $N = 92^\circ$, $\mu = 1' = 60''$, $k=1$, $y = 0,5$, $n = 60$. На *рис. 6* зображено тільки 20 (0...10; 50...60) з 60 поділок шкали мікроскопа по десять спочатку та в кінці шкали. Дробову частку поділки шкали μ оцінюють окомірно до десятої частки поділки, тобто $0,1\mu = 0,1' = 6''$.

Згідно із залежністю (6) відлік шкалового мікроскопа на *рис. 6* такий $S' = 92 \cdot 1^\circ + 1 \cdot 1' + 0,5 \cdot 1' = 92^\circ 01,5'$ або $S = 92^\circ 01' 30''$. Якщо прийняти, що номінальна точність відлічування шкал такого типу становить $0,1\mu$, відлічити шкалу можна з точністю до $6''$. Зокрема, в теодолітах типу Т5 середня квадратична похибка вимірювання кутів одним прийомом становить $\pm 5''$ (тому Т5).

У полі зору шкалового мікроскопа зазвичай одночасно видно зображення ділянок шкал обох кругів – горизонтального та вертикального. Хід променів у теодоліті з шкаловим мікроскопом подано на *рис. 7*. Відлічувати можна одночасно вертикальний і горизонтальний круги, але тільки одну сторону кожного, що не дає змоги уникнути впливу ексцентриситету алідади та круга на результати вимірювань. Шкаловими мікроскопами упоряджують технічні та точні теодоліти. На *рис. 8* та *рис. 9* подано поле зору шкалових мікроскопів технічних теодолітів: *рис. 8* – 2Т30; *рис. 9* – 4Т30. На *рис. 10* і *рис. 11* наведено приклади відлічування шкалового мікроскопа точних теодолітів. На *рис. 10* – 2Т5К, а на *рис. 11* – 3Т5КП.

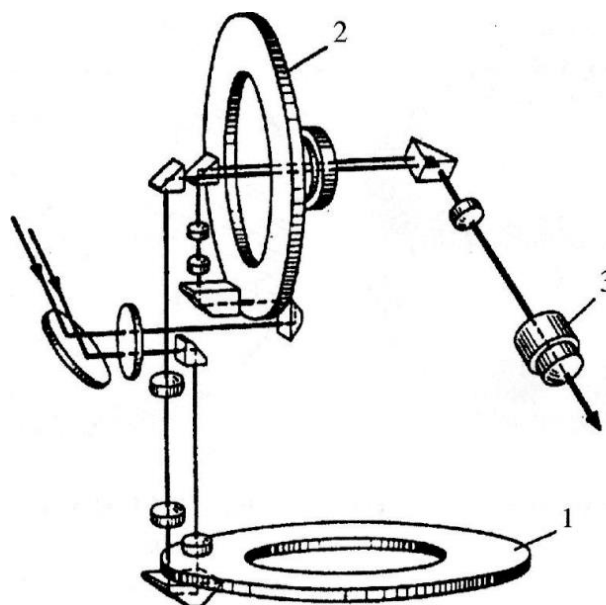


Рис. 7. Хід променів у теодолітах із шкаловими мікроскопами:
1 – горизонтальний круг; 2 – вертикальний круг; 3 – окуляр мікроскопа

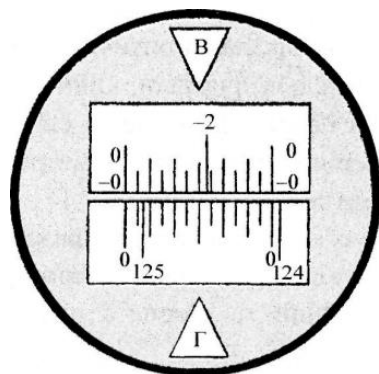


Рис. 8. Відлік у теодоліті 2Т30
($\lambda = 1^\circ$; $\mu = 5'$):
горизонтального круга $125^\circ 07,0'$;
вертикального круга $-2^\circ 26,5'$

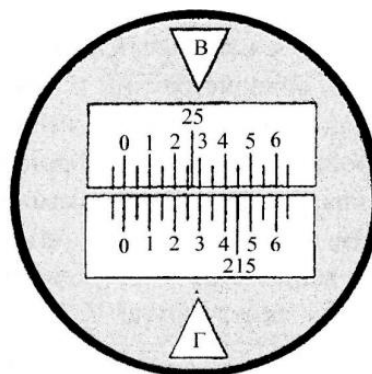


Рис. 9. Відлік у теодоліті 4Т30П
($\lambda = 1^\circ$; $\mu = 5'$):
горизонтального круга $215^\circ 44,0'$;
вертикального круга $25^\circ 26,5'$

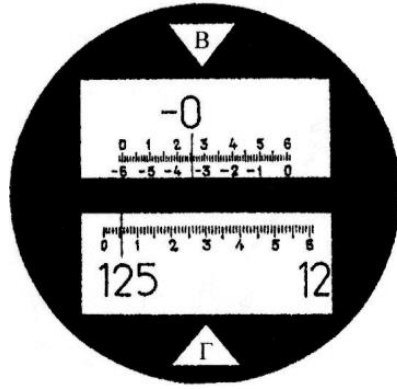


Рис. 10. Відлік у теодоліті 2Т5К
 $(\lambda = 1^\circ; \mu = 1')$
горизонтального круга $125^\circ 05,4'$;
вертикального круга $-0^\circ 34,5'$

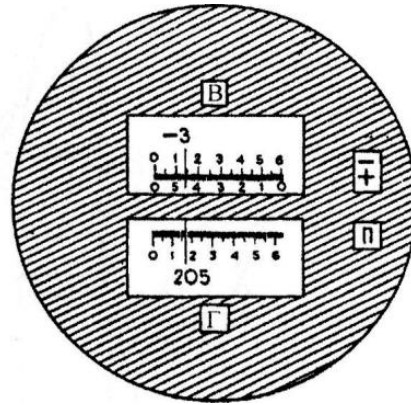


Рис. 11. Відлік у теодоліті 3Т5КП
 $(\lambda = 1^\circ; \mu = 1')$
горизонтального круга $205^\circ 07,0'$;
вертикального круга $-03^\circ 14,5'$

Відлікові пристрої електронних (кодових) кутомірних приладів

Електронно-обчислювальна техніка практично вирішила проблему автоматизації опрацювання результатів геодезичних вимірювань. Проте, оскільки відліки фіксують окомірно в оптичних приладах, результати вимірювань не можна ввести у комп'ютер автоматично, безпосередньо з приладу. Тому виникла необхідність у приладах, результати вимірювань якими 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 двом знакам двійкової системи: 0 та 1. Коли повертати автоматичний просвітлювальний пристрій по кругу, під час просвічування останнього виникають два сигнали: світло є, 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. 12).

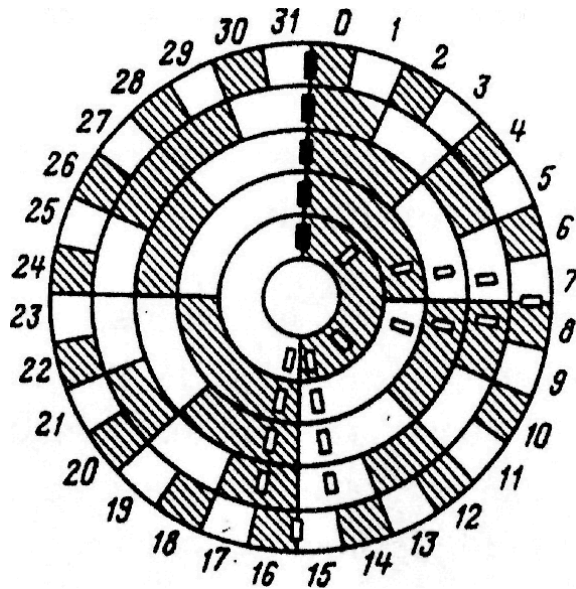


Рис. 12. Колова двійкова кодова шкала

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_{np} та непрозорих $N_{нп}$ смужок у кожному кільці за порядковим номером k , починаючи з першого внутрішнього, визначають згідно із залежністю

$$N_{i0} = N_{i1} = 2^{k-1}. \quad (8)$$

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 Δx_p перетворювача світлового сигналу (під час просвітлювання круга) у електричний

$$\Delta x_p = \frac{360^\circ}{2^n}. \quad (9)$$

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 рис. 13 подана принципова схема фотоелектричного перетворювача зчитування.

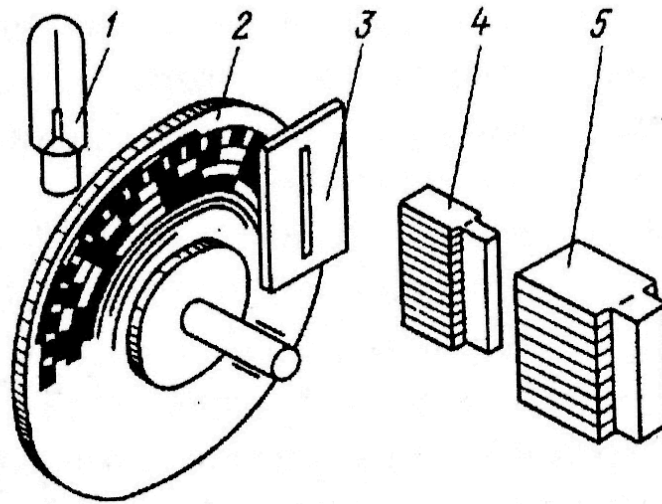


Рис. 13. Принципова схема фотоелектричного зчитувача-перетворювача:
 1 – джерело світла; 2 – круг з кодом; 3 – діафрагма з прорізю;
 4 – блок фотоприймачів; 5 – електронний блок

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 – кута повороту – опитуванням фотоелектричних приймачів і опрацюванням одержаних з них сигналів. Опитування 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 рис. 12, або застосовують спеціальні шкали, як, наприклад, шкала Грея (рис. 14).

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.

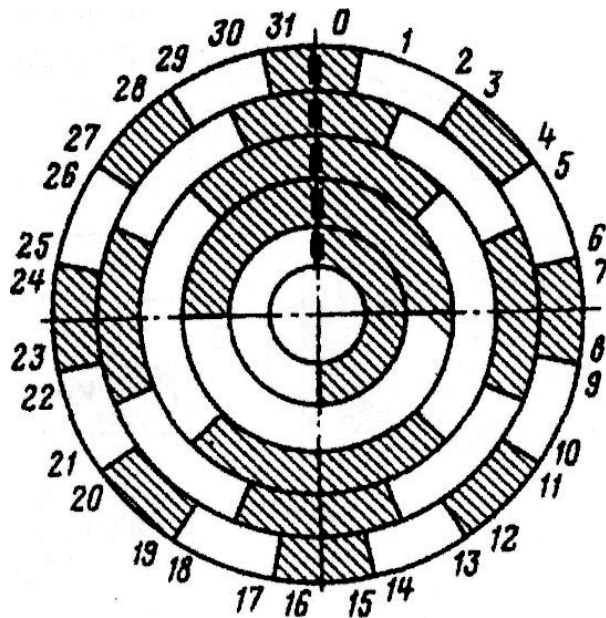


Рис. 3.14. Колова шкала з кодами Грея

Роздільну здатність фотоелектричних перетворювачів підвищують, застосовуючи 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 рис. 15 показано частину растра круга). Прозорий і непрозорий сусідні штрихи є елементом квантування круга, який у кутовій мірі 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, 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.

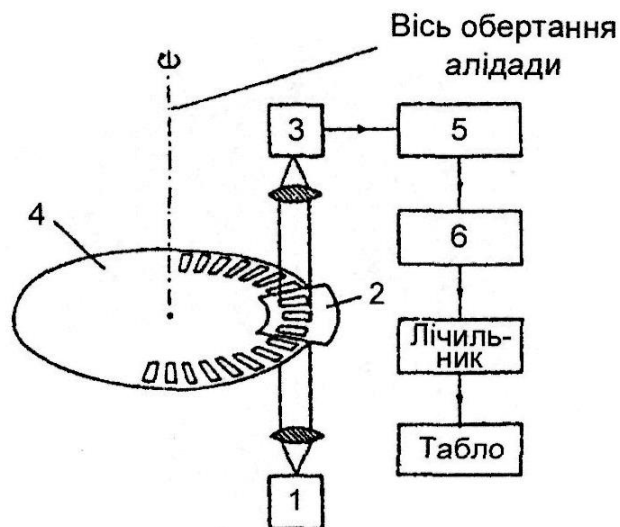


Рис. 15. Схема імпульсної системи відлічування круга:

1 – світлодіод; 2 – маска; 3 – фотодіод; 4 – круг із шкапою 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 короткочасні імпульси кожного періоду коливань. Кількість імпульсів, а, власне, на скільки елементів квантування повернувся круг, фіксує лічильник. На табло висвітлюється величина вимірюваного кута в кутових одиницях.

Щоб розрізнити напрямок обертання круга, на нього наносять дві растрові доріжки, зміщені одна відносно одної на половину товщини штриха. Зчитувач має два фотодіоди відповідно. У результаті одержують два імпульсні сигнали, зміщені один відносно одного на чверть періоду. Знак зміщення визначає напрямок повороту 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 до дробової частки 1° . Зображення доріжок, збільшене оптичною системою, проєктується 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).

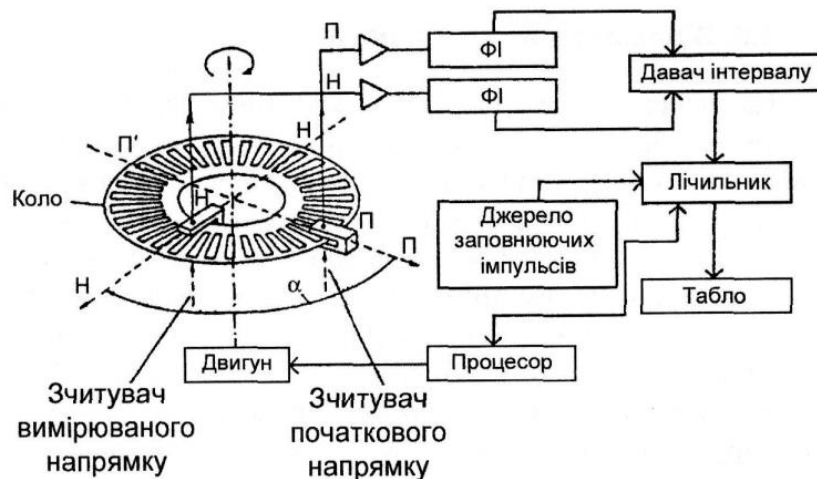


Рис. 16. Схема динамічної системи відлічування та визначення напрямків

Крім імпульсної, сьогодні застосовують динамічну систему відлічування та визначення кутових величин (рис. 16). 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 (Π' - Π) і вимірювального (H - H) 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 інтегровального цифрового фазометра дає змогу у теодоліті, наприклад, T2000 (Leica, Швейцарія), вимірювати кути з точністю не гірше ніж $1''$.