

Лекція 4. ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ПП)

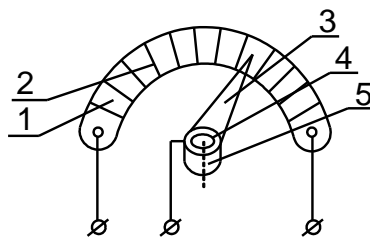


Рис. 4.1. Схематичне зображення конструкції ПП

Температурне напруження, що виникає в ПП, дорівнює:

$$\sigma_t = E_{др}(\beta_k - \beta_{др})(t_p - t_n), \quad (1)$$

де $E_{др}$ – модуль пружності матеріалу дроту ПП; β_k , $\beta_{др}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення відповідно каркасу та дроту; t_p , t_n – робоча температура й температура під час намотування. Початкове напруження, створене під час намотування,

$$\sigma_n = \frac{F_n}{q_{др}}, \quad (2)$$

де F_n – зусилля натягу дроту під час намотування; $q_{др}$ – площа поперечного перерізу дроту.

Таблиця 4.1

Матеріали дроту для обмоток потенціометрів

Сплав	Хімічний склад, %	Питомий опір ρ при 20°C, Ом·мм ² /м	Температурний коефіцієнт опору, град ⁻¹
Константан	Cu 54-67, Ni 30-45, Mn 1-3	0,48 ... 0,52	-0,000005
Ніхром	Ni 55-80, Cr 14-20, Fe 14-18, Mn 1-2	1,05 ... 1,12	-0,00013
Платина-іридій	Pt 90±0,4, Ir 10±0,6	0,230 ... 0,315	-0,00013
Платина-іридій	Pt 75±0,5, Ir 25±1	0,315	-0,00095
Платина-нікель	Pt 93-95, Ni 5-7	0,11 ... 0,50	+(0,00022 ... 0,00071)
Платина-мідь	Pt 90-98, Cu 2-9,5	0,15 ... 0,57	+(0,00020 ... 0,00183)
Паладій-срібло	Pd 30-36, Ag 63-70	0,14 ... 0,16	+(0,00032 ... 0,0004)
Золото-нікель	Au 89-95, Ni 4-10	0,085 ... 0,50	+(0,00023 ... 0,00094)

Під час проектування ПП має виконуватися нерівність

$$0 < \sigma_n + \sigma_t < \sigma_{доп}, \quad (3)$$

де $\sigma_{доп}$ – допустиме напруження ПП.

У процесі роботи ПП відбувається зношування матеріалів, яке в разі ковзного тертя визначається виразом

$$W_3 = k_3 \frac{F_{щ} x_{щ}}{H}, \quad (4)$$

де W_3 – об'єм зношеного матеріалу, см³; k_3 – безрозмірний коефіцієнт (наприклад, для пари фосфориста бронза – константан в умовах легкого мащення $k_3=6$); $F_{щ}$ – сила натиснення щітки, кгс; $x_{щ}$ – шлях, пройдений щіткою, см; H – твердість зношуваного матеріалу, кг/см².

Фізико-механічні властивості найбільш поширених матеріалів для струмозмінюючих елементів щіток наведено в табл. 4.2.

Таблиця 2.2

Фізико-механічні властивості матеріалів, що використовуються для виготовлення движків потенціометричних перетворювачів

Матеріал	Позначення	Температура плавлення, °C	Густина, г/см ³	Твердість відпаленого матеріалу		Питомий опір, 10 ⁻⁶ Ом·мм ² /м	Теплопровідність, °C
				за Брінеллем	за Віккерсом		
платина	Pt	1733	21,40	50	39	10,6	0,7
паладій	Pd	1554	–	501	–	10,75	0,41
іридій	Ir	2452	–	1705	–	5,30	0,59
кобальт	Co	1490	–	1252	–	6,80	0,70
срібло	Ag	961	10,50	25	23	1,58	4,16
платина-іридій	Пли-25	1840	21,75	270	250	33,50	–
платина-іридій	Пли-10	1780	21,50	150	120	24,50	0,31
паладій-іридій	Пди	1580	12,60	–	110	27,00	–
паладій-срібло	ПдСр	1330	11,00	22	95	35,80	0,31

4.3. Параметри, що характеризують ПП

1. Загальний опір.
2. Закон зміни опору.
3. Лінійність
4. Допуск на загальний опір.
5. Стабільність.
6. Опір ізоляції обмотки відносно корпусу.
7. Потужність розсіювання.
8. Робочий обертаючий момент.
9. Частота обертання.
10. Строк служби.

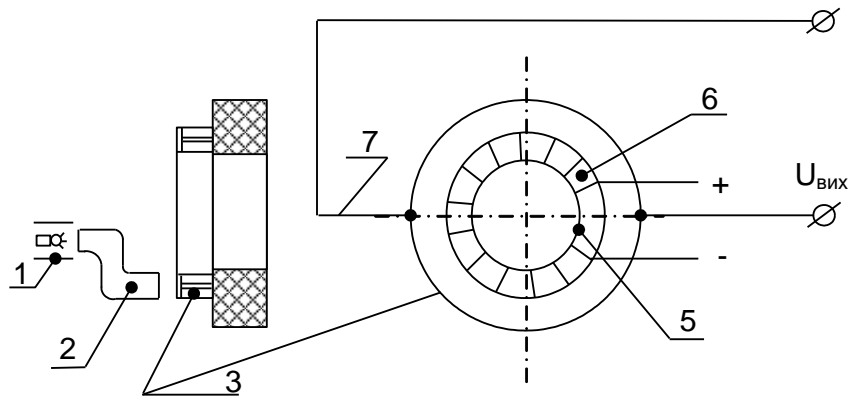


Рис. 4.2. Схематичне зображення конструкції фото потенціометра

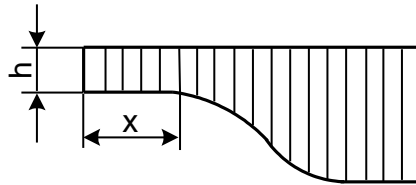


Рис. 4.3. Дротяний потенціометричний перетворювач з фігурним каркасом

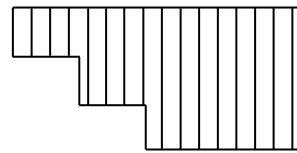


Рис. 4.4. Дротяний потенціометричний перетворювач з ступінчастим каркасом

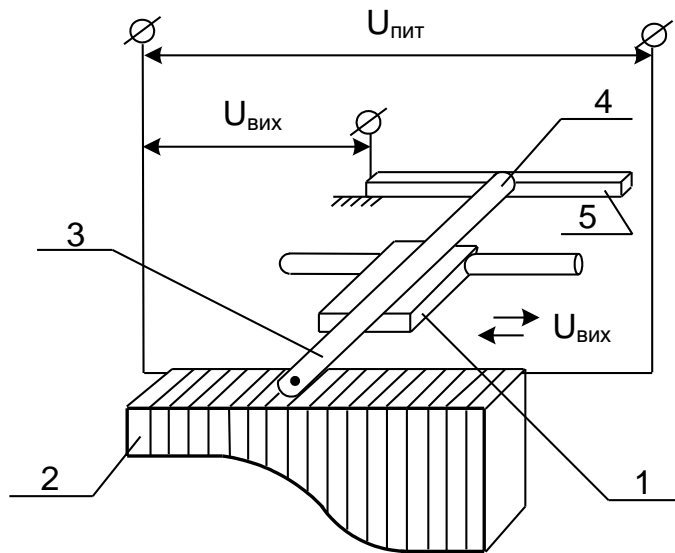


Рис. 4.5. Потенціометричний перетворювач з лінійним переміщенням движка

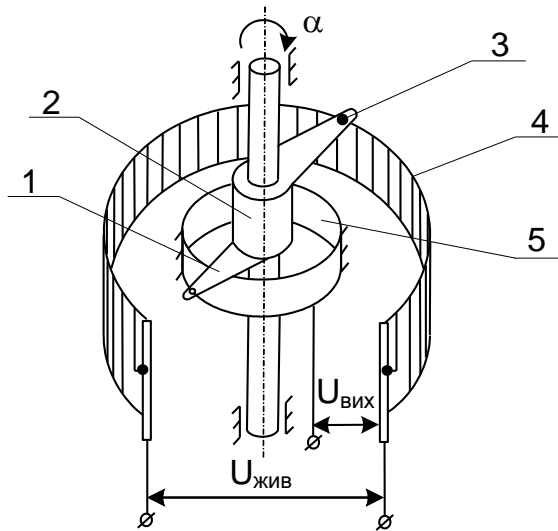


Рис. 4.6. Потенціометричний перетворювач з круговим переміщенням движка

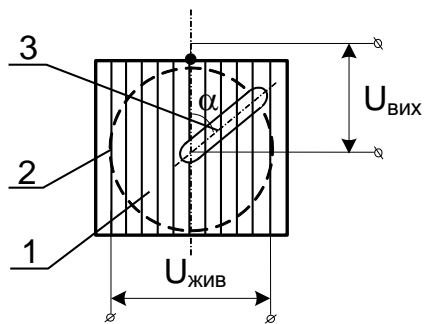


Рис. 4.7. Плоский ПП з необмежено-круговим переміщенням движка

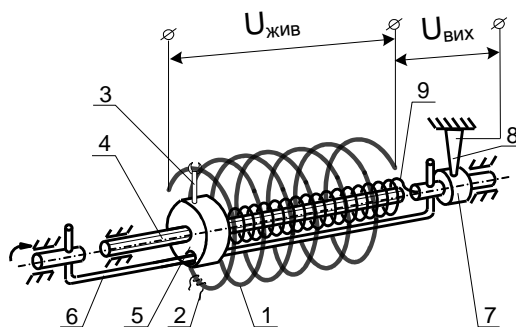


Рис. 4.8. Багатообертовий потенціометричний перетворювач

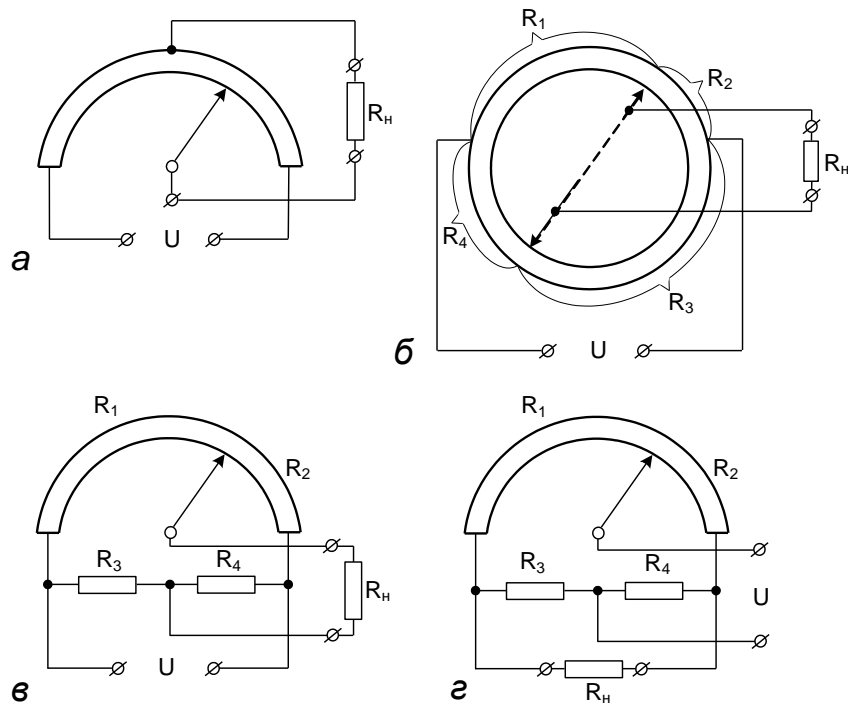
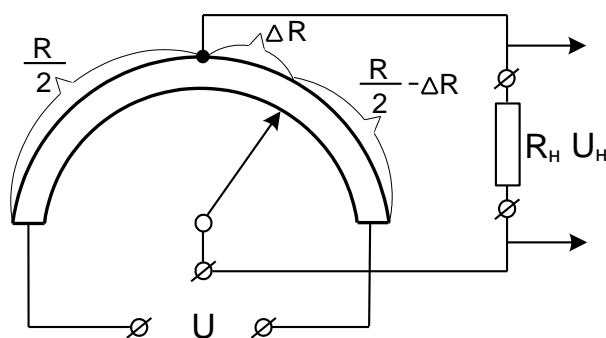


Рис. 4.9. Схеми вмикання кільцевих ПП: а – з виведенням середньої точки; б – кільцева мостова схема; в – з штучною середньою точкою; г – обернена з штучною середньою точкою

$$U_{e,2} = U \frac{\Delta R}{R}. \quad (5)$$



ΔR – опір ділянки обмотки ПП між середньою точкою та щіткою; R – загальний опір ПП; $R_{\text{н}}$ – опір навантаження; U – напруга живлення; $U_{\text{н}}$ – вихідна напруга.

Рис. 4.10. До виведення рівняння статичної характеристики

Внутрішній опір еквівалентного генератора, відповідно до схеми, дорівнює:

$$R_{e.g} = \frac{\Delta R(R - \Delta R)}{R},$$

де $R_{e.g}$ – опір еквівалентного генератора.

Сила струму в опорі навантаження:

$$I_n = \frac{U_{e.g}}{R_{e.g} + R_n} = \frac{U \frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta R(R - \Delta R)}{R} + R_n}. \quad (6)$$

Напруга на опорі навантаження:

$$U_n = I_n R_n = \frac{U \frac{\Delta R}{R}}{1 + \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right)}. \quad (7)$$

або

$$U_n = U \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right) \frac{R}{R_n}}. \quad (8)$$

(8) є рівнянням статичної характеристики ПП, перший множник являє собою рівняння характеристики ідеального подільника напруги, що відповідає холостому ходу ПП. Другий множник характеризує вплив опору навантаження на характеристику ПП і стає одиницею при $R_n \rightarrow \infty$, а практично при $R/R_n \ll 1$.

Введемо такі позначення: x – вхідне переміщення ПП; l – загальна довжина обмотки ПП.

Оскільки для ПП з лінійним розподілом опору з точністю до сталого коефіцієнта k виконуються рівняння $x = k\Delta R$, $l = kR$, то вираз статичної характеристики можна переписати у вигляді:

$$U_n = \frac{x}{l} U \frac{1}{1 + \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \frac{R}{R_n}}. \quad (9)$$

Рівняння статичної характеристики ПП, ввімкненого за схемою, показаною на рис. 4.9, б, матиме вигляд:

$$U_n = \frac{2x}{l} U \frac{1}{1 + \frac{R}{2R_n} \left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right)}. \quad (10)$$

за схемою на рис. 4.9, в:

$$U_n = \frac{x}{l} U \frac{1}{1 + \frac{R}{R_n} \left(\frac{1}{4} + \frac{R_3}{2R} - \frac{x^2}{l^2} \right)}; \quad (11)$$

за схемою на рис. 2,9, г:

$$U_n = \frac{2x}{l} U \frac{1}{1 + \frac{R}{4R_3} + \frac{R_3}{R} + \frac{\Delta R^2}{RR_3} + \frac{R}{R_n} \left(1 + \frac{R_3}{R} - \frac{2\Delta R^2}{R^2} \right)}. \quad (12)$$

Рівняння (12) при $R_n \rightarrow \infty$ матиме нелінійний характер.

Абсолютна похибка, зумовлена нелінійністю характеристики навантаженого ПП, порівняно з характеристикою перетворювача в режимі холостого ходу:

$$\Delta U_n = U_{nx} - U_n = \frac{x}{l} U \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \frac{R}{R_n}} \right]. \quad (13)$$

Відносна похибка нелінійності

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \frac{R}{R_n}}. \quad (14)$$

Відносна похибка нелінійності дорівнюватиме нулю при $x/l=0$ і при $x/l=1$. Умова $x/l=1$ не може бути виконана, оскільки для даного ПП $x_{\max} \leq l/2$.

Максимальна відносна похибка нелінійності відповідатиме випадку $x=0,5l$ або $\varphi_{\max} = 0,5\varphi_{об}$ (граничному відхиленню движка) і становитиме

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} \Big|_{\max} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{R}{R_n}}. \quad (15)$$

Визначимо, яким має бути відношення R/R_n , щоб максимальне значення відносної похибки не перевищувало 1%. З виразу (15) маємо

$$1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{R}{R_n}} \ll 0,01. \quad (16)$$

$R/R_n \ll 4/99$, тобто опір ПП для даної схеми ввімкнення має становити трохи більше як 4% опору навантаження, щоб максимальне значення відносної похибки нелінійності не перевищувало 1%.

Вирази відносної похибки і відповідні їм максимальні та мінімальні значення для інших схем.

Для схеми на рис. 4.9, б:

$$\Delta U_n = 1 - \frac{1}{1 + \frac{R}{2R_n} \left(1 - \frac{4x^2}{l^2} \right)};$$

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} \Big|_{\max \text{ при } x=0} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{R}{2R_n}}; \quad (17)$$

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} \Big|_{\min \text{ при } x=0,5l=0}.$$

Для схеми на рис. 4.9, в:

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{R}{R_n} \left(\frac{1}{4} + \frac{R_3}{2R} - \frac{x^2}{l^2} \right)};$$

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} \Big|_{\max \text{ при } x=0} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{R}{R_n} \left(\frac{1}{4} + \frac{R_3}{2R} \right)}. \quad (18)$$

Для схеми, зображеної на рис. 4.9, г, існують більш складні вирази.

Усунути або зменшити похибки нелінійності ПП можна за допомогою таких методів:

1) Використати навантаження з досить великим опором порівняно з опором ПП. В разі роботи ПП на змінному струмі можна використовувати розв'язувальний трансформатор або катодний емітерний повторювач.

2) Раціонально вибрати схему ввімкнення.

3) Звужувати діапазон змінювання $\Delta R/R$ або x/l . При цьому не слід значно збільшувати довжину обмотки потенціометра за межі його робочого кута. Значення $\Delta R/R$ простіше знизити ввімкненням послідовно з ПП сталих опорів.

4) Оптимально добирати значення крутості характеристики ПП.

5) Застосовувати функціональні ПП з нелінійним розподілом опору вздовж каркаса.

6) Використовувати ексцентричне розміщення осі движка відносно осі каркаса.

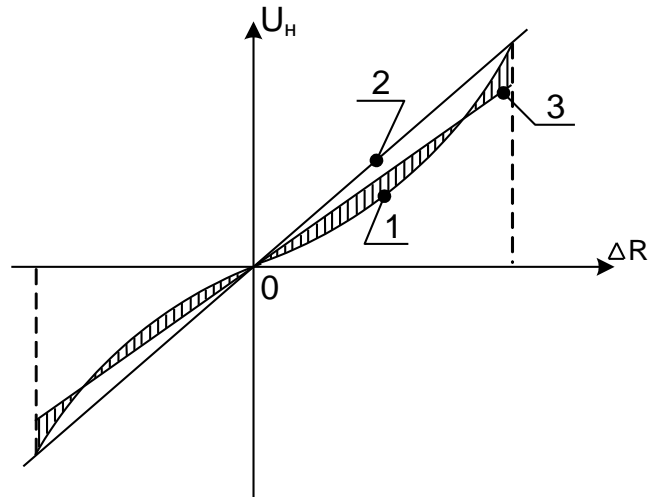


Рис. 4.11. Графіки змінювання статичної характеристики ПП

Функціональні ПП – це перетворювачі з нелінійним розподілом опору вздовж каркаса, тобто із змінним співвідношенням $\Delta R/\Delta x$ або $\Delta R/\Delta \varphi$.

Вид залежності $U_{\text{вих}}$ від x визначається формою вирізу каркаса потенціометра, тобто залежністю його висоти h від переміщення x движка $h=\varphi(x)$.

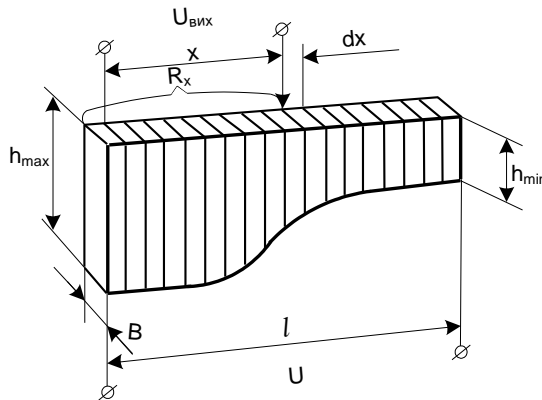


Рис. 4.12. Профільний потенціометр

$$dR_x = \rho \frac{\omega}{l} dx \frac{l_\omega}{q} \quad (19)$$

без урахування довжини витка на заокругленнях,

$$dR_x = \frac{\rho \omega}{l q} dx 2(h+b). \quad (20)$$

Величина ωl дає числове значення кількості витків на одиницю довжини потенціометра.

При цьому приріст напруги на вихідних клеммах

$$dU_{\text{вих}} = I dR_x = \frac{U}{R} dR_x = \frac{2U\rho\omega}{lqR} (h+b)dx. \quad (21)$$

Звідси висота каркаса

$$k = \frac{lqR}{2U\rho\omega}, \quad h = k \frac{dU_{\text{вих}}}{dx} - b, \quad (22)$$

де h – стала величина, не залежна від x .

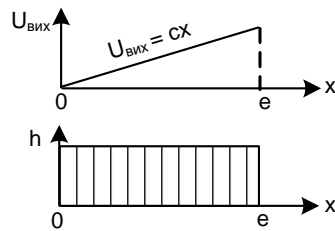


Рис. 4.13. Зміна висоти каркаса ПП з лінійною залежністю

Висота каркаса

$$h = k \frac{d(cx)}{dx} - b = kc - b \quad (23)$$

має бути сталою.

Якщо потрібно знайти залежність $U_{\text{вих}} = cx^2$ (рис. 4.14), то висота каркаса має змінюватися залежно від x за законом

$$h = k \frac{d(cx)^2}{dx} - b = 2kcx - b, \quad (24)$$

тобто лінійно залежати від переміщення x .

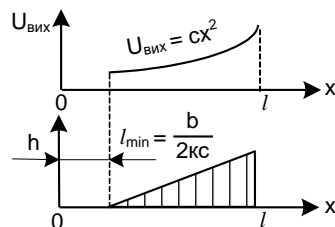


Рис. 4.14. Зміна висоти каркаса ПП з квадратичною залежністю

Потрібний вигляд залежності $U_{\text{вих}}=f(x)$ за рахунок кінцевої товщини b каркаса можна дістати лише від деякого початкового значення x , що не дорівнює нулю при $l_{\text{min}}=b/2kc$. Якщо l_{min} вважати за початкову точку ПП, то $U_{\text{вих}}=f(x)$ починатиметься не з нульового значення.

Випадок, коли переміщення движка x пропорційне квадрату вимірюваної величини (рис. 4.15) $x=ay^2$, а вихідна напруга має залежати від вимірюваної величини лінійно, тобто $U_{\text{вих}}=mu$. Заданою залежністю в цьому разі буде

$$U_{\text{вих}} = \frac{m}{\sqrt{a}} \sqrt{x} = c\sqrt{x}, \quad (25)$$

а шукану залежність $h=\varphi(x)$ дістанемо у вигляді

$$h = kc \frac{d(\sqrt{x})}{dx} - b = \frac{kc}{2} \frac{1}{\sqrt{x}} - b. \quad (26)$$

Оскільки при $x=0$ висота каркаса прямує до нескінченності, то потрібну залежність вихідної напруги також можна знайти лише від якогось початкового значення x , що не дорівнює нулю, при $l=l_{\text{min}}$.

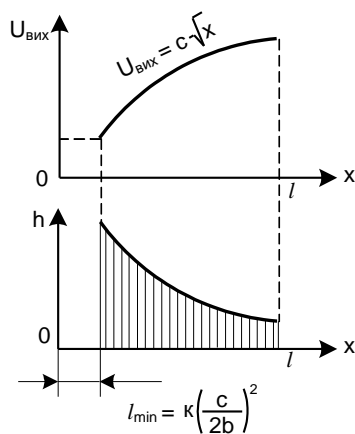


Рис. 4.15. Потенціометр з переміщенням движка, пропорційним до квадрата вимірюваної величини

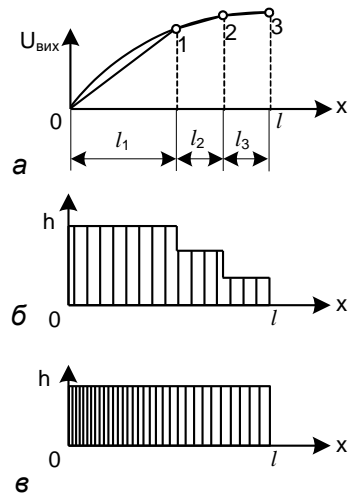


Рис. 4.16. Способи побудови функціональної залежності ПП:
 а – характеристика ПП; б – ПП з ступінчастим каркасом;
 в – ПП із змінним кроком намотки

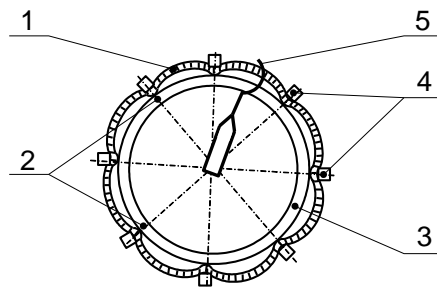


Рис. 4.17. Потенціометр з радіально профільованим каркасом

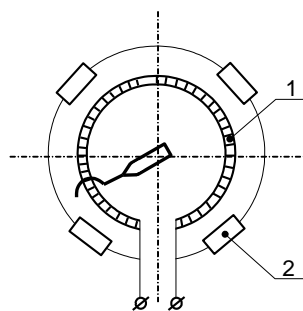


Рис. 4.18. Потенціометр з електричними шунтами

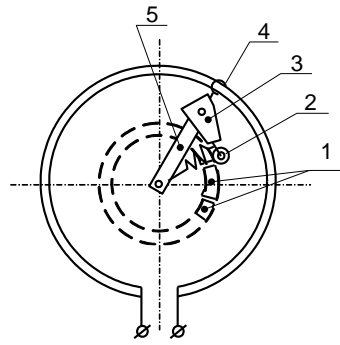


Рис. 4.19. Ламельний коригуючий механізм

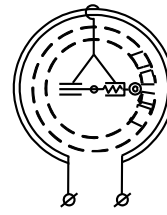


Рис. 4.20. Кулісний коригуючий механізм

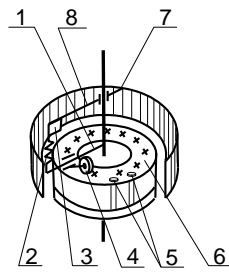


Рис. 4.21. Мембранний коригуючий механізм

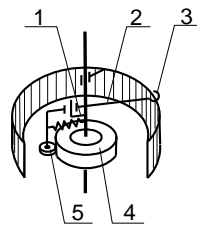


Рис. 4.22. Кулачковий коригуючий механізм