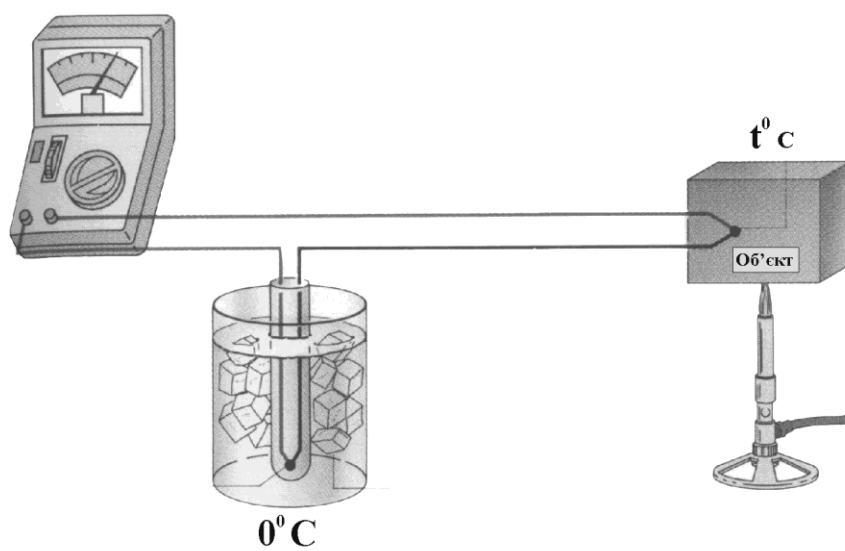


## Розділ 4

### 4. Термоелектричні явища, робота виходу.



## 4.1 Явище термоелектронної емісії

Провідність металів зумовлена наявністю вільних електронів, які рухаються подібно до частинок ідеального газу поміж іонами кристалічної ґратки металу.

Внаслідок зіткнень вільних електронів між собою, а також з іонами ґратки встановлюється енергетично рівноважний розподіл електронів. Повна енергія електронів у ґратці - від'ємна. Це означає, що при вильоті електрону з металу на нього діє сила, яка намагається повернути його назад у метал. Для виведення електрона з металу в вакуум необхідно виконати роботу проти цих сил, яка називається роботою виходу.

*Роботою виходу називається мінімальна робота, яку повинен здійснити електрон, щоб вирватись за межі даного металу в вакуум.*

Цю роботу можна також характеризувати різницею потенціалів у металі та поза ним:  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{e}$ , де  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Робота виходу  $A$  є різною для різних металів, і залежить від температури та від стану їх поверхні. При підвищенні температури деякі електрони внаслідок хаотичного руху набувають достатньо велику кінетичну енергію і можуть вилетіти за межі металу. Випускання електронів нагрітими провідниками називають термоелектронною емісією. Це явище використовується в електронних лампах та у багатьох інших електровакуумних приладах..

Залежність сили струму термоелектронної емісії від напруги між електродами в двохелектродній лампі при постійній температурі нагрівання катода називається анодною характеристикою (рис.4.1). Вигляд залежності якісно пояснюється утворенням у просторі між електродами електронної "хмаринки", яка утворює додаткове електричне поле. Це поле між електродами повертає частину електронів емісії у зворотному напрямі на катод.

Збільшення прискорюючої різниці потенціалів  $U_a$  спричиняє ріст числа електронів, які досягають анода, і при цьому анодний струм  $I_a$  зростає. У цій області графік  $I_a = f(U_a)$  описується залежністю (формула Богуславського – Ленгмюра)

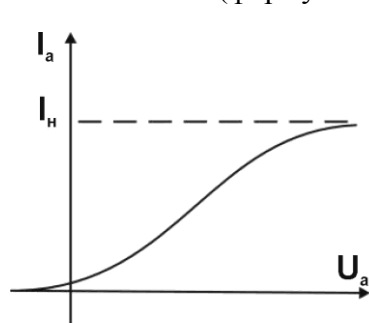


Рис.4.1

$$I_n = K U_a^{\frac{3}{2}}, \quad (4.1)$$

де  $K$  залежить від розмірів і форми електродів.

При достатньо великій  $U_a$  всі електрони, що покидають катод, досягають анода. Подальший ріст струму з збільшенням анодної напруги припиняється, встановиться струм насичення.

Теоретичний розрахунок дає залежність термоелектронного струму насичення від температури (формула Річардсона):

$$I_n = B S T^2 e^{-\frac{A}{kT}}, \quad (4.2)$$

де  $B$  - постійна, що залежить від матеріалу й форми катода;  $S$  - площа поверхні катода;  $T$  - абсолютна температура катода;  $A$  – робота виходу електрона з металу;  $k$  - постійна Больцмана,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

## 4.2 Контактні явища.

При з'єднанні двох різних провідників між ними виникає контактна різниця потенціалів, це явище у кінці ХУІІІ ст. відкрив італійський вчений А. Вольта. Він експериментально встановив два закони:

1. Контактна різниця потенціалів, що виникає при з'єднанні двох різних провідників, залежить лише від їх хімічного складу і температури.

2. Різниця потенціалів на кінцях кола, що складається з послідовно з'єднаних кількох провідників, які перебувають при однаковій температурі, не залежить від їх хімічного складу проміжних провідників, а визначається лише різницею потенціалів, що виникає при безпосередньому контакті крайніх провідників.

Як уже було сказано у попередньому розділі, робота виходу електронів залежить від хімічного складу металу, температури і стану його поверхні.

При контакті двох металів з роботами виходу  $A_1$  і  $A_2$  виникає зовнішня контактна різниця потенціалів

$$\Delta\phi_{12}^{3B} = -\frac{A_1 - A_2}{e} \quad (4.3)$$

де  $e = 16 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  - заряд електрона.  $\Delta\phi_{12}^{3B}$  це різниця потенціалів між двома точками, що перебувають дуже близько від поверхні першого і другого контактуючих металів поза ними. Ця різниця характеризує електростатичне поле створене контактом двох металів у просторі, що їх оточує. Крім зовнішньої різниці потенціалів, при контакті двох металів виникає також і внутрішня контактна різниця потенціалів. Причиною виникнення внутрішньої контактної різниці потенціалів є різна концентрація електронів провідності у цих металах. Різниця потенціалів зумовлює дифузійний потік електронів від металу з більшою концентрацією до металу з меншою концентрацією електронів. Внаслідок дифузійного переходу електронів, на межі двох металів виникає внутрішня різниця потенціалів

$$\Delta\phi_{12}^{BH} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \quad (4.4)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  - стала Больцмана;  $T$  – температура. Об'єднавши вирази (4.3) і (4.4), отримаємо формулу для контактної різниці потенціалів

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{12}^{3B} + \Delta\phi_{12}^{BH} = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \quad (4.5)$$

яка виникає на межі двох металів. Досліди показують, що зовнішня контактна різниця потенціалів  $\Delta\phi_{12}^{3B}$  практично не залежить від температури, в той час як внутрішня контактна різниця потенціалів  $\Delta\phi_{12}^{BH}$  зростає пропорційно абсолютній температурі. Проведені розрахунки свідчать про те, що при кімнатній температурі  $\Delta\phi_{12}^{3B} \gg \Delta\phi_{12}^{BH}$ .

### Явище Зеебека

Розглянемо замкнене коло, яке складається з двох провідників 1 і 2 (Рис. 4,2).

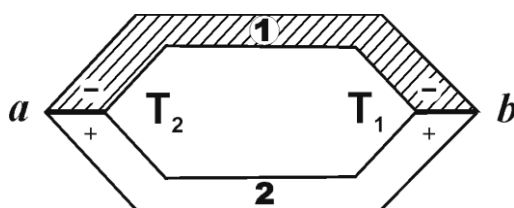


Рис. 4.2

Згідно з другим законом Кірхгофа, електрорушійна сила  $\mathcal{E}$ , що діє у даному колі, дорівнює сумі спадів напруг  $U_1$  і  $U_2$  відповідно на ділянках  $a1b$  і  $b2a$ , тобто у першому і другому провідниках

$$\mathcal{E} = U_1 + U_2 \quad (4.6)$$

Значення  $U_1$  і  $U_2$  можна визначити за законом Ома для ділянки кола ( 3.13 ).

Якщо врахувати, що на ділянках  $a1b$  і  $b2a$  не прикладемо ЕРС, то  $U_1 = \phi_{1a} - \phi_{1b}$  і  $U_2 = \phi_{2b} - \phi_{2a}$ . Підставивши ці значення у ( 4.6 ), отримаємо:

$$\mathcal{E} = (\phi_{1a} - \phi_{1b}) + (\phi_{2b} - \phi_{2a}) = \Delta\phi_a - \Delta\phi_b$$

Таким чином, з врахуванням ( 4.5 ), можна стверджувати, що у розглядуваному колі діє електрорушійна сила, яка дорівнює алгебраїчній сумі всіх внутрішніх контактних різниць

потенціалів

$$\mathcal{E} = \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \cdot (T_2 - T_1),$$

або

$$\mathcal{E} = \alpha(T_2 - T_1), \quad (4.7)$$

де  $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$ . Величина  $\alpha$  – стала, яка характеризує властивості контакту двох металів.

Якщо температури обох спаїв однакові, то з рівняння (4.7) випливає, що у замкненому колі, утвореному кількома металевими провідниками, усі спаї яких перебувають при однаковій температурі, електрорушійна сила за рахунок тільки контактних різниць потенціалів виникнути не може. Інакше виглядає справа коли температури спаїв  $T_1$  і  $T_2$  різні, наприклад  $T_1 > T_2$ . У цьому випадку в замкненому колі виникає так звана *термоелектрорушійна* сила, пропорційна різниці температур обох спаїв.

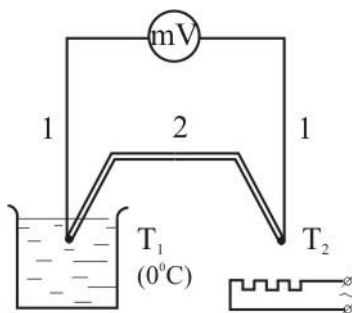


Рис. 4.3

Термоелектричні явища у металах набули широкого застосування, головним чином для вимірювання температури. Для цієї мети використовують *термоелементи*, або *термопари* – дві дротини, виготовлені з різних металів або сплавів, значення коефіцієнту  $\alpha$  яких у формулі (4.7) відоме. Кінці цих дротин зварюють (рис.4.3).

Один спай вміщують в середовище, температуру якого  $T_2$  необхідно виміряти, а другий – у середовище з відомою температурою  $T_1$ . Вимірюючи  $\mathcal{E}$  за допомогою

мілівольтметра, отримуємо з (4.7) значення температури  $T_2$ .

Термопари мають багато переваг над звичайними термометрами: значно ширший діапазон вимірюваних температур, велику чутливість, дають змогу передавати інформацію про температуру об'єкту на віддалі, здійснювати автоматичне вимірювання, запис і регулювання температури. Крім вимірювання температури, термоелектричні явища у металах використовують також для створення термоелектричних джерел струму -термогенераторів.

### Явище Пельтьє.

При протіканні струму через неоднорідне коло, складене з двох провідників, виготовлених з різних металів, на одному контакті виділяється, а на іншому поглинається теплота

$$Q_n = \Pi q = \Pi It. \quad (4.10)$$

де  $Q_n$  - теплота, яка виділяється (поглинається) на контакті;  $q$  - заряд, що проходить через спай;  $\Pi$  - коефіцієнт Пельтьє.

На віміну від теплоти Джоуля ( $Q = I^2 R t$ ), теплота Пельтьє пропорційна першому степеню струму ( $Q_n = I R t$ ) і змінює знак при зміні напрямку струму. Причина явища Пельтьє полягає у тому, що середня енергія електронів в різних металах - різна. Якщо при переході через контакт середня енергія електрона зменшується, то спай нагрівається, і навпаки.

### Явище Томсона

При проходженні струму по однорідному провіднику з градієнтом температури виділяється або поглинається теплота

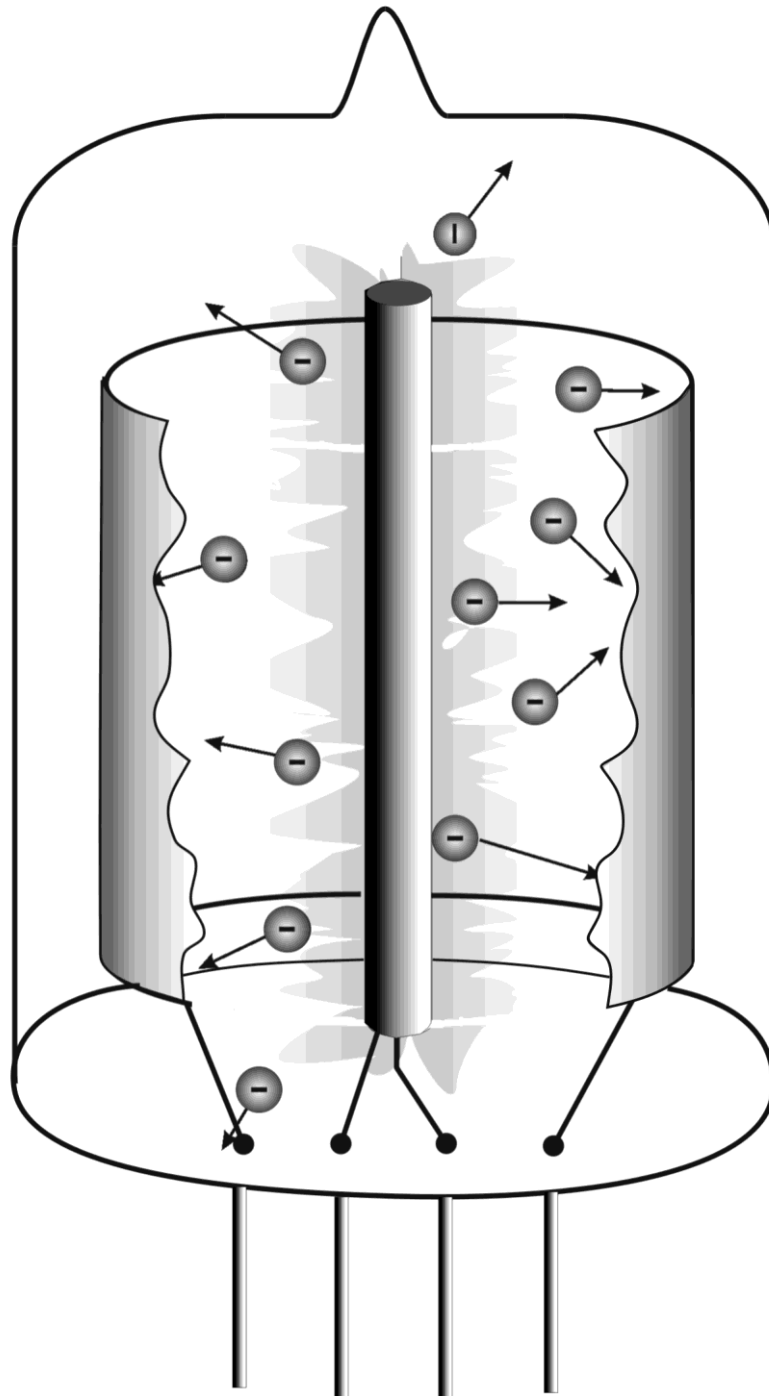
$$Q_T = \tau \frac{dT}{dx} q, \quad (4.11)$$

де  $Q_T$  - кількість теплоти, що виділяється додатково до теплоти Джоуля;

$\tau$  - коефіцієнт Томсона;  $\frac{dT}{dx}$  - градієнт температури;  $q$  - заряд, який пройшов по провіднику.

Причина явища полягає в тому, що електрони разом з зарядом переносять кінетичну енергію теплового руху: якщо струм тече в напрямку збільшення температури, то зростання енергії електронів відбувається за рахунок теплової енергії провідника і приводить до його охолодження, а якщо напрямок струму співпадає з напрямом зменшення температури, то відбувається нагрівання провідника.

Лабораторні роботи  
(Контактні явища і термоелектронна емісія )



## Лабораторна робота №7

### Визначення роботи виходу електронів з металу за допомогою явища термоелектронної емісії.

Мета роботи: дослідження явища термоелектронної емісії та визначення роботи виходу електронів з вольфраму.

#### Виведення розрахункової формули

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити матеріал з розділу 4.1

Оскільки у формулу (4.2) входять невідомі **A** і **B** (постійні для даного приладу), то для обчислення **A** потрібно виміряти струм насичення при двох різних температурах катода **T<sub>1</sub>** і **T<sub>2</sub>**.

$$I_{\text{нас}_1} = B S T_1^2 e^{\frac{A}{kT_1}} \quad (4.12)$$

$$I_{\text{нас}_2} = B S T_2^2 e^{\frac{A}{kT_2}} \quad (4.13)$$

Розв'язавши цю систему рівнянь, визначимо роботу виходу

$$A = \frac{kT_1T_2}{T_2 - T_1} \left( 2 \ln \frac{T_1}{T_2} - \ln \frac{I_{\text{нас}_1}}{I_{\text{нас}_2}} \right) \quad (4.14)$$

Враховуючи, що  $\ln \left( \frac{T_1}{T_2} \right)$  змінюється повільно з  $\left( \frac{T_1}{T_2} \right)$ , то з великим ступенем точності замість формули (4.14), можна користуватись співвідношенням

$$A = \frac{kT_1T_2 \ln \left( \frac{I_{\text{нас}_2}}{I_{\text{нас}_1}} \right)}{T_2 - T_1} \quad (4.15)$$

Температури катода **T<sub>1</sub>**, **T<sub>2</sub>** визначаємо за залежністю його опору **R<sub>t</sub>** від температури розжарювання **R<sub>t</sub> = R<sub>0</sub> (1 + α t)**, **T = (t + 273) K**.

$$T = \left( \frac{R_t + R_0}{R_0 \alpha} + 273 \right) \quad (4.16)$$

Тут **R<sub>0</sub>** - опір нитки розжарювання при 0 °C; **α** - температурний коефіцієнт опору металу (для вольфраму **α = 4,2 · 10<sup>-3</sup> K**) За законом Ома

$$R_t = \frac{U_p}{I_p}, \quad (4.17)$$

де **U<sub>p</sub>** - напруга розжарювання катода, вимірювана вольтметром **V**; **I<sub>p</sub>** – струм розжарювання, вимірюваний амперметром **A<sub>n</sub>** (рис 4.4).

Для проведення вимірювань використовується пристосування, схема якого зображена на рис. 4.4. Об'єктом досліджень є вольфрамова нитка, що служить катодом двохелектродної електронної лампи. Подача анодної напруги і нагрівання катода здійснюється від випрямляючого пристрою типу УИП-2, спрощена електрична схема, якого показана на рис. 4.4 всередині пунктирного прямокутника. Анодна напруга регулюється потенціометром **П** і вимірюється вольтметром **V<sub>a</sub>**. Анодний струм вимірюється міліамперметром **mA**, сила

струму розжарювання регулюється реостатом  $R$ .

### Порядок виконання роботи.

У даній роботі необхідно за формулою (4.15) визначити роботу виходу електрона з металу (вольфраму).

1. Зібрати схему згідно з рис. 4.4

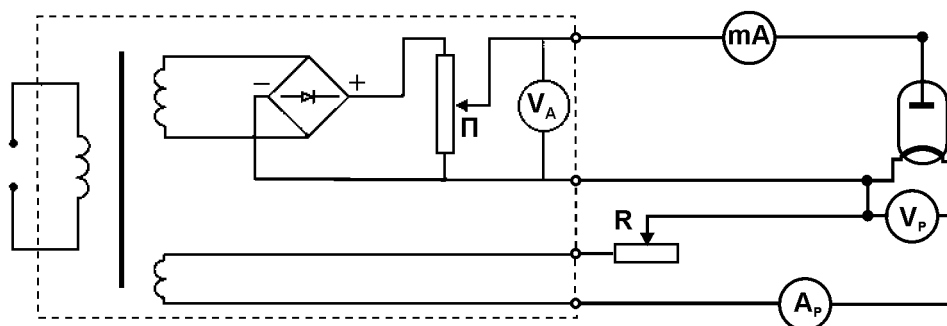


Рис.4.4

2. За допомогою реостата  $R$  встановити вказаний на установці струм  $I_p$  виміряти напругу  $U_p$ .
3. Дослідити залежність величини анодного струму  $I_a$  від анодної напруги  $U_a$  в ділянці струму насичення і побудувати графік залежності  $I_a = f(U_a)$ .
4. За графіком визначити величину струму насичення  $I_{нас}$  при даному значенні  $U_p$ .
5. Вимірювання, вказані в п. 2-4, провести й для всіх значень  $U_p$ , зазначених на щиті де розміщені прилади.
6. Для кожної пари значень  $U_p$  і  $I_p$  знайти за формулою (4.17)  $R_t$ , потім за формулою (4.16) визначити температуру катоду  $T_i$ . Значення величини  $R_0$  вказане на щиті приладів.
7. За формулою (4.15) обчислити роботу виходу  $A$  для трьох різних пар значень  $T_1$ ,  $T_2$  і відповідних їм  $I_{нас_1}$  і  $I_{нас_2}$  а також визначити її середнє значення.
8. Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю.

№ п/п	$U_p$	$I_p$	$R_t$	$R_0$	$T$	$I_{нас}$	$A$	$\Delta A$

### Контрольні запитання.

1. Що таке робота виходу електрона з металу?
2. Пояснити явище термоелектронної емісії.
3. Як пояснити існування струму насичення?
4. Який закон описує залежність анодного струму від анодної напруги у двохелектродній лампі?



## Лабораторна робота № 9

### Гradування термопар і спостереження явища Пельтьє.

Мета роботи: проградуювати термопару. За отриманою кривою градування, дослідити явище Пельтьє

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити матеріал з розділу 4.2.

#### Порядок виконання роботи.

1. Перевірити положення вимикачів і автотрансформатора ( рис.4.5 ): вимикачі 7, 12 у лівому положенні, автотрансформатор на "0".

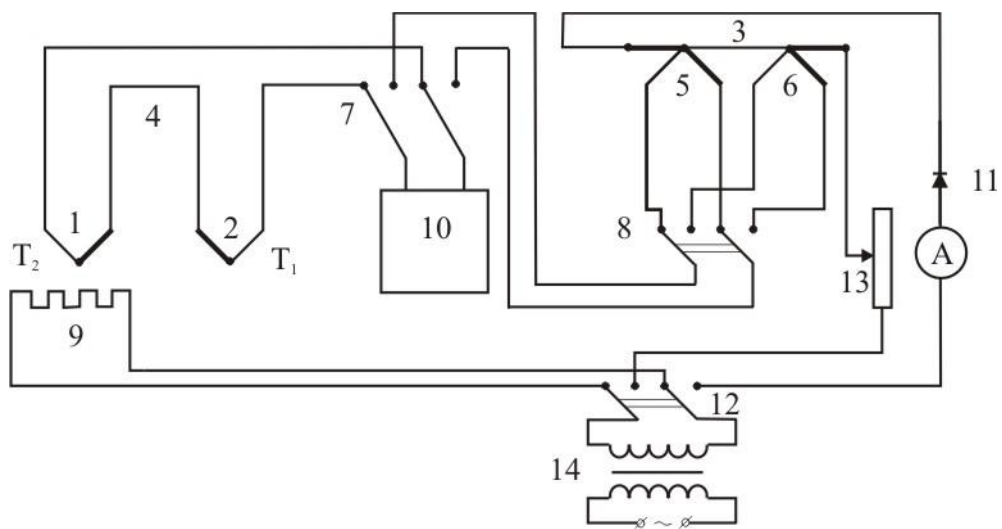


Рис. 4.5

2. Ознайомитись з порядком роботи цифрового вольтметра ( інструкція на робочому місці ).
3. Підготувати таблицю градування термопар

$t_2, ^\circ\text{C}$								
$t_1, ^\circ\text{C}$								
$T_2 - T_1$								
$\mathcal{E}_T, \text{мВ}$								
$\mathcal{E}_{TV}, \text{мВ}$								

4. Увімкнути автотрансформатор (ЛАТР) у розетку змінного струму і, регулюючи ним напругу на нагрівачі, поступово підвищувати температуру.
5. Виміряти і записати  $T_{1i}, T_{2i}, \mathcal{E}_{Ti}$  і - порядковий номер виміру ( через кожні 10 градусів

- від кімнатної температури до 160 °С.
6. Побудувати графік  $\mathcal{E}_T = f(T_2 - T_1)$  (суцільна лінія).
  7. Для усіх значень різниці температур  $T_2 - T_1$  визначити дійсні значення термоЕРС.  $\mathcal{E}_{T_0}$  взяти з таблиці, що є на робочому місці.
  8. Побудувати в одній координатній площині графіки залежностей  $\mathcal{E}_T = f(T_2 - T_1)$  суцільною лінією і  $\mathcal{E}_{T_0} = f(T_2 - T_1)$  пунктирною лінією.
  9. На основі двох одержаних графіків визначити середнє значення абсолютної похибки градування термопар.
  10. Визначити питому термоЕРС  $\alpha = \frac{\Delta \mathcal{E}_T}{\Delta T}$  для двох крайніх і середньої точки графіка (за п.6).
  11. Встановити ручку ЛАТРа на "О" і вимкнути його з розетки.
  12. Увімкнути елемент Пельтьє в коло постійного струму і встановити реостатом вказані на робочому місці струми. Виміряти термоЕРС на контактах 5, 6, перемикаючи термопару вимикачем 8. Визначити різницю термоЕРС, і за таблицею, що знаходиться на робочому місці, визначити значення різниці температур контактів.

### Контрольні запитання

1. Поясніть причину виникнення контактної різниці потенціалів.
2. У чому суть термоелектричних явищ.
3. Як залежить термоЕРС від температури?
4. Які переваги при вимірюванні температури за допомогою термопар.

