

# Úloha 11

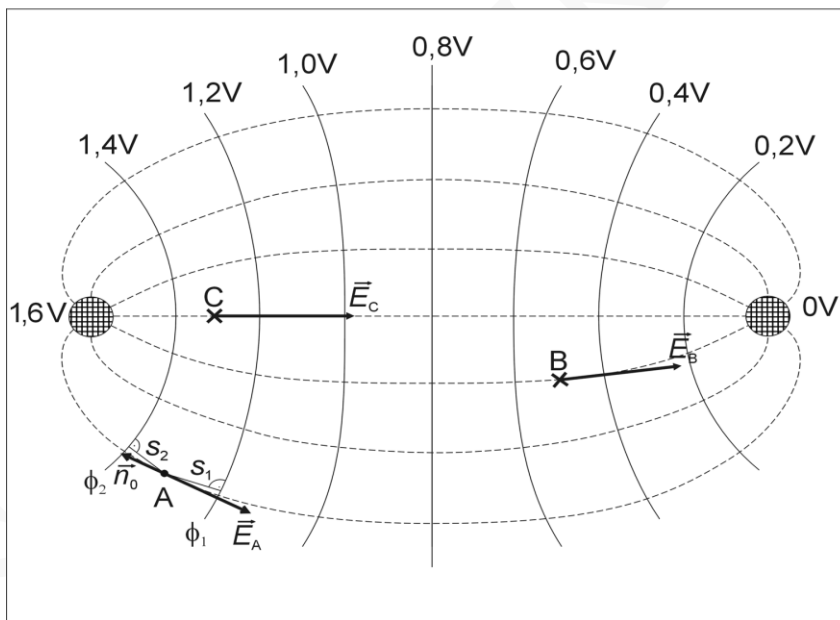
## Mapování elektrického pole

Vzájemné působení elektrických nábojů se projevuje silovými účinky. Silové pole vytvořené elektrickými náboji se nazývá **elektrické pole** a je konzervativní. Uvažujeme-li pole stacionárních nábojů, je pro popis pole vhodné použít buďto vektor **intenzity elektrického pole**  $\vec{E}(x, y, z)$ , nebo skalární **potenciál** elektrostatického pole  $\varphi(x, y, z)$ .

Intenzitu elektrostatického pole  $\vec{E}$  definujeme jako sílu, která v daném místě prostoru působí na jednotkový elektrický náboj velikosti  $Q$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \quad (1)$$

Jednotka  $[\vec{E}] = \text{N} \cdot \text{C}^{-1} = \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$



Obr. 1 Schematické znázornění rozložení elektrického pole pomocí siločar (přerušovaná čára) a ekvipotenciál (plná čára)

Prostorové rozložení elektrostatického pole lze znázornit **siločarami** (obr. 1). Jsou to myšlené křivky, vystupující z nábojů kladných a vstupující do nábojů záporných. Směr vektoru intenzity elektrostatického pole určuje tečna k siločáře v daném bodu prostoru. Orientace vektoru intenzity elektrostatického pole je pak vždy od kladného náboje směrem k náboji zápornému. Siločáry se v žádném místě prostoru neprotínají, každým místem lze vést pouze jednu a jejich hustota je úměrná intenzitě elektrostatického pole.

Místo vektorové charakteristiky elektrického pole můžeme zavést skalární pojem **elektrostatického potenciálu**  $\varphi(x, y, z)$  Ten je definován jako práce, kterou vykoná

elektrostatické pole při přemístění bodového náboje z daného bodu prostoru do **referenčního bodu**. Referenčním bodem nazýváme místo, v němž stanovíme potenciál jako nulový. Je to buďto místo nekonečně vzdálené, nebo můžeme takto stanovit povrch vodivé plochy.

**Elektrostatický potenciál**, zavedený výše popsáním způsobem jako potenciální energie jednotkového kladného náboje v daném bodě elektrostatického pole, je tedy

$$\varphi(\vec{R}) = - \int_0^{\vec{R}} \vec{E} \cdot d\vec{r}, \quad [\varphi] = V, \quad (2)$$

kde  $0$  je referenční bod ( $\varphi = 0$ ),  $\vec{R}$  je polohový vektor bodu, v němž potenciál určujeme a  $d\vec{r}$  je element integrační cesty. Mezi takto stanoveným potenciálem elektrostatického pole a intenzitou elektrostatického pole pak platí vztah

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi. \quad (3)$$

V praxi je místo potenciálu výhodnější používat **rozdíl potenciálů**  $U$  v různých bodech prostoru,  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ . Veličinu  $U$  nazýváme **elektrickým napětím** mezi dvěma body a její rozměr je shodný s rozměrem potenciálu.

Ze vztahu (3) vyplývá, že ve směru kolmém k siločárám se potenciál měnit nebude. Křivka, která má tuto vlastnost a spojuje místa se stejným potenciálem, se nazývá **ekvipotenciála** (obr. 1). Pro popis elektrického pole můžeme tedy použít jak popis pomocí siločar, tak i popis pomocí ekvipotenciál, protože vztah mezi nimi je jednoznačně definován (vzájemná kolmost v každém bodu prostoru).

---

### **Zadání:**

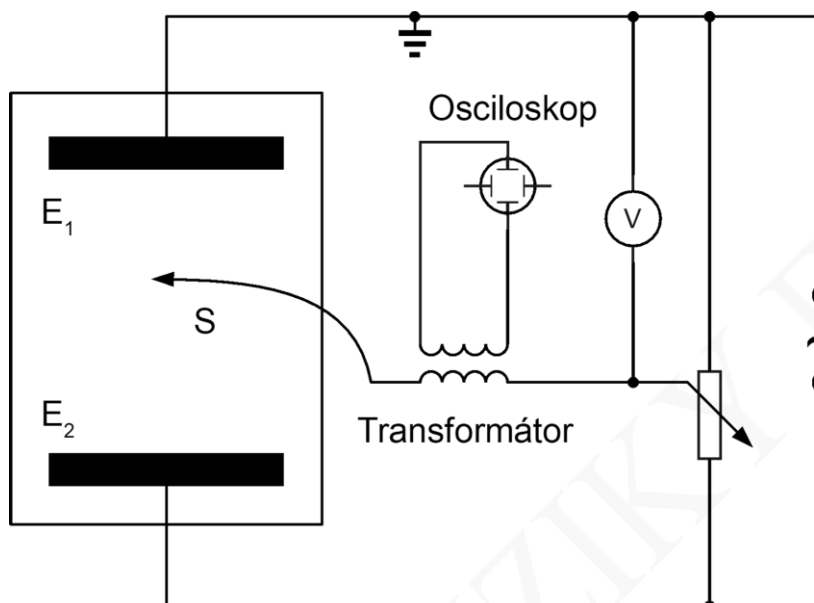
- 1) Zmapujte elektrické pole v elektrolytické vaně, graficky znázorněte ekvipotenciální křivky a siločáry elektrického pole.
- 2) Zvolte na siločarách tři body A,B,C a stanovte v nich velikost intenzity elektrického pole a její nejistotu.
- 3) Vektory intenzity elektrického pole v bodech A, B, C graficky znázorněte.

### **Teorie:**

Popis elektrického pole může být pomocí siločar nebo ekvipotenciál. Protože je však mnohem snadnější zjišťovat místa se stejným potenciálem, použijeme pro naši úlohu zkoumání **ekvipotenciálních křivek**.

Pro úlohu je vhodné zjednodušit prostorový popis na dvourozměrný model. Budeme zkoumat dvourozměrné elektrické pole vyvolané dvěma kovovými elektrodami, umístěnými ve vodivém prostředí. Použijeme k tomu účelu elektrolytickou vanu – nádobu z nevodivého materiálu s vodou, do níž elektrody  $E_1$ ,  $E_2$  vhodně umístíme a přivedeme na ně napětí z vnějšího zdroje. K elektrodám připojíme paralelně potenciometr, a k jeho jezdcí přes

primární vinutí transformátoru hrotovou sondou, kterou můžeme pohybovat v celé ploše elektrolytické vany. Budou-li elektrody na různém potenciálu, bude i na jezdcí potenciometru určitý potenciál, daný jeho momentální polohou. Umístíme-li sondu do elektrolytu do místa se shodným potenciálem s potenciálem jezdcí (  $U = 0$  V mezi sondou a jezdcem potenciometru), nepoteče sondou proud. Pokud změníme celkové napětí na elektrodách, ve stejném poměru se



Obr. 2 Schéma zapojení elektrolytické vany

změní i napětí na jezdcí potenciometru a rovněž v odpovídajícím místě v elektrolytické vaně. Přiváděné celkové napětí tedy může být i střídavé, což je výhodné pro indikaci pomocí osciloskopu.

Vlastní zapojení je na obr. 2. Zdroj střídavého napětí (RC generátor) je připojen ke koncovým vývodům potenciometru a paralelně k elektrodám. Jezdec potenciometru je spojen přes primární vinutí transformátoru s hrotovou sondou a s voltmetrem, který měří napětí na sondě vůči jedné (uzemněné) elektrodě. Posouváním jezdcí můžeme toto napětí měnit. Nenachází-li se hrot sondy v místě, kde je stejné napětí jako na jezdcí potenciometru, protéká sondou a primárním vinutím transformátoru proud, který indukuje v sekundárním vinutí napětí. Průběh sekundárního napětí indikujeme osciloskopem. Pohybujeme-li sondou rovnoběžně se spojnicí elektrod, ukáže osciloskop nulovou výchylku v okamžiku, kdy sonda projde místem s napětím shodným s napětím na jezdcí potenciometru. Polohu sondy lze odečítat na rastru, vytvořeném na dně elektrolytické vany.

## Měření:

- Úlohu zapojíme podle obr. 2. Elektrody  $E_1$ ,  $E_2$  umístíme do podélné osy elektrolytické vany tak, aby nebyly příliš blízko k okraji vany. Okraje vany omezují předpoklad volného šíření elektrického pole v celém prostoru a není-li v jejich blízkosti hodnota proudu zanedbatelná, významně ovlivňují průběh pole. Vanu s elektrodami naplníme vodou z vodovodu do výšky cca 2/3 výšky elektrod.
- Při měření nastavíme na výstupu RC generátoru napětí 1 V a posouváním jezdce potenciometru volíme hodnotu hledaného potenciálu. Je vhodné volit změnu potenciálu v jednotném **kroku po 0,1 V**. Hodnotu nastaveného napětí (resp. jeho efektivní hodnotu  $U_{ef}$ ) odečítáme na voltmetru.
- Místa stejného potenciálu (jednotlivé body ekvipotenciály) hledáme pomocí hrotové sondy – správné místo je charakterizováno poklesem výchylky signálu osciloskopu na nulu. Polohu sondy odečítáme na rastru na dně vany. Nejvhodnější je přenášet souřadnice polohy sondy rovnou na milimetrový papír s respektováním správného měřítka (nezbytné pro další výpočty).
- Získané body propojíme v grafu hladkou křivkou, čímž dostaneme obraz hledaných ekvipotenciál. Ekvipotenciálou je též povrch každého vodiče, tedy i povrch elektrod. Ke každé křivce přiřadíme i údaj o napětí, při kterém byla naměřena. Dále do grafu **zakreslíme několik siločar**. Jejich průběh lze získat pouze přibližně, respektováním pravidla, že vycházejí kolmo z povrchu elektrod a jsou v každém bodu prostoru kolmé k ekvipotenciálám.
- Na siločarách si zvolíme tři body A,B,C (neležící na zakreslených ekvipotenciálách) a určíme v nich velikost a směr intenzity elektrického pole  $\vec{E}$ . Za předpokladu, že elektrické pole v blízkém okolí zvolených bodů můžeme považovat za homogenní, můžeme vztah (3) upravit na

$$\vec{E} = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta s} \vec{n}_0 \quad (4)$$

kde  $\Delta\varphi$  je rozdíl potenciálů mezi dvěma sousedními ekvipotenciálami a  $\Delta s$  je délka oblouku siločáry mezi nimi (pozor při odečítání z grafu na zvolené měřítko!).

- Délku oblouku  $\Delta s$  lze s dostatečnou přesností nahradit součtem délek dvou úseček  $s_1$  a  $s_2$ , vytvořených vztyčením kolmic k sousedním ekvipotenciálám a procházejících daným bodem (obr. 1), tedy  $\Delta s = s_1 + s_2$ . Jednotkový vektor  $\vec{n}_0$  má směr tečny k siločáře

v daném bodě a míří ve směru **rostoucího** potenciálu (vektor intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  tudíž, díky znaménku ve vztahu (4), míří opačně).

### *Nejistota měření*

Nejistota hodnoty intenzity elektrického pole je dána nejistotami veličin  $\Delta\varphi$  a  $\Delta s$ . Vzhledem k tomu, že nejistota  $\Delta\varphi$  je výrazně nižší než nejistota  $\Delta s$ , můžeme uvažovat, že relativní nejistota hodnoty intenzity elektrického pole závisí jen na přesnosti  $\Delta s$ , a platí

$$u_{rE} = u_{r\Delta s} \quad , \quad (5)$$

kde relativní nejistota  $u_{r\Delta s}$  je dána přesností určení  $\Delta s$  z rastrovací mřížky v elektrolytické vaně.