

Učeničke poteškoće s konceptom električnoga napona

Maja Planinić

Fizički odsjek, PMF, Zagreb

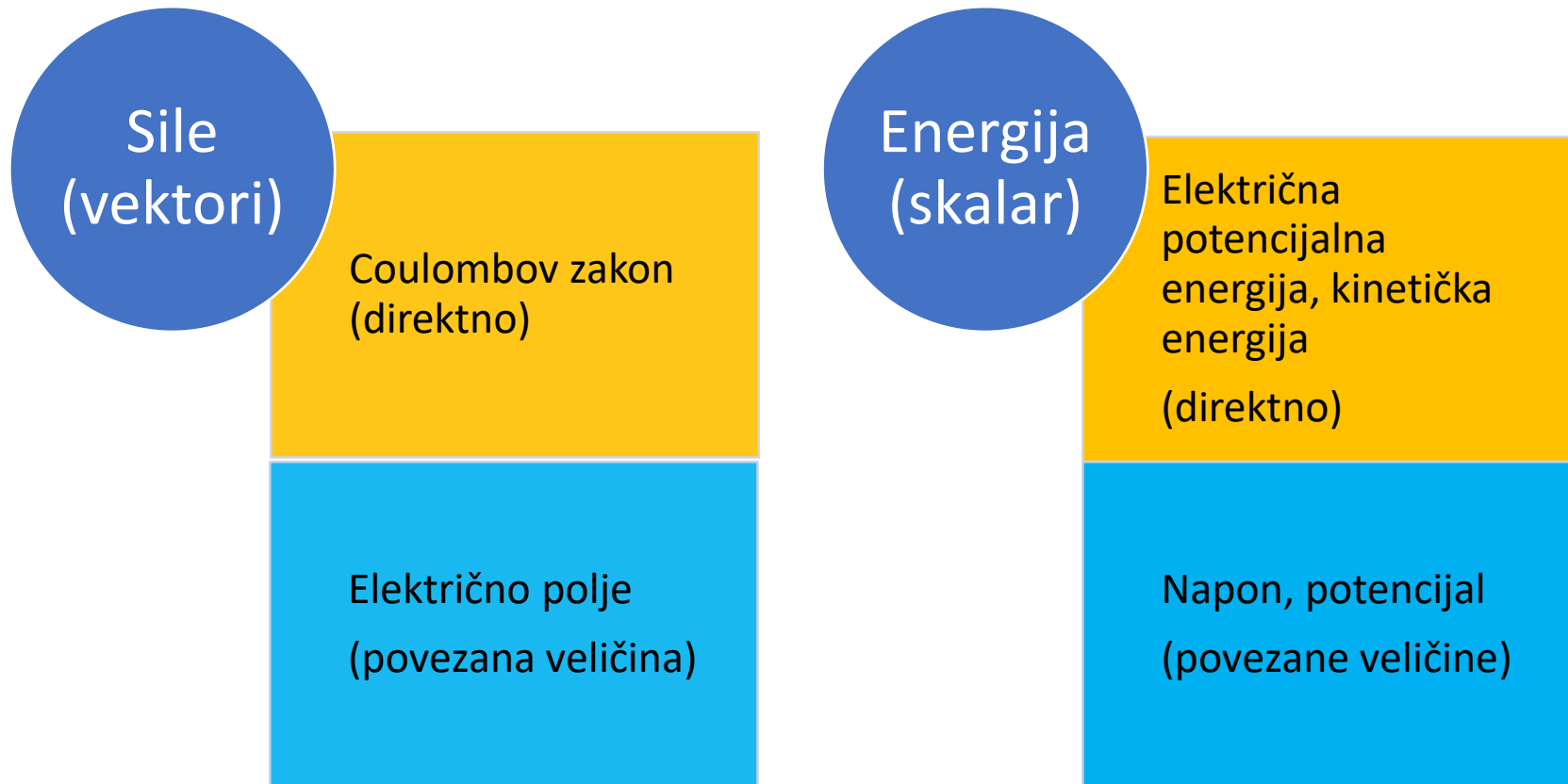
Koncept električnoga napona

- Javlja se u elektrostatici, elektrodinamici, elektromagnetizmu, pa i drugim područjima fizike, a i svakodnevnom životu
- Važan, ali apstraktan i težak pojam
- Puno različitih varijanti: napon, razlika potencijala, pad napona, elektromotorni napon, inducirani napon...

Funkcionalno razumijevanje

- Osim razumijevanja sadržaja samog koncepta, razviti i nove načine zaključivanja pomoću njega
- Učenici to najčešće neće moći sami razviti, trebaju pomoć

Dva pristupa rješavanju problema u elektrostatici



Električno polje

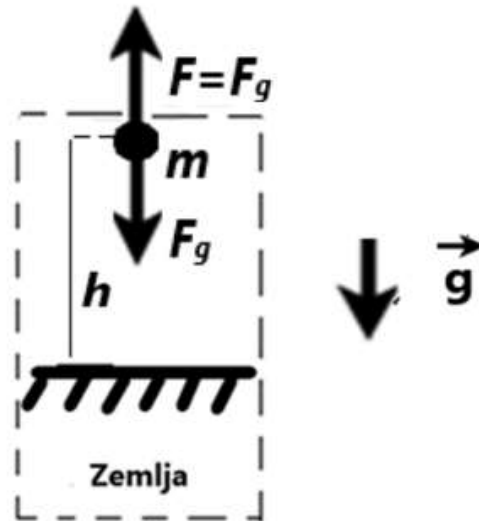
- Vektorsko polje, svojstvo prostora generirano izvorom polja (nekom raspodjelom naboja)

https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_all.html

Tražimo novu veličinu

- Možemo li konstruirati **skalarnu veličinu** kojom ćemo opisati prostor u kojemu postoji električno polje?
- Kako se nabijenoj čestici, koja se nalazi u električnom polju (odnosno sustavu čestica – izvor polja), može promijeniti električna potencijalna energija?

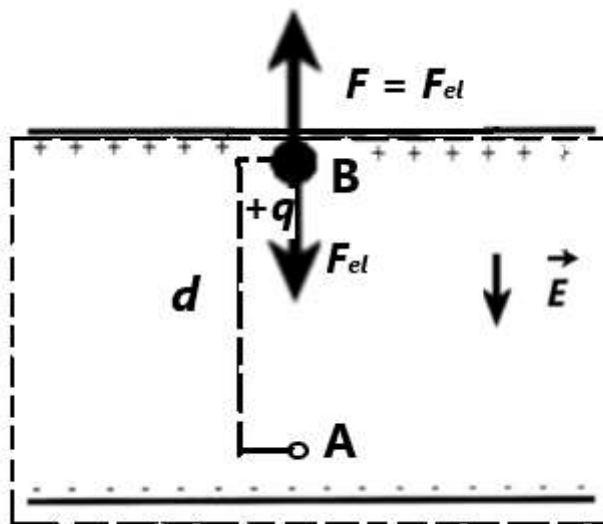
Analogija: Što se događa s energijom pri jednolikom podizanju tijela u homogenom gravitacijskom polju (za visinu h)?



Poveća se gravitacijska potencijalna energija tijela (+Z) za iznos obavljenoga vanjskog rada:

$$\Delta E_{gp} = W = mgh$$

Što se događa s energijom pri jednolikom podizanju pozitivno nabijene čestice u homogenom električnom polju (na putu d)?



Poveća se električna potencijalna energija čestice (+izvora polja) za iznos obavljenoga vanjskog rada:

$$\Delta E_{ep} = W = qEd$$

Pri gibanju nabijene čestice u električnom polju dolazi do promjene električne potencijalne energije

$$\Delta E_{ep} = qEd$$

$$\Delta E_{ep} \sim q \text{ (svojstvo čestice koju smo unijeli u polje)}$$

$$\Delta E_{ep} \sim Ed \text{ (svojstva prostora)}$$

- Želimo uvesti novu veličinu koja će ovisiti **samo o svojstvima prostora** u kojem postoji električno polje i biti povezana s ΔE_{ep}

Napon između točaka A i B (definicija): $U_{AB} = \Delta E_{ep}/q$

(R. Chabay i B. Sherwood, Electric and magnetic interactions, 1995.)

- Zašto nam je napon korisna veličina?
- Možemo brzo zaključiti o promjeni ΔE_{ep} za bilo koju česticu koja prolazi između točaka A i B

$$\Delta E_{ep} = q U_{AB}$$

Osnovni sadržaj koncepta

$$U_{AB} = \Delta E_{ep}/q$$

- Pomoću napona možemo odrediti promjenu električne potencijalne energije čestice (+ip)
- Napon se uvijek odnosi na **dvije** točke polja
- Predznak napona može biti pozitivan ili negativan – to **ne ovisi** o predznaku naboja čestice koju unesemo
- $V = J/C$, interpretacija?
- **$U = Ed$** je relacija koja vrijedi u homogenom električnom polju – pokazuje da su napon i električno polje nerazdvojne veličine (E možemo mjeriti u V/m , interpretacija?)

Elektronvolt

$$\Delta E_p = q U_{AB}$$

- Elektronvolt – jedinica za energiju
- To je energija koju će dobiti čestica pozitivnog elementarnog naboja, koja prođe kroz napon od 1 V
- $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Zaključivanje pomoću napona

- Proton i elektron prolaze između istih dviju točaka homogenog električnog polja, gibajući se prema pozitivnoj ploči kondenzatora. Apsolutni iznos napona između tih točaka je 20 V. Kolika je promjena električne potencijalne energije svake od čestica (+ip)?
 - A) Za obje +20 eV
 - B) Za obje -20 eV
 - C) Za proton -20 eV, a za elektron + 20 eV
 - D) Za proton +20 eV, a za elektron -20 eV

Zaključivanje pomoću napona

- Diskutirati predznak napona – to je velika poteškoća za učenike
- U prethodnom primjeru obje čestice prolaze kroz pozitivan napon
- Primijeniti osnovnu relaciju uz korektne predznake
- Diskutirati rješenje i način zaključivanja

Električni potencijal

- Napon se uvijek odnosi na **dvije** točke prostora (A i B)
- Možemo li konstruirati veličinu koja će biti povezana s električnom potencijalnom energijom i imati vrijednost u **svakoj pojedinoj** točki polja (skalarno polje)?
- Fiksiramo točku A (npr. u zamišljenoj točki gdje je polje zanemarivo – u “beskonačnosti”). **Svakoj točki polja** možemo pridružiti vrijednost napona u odnosu na fiksnu točku A – **električni potencijal**.
- Pridijelimo točki A u beskonačnosti vrijednost potencijala od 0 V
- Električni potencijal neke točke električnog polja je napon te točke u odnosu na referentnu točku u beskonačnosti.
- $U_{AB} = \varphi_B - \varphi_A$
- Također, $\varphi_B = E_{epB}/q$, $\varphi_A = E_{epA}/q$

Zaključivanje pomoću potencijala

- Elektron u elektronskoj cijevi ide iz točke koja je na potencijalu +10 kV do točke koja je na potencijalu +15 kV. Elektron će pri tome dobiti:
 - A) 5 keV potencijalne energije
 - B) 5 keV kinetičke energije
 - C) 25 keV kinetičke energije
 - D) 25 keV potencijalne energije.

Zaključivanje pomoću potencijala

- Diskutirati predznake potencijala: **suprotno od smjera \mathbf{E} potencijal raste, a u smjeru \mathbf{E} pada**
- Pomoću potencijala je potrebno prvo odrediti napon
- Uočiti da je moguće ubrzavanje nabijenih čestica pomoću napona: $\Delta E_k = -\Delta E_p$
- Diskutirati ekvipotencijalne plohe u jednostavnim primjerima i konstatnost energije na njima

Važne točke poučavanja električnog napona i potencijala

- Predlaže se **napon** kao primarna veličina koju uvodimo, a ne potencijal.
- Ključno je povezati napon s **promjenom** električne potencijalne energije (definicija napona) i razviti pripadno zaključivanje.
- Napon je usko povezan s električnim poljem (nema E bez U , niti U bez E).
- Potencijal se preporuča primarno razmatrati u homogenom polju, ne treba ići u zahtjevne elektrostatske probleme.
- Diskutirati sigurnosne aspekte električnog napona

Uvođenje napona u OŠ

- Uvodi se u kontekstu strujnih krugova
- Razmatra se pretvorba energije u dva strujna kruga s jednakom strujom (npr. jedan krug s jednom baterijom i jednom žaruljicom, te drugi s dvije baterije i dvije žaruljice u seriji)
- Budući je struja jednaka, razlika u pretvorenoj energiji pripisuje se novoj veličini, naponu:

$$U = \Delta E/q$$

O kojoj se energiji radi?

- Iako se ovdje ne govori eksplicitno o električnoj potencijalnoj energiji, pretvorena energija se odnosi upravo na nju, jer je kinetička energija u krugu stalna
- **Energijski pristup naponu gradimo već od OŠ**

Zašto strujni krugovi u školi?

1.

Tehnološka važnost i prisutnost u svakodnevnom životu

2.

Izvrсна vježba zaključivanja (OŠ i SŠ)

3.

Primjena temeljnih koncepata (el. polje, naboj, energija, struktura tvari) u kompleksnoj situaciji (SŠ)

Zašto struja poteče kad vodič spojimo na polove baterije?

- **Napon** na krajevima vodiča znači uspostavljanje **električnog polja** u vodiču.
- U metalnim vodičima se nalaze slobodni elektroni, koji u električnom polju osjećaju silu i počinju se usmjereno gibati – zbog stalnih sudara srednja brzina im je stalna.
- Uloga baterije je da razdvaja naboje i osigurava stalan napon na polovima.

Energijska interpretacija strujnog kruga

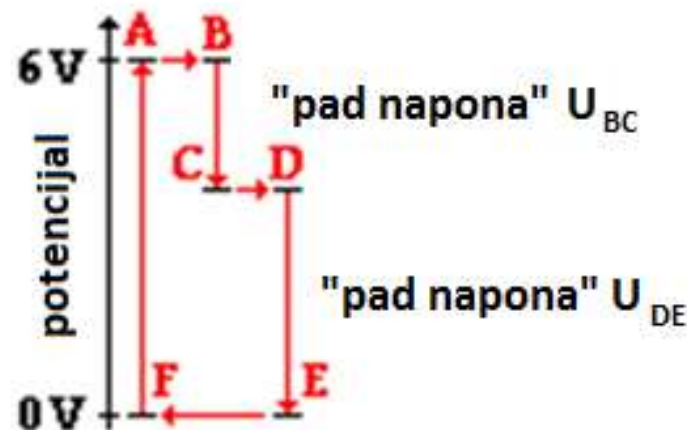
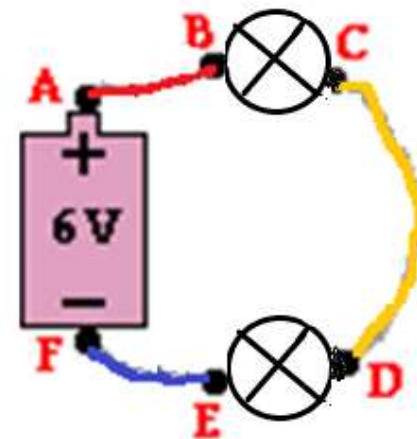
- Strujni krug je uređaj za pretvorbu energije
- U bateriji (unutarnji dio strujnog kruga), dolazi do **povećanja električne potencijalne energije.**
- Što se s električnom potencijalnom energijom događa u vanjskome dijelu strujnoga kruga?
- **Smanjuje se na trošilima**, pretvara u druge oblike energije i izlazi iz kruga (o tome govori pad napona $U = RI$).
- Što se događa s kinetičkom energijom elektrona u strujnom krugu?
- Srednja kinetička energija elektrona je **stalna.**

Mehanička analogija

<https://kaiserscience.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/10/water-flow-analogy-simple-circuit-2.gif>

Električni potencijal i napon u strujnome krugu s idealnom baterijom

- U strujnome krugu možemo odabrati bilo koju točku kruga kao nultu točku potencijala.
- Ovdje odabiremo F kao nulu.
- Sve točke vodiča označene istom bojom imaju istu vrijednost potencijala (otpor vodiča zanemarujemo)
- Na trošilu se događa pad napona
- Napon između točaka povezan je s **promjenom električne potencijalne energije**



Slike prilagođene prema:

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.physicsclassroom.com%2Fclass%2Fcircuits%2FLesson-1%2FElectric-Potential-Difference&psig=AOvVaw0Kpe4CjPRJB96qdiL86GkL&ust=1725534927533000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBiQjRxqFwoTCJixqdyUqYgDFOAAAAAdAAAAABAF>

Elektromotorni napon

Dva različita napona u strujnom krugu:

1) Elektromotorni napon ε (opisuje električni učinak neelektričnih procesa u izvoru napona)

Opisuje porast E_{ep} u izvoru: $\Delta E_{ep} = q\varepsilon$

2) Pad napona na otporniku

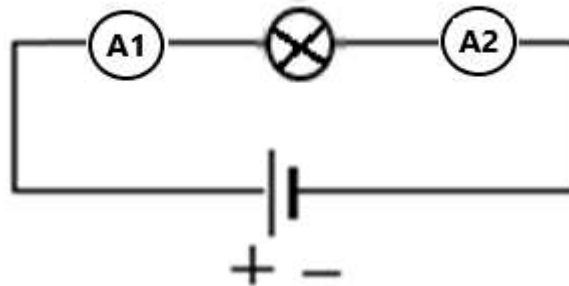
Opisuje smanjenje E_{ep} u vanjskom dijelu kruga:

$$\Delta E_{ep} = qU$$

- porast električne potencijalne energije unutar izvora jednak je smanjenju električne potencijalne energije u vanjskom krugu (ZOE)

Neke poteškoće vezane uz strujne krugove

Ampermetar **A1** (na slici) pokazivat će **veću struju** nego ampermetar **A2**, **jer će se dio struje potrošiti u žarulji.**



Točno Netočno

G1 – 35% točnih odgovora
(gimnazijalci 1. razred)

G3 – 70% točnih odgovora
(gimnazijalci 3. razred)

Struja koja **izlazi** iz otpornika **jednake je jakosti** kao i struja koja u njega **ulazi**.

Točno

Netočno

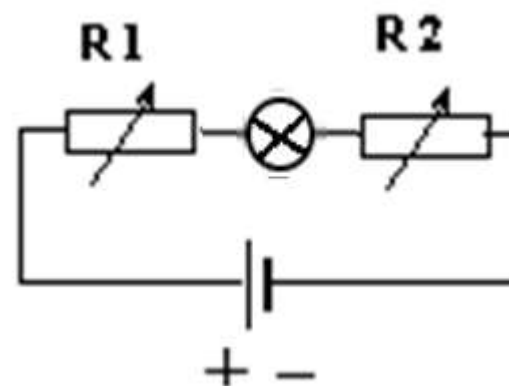
G1 – 32% točnih odgovora

G3 – 62% točnih odgovora

Samo će promjena otpora **R1** u krugu na slici izazvati **promjenu sjaja** žaruljice, dok **promjena otpora R2 neće utjecati na sjaj žaruljice.**

Točno

Netočno



G1 – 42% točnih odgovora

G3 – 61% točnih odgovora

Sekvencijalno zaključivanje o strujnom krugu

Čest, ali **pogrešan**, način učeničkog zaključivanja o strujnom krugu:

- struja kreće iz baterije i postepeno nailazi na zapreke (otpor), te joj se vrijednost tada smanjuje
- struja “ne zna” unaprijed što je pred njom, stoga se na svakom čvoru uvijek dijeli na jednake iznose
- promjena u strujnom krugu utječe samo na elemente smještene “nizvodno” od mjesta promjene
- **Sekvencijalno zaključivanje je važna prepreka razumijevanju strujnih krugova.**

Intuitivni model (alternativne konceptije)

Baterija uvijek daje **jednaku struju**.

Trošila **troše** struju (struja nije jednake jakosti prije i poslije trošila).

Struja se uvijek **grana na jednake iznose** ("ne zna" što je pred njom).

Promjena u strujnom krugu **utječe samo na elemente smještene "nizvodno" od mjesta promjene (sekvencijalno zaključivanje)**

Znanstveni model

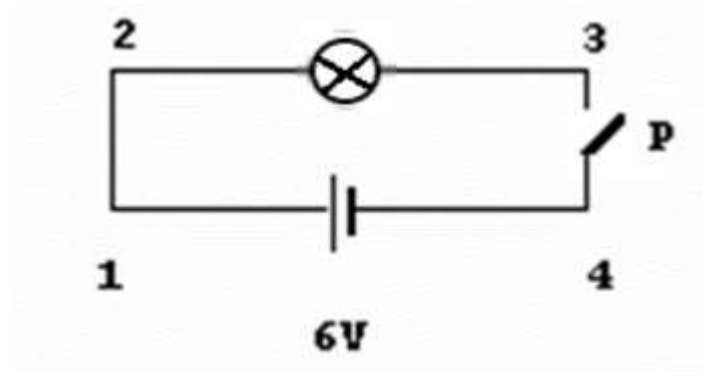
Baterija uvijek daje **jednak napon**, struja ovisi o tome što spojimo u krug.

Struja je **jednake jakosti** prije i poslije trošila.

Jakosti struje u granama **određene su otporima u granama**.

Promjena u strujnom krugu **utječe na cijeli krug**, bez obzira gdje je napravljena (promjena mijenja električno polje u cijelom vodiču).

Napon između točaka 1 i 4 iznosi 6 V.



Točno

Netočno

G1 – 41% točnih odgovora

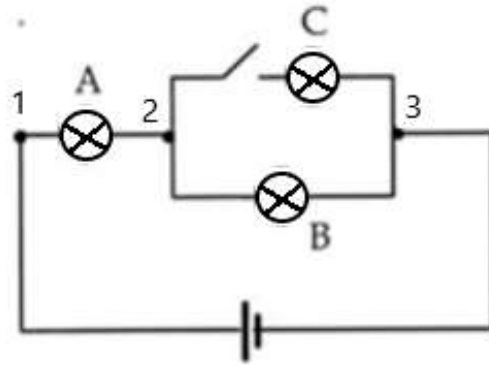
G3 – 52% točnih odgovora

Učenici poistovjećuju napon sa strujom!

Zaključivanje preko napona u strujnim krugovima

- Kvalitativno zaključivanje o strujnome krugu je jako bitno, ali učenicima zahtjevno (razvija funkcionalno razumijevanje)
- Učenici teže uvijek zaključivati preko struje, izbjegavaju zaključivanje preko napona
- Ponekad ne razlikuju struju i napon ili misle da je napon nešto što teče sa strujom
- Zaključivanje preko napona treba razvijati i poticati

Kako će svijetliti žarulje A i B kad se prekidač zatvori?



- A) Žarulja A će svijetliti jednako kao i prije, a žarulja B slabije.
- B) Žarulja A će svijetliti jače, a žarulja B slabije nego prije.
- C) Žarulje A i B će svijetliti jače nego prije.
- D) Žarulje A i B će svijetliti slabije nego prije.

Koji odgovor ukazuje na sekvencijalno zaključivanje?

Odgovor A, učenik smatra da struja tek nakon A saznaje o promjeni stanja prekidača.

- **Obrazloženja su ključna za razvoj zaključivanja**

Primjer:

- Uključivanjem sklopke smanjio se otpor i napon između točaka 2 i 3, pa se morao povećati napon između točaka 1 i 2, kako bi zbroj U_{12} i U_{23} ostao isti (jednak naponu baterije). Veći napon na A, a manji na B, čini da žaruljica A svijetli jače, a B slabije nego prije.

ILI

- Spuštanjem sklopke smanjio se ukupni otpor kruga, a time se povećala ukupna struja u krugu. Kroz žaruljicu A sada teče jača struja, stoga ona svijetli jače. Kako je napon na A (U_{12}) sada također veći, napon na B (U_{23}) se mora smanjiti, kako bi zbroj U_{12} i U_{23} ostao isti (jednak naponu baterije), pa B svijetli slabije nego prije.
- Ovakva složenija obrazloženja bit će primjerena za SŠ, u OŠ treba dati primjere s jednostavnijim obrazloženjima, ali obrazloženja treba svakako tražiti!

Primjena II. Kirchhoffovog pravila u svjetlu energijske definicije napona

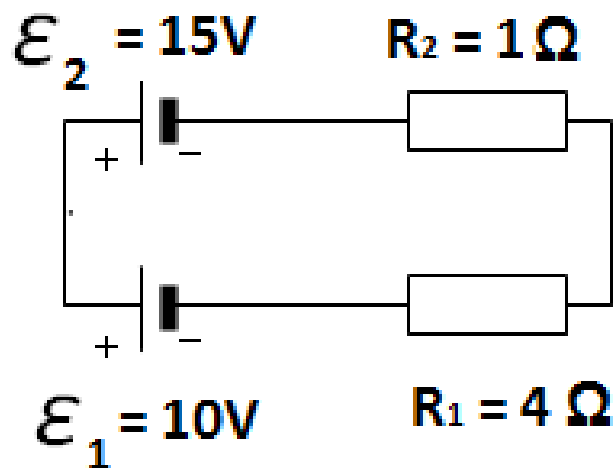
- proizvoljno odaberemo smjer obilaženja petlje
- počevši od proizvoljne točke obilazimo svaku petlju **kao pozitivno nabijena čestica** i zbrajamo pozitivne i negativne napone
- pri prolasku kroz izvor od – do + pola, $\varepsilon > 0$ (potencijal raste)
- pri prolasku kroz otpornik u smjeru struje $U = IR < 0$ (potencijal se smanjuje)
- zbroj napona mora biti jednak nuli (ZOE)
- Učenici mogu bolje razumjeti zašto vrijede ova pravila predznaka napona, ako razumiju što se događa s E_{ep} pozitivne čestice u petlji

Kirchhoffova pravila - primjer

pretpostavljeni smjer
struje



odabrani smjer
obilaženja



$$-\mathcal{E}_1 + IR_1 + IR_2 + \mathcal{E}_2 = 0$$

$$I = -1\text{ A}$$

Minus znači da je smjer struje
suprotan od pretpostavljenog.

Zaključak

- Učenici imaju velikih poteškoća pri zaključivanju o električnom naponu i strujnim krugovima – treba im pomoći razvijanjem funkcionalnog razumijevanja.
- Definicija napona $U_{AB} = \Delta E_{ep}/q$ je vrlo produktivna za primjenu i zaključivanje ne samo u elektrostatici, nego i kod strujnih krugova.
- Energijsko razumijevanje napona ima veliku primjenu u raznim dijelovima fizike, ali i svakodnevnome životu.