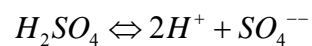


Provođenje struje kroz:  
elektrolite i jonizovane gasove;  
termoelektricitet i električni luk

## 2.8 Provođenje struje kroz elektrolite

Čista voda je dobar izolator. Međutim, rastvori kisjelina, baza i soli u vodi, su relativno dobri provodnici električne struje. Svrstavamo ih u kategoriju provodnika druge vrste. Te rastvore nazivamo **elektrolitima**.

Švedski fizičar Arenijus postavio je teoriju *elektrolitičke disocijacije* po kojoj voda razlaže molekule kisjelina, baza i soli na *jone*. Npr., molekuli sumporne kisjeline razlažu se na dva atoma vodonika bez elektrona i grupu koja ima dva elektrona viška. Ovakvi procesi teku u oba smjera i izražavaju se hemijskom relacijom:



Sličan proces se odvija u rastvorima baza i soli, pa, na primjer, za rastvor sode  $NaOH$  (natrijum hidroksida) važi:

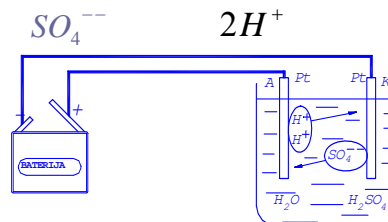


odnosno pri disocijaciji hlorida bakra je:



Pozitivni joni nazivaju se **katjoni**, a negativni joni nazivaju se **anjoni**.

Ako u sud od izolacionog materijala (recimo stakla), napunjen elektrolitom, postavimo dvije metalne ploče (elektrode) i povežemo ih na izvor električne struje, dobijamo tzv. voltmetar. I prije priključenja baterije, po teoriji elektrolitičke disocijacije, molekuli kiseline su se razložili na **anjone** i **katjone**.



Pri propuštanju struje, katjoni  $H^+$  odlaze na katodu. Svaki od njih od katode oduzima po jedan elektron i tako se stvara neutralni vodonik, koji, u vidu mjehurića, izlazi iz tečnosti.

Anjoni  $SO_4^-$  bivaju privučeni od anode, i svaki od njih predaje anodi po dva elektrona, neutrališući se pri tome. Sada nastupa sekundarna reakcija: neutralna grupa, budući da je hemijski veoma aktivna, jedini se sa vodom stvarajući sumpornu kiselinu i oslobađajući kiseonik:

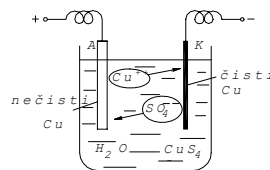
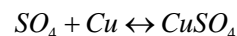


I tako, sa sekundarnom reakcijom, ukupan rezultat elektrolize je razlaganje vode na vodonik i kiseonik. Elektrolit i sastav elektroda se ne mijenjaju.

### 2.8.1 Elektrolitičko prečišćavanje metala

Kada kroz elektrolit, npr. sulfat bakra  $CuSO_4$ , prolazi električna struja odvijajuće se sljedeće reakcije:

Katjon  $Cu^{++}$  odlazi na katodu, oduzima joj dva elektrona i taloži se na njoj. Anjon  $SO_4^-$  odlazi na anodu, predaje joj dva elektrona, i neutrališe se. Sada nastupa sekundarna reakcija. Neutralizovana grupa  $SO_4$  hemijski je vrlo aktivna i jedini se sa bakrom sa anode i stvara bakarni sulfat:



Ukupan rezultat je prečišćavanje bakra prenošenjem atoma bakra sa anode na katodu.

### 2.8.2 Faradejev zakon elektrolize

Faradejevi eksperimenti nagovijestili su, a kasnije i potvrdili, današnje shvatanje o strukturi materije, o elementarnom kvantu elektriciteta i jednakosti količine elektriciteta na svakom elektronu.

Faradej je ustanovio da masa materije izdvojene elektrolitičkim procesima ne zavisi od:

- koncentracije elektrolita,
- temperature,
- površine, oblika i rastojanja elektroda,

a zavisi od:

- količine elektriciteta koja prođe kroz elektrolit,
- atomske mase elementa koji se izdvaja i
- valentnosti materije koja se izdvaja.

Pazljivim mjerenjem došao je do obrasca za određivanje mase izdvojene u elektrolitičkom procesu, koji se obično naziva Faradejev zakon elektrolize:

$$m = H_e Q$$

gdje je:

- $m$  - masa (kg)
- $H_e$  - elektrohemijski ekvivalent, (kg/C)
- $Q=It$  - količina elektriciteta koja prođe kroz elektrolit, (C=As)

Elektrohemijski ekvivalent je veličina koja ukazuje koliko se mase dotične materije izdvoji pri prolazu jedinice količine elektriciteta:

$$H_e = k_e \frac{A}{v}$$

gdje je:  $k_e$  - prirodna konstanta, (kg/C)       $A$  - atomska težina, (1)  
 $v$  - valentnost, (1)

Preciznim mjerenjem, Faradej je ustanovio da je :

$$k_e = \frac{10^{-6}}{96,5} \cong 10^{-8} \text{ (kg / C)}$$

Za neutralisanje nekog  $v$ -valentnog elementa potrebno je  $v$  kvanta elektriciteta:

$$v \cdot Q_e = v \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Svaki atom ima masu koja se približno može dobiti ako se atomska "težina" pomnoži sa masom jednog neutrona;

$$Am_n = A \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}$$

Ako kroz elektrolit prođe količina elektriciteta od  $Q$  kulona, tada će proći  $Q/Q_e$  elektrona, što odgovara  $Q/(vQ_e)$  atoma, pa je masa izdvojena pri protoku  $Q$ -kulona elektriciteta:

$$m = m_n A \frac{Q}{vQ_e} = \frac{m_n A}{Q_e v} Q = \frac{1,67 \cdot 10^{-27}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \frac{A}{v} \cdot I \cdot t$$

što, ako uporedimo sa ,

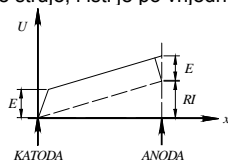
$$m = 10^{-8} \frac{A}{v} \cdot I \cdot t$$

koliko je Faradej dobio eksperimentalno, moramo konstatovati, predstavlja izvanredno dobro slaganje, posebno ako se ima u vidu da je Faradej izvodio eksperiment u vrijeme kada se o elektronima, protonima i neutronima nije znalo.

## 2.9 Hemijski izvori električne struje - akumulatori

Razmotrimo slučaj voltametra kada su obje elektrode od istog materijala (npr. dvije bakarne ploče), u rastvoru bakarnog sulfata ( $\text{CuSO}_4$ ).

Mjereći, posebnom mjernom aparaturom, porast potencijala između katode i anode, konstatovaćemo promjenu potencijala kao na slici, sa koje se vidi da kod katode ems-a  $E$  ne zavisi od jačine struje, da je daljnji porast napona srazmjeran struji, a zatim, kod anode, pad napona je takođe nezavisan od jačine struje, i isti je po vrijednosti kao kod katode.



Elektrolit se ponaša kao termogeni otpor čija je otpornost približno:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

gdje je:  $R$  - otpornost elektrolita ( $\Omega$ )

$\rho$  - specifična otpornost elektrolita ( $\Omega\text{m}$ )

$l$  - rastojanje između elektroda (m)

$S$  - površina elektroda ( $\text{m}^2$ ).

Nagle promjene napona na elektrodama (slika), nije teško objasniti. Na anodi se rastvara bakar, a iz hemije je poznato da se tom prilikom oslobađa energija. Kako struja, pri ovom eksperimentu, teče od anode ka katodi kroz elektrolit, to zbog priraštaja električne energije na račun hemijske, treba očekivati pojavu elektromotorne sile u smjeru struje. Na katodi se odvija hemijski proces koji zahtijeva ulaganje rada. Prema tome, na katodi se električna energija pretvara u hemijsku. Električna sila je sada kontraelektromotorna tj. usmjerena je protiv struje. Kako su ukupni hemijski procesi na anodi i katodi isti, samo suprotnog smjera (dekompozicija i kompozicija bakra), to mora biti elektromotorna sila na anodi jednaka kontraelektromotornoj sili na katodi. Spoljašnjim mjerenjem ne može se konstatovati postojanje ovih električnih sila.

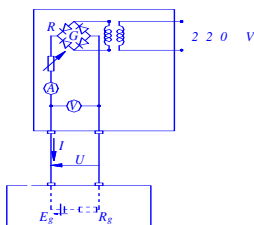
Razmotrimo sada slučaj kada elektrode nisu od istog materijala. Hemijski procesi na anodi i katodi su različiti, ne samo u pogledu hemijske reakcije, nego i u pogledu utroška i oslobađanja energije. Elektromotorne sile su zbog toga različite i kao rezultat se dobija rezultantna elektromotorna sila jednaka njihovom algebarskom zbiru.

Ako se elektrode spolja spoje metalnim provodnikom, kroz njega će teći električna struja. Dakle, voltametar sa različitim elektrodama predstavlja izvor električne energije, okarakterisan elektromotornom silom izvora i unutrašnjom otpornošću izvora.

Velike probleme kod ovakvih izvora pričinjavaju pojave "polarizacije", koja dovodi do smanjenja elektromotorne sile, i pojava "korozije" koja relativno brzo "izjeda" elektrode.

### 2.9.1 Akumulatori

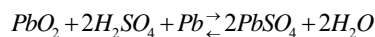
Akumulatori su hemijski izvori električne energije, koji imaju važnu osobinu da su im hemijski procesi na elektrodama reverzibilni. Kada se akumulator "isprazni" snabdjevajući potrošače električnom energijom, on se može naknadno ponovo "napuniti" i vratiti u prvobitno stanje, što se postiže propuštanjem struje iz spoljnog izvora kroz akumulator u suprotnom smjeru.



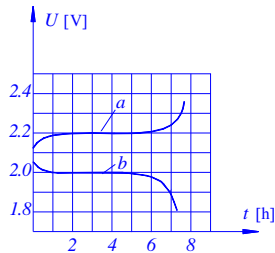
Količina elektriciteta koju je akumulator u stanju da oda prilikom pražnjenja naziva se kapacitet akumulatora i ne mjeri u kulonima ( $1C=1As$ ) već u većim jedinicama amperčasovima ( $1Ah=3600C$ ). Najčešće se koriste olovni i alkalni akumulatori.

### 2.9.2 Olovni akumulatori

Kod olovnih akumulatora pozitivna ploča je od dioksida olova  $PbO_2$ , a negativna od olova  $Pb$ . Elektrolit je razblažena sumporna kiselina  $H_2SO_4$ . Hemijski procesi pri punjenju i pražnjenju akumulatora su složeni, ali se grubo mogu izraziti sljedećim hemijskim relacijama:



Važno je napomenuti da se ispražnjenom akumulatoru smanjuje koncentracija sumporne kiseline, ali se ne smije dodavati sumporna kiselina. Koncentracija će se vratiti na potrebnu vrijednost prilikom normalnog punjenja.



Promjena napona akumulatora; a) Punjenje, b) Pražnjenje

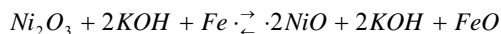
Pri punjenju napon se duže vremena zadržava na vrijednosti 2,2 V po ćeliji. Kada napon počne naglo da raste, treba smanjiti struju punjenja, da burni hemijski procesi ne bi oštetili ploče. Kada napon po ćeliji pređe vrijednost 2,4V punjenje treba prekinuti.

Pri pražnjenju napon brzo padne na 2V po ćeliji. Pri kraju pražnjenja napon opada naglo i treba voditi računa da nikad ne padne ispod 1,8V po ćeliji, inače bi moglo doći do neugodne sulfatizacije ploča.

Razlika napona pri punjenju i pražnjenju se objašnjava djelimično padom napona u elektrolitu, koji se pri punjenju sabira sa elektromotornom silom  $U=E+RI$ , a pri pražnjenju oduzima od nje  $U=E-RI$ , a takođe i sekundarnim reakcijama i povećanoj (odnosno smanjenoj) koncentraciji kiseline oko ploča.

### 2.9.3 Alkalni -čelični akumulatori -(Edisonov akumulator)

Pozitivna ploča je od oksida nikla  $Ni_2O_3$ , a negativna od željeza Fe. Elektrolit je 21% rastvor hidroksida kalijuma KOH. Hemijski procesi punjenja i pražnjenja su veoma složeni, ali se grubo mogu izraziti relacijom:



Napon iznosi oko 1,5V po ćeliji. On se mijenja pri punjenju i pražnjenju slično kao kod olovnih akumulatora.

Alkalni akumulatori su znatno skuplji od olovnih. Prednost im je u dužem vijeku trajanja, boljoj mehaničkoj izdržljivosti, manjoj specifičnoj težini, jednostavnijem održavanju, manjem riziku od kvarova. U mane čeličnih akumulatora treba ubrojiti, pored visoke cijene, i nešto veći unutrašnji otpor i naglo gubljenje kapaciteta pri temperaturama manjim od nula stepeni Celzijusa.

### 2.10 Provođenje struje kroz gasove

U normalnim uslovima pritiska i temperature gasovi su izolatori, jer praktično ne sadrže nosioce električne struje - ni slobodne elektrone ni jone. Međutim, pod određenim uslovima gasovi provode električnu struju, kada se mogu smatrati provodnim sredinama.

Pri normalnim uslovima, atomi i molekuli gasa su električno neutralni. Da bi gas postao provodan, moraju se njegovi molekuli na neki način učiniti naelektrisanim (jonizovati). Pod uticajem jonizatora jedan ili više elektrona napuštaju neutralni atom gasa i postaju *slobodni elektroni*, a ostatak atoma predstavlja *pozitivan jon*. Jedan dio slobodnih elektrona apsorbuju postojani atomi gasa da bi popunili svoje elektronske orbite, tako da oni postaju negativni joni. Prema tome, jonizovani gas sadrži slobodne elektrone, pozitivne i negativne jone. Gas može da provodi električnu struju samo ako sadrži jonizovane molekule.

Gas može biti jonizovan različitim spoljnim uzrocima. Rentgenovi zraci i  $\gamma$ -zraci iz radioaktivnih tijela, kao i kosmički zraci, imaju osobinu da, u izvjesnoj mjeri, jonizuju gas kroz koji prolaze. Isto tako, gasovi se mogu jonizovati zagrijavanjem gasa, ili prisustvom usijanih metala.

Ako se jonizovani gas nađe u električnom polju između dvije elektrode, koje su vezane na izvor ems-e E, doći će do kretanja pozitivnih jona ka negativnoj elektrodi – katodi K, a negativnih jona i slobodnih elektrona ka pozitivnoj elektrodi – anodi A. Na taj način se kroz gas između elektroda obrazuje električna struja.

Provodljivost gasa je utoliko veća ukoliko je veća njegova jonizovanost. Zakonitost provođenja struje kroz gasove razmotrićemo posmatranjem elementarne zapremine gasa  $dV$ , presjeka  $dS$  i dužine  $dl$ , sa zapreminskom gustinom  $\rho$  slobodnih naelektrisanja.

Elementarna količina naelektrisanja u tom prostoru će biti:

$$dq = \rho \cdot dV, \dots dq = \rho \cdot dS \cdot dl$$

Pošto se naelektrisanja slobodno kreću, njihova brzina je:

$$v = \frac{dl}{dt}$$

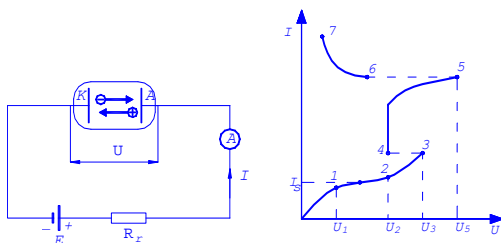
Jačina struje u gasu biće:  $di = \frac{dq}{dt} = \frac{\rho \cdot dS \cdot dl}{dt} = \rho \cdot v \cdot dS$

a njena gustina J:  $J = \frac{di}{dS} = \frac{\rho \cdot v \cdot dS}{dS} = \rho \cdot v$

ili u vektorskom obliku:  $\vec{J} = \rho \cdot \vec{v}$

Poslednja relacija pokazuje da je gustina konvekcione struje funkcija brzine kojom se naelektrisanja kreću, a ne jačine električnog polja, kao što je to bio slučaj kod metala:

$$\vec{J} = \gamma \cdot \vec{E}$$



Karakter provođenja struje kroz gasove, ili, kako se obično kaže, pražnjenje kroz gasove, zavisi od mnoštva faktora: od hemijske prirode gasa i elektroda, od temperature i pritiska gasa, od oblika, dimenzija i međusobnog položaja elektroda, od intenziteta električne struje itd. Prema tome, oblici gasnog pražnjenja su veoma raznovrsni, a pražnjenje u gasu najčešće je praćeno toplotnim, zvučnim i svjetlosnim efektima.

Emitovanje elektrona iz metala može biti:

- termojonsko,
- fotoemisijom i
- sekundarnom emisijom.

Termojonska emisija nastaje pri zagrijavanju metala na visoke temperature. Time se, elektronima u metalu predaje termička energija, koja im omogućava da napuste metal. Povećanjem temperature povećava se i broj elektrona koji ga napuštaju. Ako se u blizini zagrijanog metala postavi anoda, slobodni elektroni će se kretati prema njoj, stvarajući električnu struju.

Ako usijani metal sadrži primjese alkalnih metala, pri višim temperaturama se, pored emisije elektrona, javlja i emisija jona, koji se nazivaju termojonima.

Metal koji emituje elektrone naziva se katodom ili emitorom, a elektroda koja ih sakuplja anodom ili kolektorom.

Fotoemisija je posljedica dejstva svjetlosti na površinu metala. Elektroni u metalu povećavaju svoju energiju na račun energije svjetlosnog zraka koji pada na metal. Dospijevajući na metal, foton, jednim dijelom svoje energije ( $h\nu$ ), vrši izlazni rad ( $A_i = Q_e U_i$ ), a ostatak energije fotona prelazi u kinetičku energiju emitovanog elektrona. Prema tome, za fotoelektrični efekt važi relacija:

$$h \cdot \nu = A_i + W_k = Q_e \cdot U_i + \frac{mv^2}{2}$$

Sekundarna emisija je emitovanje elektrona kao posljedica bombardovanja materijala elektronima, jonima ili atomima. Emisija elektrona zavisi od vrste materijala, od energije i vrste primarnih čestica. Čestice koje udaraju u čvrsti materijal nazivaju se primarnim česticama, a elektroni koji napuštaju materijal sekundarnim elektronima.

Mehanizmi provođenja struje kroz gasove, u tehničkoj primjeni, najviše se koriste kod elektronskih cijevi, a u raznim primjenama koriste se efekti električnog luka.

### 2.10.1 Električni luk

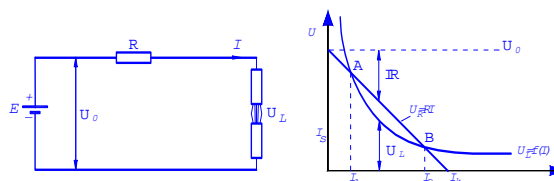
Električni luk, ako se pojavi tamo gdje se ne očekuje, može biti vrlo štetan, pa stoga i nepoželjan. On ne samo da razara izolaciju nego, zbog velike toplote, koja prati njegovu pojavu, topi sve metalne dijelove na svom putu. Međutim, često se električni luk izaziva namjerno, radi korišćenja njegove toplotne energije i energije zračenja. Električni luk se najčešće koristi za elektrolučno zavarivanje metala, za topljenje ruda i metala u elektrolučnim pećima i za lučne lampe. Električni luk, koji se koristi u navedene svrhe, ostvaruje se pri naponima od nekoliko desetina do nekoliko stotina volti. Koristi se termoelektronska emisija usijane katode i termojonizacija gasa (najčešće vazduha) između elektroda.

Elektrode, koje mogu biti metalne, u praksi se najčešće koriste ugljene. Njihova važna osobina je da se ne tope, već postepeno sagorjevaju, mada luk daje vrlo jak toplotni i svjetlosni efekt. Najjači izvor svjetlosti i toplote je krater na pozitivnoj ugljenoj elektrodi, čija temperatura može dostići vrijednost 3.500 do 4000 °C dok je temperatura katode znatno niža (oko 2.500 °C). Na anodi se pojavljuje krater, a na katodi, se javlja ispupčenje. Zbog toga se tokom rada anoda brže troši od katode i obično uzima dvostruke debljine..

### 2.10.2 UI - karakteristika električnog luka

$$U = RI + U_i$$

$$U_i = U - RI$$



### 2.11 Termoelektricitet

Italijanski fizičar Volta je, još 1793. god., uočio da se pri dodiru dva različita metala među njima javlja mali električni napon. Ovaj napon se naziva kontaktni napon (kontaktna ems-a), a efekt se često naziva Voltin efekt. Ovaj napon je uslovljen prelazom elektrona provodnosti na mjestu kontakta iz jednog metala u drugi. S obzirom na nejednaku koncentraciju elektrona, iz metala sa većom koncentracijom preći će veći broj elektrona u drugi metal. Tako se u jednom od metala javlja višak pozitivnog, a u drugom višak negativnog elektriciteta, uslijed čega dolazi do kontaktne razlike potencijala.

Pri prelasku elektrona iz jednog metala u drugi vrši se određeni rad -izlazni rad. Da bi elektron prešao iz jednog metala u drugi njegova energija toplotnog kretanja mora biti veća od izlaznog rada

$$A_i = Q_e \cdot U_i$$

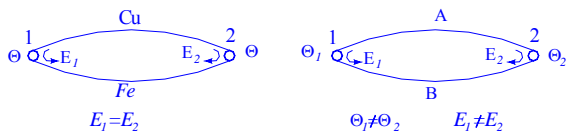
$U_i$  Izlazni napon je različit za svaki metal.

Izlazni rad mjeri se jedinicom elektron-volt (eV) i iznosi:

$$1eV = 1,6 \cdot 10^{-19} C \cdot 1V = 1,6 \cdot 10^{-19} J$$



Ako se formira kolo od dva različita metala (npr. bakra i gvožđa kao na slici), tada ćemo u kolu imati dvije kontaktne ems-e suprotno usmjerene (u opoziciji), tako da u kolu nema struje.



Kada se jedan od spojeva zagrije ili rashladi, tako da ima temperaturu različitu od drugog spoja, tada će kroz kolo proteći električna struja. Ovu pojavu je 1821. god. konstatovao Zebek i naziva se *Zebekov efekt*, ili termoelektrični efekt.

Ovakav spoj dva različita metala, prema tome, može da služi kao izvor elektromotorne sile (termoelektromotorna sila TEMS-a) i naziva se termoelement (ili termospreg). TEMS-a zavisi od vrste primjenjenih materijala i razlike temperatura spojeva dva metala i kod tehničkih primjena iznose od nekoliko milivolti do nekoliko desetina milivolti. Termoelementi su našli široku primjenu u mjerenju temperature.

Francuski fizičar Peltije je utvrdio da je Zebekov efekt reverzibilan. Ako se kroz kolo sastavljeno od dva različita metala propusti struja, onda će se spoj (1), koji bi pri zagrijavanju davao struju u istom smjeru, sada hladiti, dok će se drugi spoj (2) zagrijavati. Objašnjenje Peltijeovog efekta, je sljedeće: pri prelazu elektrona iz gvožđa u bakar u spoju (1) njihova se energija povećava, jer prelaze u metal čiji je izlazni napon viši, što može biti samo na račun energije dovedene spolja. Kako se ova energija ne dovodi, troši se sopstvena toplota spoja, i spoj se zbog toga hladi. U spoju (2) dešava se suprotno. Ako je smjer struje u kolu suprotan, dešava se obrnuto; spoj (1) se zagrijava, a spoj (2) se hladi.

Ovu toplotu treba razlikovati od toplote dobijene Džulovim efektom. Toplota uslijed ovog efekta zavisi od izlaznog napona, struje i njenog smjera. U običnim uslovima, ova toplota je mnogo manja od džulovske.

Na osnovu termodinamičkog razmatranja tada poznatih karakteristika termosprega, Tomson je eksperimentalno pokazao da duž jednog provodniku od istog materijala postoji razlika električnog potencijala, ako duž tog provodnika postoji temperaturna razlika. Ova pojava je nazvana Tomsonov efekt. To znači da ako između dva kraja jednog homogenog provodnika postoji temperaturna razlika tada će između ovih krajeva postojati izvjesna ems-a -Tomsonova elektromotorna sila, koja je data sljedećim izrazom:

$$E_T = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \sigma \cdot d\vartheta$$

gdje je:  $\sigma$  - Tomsonov koeficijent ( $V/^\circ C$ )

Uočimo da se Tomsonov efekt ne može koristiti za proizvodjenje struje u zatvorenom kolu. Jer, ako se zatvoreno kolo od bakarne žice grije na jednom kraju, a hladi na drugom, tada će u dva dijela žice biti obrazovane dvije potpuno jednake Tomsonove ems-e, a suprotnih smjerova, tako da će se uzajamno poništavati. I Tomsonov efekt je reverzibilan.