

3. *Временски константне електричне струје* — *електрокинетика*

3.1. УВОД

До сада смо проучавали електростатичко поље, тј. електрично поље које потиче од непокретних електричних оптерећења. У електрокинезици проучавамо случајеве када се велики број електричних оптерећења под дејством електричног поља организовано, усмерено креће. Такво организовано кретање наелектрисаних тела има сличности са струјањем течности, па га називамо електрична струја. Електричном струјом у ширем смислу те речи називамо свако усмерено кретање електричних оптерећења, без обзира на узроке овог кретања и на врсту оптерећења која учествују у овом кретању.

Електрична струја се може образовати у чврстим, течним и гасовитим срединама, па чак и у вакууму, ако постоје слободно покретљива наелектрисања и ако постоји узрок који ће изазвати кретање ових наелектрисања.

Покретљива наелектрисања која могу образовати електричну струју су електрони и позитивни и негативни јони. У чврстим телима, а посебно у металним проводницима, слободно покретљива наелектрисања су електрони, тј. негативна елементарна наелектрисања. То су тзв. електрони проводности, који су код проводника веома »лабаво« везани за матичне атоме и молекуле. Струје образоване овим електронима називају се струје проводности или кондукционе струје.

Од течних средина у којима се може образовати електрична струја посебно су значајни електролити. Слободно покретљива наелектрисања у електролитима су позитивни и негативни јони.

У гасовима, који су добри изолатори, услед јонизације може доћи до појаве електричне струје. Слободно покретљива наелектрисања у овом случају су позитивни и негативни јони и слободни електрони.

Електрична струја се може образовати и у вакууму, ако се обезбеди присуство слободних електрона. Оваква врста електричне струје среће се у електронским цевима са вакуумом, при чему се потребни електрони ослобађају загревањем катоде.

С обзиром на врсту покретљивих оптерећења која учествују у појави електричне струје, струје се могу поделити на електронске (кондукционе) и јонске. У случају електронских струја, које карактеришу металне проводнике и вакуум, не долази ни до каквих материјалних промена у средини у којој постоји струја, док у случају јонских струја долази до преношења супстанце и до хемијских промена средине (електролиза).

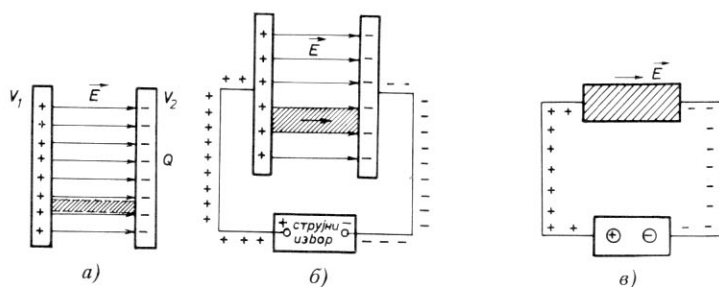
Електрична струја може бити временски непроменљива, као што је, рецимо, равномерно кретање воде у некој цеви. Такву електричну струју називамо временски константна електрична струја. Често се у истом смислу

користе називи *једносмерна струја* или *стационарна струја*. У овом делу уџбеника ми ћемо проучити детаљно такве струје.

Усмерено кретање великог броја оптерећења може да буде временски променљиво, при чему може доћи и до повремене промене смера кретања. Таква електрична струја назива се временски променљива струја.

Постојање слободно покретљивих оптерећења је потребан, али не и довољан, услов за настанак и одржавање електричне струје. Да би кретање слободних оптерећења било усмерено, потребан је узрок који ће изазвати и оджавати овакво кретање, а то је најчешће електрично поље. С обзиром на практичан значај и потребе ми ћемо се искључиво бавити струјама које су настале под дејством електричног поља у металним проводницима.

Временски константне струје називају се још и стационарне струје. Да би се образовала стационарна струја, потребно је да електрично поље, чије ће силе изазвати усмерено кретање слободних оптерећења, буде стационарно — временски константно. Да бисмо објаснили појам стационарног електричног поља, упоредићемо га са електростатичким пољем (слика 3.1а).



Сл. 3.1

Посматрајмо плочаста кондензатор у вакууму чије су електроде наелектрисане истим количинама разноименог електрицитета. Унутар кондензатора успостављено је хомогено електрично поље вектора \vec{E} , а између електрода влада напон $U_{12} = V_1 - V_2$. Рад који је извршен приликом наелектрисавања електрода трансформисао се у енергију електростатичког поља. Док између електрода нема проводне везе, систем је у стању електростатичке равнотеже. Ако унесемо метални проводник, тако да он додирује електроде кондензатора (шрафирани део на слици 3.1а), формираће се проводни пут и под дејством поља успоставиће се електрична струја. Слободни електрони проводника прелазиће на позитивно наелектрисану электроду, а на њихово место долазиће електрони са негативно наелектрисане електроде. Померање електричних оптерећења изазвано струјом доводи до опште прерасподеле наелектрисања у оваквом систему, а самим тим и до промена у структури и јачини електричног поља. Коначан резултат овог померања доводи до неутрализације електрода и ишчезавања електричног поља. Струја која је пратила овај процес је краткотрајна и променљива у времену. Према томе, електростатичко поље не може да одржава сталну стационарну струју. У процесу растеређивања кондензатора потенцијална енергија електростатичког поља се прво трансформише у рад сила поља, а затим у топлотну енергију, због судара слободних електрона са непокретним честицама металног проводника.

Да бисмо у посматраном случају остварили временски непроменљиву, једносмерну струју, потребно је одржавати сталну количину електрицитета на електродама кондензатора, сталну јачину поља \vec{E} и сталну разлику потенцијала између електрода, а самим тим и на крајевима проводника унутар кондензатора. То се постиже прикључивањем кондензатора, односно проводника, на електрични уређај који се назива струјни извор или електрични генератор, чији је задатак да насупрот силама електричног поља стално потискује приспеле електроне са позитивне електроде на негативну одржавајући тако сталну разлику потенцијала између електрода кондензатора (слика 3.16). У овом случају количина наелектрисања на електродама биће стална, мада су електрони били стално у кретању. Временски константно електрично поље изазваће у проводнику константну електричну струју која ће постојати све време док је укључен извор струје.

Основна разлика између електростатичког и стационарног поља је у томе што већ формирано електростатичко поље у идеалном диелектрику нити врши неки рад, нити је потребно улагање енергије за његово одржавање, док стационарно електрично поље стално врши рад померајући слободна наелектрисања, па је неопходно довођење енергије за његово одржавање. Очигледно је да се ова енергија доводи из струјних извора (генератора) у којима се други облици енергије (механичка, топлотна, хемијска, светлосна) претварају у електричну. Извори електричне енергије биће касније детаљно описани.

Стационарна наелектрисања се разликују од статичких по томе што се стално померају, али им је заједничко то што им је густина у свакој тачки константна у времену. Из овога следи да је електрично поље које проузрокује једносмерна струја исто као електростатичко поље које потиче од на исти начин расподељених оптерећења. Појмови које смо дефинисали у електростатици као што су јачина поља, потенцијал и напон важе и за стационарно електрично поље и имају исти смисао као у електростатици. Још једна битна разлика између електростатичког и стационарног поља је што стационарно поље постоји и у унутрашњости проводника.

Електрични систем на слици 3.16 може се еквивалентно представити као на слици 3.1в, тј. електроде кондензатора као прикључци генератора, при чему се проводник везује за генератор. Такав затворен систем назива се електрично коло. Основни елементи електричног кола су:

- извор електричне енергије,
- пријемник електричне енергије (видели смо да се енергија поља у проводнику претвара у топлоту) и
- спојни проводници.

Пријемник електричне енергије и спојни проводници представљају спољашњи, а генератор унутрашњи део електричног кола.

Дакле, да би се у проводнику успоставила временски константна струја:

- проводник мора бити део затвореног електричног (струјног) кола,
- на крајевима проводника мора да постоји константна разлика потенцијала.

Брзина усмереног кретања слободних електрона у металним проводницима веома је мала (нпр. када је у проводнику поље јачине $E = 1 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$, онда

је просечна брзина електрона свега $0,5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$, тј. електрон пређе у правцу поља 1 cm за 20 секунди), али великом брзином се преноси појава њиховог кретања. Електрично поље се успоставља брзином светлости, тј. $C = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ и његов утицај ће се готово тренутно пренети на све електроне.

3.2. ПРАТЕЋА ДЕЈСТВА ЕЛЕКТРИЧНЕ СТРУЈЕ

Протицање електричне струје кроз проводнике не може се непосредно опазити, али се о њеном постојању може закључити на основу низа појава које изазива струја како у самим проводницима тако и у околном простору.

Једна од појава које прате електричну струју јесте загревање проводника при чему се електрична енергија претвара у топлотну.

Друга појава која се умногоме користи у техници, а која прати електричну струју, јесте појава магнетног поља. Ако се у близини проводника кроз који протиче електрична струја постави магнетна игла, она ће да се окрене око своје осе и заузме нови положај. То значи да је неко ново магнетно поље у околини проводника пореметило магнетно поље Земље.

При проласку електричне струје кроз електролите примећују се хемијске реакције праћене издвајањем разних материјала на електродама. Ова појава се назива електролиза. Процес електролизе се примењује у разним гранама индустрије за добијање метала, као и за nanoшеће металних слојева на разне елементе.

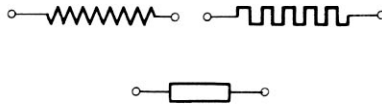
Електрична струја има и светлосно дејство (електрична сијалица), а такође и механичко дејство, па се многе машине како у индустрији тако и у домаћинству покрећу електричном струјом. Постоје и друге појаве које прате електричну струју, али овде су набројане само најосновније.

3.3. ПОЈАМ ЕЛЕКТРИЧНОГ КОЛА — ЕЛЕМЕНТИ КОЛА

Већ смо нагласили да се стална (стационарна) електрична струја може одржавати само у затвореним струјним колима уз услов, који је исто тако битан, да је у коло укључен струјни извор. Коло које задовољава овај услов приказано је на слици 3.1b, али то није уобичајени начин представљања електричних кола. Пошто је коло непрекинути проводни ланац разних електричних елемената (као што су електрични извори, пријемници разних врста и проводници који те елементе повезују), договорени су графички симболи за представљање ових елемената у електричним схемама. На овај начин се електричне схеме поједностављују, а елементи кола, који по стварном облику могу бити веома различити и сложени, а по функцији слични, представљају се истим и једноставним графичким симболима.

Проводници и водови који повезују поједине елементе кола, који су, по правилу, добри проводници електричне струје, означавају се пуним извученим линијама.

Термогени пријемници електричне енергије најчешће се представљају једним од три симбола приказана на слици 3.2.



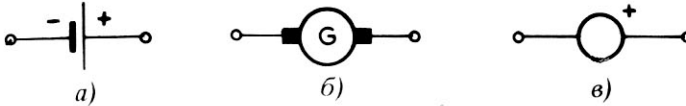
Сл. 3.2

Овим симболом може се представити и обичан отпорник на схеми неког електронског уређаја, али исто тако и сијалица са ужареним влакном или електрична грејалица.

Електрични извори, односно генератори, такође се обележавају на више начина (слика 3.3)

а) Електрохемијски извори обележавају се са две паралелне црте и то једном тањом и дужом, која означава позитиван пол извора, и другом, краћом и дебљом цртом, која означава негативан пол.

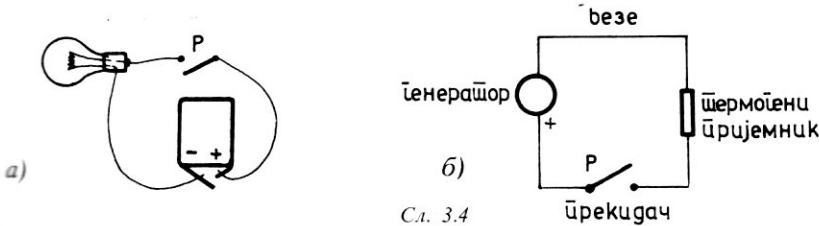
б) Машински генератори једносмерне струје обележавају се симболом који је приказан на слици 3.3б.



Сл. 3.3

в) У проучавању електричних кола, када није битна физичка природа генератора, најчешће се употребљава симбол као на слици 3.3в. Знак + означава прикључак извора на позитивном, односно вишем потенцијалу.

До сада описани графички симболи омогућавају да се нацрта схема једног простог струјног (електричног) кола које садржи електрични извор и термогени пријемник (слика 3.4). Поред проводника који повезује елементе тако да чине затворено коло, на схеми је назначен и прекидачки елемент Р помоћу кога се коло може прекидати и затварати.



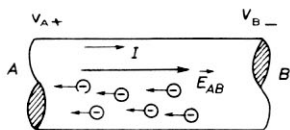
Сл. 3.4

На слици 3.4б приказана је схема струјног кола са слике 3.4а.

3.4. ЈАЧИНА, СМЕР И ГУСТИНА СТРУЈЕ

Прва и најважнија квантитативна карактеристика електричне струје је јачина или интензитет струје. То је скаларна величина која описује усмерено

кретање електричних оптерећења кроз неку површину. Јачина струје у случају временски константне струје обележава се симболом I , а у случају временски променљиве струје симболом i . Да бисмо одредили јачину струје, посматраћемо проводник (увеличан) као део затвореног кола на чијим крајевима А и В влада напон $U_{AB} = V_A - V_B$ (слика 3.5).



Сл. 3.5

Нека је $V_A > V_B$. Под дејством електричног поља \vec{E}_{AB} слободни електрони ће се усмерено кретати од тачке В ка тачки А, тј. насупротив смеру поља \vec{E}_{AB} .

Услед сталног електричног поља кроз сваки попречни пресек проводника проћи ће у времену t иста количина наелектрисања Q . Количник протекле количине електрицитета и времена за које је та количина протекла представља јачину струје кроз тај проводник:

$$I = \frac{Q}{t}. \quad (3.1)$$

Струји се приписује и одређени смер у односу на проводник. Природно би било да смер струје буде истоветан са смером организованог кретања електрона у проводнику. Међутим, још пре него што је утврђено да електричну струју у металним проводницима образују електрони, усвојено је да смер електричне струје буде од краја на вишем (позитивном V_A) потенцијалу ка крају на нижем (негативном V_B) потенцијалу проводника (види слику 3.5). Такав смер струје, у смеру деловања електричног поља \vec{E}_{AB} , задржан је и данас из практичних разлога и често га називамо техничким смером струје. Овде треба добро разликовати:

- физички, стварни смер кретања електрона насупротив смеру вектора поља \vec{E}_{AB} и
- усвојени, технички смер струје кроз проводник, који је исти као и смер вектора \vec{E}_{AB} .

Када се струја мења у времену њена јачина се дефинише брзином промене количине електрицитета кроз попречни пресек проводника и рачуна се као:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (3.2)$$

Јединица јачине струје у СИ систему је:

$$I_u = \frac{Q_u}{t_u} = \frac{C}{s} = \frac{\text{кулон}}{\text{секунд}}. \quad (3.3)$$

Према француском физичару Амперу (André Marie Ampère, 1775–1836) ова јединица носи име ампер и обележава се симболом А.

$$I_u = A. \quad (3.4)$$

Дефиниција јачине струје од 1А дата је у уводном делу овог уџбеника.

За мале јачине струје употребљавају се мање јединице од ампера: милиампер ($1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$) и микроампер ($1 \text{ }\mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$).

Из дефиниције јачине електричне струје (једначина 3.1) следи да је могуће израчунати количину електрицитета Q која за време t протекне кроз попречни пресек проводника са струјом I :

$$Q = I \cdot t. \quad (3.1a)$$

Како су нам јединице за интензитет електричне струје I и време t познате као основне јединице SI система из релације (3.1a), можемо дефинисати јединицу за количину електрицитета — кулон:

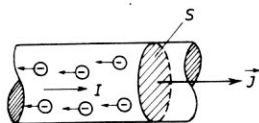
$$Q_u = I_u \cdot t_u = A \cdot s = C. \quad (3.3a)$$

Кулон је количина електрицитета која у једној секунди протекне кроз пресек проводника са сталном струјом јачине једног ампера.

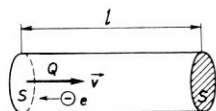
У пракси се користи већа јединица која је добијена тако што се уместо једне секунде за време t узима јединица један сат (час), па се новодобијена јединица назива амперсат или амперчас:

$$1 \text{ Ah} = 3600 \text{ As} = 3600 \text{ C}. \quad (3.3b)$$

Део простора у коме постоји електрична струја назива се струјно поље. Да би се струјно поље квантитативно што прецизније описало, уводи се појам вектора густине струје \vec{J} . Правец вектора \vec{J} дефинисан је правцем усмереног кретања електрона проводности у датој тачки, а смер му је супротан смеру кретања електрона, тј. има исти смер као технички смер струје (види слику 3.6).



Сл. 3.6



Сл. 3.7

Када је струја равномерно расподељена по површини попречног пресека проводника, интензитет вектора густине струје дефинисан је односом:

$$J = \frac{I}{S}, \quad (3.5)$$

где је I јачина струје у проводнику, а S површина попречног пресека проводника. Јединица за густину струје у SI систему је:

$$J_u = \frac{I_u}{S_u} = \frac{A}{m^2} = \frac{\text{ампер}}{\text{метар квадратни}}. \quad (3.6)$$

Ампер по метру квадратном је веома мала јединица за густину струје и зато се најчешће користи помоћна јединица:

$$J_u = \frac{A}{mm^2} = 10^6 \frac{A}{m^2}. \quad (3.6a)$$

Јачина и густина струје су макроскопске величине помоћу којих се квантитативно описује појава електричне струје. Обе ове величине могу се једноставно

изразити помоћу запреминске густине покретљивих наелектрисања N' (која се још назива и концентрација слободних наелектрисања електрона), њиховог електричног оптерећења Q (e) и њихове средње макроскопске брзине N . Посматрајмо цилиндрични проводник дужине l и површине попречног пресека S (слика 3.7) као део електричног кола у коме се крећу слободна наелектрисања.

Сви електрони који су за време t прошли кроз површину S налазе се у запремини:

$$V = S \cdot l = S \cdot v \cdot t. \quad (3.7)$$

Број електрона N у запремини V ако је њихова запреминска густина N' је:

$$N = N' \cdot V = N' \cdot S \cdot v \cdot t. \quad (3.8)$$

Укупна количина електрицитета која је прошла кроз површину S је:

$$Q = N \cdot e = e \cdot N' \cdot S \cdot v \cdot t, \quad (3.9)$$

па је јачина струје кроз проводник:

$$I = \frac{Q}{t} = N' \cdot e \cdot v \cdot S, \quad (3.10)$$

а густина струје:

$$J = \frac{I}{S} = N' \cdot e \cdot v. \quad (3.11)$$

Пошто правац и смер вектора \vec{J} по дефиницији одговарају правцу и смеру кретања позитивних покретљивих наелектрисања, изразу 3.11 може се дати векторски облик:

$$\vec{J} = (-e) \cdot N' \cdot \vec{v}, \quad (3.12)$$

одакле се види да је смер вектора \vec{J} у металном проводнику супротан смеру вектора средње макроскопске брзине кретања електрона.

Помоћу релације 3.11 може се израчунати средња брзина електрона када је позната њихова густина у проводнику и густина струје. Узмимо за пример бакарни проводник за који је познато да у запремини $Q = 1 \text{ cm}^3$ има око $N = 8,5 \cdot 10^{22}$ слободних електрона, што значи да је $N' = \frac{N}{V} = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$. Ако

је густина струје $J = \frac{1 \text{ A}}{\text{mm}^2} = 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ и како је $e = 0,16 \cdot 10^{-18} \text{ C}$, то је средња брзина електрона:

$$v = \frac{J}{N'e} = \frac{10^6}{8,5 \cdot 10^{28} \cdot 0,16 \cdot 10^{-18}} = 7,35 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Из овога се види да је средња макроскопска брзина електрона проводности у металима веома мала.

3.5. ПРВИ КИРХОФОВ ЗАКОН

У сталном струјном пољу и распоред електричних оптерећења у простору мора бити временски непроменљив, што значи да на место покретних

оптерећења која напусте одређену запремину (нпр. на слици 3.7 запремину $V=S \cdot l$) долази istа количина нових покретних оптерећења, па се укупна количина наелектрисања унутар запремине V не мења. У противном, дошло би до сталног пораста количине позитивних или негативних оптерећења, расподела оптерећења би се мењала, мењало би се и поље које проузрокује струју па она не би била временски непроменљива.

Електрична кола могу бити и сложена. Место у електричној мрежи где је везано два или више проводника назива се чвор кола и обележава се великим штампаним словима, нпр. А (слика 3.8а).

Нека кроз проводнике 1—3, као дела сложеног електричног кола, теку сталне количине електрицитета Q_1 , Q_2 и Q_3 . Да не би дошло до нагомилавања оптерећења у чвору А, укупна количина наелектрисања која за време t дотече у чвор мора да буде једнака количини електрицитета која за исто време отече из чвора. Ово представља закон континуитета.

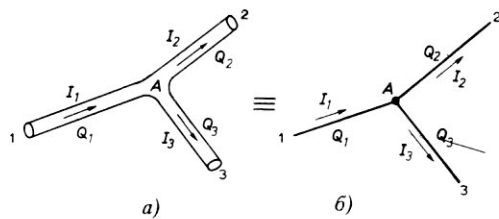
За чвор А на слици 3.8б, према назначеним смеровима, закон континуитета у математичком облику може да се напише:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3, \quad (3.13)$$

односно ако релацију 3.13 поделимо са временом t , добићемо да је

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (3.14)$$

Релација 3.14 може да се исказе речима: збир струја које имају смер ка чвору једнак је збиру струја које имају смер од чвора.



Сл. 3.8

Једначину 3.14, написану за чвор А, можемо изразити и у облику:

$$I_2 + I_3 - I_1 = 0 \quad (3.15)$$

и на крају уопштити: у чвору у коме се стиче произвољан број n проводника са струјом, алгебарски збир јачина струје мора бити нула:

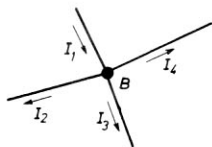
$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (3.16)$$

При томе се јачина струје чији су смерови од чвора уноси са позитивним, а оне чији су смерови ка чвору са негативним знаком (као у релацији 3.15), а може се узети и обрнуто.

Овај закон за чворну тачку сложеног електричног кола и струје у њој, исказан речима и математички формулисан релацијом 3.16, дао је 1845. године немачки физичар Густав Роберт Кирхоф (G. R. Kirchoff, 1824—1887) и по њему се назива први Кирхофов закон.

Знак Σ (сигма) у једначини 3.16 означава у математици суму или збир.

Први Кирхофов закон служи нам да за конкретан случај чвора израчунамо само једну непознату струју, док остале морају бити познате. Као пример посматрајмо на слици 3.9 део сложеног кола састављеног од четири гране које се стичу у чвору В.



Сл. 3.9

Нека су нам познати смерови и интензитети струја I_1, I_2, I_3 . Потребно је да одредимо струју у четвртој грани. Да бисмо на чвор В применили једначину 3.16, струји I_4 придодајемо произвољан, претпостављени смер у односу на чвор В и тиме одређујемо њен предзнак у релацији 3.16.

Тај претпостављени смер струје називамо референтни смер. Референтни смер струје I_4 дат је на слици 3.9 пуном извученом стрелицом. За чвор В сада пишемо:

$$-I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0. \quad (3.16a)$$

Нека је:

$$I_1 = 3A; \quad I_2 = 2A; \quad I_3 = 4A.$$

Решавајући једначину (3.16a) по I_4 добијамо:

$$I_4 = I_1 - I_2 - I_3 = (3 - 2 - 4)A = -3A,$$

што значи да је интензитет струје $I_1 = 3A$, а знак минус нам казује да је стварни смер струје I_4 супротан референтном смеру.

3.6. ЕЛЕКТРИЧНА ОТПОРНОСТ

Као један од услова за успостављање електричне струје у проводној средини навели смо постојање електричног поља. То нас наводи на закључак да постоји неки однос између електричног поља и густине струје. Мерењем је та веза констатована и добијено је:

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J}, \quad (3.17)$$

при чему се коефицијент ρ назива специфична отпорност материјала у коме је успостављена струја густине \vec{J} . Специфична отпорност зависи од врсте материјала и његове температуре, као што ћемо мало касније и видети.

На основу релације 3.17 видимо да по природи ρ одговара количнику интензитета електричног поља \vec{E} и густине електричне струје:

$$\rho (=) \frac{E}{J}, \quad (3.18)$$

па је јединица за мерење специфичне отпорности у SI систему:

$$\rho_u = \frac{E_u}{J_u} = \frac{\frac{V}{m}}{\frac{A}{m^2}} = \frac{V}{A} \cdot m. \quad (3.19)$$

Јединица $\frac{V}{A}$ назива се ом (према немачком физичару Georgu Simonu Ohmu, 1787—1854, који је уочио везу између напона на проводнику и струје кроз проводник) и обележава се великим грчким словом Ω . Према томе, једначина 3.19 може да се напише као:

$$\rho_u = \frac{V}{A} \cdot m = \Omega \cdot m. \quad (3.19a)$$

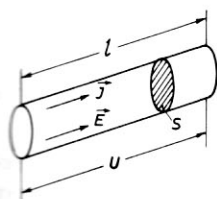
Имајући у виду напред изложену материју, која се односи на електрично поље и густину електричне струје, развићемо даље релацију 3.17. Посматрајмо проводник у облику металне жице попречног пресека S и дужине l . На крајевима жице напон је U и нека кроз жицу тече струја I (слика 3.10).

У жици ће се формирати електрично поље интензитета:

$$E = \frac{U}{l}, \quad (3.20)$$

а густина струје ће износити:

$$J = \frac{I}{S}. \quad (3.21)$$



Сл. 3.10

Ако то заменимо у једначини 3.17, добићемо:

$$E = \rho \cdot J = \frac{U}{l} = \rho \cdot \frac{I}{S},$$

из чега следи да је:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{S}{l}. \quad (3.22)$$

На основу релације 3.22 можемо извести важан закључак: пошто је за један материјал специфична отпорност константна, то ће за проводник константне дужине l и попречног пресека S напон на његовим крајевима и струја у њему бити сразмерни:

$$I = \frac{U}{R}, \text{ односно } U = R \cdot I, \quad (3.23)$$

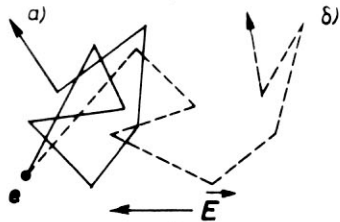
дакле, већем напону одговара већа струја кроз проводник. Коефицијент сразмерности између напона и струје R назива се електрична отпорност или само отпорност тог проводника. Из релације 3.22 и 3.23 можемо одредити отпорност проводника:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (3.24)$$

што значи да ће отпорност бити утолико већа уколико је дужина проводника већа, а његов попречни пресек мањи. Јединица за мерење електричне отпорности је ом:

$$R_u = \frac{U_u}{I_u} = \frac{V}{A} = \Omega. \quad (3.25)$$

Отпорности од једног ома има проводник на чијим крајевима влада потенцијална разлика од једног волта, при чему кроз њега тече струја јачине једног ампера.



Сл. 3.11

У чему је суштина електричне отпорности?

Подсетимо се да у проводним материјалима постоји хаотично кретање електрона (слика 3.11а). Под утицајем електричног поља долази до усмеравања електрона, али термичко кретање и даље постоји (слика 3.11б). При овом кретању долази до интеракције електрона са јонима кристалне решетке, те електрони предају део енергије кристалној решетки у виду топлоте.

Уколико је поље јаче, и усмерено кретање електрона је израженије, па су и контакти електрона са кристалном решетком чешћи — материјал се у већој мери супротставља кретању електрицитета.

3.7. ЗАВИСНОСТ СПЕЦИФИЧНЕ ОТПОРНОСТИ ОД ТЕМПЕРАТУРЕ

Код већине проводника специфична отпорност не зависи од јачине електричног поља, изузев када је оно веома јако, тако да доводи до стварања нових слободних електрона. Специфична отпорност зависи и од температуре с обзиром на то да су при вишој температури термичка кретања електрона израженија тако да је потребно јаче поље да би се они усмерили, односно отпорност је већа. Промена специфичне отпорности са температуром може се изразити:

$$\rho(\theta) = \rho_0 [1 + \alpha_0 (\theta - \theta_0)], \quad (3.26)$$

где је:

$\rho(\theta)$ — специфична отпорност при температури θ ,

ρ_0 — специфична отпорност при собној температури

$$\theta_0 = 20^\circ\text{C} = 293^\circ\text{K},$$

α_0 — температурни коефицијент специфичне отпорности.

За већину метала α_0 је позитивна величина, што је у складу са објашњењем својства отпорности металних проводника. Постоје материјали код којих је α_0 негативно (као што је графит), или је блиско нули (као код неких легура, нпр. хромникал, константан и сл.). У табели 3.1 дате су вредности специфичне отпорности и њеног температурног коефицијента за неке материјале.

ТАБЕЛА 3.1

материјал	$\rho (\Omega \cdot \text{m})$	$\alpha_0 (1/^\circ\text{C})$
бакар	$1,6 \cdot 10^{-8}$	0,004
сребро	$1,5 \cdot 10^{-8}$	0,0038
злато	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,0036
алуминијум	$2,6 \cdot 10^{-8}$	0,0044
гвожђе	$8,5 \cdot 10^{-8}$	0,0073
жива	$94 \cdot 10^{-8}$	0,0009
графит	$3500 \cdot 10^{-8}$	-0,0005
хромникал	$137 \cdot 10^{-8}$	0,0000002

Реципрочна величина специфичној отпорности назива се специфична проводност проводника;

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (3.27)$$

Јединица за специфичну проводност у SI систему је:

$$\gamma_u = \frac{1}{\rho_u} = \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} = \frac{\text{S}}{\text{m}}. \quad (3.28)$$

Јединица $\frac{1}{\Omega} = \text{S}$ назива се сименс по немачком инжењеру и проналазачу Сименсу (Werner von Siemens, 1816—1892). На снову релације 3.24 електрична проводност проводника је:

$$G = \frac{1}{R} = \gamma \cdot \frac{S}{l}. \quad (3.29)$$

Јединица за специфичну проводност је:

$$G_u = \frac{1}{R_u} = \frac{1}{\Omega} = \text{S (сименс)}. \quad (3.30)$$

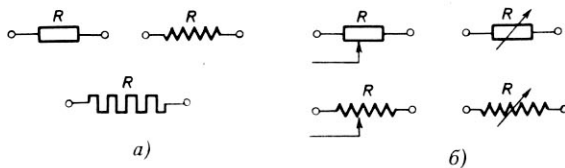
Величине γ и G могу се равноправно користити као и ρ и R , али су ипак у ређој употреби.

3.8. ОТПОРНИЦИ

У електричним колима користе се проводници ради повезивања појединих делова кола и обезбеђивања протока електрицитета. За проводнике бирамо материјале са што нижом специфичном отпорношћу и тако их конструишемо да имају што мању отпорност. На тај начин се у проводницима неће непотребно губити енергија електричног извора.

Поред проводника у електричном колу потребни су и елементи чија је отпорност знатно већа од отпорности проводника. То су елементи у којима се електрична енергија претвара у топлотну (електротермички уређаји, сијалице са ужареним влакном итд.) или елементи који служе за добијање одређеног напона на њиховим крајевима, као што су разна електрична кола у електротехници. Ови елементи, конструисани тако да у електрично коло унесу одређену отпорност која је велика у односу на отпорност веза и контаката, називају се отпорницима и обележавају се симболом R .

Најчешће коришћене ознаке за отпорнике на схемама приказане су на слици 3.12а. На тим ознакама танке линије представљају проводне жице



Сл. 3.12

тј. прикључке отпорника. Отпорнике можемо конструисати тако да им се отпорност мења помоћу клизног контакта (слика 3.12б). Такав отпорник назива се променљиви отпорник или реостат.

3.9. ОМОВ ЗАКОН

Посматраћемо отпорник отпорности R као део затвореног електричног кола на чијим прикључцима влада напон U и кроз који тече једносмерна струја I .

Из претходног излагања уочили смо да између напона на посматраном делу кола и струје кроз коло постоји зависност дата релацијом 3.23:

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{или} \quad U = R \cdot I.$$

Дакле, већем напону одговара и већи интензитет струје. Ову зависност између напона и струје открио је експерименталним путем немачки научник Ом мерећи струју кроз део кола на два начина:

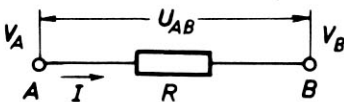
- одржавајући напон константним, а мењајући елементе кола, тј. отпорност и
- мењајући напон на истом проводнику.

Релација 3.23 представља Омов закон за део електричног кола и може се исказати речима: јачина струје кроз проводник управо је сразмерна напону на крајевима тог проводника, а обрнуто је сразмерна његовој отпорности.

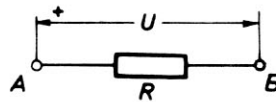
У изразу који исказује Омов закон I и U представљају апсолутне вредности јачине струје у проводнику и напона на његовим крајевима. При томе се подразумева да струја има смер од краја на вишем ка крају на нижем потенцијалу проводника. Међутим, приликом анализе сложених електричних кола стварни смер струје у неком отпорнику обично не знамо унапред. Стога не знамо ни који је од два краја отпорника на вишем потенцијалу. У таквим случајевима за струју I се уводи референтни смер, тј. претпоставља се да је смер струје у једном од два могућа смера што се означава стрелицом уз отпорник (слика 3.13). Коначни резултат за јачину струје може бити позитиван ($I > 0$) или негативан ($I < 0$) према томе да ли су стварни и референтни смер струје исти или супротни. Аналогно се поступа и са напоном. Напон између тачака А и В (слика 3.13) израчунава се као разлика потенцијала између те две тачке, тј.:

$$U_{AB} = V_A - V_B.$$

Ако је $U_{AB} > 0$, онда је тачка А на вишем потенцијалу у односу на тачку В, односно за $U_{AB} < 0$ тачка В на вишем потенцијалу у односу на тачку А. Напону, такође, дајемо референтни смер, тј. претпостављамо да је један крај отпорника на вишем потенцијалу што означавамо знаком $+$ и симболом за напон U без ознака тачака А и В.



Сл. 3.13



Сл. 3.14

Ако је напон U позитиван, крај обележен са $+$ је на вишем потенцијалу у односу на необележени. Ако је напон U негативан, крај обележен са $+$ је на нижем потенцијалу.

У принципу, референтни смерови за напон и струју могу се бирати независно, тако да могу настати два случаја приказана на слици 3.15а и б. У случају приказаном на слици 3.15а каже се да су референтни смерови напона и струје усаглашени, тј. претпоставили смо да је на вишем потенцијалу онај крај отпорника у који струја узета у усвојеном референтном смеру «улази», па је $U = R \cdot I$.

На слици 3.15б за референтне смерове напона U и струје I каже се да су неусаглашени, тј. претпоставили смо да струја кроз отпорник тече од тачке на нижем ка тачки на вишем потенцијалу, па је према томе напон U једнак:

$$U = -R \cdot I.$$

Обе претходне једначине произилазе из Омовог закона и физичке чињенице да је смер струје у посматраном делу електричног кола од краја на вишем ка крају на нижем потенцијалу.



Сл. 3.15

Ми ћемо у овом уџбенику користити усаглашене референтне смерове за напон и струју као на слици 3.15а, тј. линија са две стрелице на крајевима означаваће тачке између којих израчунавамо напон, а знак $+$ ону тачку за коју претпостављамо да је на вишем потенцијалу. Референтни смер струје биће такав да она «улази» у тачку означену са $+$. Струју можемо обележити и стрелицом на проводнику: \overrightarrow{I} □.

3.10. ЦУЛОВ ЗАКОН

Као што је већ споменуто, једна од веома важних манифестација електричне струје је њен топлотни ефекат, тј. загревање проводника. Ову појаву је експериментално проучавао и поставио квантитативне односе између величина које учествују у њој енглески физичар Цул (James Prescott Joule, 1818—1889). Посматрајући процес загревања проводника и мерећи количину ослобођене топлотне енергије при различитим јачинама сталне једносмерне струје Цул је открио следећу законитост: ослобођена количина топлотне енергије сразмерна је квадрату јачине струје I и времену t у коме се процес посматра. Кофицијент сразмерности зависи од геометријског облика проводника и врсте материјала и показаћемо да је то управо отпорност проводника R .

Посматрајмо произвољан отпорник отпорности R кроз који тече струја I , при напону на прикључцима U . У неком интервалу времена t кроз отпорник протече количина електрицитета $Q = I \cdot t$. То оптерећење су кроз проводник пренеле електричне силе, при чему се одређена количина енергије електричног

поља претворила у топлотну енергију. Према дефиницији напона, електричне силе при преношењу количине електрицитета Q кроз отпорник изврше рад:

$$A = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t.$$

По закону о одржању енергије, енергија бројно једнака овом раду претворила се у отпорнику у топлоту. Означимо ту енергију са W_J и пошто је $U = R \cdot I$ добијемо:

$$W_J = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t. \quad (3.31)$$

Једначина 3.31 одређује количину електричне енергије која се за време t претворила у отпорнику у топлотну и представља аналитичку формулацију Џуловог закона.

У колу константне струје брзина претварања електричне енергије у топлотну временски је константан процес, па дефинишемо електричну снагу посматраног отпорника:

$$P = \frac{A}{t} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}. \quad (3.32)$$

Подсетимо се да је јединица у SI систему за енергију и рад џул (J), а за снагу ват (W):

$$P_u = \frac{A_u}{t_u} = \frac{J}{S} = W \quad (\text{ват}). \quad (3.33)$$

Из релације 3.33 дефинишемо још један назив јединице рада:

$$A_u = P_u \cdot t_u = W \cdot s = \text{ват} \cdot \text{секунда}. \quad (3.34)$$

Већ је речено да при већој струји долази и до већег загревања проводника. Ако није обезбеђено хлађење проводника, може доћи до његовог прегревања и прегоривања (топљења). Као заштита од ових нежељених појава у електричним колима користе се осигурачи. Њихов задатак је да при струјама великог интензитета у колу прекину електрично коло и тиме спрече настанак већих оштећења или чак пожар. Најчешће се користе тзв. топливи осигурачи који се израђују од топливе жице. Пресек жице тако се одабира да густина струје у њој буде знатно већа него у проводницима електричног кола. Тиме је и загревање ове жице веће. Ако струја достигне критичну вредност, доћи ће до топљења само те жице, осигурача, а електрично коло остаје заштићено.

3.11. ВЕЗИВАЊЕ ОТПОРНИКА И ЕКВИВАЛЕНТНА ОТПОРНОСТ

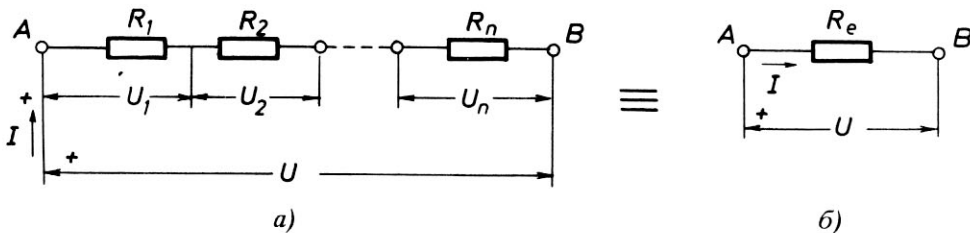
На основу ранијег излагања закључили смо да су отпорници елементи електричног кола у којима се електрична енергија неповратно губи — претвара у неки други вид енергије (најчешће топлотну) у неповратном процесу.

У практичним примерима, због постизања неког жељеног ефекта отпорници се везују у групе. Слично као и кондензатори, отпорници могу да се вежу:

- а) редно (серијски),
- б) паралелно и
- в) мешовито.

а) Редна веза отпорника

Карактеристика редне везе јесте да је струја у свим елементима иста. На слици 3.16 она је означена са I .



Сл. 3.16а

Сл. 3.16б

Према Омовом закону напон на сваком елементу једнак је производу његове отпорности и јачине струје која тече кроз њега, па је:

$$U_1 = R_1 \cdot I; \quad U_2 = R_2 \cdot I, \dots, U_n = R_n \cdot I. \quad (3.35)$$

Укупан напон између тачака А и В је:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + \dots + R_n \cdot I. \quad (3.36)$$

Делећи релацију 3.36 са струјом добићемо:

$$\frac{U}{I} = R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (3.37)$$

R_e представља отпорност еквивалентног отпорника који између тачака А и В замењује све редно везане отпорнике (слика 3.16б). Омов закон за еквивалентни отпорник гласи:

$$U = R_e \cdot I. \quad (3.38)$$

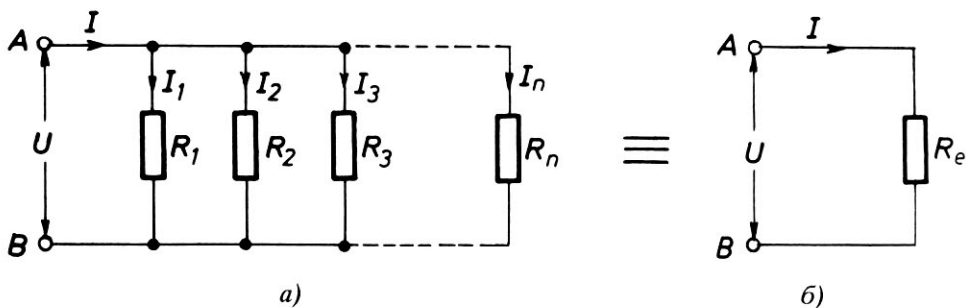
Отпорност R_e је већа од највеће отпорности у редној вези.

Укупна снага отпорника са схеме 3.16 једнака је збиру снага сваког елемента:

$$P = U \cdot I = U_1 \cdot I + U_2 \cdot I + U_3 \cdot I + \dots + U_n \cdot I = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (3.39)$$

б) Паралелна веза отпорника

Карактеристика паралелне везе јесте да је напон на крајевима свих отпорника исти, а струје се разликују и одређују према Омовом закону (слика 3.17а).



Сл. 3.17а

Сл. 3.17б

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad \dots \quad I_n = \frac{U}{R_n}. \quad (3.40)$$

Укупна струја I према првом Кирховом закону износи:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right). \quad (3.41)$$

Количник струје I и напона U даје:

$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (3.42)$$

Реципрочна вредност еквивалентне отпорности представља еквивалентну проводност G , па је:

$$G_e = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n, \quad (3.43)$$

а еквивалентна схема паралелне везе представљена је сликом 3.17б.

У паралелној вези еквивалентна отпорност је мања од најмање међу њима.

За два отпорника R_1 и R_2 везана паралелно можемо наћи R_e на следећи начин: прво одредимо према релацији (3.43) еквивалентну проводност:

$$G_e = G_1 + G_2 = \frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2},$$

односно

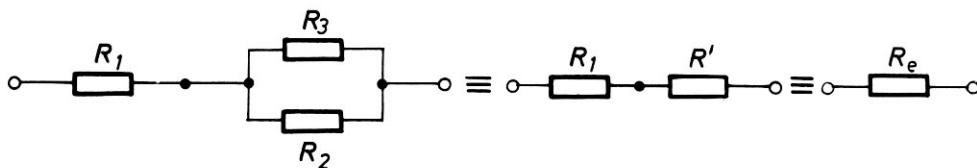
$$R_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.44)$$

Укупна снага паралелне везе отпорника једнака је:

$$P = U \cdot I = U \cdot (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n. \quad (3.45)$$

в) Мешовита веза ојјорника.

Јавља се као комбинација редне и паралелне везе (слика 3.18),



Сл. 3.18

где је:

$$R_e = R_1 + R' = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}.$$

3.12. МЕРЕЊЕ ЈАЧИНЕ СТРУЈЕ

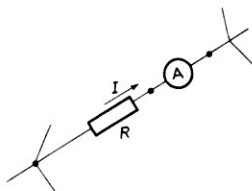
Да би се измерила јачина струје, користе се мерни инструменти који јачину струје мере користећи њена различита дејства (топлотно, хемијско, магнетно). Општи назив инструмената за мерење јачине струје је амперметар и у електричним схемама обележава се кружићем унутар којег је уписан симбол А — \textcircled{A} —. Највећи број амперметара мери јачину струје на основу њених магнетних дејстава.

Интензитет струје се мери тако што се проводник прекине, а затим споји преко амперметра. Дакле, амперметар се везује редно у грану у којој желимо да измеримо јачину струје. Схематски приказ везивања амперметра дат је на слици 3.19.

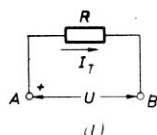
Спољашњи изглед амперметра може бити разнолик, али најчешће амперметри имају казаљку и скалу са које се може директно прочитати јачина струје. При мерењу једносмерних струја смер скретања казаљке зависи од смера струје кроз амперметар. Знаком + обележава се на инструменту прикључак амперметра који треба да буде на вишем потенцијалу да би скретање казаљке било у предвиђеном смеру. Тај прикључак треба узети у мерно коло тако да струја »утиче« у њега.

Услед саме конструкције, приликом протока струје кроз амперметар један део електричне енергије унутар инструмента претвара се у топлоту. То значи да је основна карактеристика инструмента његова унутрашња отпорност R_A . Везујући амперметар у грану кроз коју хоћемо да измеримо јачину струје мењамо њену претходну отпорност, а самим тим и јачину струје што доводи до систематске грешке. Ово ћемо најбоље илустровати на следећи

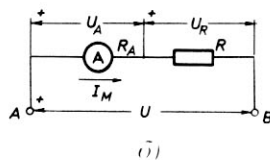
начин: на слици 3.20а приказан је део електричног кола у коме хоћемо да одредимо јачину струје у одсуству амперметра, а на слици 3.20б са прикључним амперметром.



Сл. 3.19



(а)



(б)

Сл. 3.20

При константном напону између тачака A и B за схему на слици 3.20а јачина струје I_T кроз отпорник отпорности R је:

$$I_T = \frac{U}{R}, \text{ и то је тачна вредност.}$$

Мерену вредност струје I_M добићемо по Омовом закону, а према схеми на слици 3.20б:

$$U = U_A + U_R = R_A \cdot I_M + R \cdot I_M, \text{ одакле следи да је:}$$

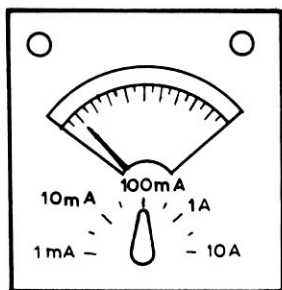
$$I_M = \frac{U}{R_A + R}.$$

Из последње једначине видимо да амперметром измерена струја има мањи интензитет од стварне струје која тече кроз R у одсуству амперметра. Да би измерена струја имала приближну вредност стварној, потребно је да унутрашња отпорност амперметра R_A буде знатно мања од отпорности отпорника R чију струју хоћемо да измеримо. Зато амперметар мора да има малу унутрашњу отпорност или, како кажемо, идеалан амперметар би требало да има унутрашњу отпорност једнаку нули, што је практично немогуће извести.

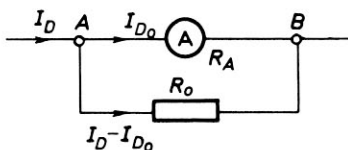
Поред унутрашње отпорности, веома важна карактеристика амперметра је и јачина струје која проузрокује максимално скретање казаљке. Та јачина струје назива се мерни домашај или опсег и обележава се са I_D . На пример, пуно скретање казаљке амперметра може бити при јачини струје од 1 mA . Тада се веће јачине струје оваквим амперметром директно не могу мерити. С друге стране, ако је пуно скретање казаљке при јачини од 10 A , овакав амперметар не може прецизно да мери мале струје реда 1 mA . При овако малој јачини струје неће доћи до видљивог скретања казаљке. Зато сваки амперметар има више мерних домашаја које мењамо преклопником на самом инструменту као на слици 3.21.

Амперметар који је конструисан за мерење струје мале јачине, максималне вредности I_{D0} , може се веома лако прилагодити за мерење струја много веће јачине. За то је довољно додати му у паралелном споју отпорник

одређене отпорности R_0 који се назива оточни отпор или шант (енгл. shunt), слика 3.22. Овај поступак се назива проширивање домашаја амперметра.



Сл. 3.21



Сл. 3.22

Из новог домашаја амперметра I_D и основног домашаја I_{D_0} потребно је одредити величину отпорности R_0 . Према схеми на слици 3.22 на R_A и R_0 влада исти напон U , па је:

$$U = R_A I_{D_0} = R_0 (I_D - I_{D_0}),$$

одакле је:

$$R_0 = \frac{R_A \cdot I_{D_0}}{I_D - I_{D_0}},$$

или:

$$R_0 = \frac{R_A}{\frac{I_D}{I_{D_0}} - 1} = \frac{R_A}{m_A - 1}. \quad (3.46)$$

Величина:

$$m_A = \frac{I_D}{I_{D_0}} \quad (3.47)$$

добијена као количник новог I_D и основног домашаја амперметра I_{D_0} назива се моћ умножавања, већа је од један (рецимо 10, 100, 1000) и показује нам колико пута смо увећали основни домашај додавањем оточног отпора R_0 .

Еквивалентну отпорност R_{Ac} амперметра са проширеним домашајем израчунаћемо преко еквивалентне проводности:

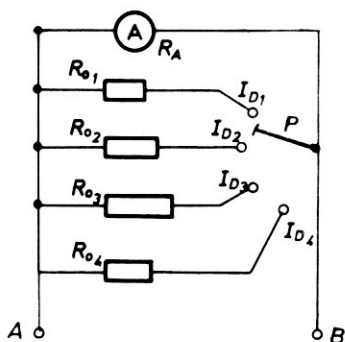
$$\frac{1}{R_{Ac}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_A} + \frac{m_A - 1}{R_A} = \frac{m_A}{R_A},$$

одакле је:

$$R_{Ac} = \frac{R_A}{m_A}. \quad (3.48)$$

Из релације 3.48 видимо да проширивањем основног домашаја за m_A пута смањујемо његову основну отпорност R_A исто толико пута.

Већ смо рекли да сваки амперметар има више домаћаја. На слици 3.23 приказано је једно од решења за промену домаћаја:



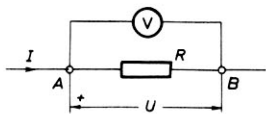
Сл. 3.23

3.13. МЕРЕЊЕ НАПОНА

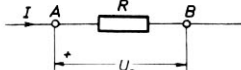
Инструменти за мерење напона називају се волтметри. Волтметар, као и амперметар, има два прикључка, који се једноставно вежу за тачку између којих се мери напон (слика 3.24).

На електричним схемама волтметар се означава кружићем у који се уписује симбол V — \odot — \ominus . Видећемо да, теоријски, сваки амперметар може да се прилагоди за мерење напона, па се најчешће волтметри тако и праве. Аналогно амперметру, за очитавање напона волтметри имају скалу и казальку, прикључак са ознаком $+$ који треба да се прикључи за тачку на вишем потенцијалу, унутрашњу отпорност R_V и мерни домаћај R_{D0} .

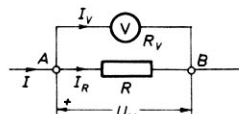
Прикључењем волтметра на део електричног кола утичемо на отпорност тог дела, а самим тим и мењамо напон између прикључних тачака, што опет доводи до систематске грешке. Ако желимо да видимо када ће утицај волтметра на стање у електричном колу бити занемарљив, посматрајмо отпорник R кроз који тече струја I без и са прикљученим волтметром између тачака A и B (слика 3.25а и б).



Сл. 3.24



(a)



Сл. 3.25

Према Омовом закону напон између тачака A и B (слика 3.25а) је: $U_T = RI$, и то је његова стварна вредност. Прикључивањем волтметра између тачака A и B , при константној струји I (слика 3.25б), према првом Кирхофовом закону ова струја ће се поделити у чвору A на струје I_R и I_V где је:

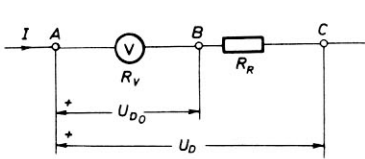
$$I = I_R + I_V.$$

Волтметар ће показати напон U_M , а с обзиром на особине паралелне везе R и R_V мерени напон је једнак:

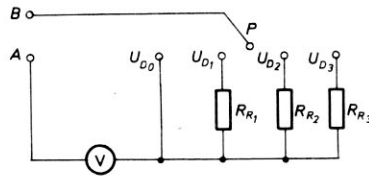
$$U_M = R \cdot I_R = R_V \cdot I_V.$$

Поредећи напоне U_T и U_M закључујемо да је $U_M < U_T$. Да бисмо смањили систематску грешку, тј. да би U_M било приближно једнако U_T , потребно је да струја I_R буде приближног интензитета као I што значи да струја I_V треба да буде занемарљиво мала. Овај услов је испуњен у случају $R_V \gg R$, па закључујемо да волтметри треба да имају веома велику унутрашњу отпорност, теоријски речено бесконачно велику.

Напонски домашаји, одређени самом конструкцијом инструмента, веома су мали реда mV , па овакав мерни систем, назван још и основни, треба прилагодити за мерење и већих напона. Тај поступак смо већ назвали проширењем основног домашаја, у овом случају напонског U_{D_0} . Увећање мерног опсега волтметра постиже се редним везивањем отпорника R_R и основног мерног система као на слици 3.26.



Сл. 3.26



Сл. 3.27

Одредићемо отпорност отпорника R_R , интензитет струје I можемо одредити према Омовом закону:

$$I = \frac{U_{D_0}}{R_V} = \frac{U_D}{R_V + R_R},$$

одакле је:

$$\frac{U_D}{U_{D_0}} = \frac{R_V + R_R}{R_V} = m_V, \quad (3.49)$$

где m_V има исто значење као и у случају проширивања домашаја амперметру. Решавајући релацију 3.49 по R_R добијемо:

$$R_R = R_V (m_V - 1), \quad (3.50)$$

што нам одређује вредност отпорности редно везаног елемента за проширење домашаја U_{D_0} на U_D . Еквивалентна отпорност R_{V_e} овако модификованог волтметра је:

$$R_{V_e} = R_V + R_V \cdot (m_V - 1) = m_V \cdot R_V, \quad (3.51)$$

тј. основна отпорност R_V увећана је m_V пута, где је m_V моћ умножавања.

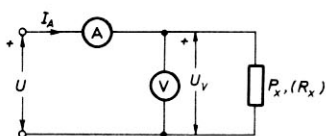
Сваки волтметар има више напонских домашаја што је приказано на слици 3.27.

3.14. МЕРЕЊЕ СНАГЕ

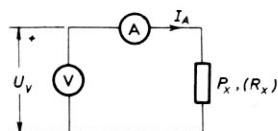
За мерење снаге P најчешће се користи метода волтметра и амперметра а инструмент са кога се снага директно читава — ватметар.

Разликујемо два начина везивања инструмената у мерно коло.

- волтметар ближе пријемнику снаге P_x (слика 3.28),
- амперметар ближе пријемнику снаге P_x (слика 3.29).



Сл. 3.28



Сл. 3.29

Мерна снага у првом случају биће:

$$P_{xm} = U_v \cdot I_A = U_v \cdot (I_v + I_p) = P_v + P_x. \quad (3.52)$$

Апсолутна грешка у мерењу износи:

$$\Delta P = P_{xm} - P_x = P_v,$$

а релативна:

$$d = \frac{\Delta P}{P_x} = \frac{U_v^2}{U^2} = \frac{R_v}{R_x}. \quad (3.53)$$

Систематска грешка је незнатна за $R_x \ll R_v$.

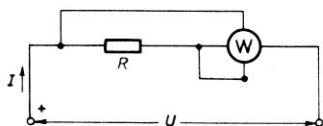
Мерењем P_x мерним колом као на слици 3.29 добићемо да је:

$$P_{xm} = P_A + P_x. \quad (3.54)$$

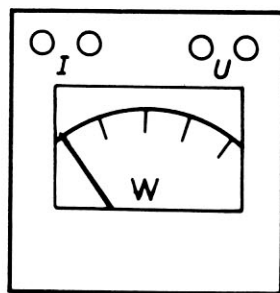
Истом анализом као у претходном случају можемо показати да је метода прецизна за потрошаче великих снага. P_A је снага амперметра.

Инструменти за мерење снаге, ватметри, имају увек четири прикључака. Један пар прикључака, који се називају струјни, везују се на ред са пријемником, а други пар, такозвани напонски прикључци, везују се паралелно пријемнику. Конструкција ватметра је таква да је заокретање казаљке сразмерно производу $U \cdot I$.

Ознака за ватметар на схемама, као и начин како се ватметар прикључује, приказани су на слици 3.30, а спољашњи изглед ватметра на слици 3.31.



Сл. 3.30



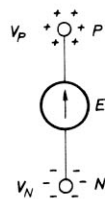
Сл. 3.31

3.15. ЕЛЕКТРИЧНИ ГЕНЕРАТОРИ, ЕЛЕКТРОМОТОРНА СИЛА И УНУТРАШЊА ОТПОРНОСТ

Као што је већ речено, електрична струја у затвореном колу одржава се услед деловања извора електричне струје или како краће кажемо електричног генератора. Ови уређаји претварају неку другу врсту енергије (механичку, топлотну, хемијску и светлосну) у електричну. При томе процесу на прикључцима генератора Р и N (слика 3.32) долази до нагомилавања позитивне односно негативне количине електрицитета Q и стварања потенцијалне разлике $V_P - V_N = U_{PN}$. Силе унутар генератора приликом раздвајања позитивног и негативног оптерећења, односно преносећи позитивна оптерећења Q са прикључка N на прикључак Р извршиле су неки рад A на рачун једне од већ поменутих врста енергије. Тај рад је сразмеран количини наелектрисања Q и напону U_{PN} , па је:

$$A = Q \cdot U_{PN}. \quad (3.55)$$

Кроз генератор не тече струја јер он још увек не представља део затвореног електричног кола. За овакав извор се каже да је у празном ходу или отворен. Напон U_{PN} отвореног генератора карактерише његову способност да одржава струју у колу и да стално врши претварање других видова енергије у електричну. Тај напон се назива електромоторна сила генератора или скраћено емс и обележава се симболом E за изворе једносмерне, односно e за изворе временски променљиве струје. Из релације 3.55 можемо дефинисати електромоторну силу као количник рада A , који су извршиле силе генератора преносећи позитивна наелектрисања са прикључка N на Р, и самих оптерећења Q :



Сл. 3.32

$$E = U_{PN} = \frac{A}{Q}. \quad (3.56)$$

Јединица за електромоторну силу у СИ систему је волт. Као скаларна величина емс нема смер. Ипак, уведен је појам смера емс при чему се подразумева смер деловања силе у генературу на позитивна оптерећења. Према том договору каже се да је смер емс генератора приказаног на слици 3.36 од прикључка N (негативно наелектрисаног) ка прикључку Р (позитивно оптерећеном), што је назначено стрелицом.

Електромоторна сила извора може се једноставно измерити мерењем напона између прикључака Р и N када је генератор у празном ходу.

Ако је генератор део затвореног електричног кола, количина позитивног оптерећења Q стално ће да кружи кроз генератор од негативно наелектрисаног прикључка N ка позитивном Р, а кроз спољашњи део од Р ка N. На тај начин образоваће се константна једносмерна струја интензитета:

$$I = \frac{Q}{t},$$

која кроз генератор има смер од N ка P , дакле исти као и електромоторна сила. Рад A који врше силе генератора одржавајући ову струју можемо израчунати:

$$A = Q \cdot E = I \cdot t \cdot E. \quad (3.57)$$

Снага извора (генератора) P_i добија се деобом једначине (3.68) са временом t , па је:

$$P_i = \frac{A}{t} = E \cdot I. \quad (3.58)$$

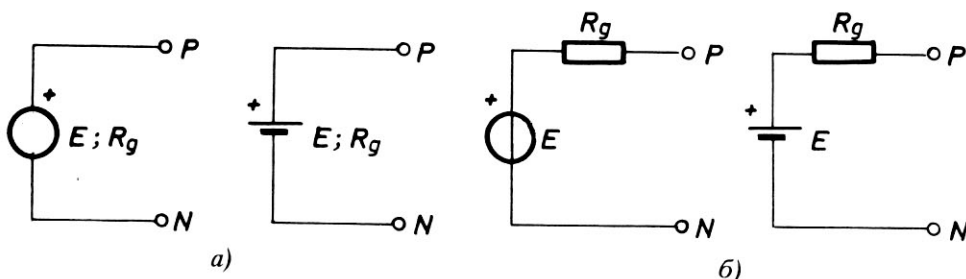
Закључујемо да је снага извора једнака производу његове електромоторне силе и јачине струје I .

Када се генератор посматра као елемент електричног кола, електромоторна сила није једина његова карактеристика. Када кроз извор тече струја, у њему самом долази до претварања једног дела енергије електричног поља у топлоту из истих разлога као и у сваком отпорнику. Зато као други параметар извора дефинишемо његову унутрашњу отпорност R_g (означава се и са R_i). Као и у случају отпорника, снага на унутрашњој отпорности генератора може се израчунати по Џуловом закону:

$$P_g = R_g \cdot I^2, \quad (3.59)$$

где је I јачина струје кроз генератор и спољашње коло. Снага P_g назива се и снага Џулових губитака у генератору и треба да је што мања.

Схематско означавање генератора дато је на слици 3.33а, а алтернативно означавање када је R_g издвојено приказано је на слици 3.33б. Унутрашња отпорност R_g је неодвојива од генератора као извора електричне енергије, али ради лакше анализе електричних кола често се издвојено означава.



Сл. 3.33

Црта кроз генератор на слици 3.33б симболично означава да генератор нема унутрашње отпорности, тј. да је идеалан. Знак (+) на схеми означава прикључак на вишем потенцијалу (P), ако је реч о генератору једносмерног напона, односно референтни смер ако је генератор наизменичног напона.

За нас, у овом градиву, нису од значаја процеси који се одвијају унутар генератора, већ понашање према спољашњем колу.

3.16 ПРОСТО ЕЛЕКТРИЧНО КОЛО СА ЈЕДНИМ ГЕНЕРАТОРОМ И ЈЕДНИМ ОТПОРНИКОМ

Посматрајмо генератор емс E и унутрашње отпорности R_g . Нека је за прикључке генератора P и N везан отпорник отпорности R као на слици 3.34. Оваква веза назива се просто електрично коло.

У колу је успостављена струја јачине I коју треба да одредимо. Снага генератора је сада $P_i = E \cdot I$, а снаге Џулових губитака у генератору и у спољашњем отпорнику су $P_g = R_g \cdot I^2$ и $P_R = R \cdot I^2$. По закону о одржању енергије, снага генератора мора бити једнака укупној снази Џулових губитака, па је:

$$E \cdot I = R_g \cdot I^2 + R \cdot I^2.$$

Дељењем једначине са I добијамо:

$$E = R_g \cdot I + R \cdot I, \quad (3.60)$$

одакле је:

$$I = \frac{E}{R_g + R}. \quad (3.61)$$

Једначина (3.61) казује нам да је интензитет електричне струје директно сразмеран електромоторној сили E , а обрнуто сразмеран укупној отпорности електричног кола што представља Омов закон за просто електрично коло.

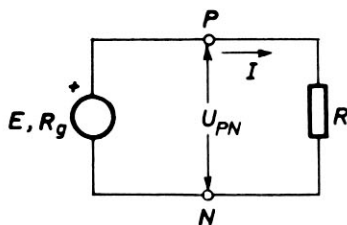
Укупна снага коју одаје генератор, преображавајући неки други вид енергије у електрични рад, је $P_i = E \cdot I$. Један део те снаге одлази на покривање Џулових губитака у самом генератору, па се може сматрати некорисним за систем генератор-пријемник. Други део снаге генератора предаје се пријемнику, и он се са тачке гледишта преноса енергије од генератора ка пријемнику може сматрати корисном снагом. Пошто је овде пријемник у виду термогене отпорности R , то је корисна снага $P_k = P_R$. Однос корисне снаге P_k у оваквом колу и укупне снаге P_i назива се степен корисног дејства или степен искоришћења, η , и изражава се као:

$$\eta = \frac{P_k}{P_i} = \frac{R \cdot I^2}{E \cdot I} = \frac{R \cdot I^2}{(R_g + R) I^2} = \frac{R}{R_g + R}. \quad (3.62)$$

Степен корисног дејства је неименован број и најчешће се даје у процентима:

$$\eta\% = \eta \cdot 100\%. \quad (3.63)$$

Из релације (3.62) видимо да је степен корисног дејства већи уколико је R_g мање и у идеалном случају када је $R_g = 0$ он има максималну вредност $\eta = 1$. Дакле, η је број мањи од један, а већи од нуле.



Сл. 3.34

3.17. НАПОН НА ПРИКЉУЧЦИМА ГЕНЕРАТОРА У ПРОСТОМ КОЛУ. РЕЖИМИ РАДА ГЕНЕРАТОРА

Одредићемо разлику потенцијала (напон) између позитивног P и негативног N прикључка у простом колу на слици 3.34. У посматраном случају ова разлика потенцијала једнака је напону на крајевима отпорника отпорности R . Према томе, на основу Омовог закона је:

$$U_{PN} = R \cdot I. \quad (3.64)$$

Из релације (3.60) напон $R \cdot I$ једнак је:

$$R \cdot I = E - R_g \cdot I = U_{PN}. \quad (3.65)$$

Видимо да је напон између прикључака оптерећеног генератора мањи од напона празног хода извора, тј. електромоторне силе E , за величину напона на унутрашњој отпорности $R_g \cdot I$. Како интензитет струје у оваквом колу зависи од величине отпорности R , то ће промена овог параметра изазвати и различите напоне на прикључцима генератора.

Ако је генератор идеалан, тј. $R_g = 0$, онда је напон на прикључцима оваквог извора увек константан без обзира на вредност отпорности спољашњег кола и једнак је електромоторној сили. Овакви извори називају се идеални напонски генератори.

Сваки извор електричне енергије у зависности од величине отпорности спољашњег кола, у овом случају отпорности отпорника R , може се налазити у једном од следећа три режима рада:

- режиму празног хода,
- режиму кратког споја,
- режиму оптерећења.

Режим оптерећења смо већ проучили. Закључили смо следеће:

- јачина струја кроз коло, па и генератор, износи:

$$I = \frac{E}{R_g + R};$$

- напон на прикључцима извора је:

$$U_{PN} = E - R_g \cdot I;$$

- корисна снага у колу је:

$$P_k = R \cdot I^2, \text{ снага генератора } P_i = E \cdot I \text{ и степен корисног дејства } \eta = \frac{R}{R + R_g}.$$

Одредићемо ове величине за случај прва два режима рада генератора.

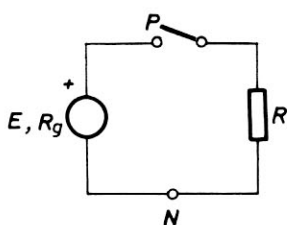
Режим празног хода (ph) јесте такав режим при којем је потрошач искључен од извора (слика 3.35). У овом случају отпорност спољашњег кола је бесконачно велика ($R = \infty$), па је:

- јачина струје I једнака нули ($I = 0$),

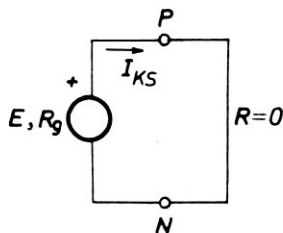
— напон на унутрашњој отпорности R_g је такође једнак нули ($R_g \cdot I = 0$),

тако да је напон на прикључцима генератора $U_{PN} = E$, тј. једнак је електромоторној сили извора, и то је највећи напон извора.

За генератор се каже да је неоптерећен јер не тече струја кроз њега. Тада је $P_i = 0$; $P_k = 0$ и $\eta = 1$. ($\eta = 100\%$).



Сл. 3.35



Сл. 3.36

Режим *крајкој сјаја* (ks) наступа када се прикључци извора споје проводником који има занемарљиво малу отпорност, тако да можемо да кажемо да је $R = 0$ (слика 3.36). Јачина струје у колу је тада:

$$I_{ks} = \frac{E}{R_g} \quad (3.66)$$

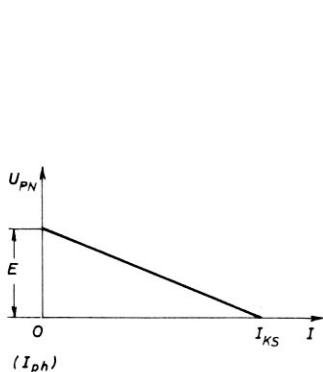
и то је највећа јачина струја кроз извор. За генератор се сада каже да је преоптерећен, јер овакав режим рада због велике јачине струје најчешће изазива оштећење извора.

Напон на прикључцима генератора је сада једнак:

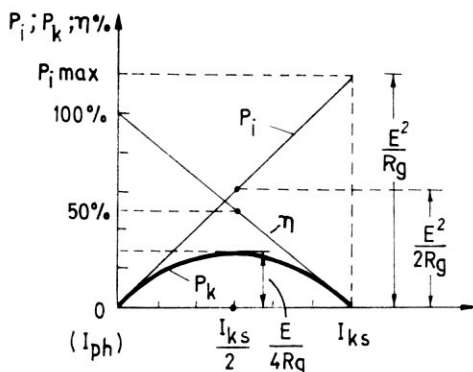
$$U_{PN} = E - R_g I_{ks} = E - R_g \cdot \frac{E}{R_g} = 0. \quad (3.67)$$

Корисна снага у колу је $P_k = 0$, снага извора је $P_i = \frac{E^2}{R_g} = P_{i \max}$, а степен искоришћења је $\eta = 0$.

Сада можемо графички приказати зависност напона на прикључцима извора U_{PN} од јачине струје I кроз извор (слика 3.37), сматрајући да је R_g константне вредности.



Сл. 3.37



Сл. 3.38

Зависност P_k , P_i и η од интензитета струје I у колу, приказана је на дијаграму на слици 3.38.

У току промене струје оптерећења, корисна снага расте од нуле (режим ph) до неке максималне вредности $P_{k\max}$, а затим се поново смањује до нуле (режим ks). Доказаћемо да је максимална корисна снага у колу одређена интензитетом струје I једнаким половини струје кратког споја:

$$I = \frac{E}{R + R_g} = \frac{I_{ks}}{2} = \frac{E}{2R_g}. \quad (3.68)$$

Вредност напона U_{PN} на пријемнику сада је:

$$U_{PN} = E - R_g \cdot I = E - R_g \cdot \frac{E}{2R_g} = \frac{E}{2}. \quad (3.69)$$

а корисна P_k снага у колу:

$$P_k = R \cdot I^2 = U_{PN} \cdot I = \frac{E}{2} \cdot \frac{E}{2R_g} = \frac{E^2}{4R_g}. \quad (3.70)$$

Променимо сада интензитет струје I за неку малу вредност ΔI (која може бити позитивна или негативна), па је сада:

$$I_1 = I + \Delta I = \frac{E}{2R_g} + \Delta I.$$

Напон на пријемнику U_{PN1} је:

$$U_{PN1} = E - R_g \cdot I_1 = E - R_g \left(\frac{E}{2R_g} + \Delta I \right) = \frac{E}{2} - R_g \cdot \Delta I,$$

а корисну снагу P_{k1} одредићемо као:

$$P_{k1} = U_{PN1} \cdot I_1 = \left(\frac{E}{2} - R_g \cdot \Delta I \right) \left(\frac{E}{2R_g} + \Delta I \right) = \frac{E^2}{4R_g} - R_g (\Delta I)^2 = P_k - R_g \cdot (\Delta I)^2. \quad (3.71)$$

За свако ΔI , производ $R_g \cdot (\Delta I)^2$ у једначини (3.71) има позитивну вредност, па је $P_{k1} \leq P_k = P_{k\max}$. Тиме смо показали да релација (3.70) представља максималну вредност снаге пријемника.

Да би струја успостављена у електричном колу са слике 3.34 имала интензитет одређен релацијом (3.68), потребно је да отпорност пријемника R буде једнака унутрашњој отпорности генератора R_g :

$$R = R_g. \quad (3.72)$$

Овај, специјалан, случај оптерећења генератора $R = R_g$ назива се режимом прилагођења по снази, с обзиром да генератор предаје максималну снагу пријемника.

У режиму прилагођења снага извора је:

$$P_i = E \cdot I = E \cdot \frac{E}{2R_g} = \frac{E^2}{2R_g} = 2P_{k\max}, \quad (3.73)$$

па је коефицијент корисног дејства $\eta \% = 50\%$.

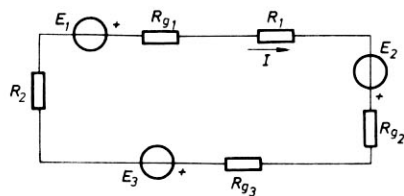
На основу изложеног можемо закључити да се друга половина снаге некорисно троши на унутрашњој отпорности генератора. Услов за добијање максималне корисне снаге ($R=R_g$) и услов за добијање максималног коефицијента корисног дејства ($R=\infty$) међусобно се не подударају. У електричним уређајима велике снаге није погодан режим прилагођења по снази, јер се при томе много снаге троши у самом генератору. Због тога се електричне подстаннице, генератори, трансформатори пројектују тако да се обезбеди висок коефицијент корисног дејства (90% и више). У уређајима малих снага ситуација је другачија. На пример, у телефонском апарату, при разговору, ствара се електрични сигнал снаге реда 2 mW, па је за добијање највећег домета везе потребно предавати у вод највећу могућу снагу. Овде је неопходно остваривати режим прилагођења по снази, а коефицијент корисног дејства нема битан значај јер губици снаге износе делове или јединице миливата.

3.18. ПРОСТО ЕЛЕКТРИЧНО КОЛО СА ВИШЕ ГЕНЕРАТОРА И ПРИЈЕМНИКА

До сада смо проучавали само електрично коло које садржи један генератор. Сада ћемо анализирати општи случај електричног кола које садржи произвољан број реалних генератора и отпорника везаних на ред. Као пример посматрајмо коло приказано на слици 3.39.

Сваки од извора представљен је редном везом идеалног генератора који представља његову емс и отпорника чија је отпорност једнака унутрашњој отпорности генератора. Знак + представља прикључак извора на вишем потенцијалу.

Пошто емс генератора у општем случају нису познате, то ни стварни смер струје I у колу није унапред познат. Оч се може одредити тек на основу конкретних вредности за емс. Због тога ћемо произвољно усвојити референтни смер струје онако како је означен стрелицом на слици 3.39.



Сл. 3.39

Ако на основу усвојеног референтног смера струје посматрамо деловање емс генератора, закључићемо да емс E_1 и E_2 одржавају струју у колу, при чему спољашњем делу кола предају енергију. Емс E_3 делује насупрот усвојеном смеру струје, што значи да се понаша као пријемник електричне енергије, као и отпорници. Дакле, можемо написати по закону о одржању рада и енергије једначину за укупну снагу овог кола:

$$E_1 \cdot I + E_2 \cdot I = E_3 \cdot I + (R_{g1} + R_{g2} + R_{g3} + R_1 + R_2) \cdot I^2. \quad (3.74)$$

Делећи једначину 3.85 са I и прегруписавањем чланова добијамо:

$$E_1 + E_2 - E_3 = (R_{g1} + R_{g2} + R_{g3} + R_1 + R_2) \cdot I,$$

одакле ћемо интензитет струје I у колу одредити као:

$$I = \frac{E_1 + E_2 - E_3}{R_{g1} + R_{g2} + R_{g3} + R_1 + R_2} \text{ или}$$

скраћено:

$$I = \frac{\pm \Sigma E}{\Sigma R}. \quad (3.75)$$

Интензитет струје I у оваквом колу директно је сразмеран алгебарском збиру електромоторних сила у колу, а обрнуто сразмеран укупној отпорности кола, при чему се емс узимају са знаком $+$ ако делују у смеру струје, а са знаком $-$ ако делују насупрот струји. Израз 3.75 назива се уопштени Омов закон за просто електрично коло.

Ако према једначини 3.75 добијемо позитивно решење за струју, значи да нам се референтни смер струје слаже са њеним стварним смером и да извори чији се смер емс поклапа са смером струје имају функцију генератора. Ако конкретан прорачун покаже да струја има негативну вредност у односу на произвољно изабрани референтни смер, стварни смер струје је супротан од референтног, а претпостављене улоге извора емс се мењају.

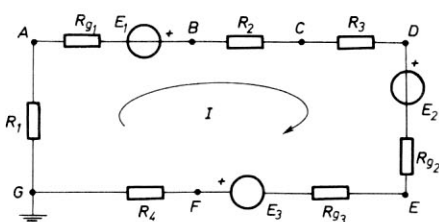
3.19. НАПОН ИЗМЕЂУ ДВЕ ТАЧКЕ И ПОТЕНЦИЈАЛ ТАЧАКА У КОЛУ

До сада смо видели како се може израчунати напон између прикључака отпорника и генератора. Сада ћемо извести изразе помоћу којих се може израчунати напон између било које две тачке у електричном колу, односно потенцијал било које тачке у колу у односу на одабрану референтну тачку.

Посматрајмо електрично коло на слици 3.40.

Познато нам је како се одређује напон између прикључака било ког отпорника и било ког генератора.

Напон између било које две тачке у колу једнак је збиру напона између прикључака појединих отпорника и генератора који се налазе између те две тачке. Тај напон не зависи од путање по којој га израчунавамо, јер је електрично поље временски константних струја исто као и електростатичко поље.



Сл. 3.40

Изабрали смо референтни смер струје I и као пример одредићемо напон између тачака C и G . С обзиром на то а смо усвојили усаглашени референтни смер струје и напона, тачка C је на вишем потенцијалу у односу на тачку G :

$$U_{CG} = U_{CD} + U_{DE} + U_{EF} + U_{FG}, \quad (3.76)$$

где су појединачни напони:

$$U_{CD} = R_3 \cdot I; \quad U_{DE} = E_2 + R_{g2} \cdot I$$

$$U_{EF} = R_{g3} \cdot I - E_3; \quad U_{FG} = R_4 \cdot I.$$

Сада је напон U_{CG} једнак:

$$U_{CG} = R_3 \cdot I + E_2 + R_{g2} \cdot I + R_{g3} \cdot I - E_3 + R_4 \cdot I. \quad (3.77)$$

Овај напон можемо израчунати сабирајући напоне и дуж путање СВAG, па је: $U_{CG} = U_{CB} + U_{BA} + U_{AG}$, где су:

$$U_{CB} = -R_2 \cdot I; \quad U_{BA} = E_1 - R_{g1} \cdot I; \quad U_{AG} = -R_1 \cdot I, \quad \text{па је} \quad (3.78)$$

$$U_{CG} = -R_2 \cdot I + E_1 - R_{g1} \cdot I - R_1 \cdot I.$$

Једначине 3.77 и 3.78 морају дати исти резултат.

Очито је да нема никаквих тешкоћа при израчунавању напона између било које две тачке у електричном колу. Ипак, корисно је поступак одређивања напона још више систематизовати да би се смањила могућност грешака.

При израчунавању напона између две тачке у електричном колу постоје три смера о којима морамо водити рачуна. То су:

- смер емс појединих генератора,
- референтни смер струје,
- смер дуж кола којим при израчунавању напона идемо од једне тачке до друге у колу.

На основу датих примера видимо да предзнак електромоторних сила и производа $R \cdot I$ у изразу за напон зависи од смера којим идемо дуж кола при израчунавању напона. Ако су тај смер и референтни смер струје исти, производе $R \cdot I$ узимамо са позитивним предзнаком (3.77). ако су ти смерови супротни, производ $R \cdot I$ узимамо са негативним предзнаком, тј. као $-R \cdot I$ (3.78). Позитиван предзнак емс долази ако су смер дуж кола и емс супротни (3.77), а негативан ако су исти. Ради лакшег памћења формула можемо испред свих емс писати знак минус, (нпр. уместо E_3 ставити $E'_3 = -E_3$) па такве емс узимати са позитивним предзнаком ако је смер емс и смер дуж кола исти, (дакле, узети E'_3 у релацији (3.77) а са негативним предзнаком ако су ти смерови супротни (нпр. $-E_2 = E_2$ у (3.77)). На основу овога може се написати уопштени образац за израчунавање напона између две тачке А и В у електричном колу:

$$U_{AB} = (\Sigma R \cdot I - \Sigma E) \text{ од } A \text{ до } B. \quad (3.79)$$

У овом изразу, ако се смер путање од А ка В и референтни смер струје кроз отпорник, односно смер емс генератора, поклапају, $R \cdot I$, односно E , узимају се са позитивним предзнаком. У супротном случају $R \cdot I$, односно E , узимају се са негативним предзнаком.

Често се у теорији електричних кола напон U_{AB} израчунава идући од тачке В до тачке А. У том случају треба само променити знак испред свих сабирака у једначини (3.79), тј.

$$U_{AB} = (\Sigma E - \Sigma R \cdot I) \text{ од } B \text{ до } A. \quad (3.80)$$

И у изразу (3.80) подразумева се да E и $R \cdot I$ имају позитиван или негативан предзнак. Ако је смер путање од В до А исти као смер емс, односно референтни смер струје, E односно $R \cdot I$ узимају се са позитивном предзнаком. У другом случају се E , односно $R \cdot I$, узимају се негативним предзнаком.

Одредимо напон U_{CG} у колу на слици 3.40 помоћу оба израза (3.79) и (3.80). Према једначини (3.79) је:

$$U_{CG} = (\Sigma R \cdot I - \Sigma E) \text{ од } C \text{ до } G = R_3 \cdot I - (-E_2) + R_{g2} \cdot I + R_{g3} \cdot I - (E_3) + R_4 \cdot I,$$

а према изразу (3.80):

$$U_{CG} = (\Sigma E - \Sigma R \cdot I) \text{ од } G \text{ до } C = -(-R_4 \cdot I) + (-E_3) - (R_{g3} \cdot I) - (-R_{g2} \cdot I) + E_2 - (-R_3 \cdot I).$$

Према обе формуле добили смо исти резултат.

Осим напона између било које две тачке у колу, може се дефинисати и потенцијал неке тачке у колу. За то је потребно да одаберемо једну тачку за референтну тачку потенцијала, тј. тачку у којој је потенцијал једнак нули. То може бити било која тачка у самом колу или изван њега. Најчешће се за референтну тачку узима тачка на површини Земље, а једна тачка у колу се везује проводником за ову референтну тачку. Тада се каже да је та тачка уземљена. На слици 3.40 као референтна тачка усвојена је тачка G . За уземљену тачку дају се две уобичајене ознаке \perp и \equiv .

Израчунавање потенцијала своди се на израчунавање разлике потенцијала између посматране тачке и референтне тачке. Тако напон U_{CG} из примера представља и потенцијал тачке $C - V_C$ у односу на референтну G . Уопштено, ако референтну тачку обележимо са R , потенцијал V_A неке тачке A у колу је:

$$V_A = (\Sigma R \cdot I - \Sigma E) \text{ од } A \text{ до } R \quad (3.81)$$

или

$$V_A = (\Sigma E - \Sigma R \cdot I) \text{ од } R \text{ до } A. \quad (3.82)$$

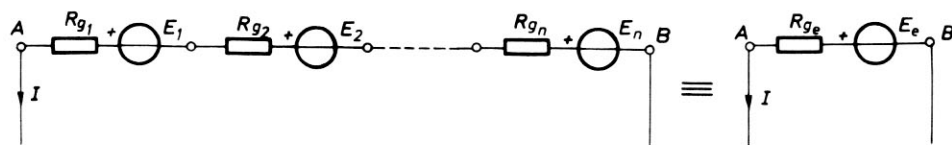
Понекад се уместо израза разлика потенцијала или напон говори »пад потенцијала« или »пад напона«. На пример, говори се о паду потенцијала или о паду напона на неком отпорнику, при чему се мисли на разлику потенцијала између његовог позитивног и негативног краја.

3.20. ВЕЗИВАЊЕ ГЕНЕРАТОРА

Када имамо генераторе малих емс (нпр. батерије), а потребна нам је велика електромоторна сила, можемо генераторе везати редно и то тако да се $+$ прикључак једног извора веза за $-$ прикључак наредног као на слици 3.41. Оваква група генератора је еквивалентна једном једином генератору чија емс и унутрашња отпорност износе:

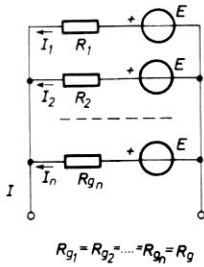
$$E_e = E_1 + E_2 + \dots + E_n, \quad (3.83)$$

$$R_{ge} = R_{g1} + R_{g2} + \dots + R_{gn}. \quad (3.84)$$

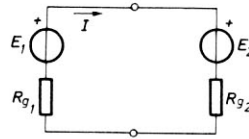


Сл. 3.41

Ако је за рад кола потребна већа струја, онда се n једнаких генератора везује паралелно као на слици 3.42.



Сл. 3.42



Сл. 3.43

Укупна струја у спољашњем колу је према првом Кирхофовом закону једнака збиру струја појединих генератора, тј. $I = nI_1$. И ова група генератора еквивалентна је једном једином чија емс и унутрашња отпорност износе:

$$E_e = E, \quad (3.85)$$

$$R_{ge} = \frac{R_g}{n}. \quad (3.86)$$

Веза генератора у опозицији приказана је на слици 3.43.

Ако емс извора нису исте, тада ће се у колу јавити струја коју одржава онај генератор који има већу емс: на пример, ако је E_1 већи од E_2 , тада је струја у колу усмерена као на слици 3.47, а њен интензитет је једнак:

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_{g1} + R_{g2}}. \quad (3.87)$$

Оваква веза се у пракси често користи при пуњењу акумулатора. Нека је, на пример, E_2 емс акумулатора номиналног напона од 12 V који се »истрашио«. Допуњавање акумулатора, односно надокнађивање хемијске енергије, може се вршити колом као на слици 3.43 при чему генератор E_1 треба да има већи напон, нпр. 15 V. У колу ће постојати струја са смером као на слици, тако да ће акумулатор радити као пријемник и у њему ће се електрична енергија извора E_1 претварати у хемијску енергију — акумулираће се. Процесом пуњења повећава се емс E_2 и струја се смањује. Када се E_1 и E_2 изједначе, струја је једнака нули јер нема електричног поља које би изазвало усмерено кретање електрона.

3.21. СТРУЈНИ ГЕНЕРАТОР

Генератор сталне једносмерне струје карактеришу његова електромоторна сила E и унутрашња отпорност R_g . Овакав генератор назива се напонски

Да би јачина струје у једначина 3.90 и 3.91 била иста без обзира колика је величина отпорности R , мора бити:

$$R_s = R_g \quad \text{и} \quad I_s = \frac{E}{R_g} = G_g \cdot E \quad (3.92)$$

или

$$R_s = R_g \quad \text{и} \quad E = R_s \cdot I_s. \quad (3.93)$$

За идеалан напонски генератор не постоји еквивалентан струјни генератор и обрнуто. Идеалан напонски генератор има R_g једнаку нули, па би се добило $I_s \rightarrow \infty$ и $R_s = 0$. Идеалан струјни генератор има R_s бесконачно велику, па би се добило $R_s \rightarrow \infty$ и $E \rightarrow \infty$.

3.22. ПОДЕЛА ИЗВОРА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Електромоторна сила са ствара и одржава у изворима струје на рачун претварања разних врста енергије у електричну. Најчешће коришћени начин добијања емс су:

а) *Елекџрохемијски начин* где се хемијска енергија претвара у електричну. Овакав начин добијања емс примењује се у галванским елементима и акумулаторима. Сваки хемијски извор струје има две електроде (позитивну и негативну) и електролит — водени раствор соли, киселине или базе.

б) *Механички начин* примењује се код електричних машина. Принцип рада оваквих генератора заснива се на појави електромагнетне индукције, па ће о њима бити више речи у наредном поглављу. Предност ових генератора над хемијским и осталим изворима струје је у томе што је њихова снага знатно већа.

в) *Термоелектрични начин* заснива се на добијању електричне енергије на рачун топлотне енергије. При загревању места споја два разнородна метала, тзв. термоспоја, долази до усмереног кретања електрона, при чему се на крајевима термоспоја образује потенцијална разлика.

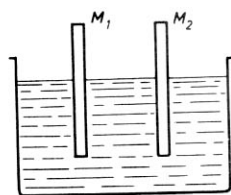
г) *Фотоелектрични начин* добијања емс заснива се на непосредном претварању енергије светлосног зрачења (видљивог и невидљивог) у електричну енергију помоћу специјалних полупроводничких елемената тзв. фотоелемената.

3.22.1. ХЕМИЈСКИ ИЗВОРИ ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ

Најчешће коришћени хемијски извори електричне струје су галвански елементи и акумулатори.

Принцип рада галванских елемената састоји се у узајамном дејству метала са електролитом, које у затвореном електричном колу доводи до појаве електричне струје. Ову појаву први је открио италијански научник Галвани (Luigi Galvani, 1737—1798) и по њему су ови елементи добили име. Сваки галвански елемент састоји се од две електроде које су од хемијски

различитих метала M_1 и M_2 , и које су потопљене у електролит (слика 3.47). Да бисмо објаснили принцип рада хемијских генератора, замислимо да смо једну электроду потопили у водени раствор неког једињења — електролит. Знамо да у раствору постоје позитивни и негативни јони. Ако ниједна од те две врсте јона не реагује хемијски са материјалом потопљене електроде, неће се одвијати никакав процес. Међутим, ако материјал електроде реагује хемијски са јонима из раствора и спаја се у нови молекул, електрода и слој раствора уз њу постаће наелектрисани наелектрисањима супротног знака. Знак оптерећења на електроди и површини раствора уз њу зависи од врсте електроде и раствора. После кратког времена, на електроди и слоју раствора уз њу ће се образовати довољно оптерећење тако да електричне силе, које потичу од тих оптерећења, сада спречавају јоне из раствора да дођу у додир са електродом и процес наелектрисања престаје.



Сл. 3.47

Када имамо две електроде од истог материјала потопљене у раствору, тада су обе електроде наелектрисане истом врстом електрицитета, обе су на истом потенцијалу и ако бисмо их спојили проводником, кроз њега не би текла струја.

Стављајући електроде M_1 и M_2 од различитог материјала у раствор, између њих ће доћи до стварања разлике потенцијала. Ако електроде M_1 и M_2 спојимо проводником, тада ће кроз затворено коло: електрода M_1 — проводник — електрода M_2 — раствор — електрода M_1 постојати струја. Дакле, две различите електроде потопљене у раствор понашају се као електрични генератор.

Постоје десетине врста хемијских извора који се међусобно разликују по врстама електрода и електролита и по својим електричним својствима. Све хемијске генераторе можемо поделити у две групе: тзв. примарне генераторе, који се могу употребити само једном, и секундарне генераторе, у којима се пропуштањем струје у супротном смеру могу добити хемијске супстанце на електродама и у електролиту које су постојале пре пражњења генератора. Пошто су генератори ове друге врсте у стању да акумулирају енергију, добили су назив акумулатори.

Сви хемијски генератори имају једно заједничко својство: ако се у њима успостави електрична струја (као последица сопствене емс или евентуално прикљученог напона споља, који делује насупрот те емс), обавезно долази до хемијских промена у електролиту или на електродама). У многим случајевима долази до издвајања неког гаса (на пример, водоника) на једној од електрода. Поред још неких ефеката мехурићи гаса који се образују око електроде чине изолациони слој. Струја кроз генератор слаби и на крају сасвим престаје. Тада кажемо да се генератор поларизовао. Један од услова да хемијски генератор буде практично применљив јесте да у њему не долази до поларизације. У ту сврху се користе деполаризатори, који хемијски везују гас који се развија.

Једна врста примарних генератора је тзв. Лекланшеов или суви елемент. Он се састоји од цинканог лончића као једне електроде, воденог раствора амонијум-хлорида (хемијска формула NH_4Cl , тзв. нишадор) као електролита и угљеног штапића који је друга електрода (слика 3.48). Електролиту се додају

брашно, дрвени опилци или сличан материјал да би се спречило проливање електролита (отуда и назив суви генератор). Угљена електрода се завршава металном капом, а ради бољег контакта све се залије смолом. Електромоторна сила сувог генератора је око 1,5 V.

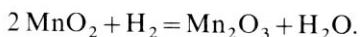
Молекул NH_4Cl у раствору распада на јоне по формули:



Јон хлора се везује са цинком на цинканој електроди у цинк-хлорид (ZnCl). Када у генератору постоји струја, нови јони Cl^- пристижу на цинкану электроду. Јони NH_4^+ се крећу на угљеном штапу, тамо узимају електрон који им недостаје (а који је »стигао« кроз проводник са цинкане електроде) и распадају се на амонијак и атом водоника:

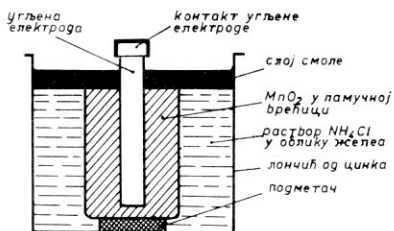


Мехурићи водоника на угљеној електроди брзо би поларизовали генератор. Зато се око угљеног штапа ставља врећица са диоксидом мангана (MnO_2) који спречава поларизацију генератора, јер у хемијској реакцији везује водоник:

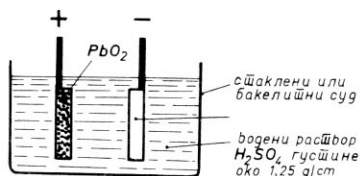


Суви генератори који су истрошили своју хемијску енергију не могу се вратити у првобитно стање пропуштањем струје у супротном смеру. Дакле, суви генератори су примарног типа.

Као секундарни хемијски генератори најчешће се користе оловни и тзв. Едисонов челични акумулатор.



Сл. 3.48

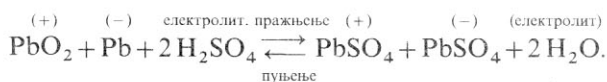


Сл. 3.49

За акумулаторе који су спремни за употребу као генератори каже се да су поларизовани или потпуно напуњени. Поларизован оловни акумулатор има као електроде плоче са оловним диоксидом (PbO_2 , позитивна плоча и плоче од чистог олова (Pb , негативна плоча). Као електролит служи водени раствор сумпорне киселине (H_2SO_4), такве концентрације да му је специфична густина 1,2 до 1,3 g/cm^3 . Електромоторна сила оловног акумулатора је приближно 2 V, а унутрашња отпорност му је веома мала. Скица оловног акумулатора дата је на слици 3.49.

Ако је за прикључке акумулатора везан неки пријемник, тј. ако је у акумулатору успостављена струја у смеру његове емс, одвијају се на

электродама и у електролиту доста сложене хемијске реакције. Крајњи биланс тих реакција се може показати хемијском формулом:



Према овој формули, у акумулатору који се празни долази до постепеног претварања материјала обе плоче у оловни сулфат (PbSO_4) и емс акумулатора нестаје.

Да бисмо акумулатор поново напунили, везујемо га за извор нешто веће емс од 2 V, као што је приказано на слици 3.50.

Као карактеристика акумулатора уводи се појам његовог капацитета. При томе се мисли на енергију коју из акумулатора можемо добити. Знамо да је емс оловног акумулатора око 2 V. Стога је за ближе описивање енергије садржане у њему довољно дати само количину електрицитета коју он може да пренесе са једне своје електроде на другу, тј. $Q = I \cdot t$. Уобичајено је да се капацитет акумулатора даје у амперчасовима ($\text{Ah} = 3600 \text{ As} = 3600 \text{ C}$).

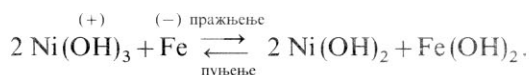
Друга карактеристика акумулатора је коефицијент корисног дејства η . То је однос енергије пражњења (W_{pr}) коју је акумулатор способан да ода при пражњењу и енергије пуњења ($W_{\text{пу}}$) која је потребна да би се акумулатор напунио:

$$\eta = \frac{W_{\text{pr}}}{W_{\text{пу}}}$$

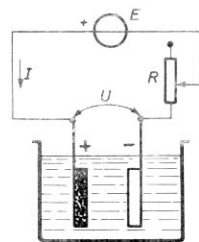
Коефицијент корисног дејства оловног акумулатора је око 0,7.

Осим оловног, у пракси се најчешће среће Едисонов или челични акумулатор. Електромоторна сила челичног акумулатора је око 1,5 V. Унутрашња отпорност му је већа него у оловних акумулатора.

Плоче напуњеног челичног акумулатора су од хидроксида никла (позитивна плоча $\text{Ni}(\text{OH})_3$) и гвожђа (негативна плоча Fe). Електролит је 21% раствор калијум-хидроксида (KOH) у води. Хемијски процеси при пражњењу и пуњењу су веома сложени, али се крајњи резултат може представити формулом:



Дакле, у овом акумулатору приликом поларизације и деполаризације не долази до промене у електролиту. Овај акумулатор има мањи коефицијент корисног дејства од оловног, али механички чвршћи, није осетљив на велике струје и захтева мању пажњу.



Сл. 3.50

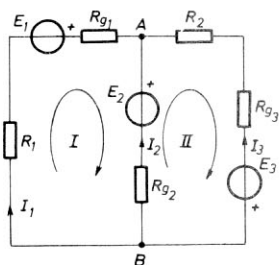
3.22.2. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИ И ФОТОЕЛЕКТРИЧНИ ГЕНЕРАТОРИ

Електрохемијски генератори су најстарији и најраспрострањенији генератори који су још увек у широкој употреби. Генератори чији се рад заснива

Фотоелементи се данас израђују од разних полупроводника: силицијума, германијума, селена, који имају релативно висок степен искоришћења, тј. претварају око 15% светлосне енергије у електричну.

3.23. СЛОЖЕНО ЕЛЕКТРИЧНО КОЛО — ДРУГИ КИРХОФОВ ЗАКОН

Често се срећу електрична кола сачињена од неколико простијих кола у којима делује више извора електричне струје. То су сложена електрична кола. Оваква кола се не могу свести на једну еквивалентну отпорност. На слици 3.54



Сл. 3.54

приказано је једно сложено коло. У овом колу се могу уочити следећи основни саставни делови: грана, чвор и контура или петља.

Грана је део кола у коме кроз све елементе тече иста струја. Грана се може састојати од једног или више редно везаних елемената. Сложено коло са слике 3.54 има три гране: једну са пријемником R_1 и генератором емс E_1 и унутрашње отпорности R_{g1} , другу са реалним напонским генератором E_2 и R_{g2} и трећу са пријемником R_2 и генератором E_3 и R_{g3} .

Чвор је тачка спајања неколико грана (а најмање две). Према схеми на слици 3.54 чворови сложеног кола су тачке А и В.

Контура (петља) електричног кола је затворена линија дуж грана кола. У нашем примеру са слике 3.54 можемо уочити три контуре:

- прва контура: $R_1 - E_1 - R_{g1} - E_2 - R_{g2}$ означена са I,
- друга контура: $R_{g2} - E_2 - R_2 - R_{g3} - E_3$ означена са II,
- трећа контура: $R_1 - E_1 - R_{g1} - R_2 - R_{g3} - E_3$.

Други Кирхофов закон односи се на контуре сложеног кола. Овај закон повезује све електромоторне силе (напоне генератора у празном ходу) и напоне на отпорностима једне контуре. Струје у гранама сложеног кола су временски константне, па електрично поље које постоји унутар и у околини елемената од којих је коло сачињено има све особине електростатичког поља. Раније смо већ доказали да је у оваквом пољу рад електричних сила по затвореној путањи једнак нули. Према овом својству поља Кирхоф је формулисао свој други закон који гласи: алгебарски збир свих електромоторних сила у једној контури сложеног кола једнак је алгебарском збиру напона на свим отпорницима (пријемницима) те контуре. Други Кирхофов закон математички на свим отпорницима (пријемницима) те контуре. Други Кирхофов закон математички се може дати једначином:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n (R \cdot I)_k \quad (3.95)$$

или

$$\sum_{k=1}^n E_k - \sum_{k=1}^n (R \cdot I)_k = 0. \quad (3.96)$$

На основу једначине (3.96) други Кирхофов закон се може исказати и на следећи начин: алгебарски збир електромоторних сила умањен за алгебарски збир напона на отпорницима у једној контури једнак је нули.

Било који од ова два облика другог Кирхофовог закона да се употреби, треба се придржавати већ наведеног правила (уз релације 3.79—3.80) када је контура, на коју ће се применити други Кирхофов закон, одабрана. Произвољно се одабере смер обилажења по контури (нпр. смер кретања казаљке на часовнику) и он се означи стрелицом (крива линија на слици 3.54). Приликом формирања збирова у једначинама (3.95 и 3.96) електромоторне силе и напони чији се референтни смер поклапа са изабраним смером обилежења по контури узимају се са позитивним знаком, а негативни су ако им је смер супротан. За контуру означену са (I) на слици 3.54 једначина написана према закону формулисаним изразом (3.96) гласи:

$$-E_2 + E_1 + R_{g2} \cdot I_2 - R_1 \cdot I_1 - R_{g1} \cdot I_1 = 0. \quad (3.97)$$

Други Кирхофов закон се може лако доказати на основу чињенице да је напон између две тачке у колу исти без обзира на пут по којем смо га рачунали. Тако је за схему на слици 3.54 напон U_{AB} једнак:

$$U_{AB} = -R_{g2} \cdot I_2 + E_2, \quad (3.98)$$

$$U_{AB} = -R_1 \cdot I_1 + E_1 - R_{g1} \cdot I_1 \quad (3.99)$$

$$U_{AB} = -E_3 - R_{g3} \cdot I_3 - R_2 \cdot I_2. \quad (3.100)$$

Изједначавајући релације (3.98 и 3.99) добијамо:

$$-E_2 + E_1 + R_{g2} \cdot I_2 - R_1 \cdot I_1 - R_{g1} \cdot I_1 = 0,$$

што одговара формулацији другог Кирхофовог закона за контуру (I).

3.24. РЕШАВАЊЕ СЛОЖЕНИХ КОЛА

Решити сложено електрично коло најчешће означава решавање струја у свим гранама кола ако су нам познате све електромоторне силе и све отпорности. Једна од метода које се употребљавају за решавање сложених кола јесте примена I и II Кирхофовог закона. Да бисмо решили сложено коло, треба да формирамо помоћу ових закона онолико независних једначина колико у колу има различитих струја.

Свако коло има одређен број чворова N_c и грана N_g , што значи да је број непознатих струја које треба одредити једнак N_g , па толико треба поставити независних једначина по I и II Кирхофовом закону. Прво пишемо независне једначине примењујући I Кирхофов закон на чворове. Одређивање броја независних једначина показаћемо на примеру са слике 3.54. Ово коло има два чвора ($N_c = 2$) А и В, па је:

$$\text{за чвор А: } -I_1 - I_2 - I_3 = 0,$$

$$\text{за чвор В: } I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

Видимо да су једначине написане за оба чвора истоветне, па је сасвим довољно изабрати један чвор и применити I Кирхофов закон. Ако сложено коло има три чвора, изабраћемо два, ако има четири, одабраћемо три чвора итд. и за њих написати једначине. Да уопшtimo: број независних једначина написаних по I Кирхофовом закону N_{IKz} за један је мањи од броја чворова (N_c) сложеног кола:

$$N_{IKz} = N_c - 1. \quad (3.101)$$

Примењујући други Кирхофов закон допунићемо број једначина до N_g , па је број једначина N_{IKz} написан по овом закону једнак:

$$N_{IKz} = N_g - (N_c - 1). \quad (3.102)$$

Избор контура мора бити такав да једначине N_{IKz} буду међусобно независне. Један од начина је да тако изаберемо контуре да сваки садржи макар једну грану која не припада другим контурама за које се постављају једначине.

При решавању сложених електричних кола треба спровести следћи поступак: (ознаке у заградама односе се на схему 3.54):

— према схеми одредити број грана (N_g) кола и број чворова (N_c) и обележити чворове (пример са слике 3.54: $N_g = 3$; $N_c = 2$; A и B),

— обележити струју у свакој грани и дати јој произвољно изабрани референтни смер (I_1 ; I_2 ; I_3),

— одабрати чворове на које ћемо применити I Кирхофов закон (нпр. чвор A), и формирати N_{IKz} једначина ($N_{IKz} = N_c - 1 = 2 - 1 = 1$):

$$\text{за чвор A: } -I_1 - I_2 - I_3 = 0, \quad (1)$$

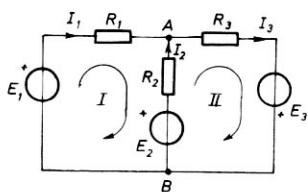
— одабрати одговарајући број независних контура, обележити смер обилажења по контури (I; II) и формирати N_{IKz} једначина ($N_{IKz} = 2$) по другом Кирхофовом закону:

$$\text{I) } -E_2 + R_{g2} \cdot I_2 - R_1 \cdot I_1 + E_1 - R_{g1} \cdot I_1 = 0, \quad (2)$$

$$\text{II) } +R_2 \cdot I_3 + R_{g3} \cdot I_3 + E_3 - R_{g2} \cdot I_2 + E_2 = 0. \quad (3)$$

Решавајући овако формиран систем једначина одредићемо све струје у гранама сложеног кола. За схему са слике 3.54 формирали смо три независне једначине (1, 2, 3) јер коло има три гране и три струје.

Ако се у решењима добије негативна струја, то значи да тече у супротном смеру од претпостављене.



Сл. 3.54а

Као пример одредићемо струје I_1 ; I_2 и I_3 у сложеном електричном колу са слике 3.54а.

Нека је: $E_1 = 10 \text{ V}$; $E_2 = 20 \text{ V}$, $E_3 = 30 \text{ V}$,
 $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 3 \Omega$, $R_3 = 4 \Omega$.

За чвор A, према првом Кирхофовом закону, је:

$$\text{A: } I_3 = I_1 + I_2. \quad (1)$$

Други Кирхофов закон применили смо на контуре обележене на слици 3.54а са I и II. Према усвојеном смеру обележења по контурама је:

$$\text{I)} \quad E_1 - R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 - E_2 = 0, \quad (2)$$

$$\text{II)} \quad E_2 - R_2 \cdot I_2 - R_3 \cdot I_3 + E_3 = 0. \quad (3)$$

Уводећи једначину (1) у једначину (3) и преписујући израз (2), добијамо:

$$\text{I)} \quad E_1 - R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 - E_2 = 0, \quad (2)$$

$$\text{II)} \quad E_1 - R_2 \cdot I_2 - R_3 \cdot (I_1 + I_2) + E_3 = 0. \quad (3)$$

После сређивања једначина (2) и (3) гласе:

$$\text{I)} \quad E_1 - E_2 - R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = 0, \quad (2)$$

$$\text{II)} \quad E_2 + R_3 - (R_2 + R_3) \cdot I_2 - R_3 \cdot I_3 = 0. \quad (3)$$

Примењујући бројне вредности:

$$\text{I)} \quad -10 - 2I_1 + 3I_2 = 0, \quad (2)$$

$$\text{II)} \quad 50 - 4I_1 - 7I_2 = 0. \quad (3)$$

Једначине (2) и (3) решићемо методом једнаких коефицијената.

Израз (2) помножићемо са -2 и сабрати релације (2) и (3):

$$\text{I)} \quad 20 + 4I_1 - 6I_2 = 0, \quad (2)$$

$$\text{II)} \quad 50 - 4I_1 - 7I_2 = 0, \quad (3)$$

(2)+(3) је:

$$70 - 13I_2 = 0,$$

одакле је:

$$I_2 = \frac{70}{13} = 5,385 \text{ A.}$$

Уводећи решење $I_2 = 5,385 \text{ A}$ у једначину (2), добићемо да је:

$$20 + 4I_1 - 32,31 = 0, \quad (2)$$

па је:

$$I_1 = \frac{12,31}{4} = 3,076 \text{ A.}$$

Коначно, интензитет струје I_3 је према (1):

$$I_3 = 4,385 \text{ A} + 3,076 \text{ A} = 8,46 \text{ A.}$$

ПИТАЊА

1. Шта је електрична струја?
2. Која је основна разлика између електристатичкој и временски константној електричној поља?
3. Шта је пошребно да би се образовала електрична струја?
4. Која су дејства електричне струје?
5. Како се одређује интензитет и смер електричне струје?
6. Шта је суштина првој Кирхофовој закона?