# 1. Podstawowe wielkości elektryczne

Elektrotechnika to dział fizyki zajmujący się zastosowaniem zjawisk fizycznych z dziedziny elektryczności i magnetyzmu w różnych gałęziach gospodarki, a w szczególności dziedziny związanej z elektrotechniką i elektroniką.

Do opisania praw fizycznych konieczne jest posługiwanie się wielkościami fizycznymi z uwzględnieniem jednostek miar tych wielkości.

Wielkością fizyczną nazywamy cechę zjawiska fizycznego lub własność ciała, zbiór wielkości fizycznych układem wielkości. Obowiązującym w Polsce układem jednostek jest Międzynarodowy Układ Jednostek SI (w skrócie układ SI). Jednostki podstawowe i uzupełniające przedstawia tabela 1.

**Tabela 1.** Układ jednostek SI

| Jednostki podstawowe | | | | Jednostki podstawowe c. d. | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Lp. | Wielkość miary | Jednostka miary | | Lp. | Wielkość miary | Jednostka miary | |
| | | Nazwa | Oznaczenie | | | Nazwa | Oznaczenie |
| 1 | Długość | metr | m | 6 | Liczność materii | mol | mol |
| 2 | Masa | kilogram | kg | 7 | Światłość | kandela | cd |
| 3 | Czas | sekunda | s | Jednostki uzupełniające | | | |
| 4 | Prąd elektryczny | amper | A | 1 | Kąt płaski | radian | rad |
| 5 | Temperatura | kelwin | K | 2 | Kąt bryłowy | steradian | sr |

W elektrotechnice i elektronice używa się jednostek pochodnych. W tabeli 2. przedstawiono niektóre, najczęściej stosowane jednostki.

**Tabela 2.** Niektóre jednostki, najczęściej stosowane w elektrotechnice i elektronice.

| Wielkość fizyczna | | | Jednostka miary | |
|---|---|---|---|---|
| Lp. | Nazwa | Oznaczenie | Nazwa | Oznaczenie |
| 1 | Ładunek elektryczny | Q, q | kulomb | C |
| 2 | Napięcie elektryczne | U | wolt | V |
| 3 | Siła elektromotoryczna | E | wolt | V |
| 4 | Natężenie pola elektrycznego | E | wolt na metr | V/m |
| 5 | Pojemność elektryczna | C | farad | F |
| 6 | Rezystancja (opór czynny) | R | om | Ω |
| 7 | Rezystywność | $\rho$ | omometr | $\Omega \cdot m$ |
| 8 | Konduktywność | $\gamma$ , $\sigma$ | Simens na metr | S /m |
| 9 | Indukcyjność własna | L | henr | H |
| 10 | Indukcyjność wzajemna | M, $L_{mm}$ | henr | H |

W otaczającym nas świecie występuje ruch cząstek materialnych oraz wraz z nimi ładunków elektrycznych dodatnich, jak i ujemnych. Ruch tych cząstek powoduje powstanie pola nazywanego polem elektromagnetycznym, a zjawiska towarzyszące rozprzestrzenianiu się tego pola nazywane są zjawiskami elektromagnetycznymi.

Pole elektryczne jest to pole wywołane przez ładunki elektryczne. Charakteryzuje się tym, że na nieruchome ciała lub cząstki elementarne umieszczone w nim działa siła.

Pole magnetyczne jest to pole wywołane przez poruszające się ładunki elektryczne. Charakteryzuje się tym, że na poruszające się w nim naładowane ciała lub cząstki elementarne działa siła.

Zmiana w czasie jednego z tych pól powoduje pojawienie się drugiego pola. Występuje nierozerwalny związek zjawisk elektrycznych i magnetycznych.

1. Ładunek elektryczny to pewna ilość ładunków elementarnych dodatnich i ujemnych. Jego jednostką jest kulomb [C].
2. Prądem elektrycznym nazywamy zjawisko fizyczne polegające na uporządkowanym ruchu ładunków elektrycznych przez badany przekrój poprzeczny ciała przewodzącego pod wpływem pola elektrycznego. Prądem stałym nazywa się prąd, którego natężenie nie zmienia się w czasie, prądem zmiennym taki prąd, którego natężenie zmienia się w czasie.

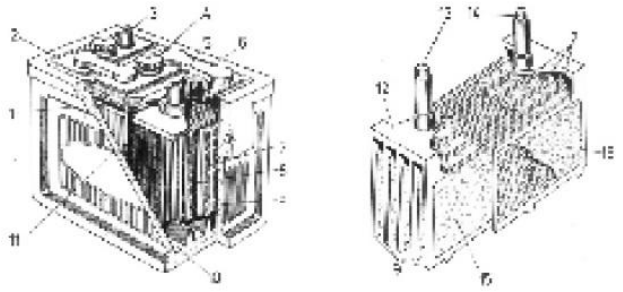
3. Natężeniem prądu elektrycznego nazywamy stosunek elementarnego ładunku elektrycznego przenoszonego przez cząstki naładowane w ciągu pewnego elementarnego czasu $\Delta t$ przez dany przekrój poprzeczny środowiska, do tego czasu. Jednostką natężenia prądu elektrycznego jest 1 amper – 1[A] (patrz tabela 1).
4. Napięcie elektryczne między dwoma punkami A i B obwodu elektrycznego rozumie się jako różnicę potencjałów tych punktów $V_A$ i $V_B$. Jednostką napięcia elektrycznego jest 1 [V].
5. Siła elektromotoryczna (sem) E w [V] jest różnicą potencjałów wytwarzaną przez źródło prądu.
6. Rezystancja to wielkość charakteryzująca czynny opór, jaki stawia prądowi element obwodu elektrycznego. Wartość rezystancji zależy od rodzaju materiału, jego rozmiarów i kształtu oraz od temperatury środowiska przewodzącego.
7. Konduktywność [ $\gamma$ ], to wielkość określająca własności przewodzące przewodnika. W praktyce konduktywność przewodnika prądu wyraża się w [m/ $\Omega$ ] · [$mm^2$] = $10^6$ · [S] / [m].
8. Odwrotność konduktywności jest rezystywność [$r$] = 1 [ $\Omega$ ]·[m]
9. Odwrotnością rezystancji jest konduktacja G.
10. Stosunek energii prądu elektrycznego W do czasu t nazywamy mocą elektryczną. Jednostką mocy jest 1 [W]
    P=W/t
    Moc prądu elektrycznego równa jest iloczynowi napięcia i natężenia prądu elektrycznego. Jednostką mocy elektrycznej prądu elektrycznego jest wat 1 [W].
    1[W] = 1 [V] · 1 [A];
    P=I*U
11. Kondensator tworzą dwa przewodniki zwane okładzinami rozdzielone dielektrykiem. Rozróżnia się kondensatory płaskie i cylindryczne. Jeżeli do okładzin kondensatora doprowadzimy napięcie elektryczne U, to na okładzinach zacznie gromadzić się ładunek elektryczny Q. Na jednej okładzinie zgromadzi się ładunek dodatni, na drugiej ujemny. Ładunkiem kondensatora nazywamy ładunek na jednej z okładzin.
12. Pojemnością elektryczną kondensatora C nazywa się stosunek ładunku kondensatora do napięcia występującego pomiędzy jego okładzinami, jest to zdolność do gromadzenia ładunku elektrycznego na okładzinach.
    C=Q/U
    gdzie: Q – ładunek elektryczny zgromadzony na elektrodach kondensatora, U – napięcie między elektrodami.
    Jednostką pojemności jest farad; 1 [F] = 1 [C] / [V].
13. Indukcja elektromagnetyczna
    Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na powstaniu siły elektromotorycznej w dowolnym obwodzie elektrycznym przy zmianie w czasie strumienia $\phi$ skojarzonego z tym obwodem.
    Zmiana w czasie strumienia skojarzonego z obwodem elektrycznym może wywołana ruchem obwodu elektrycznego lub zmianami indukcji magnetycznej. Indukcyjność jest to zależność od średniej drogi strumienia magnetycznego, przekroju poprzecznego obwodu magnetycznego, ilości zwojów uzwojenia elektrycznego i bezwzględnej przenikalności środowiska cewki elektrycznej.
    Rozróżnia się indukcyjność własną i wzajemną.
14. Jednostka natężenia pola magnetycznego jest 1 henr [H];

# 2. Źródła energii elektrycznej i odbiorniki energii w pojeździe samochodowym

Współczesne pojazdy samochodowe wyposażone są w dwa źródła energii elektrycznej. Urządzenia wysyłające energię elektryczną nazywa się źródłami energii elektrycznej. Do nich zalicza się akumulator oraz prądnicę. Prądnica napędzana przez silnik wytwarza energię, a akumulator tę energię magazynuje. Akumulatory dzieli się na kwasowe i zasadowe.

W pojazdach samochodowych stosuje się powszechnie akumulatory kwasowe, czyli ołowiowe. Podstawowymi odbiornikami energii elektrycznej są urządzenia układu zapłonowego i rozrusznik, oraz reflektory i lampy. Odbiornikami energii elektrycznej są również urządzenia układu sygnalizacji świetlnej i dźwiękowej, urządzenia, kontrolno-sygnalizacyjne, zabezpieczenia instalacji itp. Wobec powyższego w rozdziale tym będą opisane źródła energii elektrycznej.

Akumulator ołowiowy rys. 1. nazywany również kwasowym składa się z kilku połączonych ze sobą ogniw umieszczonych w jednej obudowie. Ogniwo składa się z płyt dodatnich oraz ujemnych zanurzonych w elektrolicie.

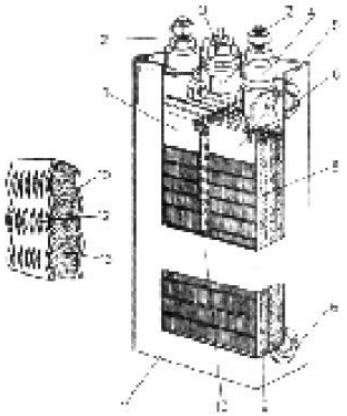


**Rys. 1**. Akumulator kwasowy: 1 - ogniwo akumulatora, 2 - pokrywa ogniwa, 3 - biegun ujemny, 4 - korek wlewu 5 - biegun ujemny, 6 - mostek, 7 - płyta ujemna, 8 - separator płyt, 9 - płyta dodatnia, 10 - komora osadowa, 11 - grodź międzyogniwowa, 12 - mostek biegunowy zespołu płyt dodatnich, 13 - dodatnia końcówka ogniwa, 14 - ujemna końcówka ogniwa, 15 - czynna masa płyty

Naczynie akumulatorowe wykonane jest z półprzezroczystego polipropylenu i zamknięte pokrywą nazywaną wieczkiem. W wieczku wykonane jest sześć otworów umieszczonych na środku i zamkniętych korkami. Płyty dodatnie wykonane są z dwutlenku ołowiu ($PbO_2$), który stanowi masę czynną, natomiast w płytach ujemnych występuje ołów gąbczasty (Pb). Elektrolitem akumulatora jest wodny roztwór kwasu siarkowego o gęstości 1,265 g/cm$^3$.

Akumulatory zasadowe występują zazwyczaj jako: kadmowo-niklowe, żelazowo-niklowe i srebrowo-cynkowe.

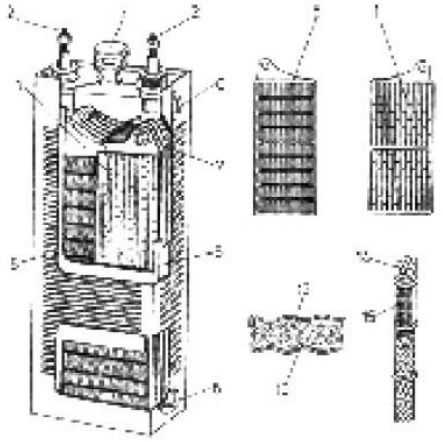
Akumulator kadmowo-niklowy rys. 2. Składa się z płyt – elektrod dodatnich, które stanowi wodorotlenek lub tlenek niklu w postaci proszku oraz dodatków zwiększających przewodność, którymi może być sadza lub grafit. Płyty elektrod ujemnych stanowi masę czynną sporządzaną z tlenku kadmu (CdO) lub ze sproszkowanego kadmu metalicznego (Cd).



**Rys. 2.** Akumulator kadmowo-niklowy: 1 – płyta dodatnia, 2 – zacisk akumulatora, 3 – korek ogniwa akumulatora, 4 – tuleja izolacyjna, 5 – płyta ujemna, 6 – czop zawieszenia ogniwa, 7 – śruba złączna płyt, 8 – rama płyty, 9 – okładzina izolacyjna, 10 – niklowana blacha stalowa, 11 – naczynie ogniwa akumulatora, 12 – perforacja, 13 – czynny wypełniacz

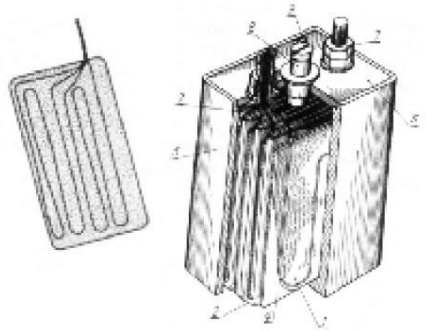
Elektrolitem jest roztwór wodorotlenku potasowego KOH o gęstości ok. 1,2 g/cm$^3$, z dodatkiem niewielkiej ilości wodorotlenku litu. Elektrody te są rozdzielone separatorami z materiałów syntetycznych. Obudowa wykonana jest najczęściej z tworzywa sztucznego.

Akumulator żelazowo-niklowy rys. 3. Składa się z płyt – elektrod dodatnich, które stanowi wodorotlenek lub tlenek niklu w postaci proszku oraz dodatków zwiększających przewodność, którymi może być sadza lub grafit. Płyty elektrod ujemnych stanowi masę czynną sporządzaną z metalicznego żelaza (Fe). Elektrolitem jest roztwór wodorotlenku potasowego KOH o gęstości ok. 1,2 g/cm3, z dodatkiem niewielkiej ilości wodorotlenku litu.



**Rys. 3.** Akumulator żelazowo-niklowe: 1 – płyta dodatnia, 2 – zacisk akumulatora, 3 – korek ogniwa akumulatora, 4 – tuleja izolacyjna, 5 – płyta ujemna, 6 – czop zawieszenia ogniwa, 7 – śruba złączna płyt, 8 – rama płyty, 9 – okładzina izolacyjna, 10 – niklowana blacha stalowa, 11 – naczynie ogniwa akumulatora, 12 – perforacja, 13 – czynny wypełniacz, 14 –rura elektrody płyty dodatniej, 15 – wodorotlenek niklu

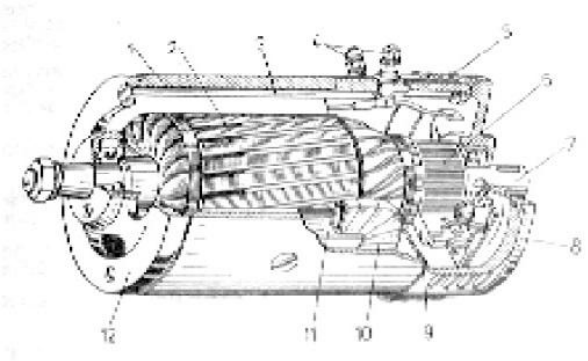
Akumulator srebrowo-cynkowy rys. 4 – składa się z cienkich płytek o grubości od 0,5 do 3 mm i elementów przewodzących prąd, którym jest drut srebrny umieszczony w materiale elektrody w postaci kilku pętli z końcami skręconymi ze sobą. Elektrodę srebrową (dodatnią) wykonuje się przez sprasowanie pod ciśnieniem bardzo drobnego proszku czystego srebra metalicznego i spiekanie w temperaturze 450°C, a elektrodę cynkową ujemną najczęściej przez sprasowanie tlenku cynku zmieszanego z pyłem cynkowym. Elektrolitem jest 40 % roztwór wodorotlenku potasu (KOH). Sita elektromotoryczna wynosi 1,85 V i jest równa, a napięcie pracy podczas długotrwałego wyładowania wynosi 1,5 V i jest stałe.



**Rys. 4.** Akumulator srebrowo-cynkowy: 1 – elektroda dodatnia, 2 – elektroda ujemna, 3 – drut srebrny, 4 – separator, 5 – naczynie akumulatorowe, 6 – pokrywa, 7 – zacisk, 8 – zawór, 9 – otwór do wlewania elektrolitu.

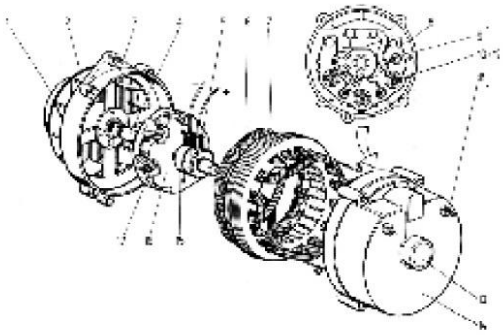
Prądnica jest podstawowym źródłem energii elektrycznej. Rozróżnia się prądnice komutatorowe nazywane potocznie prądnicami prądu stałego oraz prądnice bezkomutatorowe nazywane potocznie prądnicami prądu przemiennego lub alternatorami.

Prądnica prądu stałego – jest zbudowana ze stojanu wykonanego z blachy stalowej zwijanej i spawanej, do którego mocowane są nabiegunniki wykonane z odkuwek stalowych, walcowanych profili stalowych lub spiekanych ze sproszkowanego żelaza za pomocą wkrętów. Na biegunach osadzone są cewki uzwojenia wzbudzenia z drutu miedzianego. Twornik prądnicy osadzony jest na wałku stalowym. Rdzeń twornika wykonany jest z pakietu blach prądnicowych. Żłobki twornika są zwykle o przekroju półzamkniętym. Uzwojenie twornika wykonane jest z drutu miedzianego izolowanego emalią. Uzwojenie izolowane jest za pomocą wkładek izolacyjnych. Komutator wykonany jest przez zaprasowanie wycinków miedzianych w izolowanej tulei stalowej lub w sztucznym tworzywie termoutwardzalnym. Stojan prądnicy zamknięty jest przez tarcze łożyskowe. Części prądnicy przedstawia rys. 5.



**Rys. 5.** Prądnica prądu stałego: 1– stojan, 2 – twornik, 3 – śruba ściągająca, 4 – zacisk przewodu, 5 – opaska ochronna, 6 – komutator, 7 – wał twornika, 8 – wspornik łożyska tylnego, 9 – szczotkotrzymacz ze szczotką węglową, 10 – uzwojenie wzbudzenia, 11 – nabiegunnik, 12 – przednia płyta łożyskowa

Prądnica prądu przemiennego – alternator. Jest zbudowana rys. 6. ze stojanu, twornika i pełnookresowego prostownika. Stojan (7) - element nieelektryczny obwodu magnetycznego jest złożony ze spakietowanych ze sobą blach magnetycznych jednostronnie izolowanych. Uzwojenie twornika (6) – trójfazowe uzwojenie połączone **w** gwiazdę wykonane z drutu nawojowego miedzianego. Prostownik trójfazowy składa się z sześciu diod krzemowych (9 i 10). Uzwojenie wzbudzenia (17) jest usytuowane pod biegunami kłowymi, tworząc elektromagnesy o przeciwnej biegunowości. Dwa końce uzwojenia wzbudzenia są połączone z pierścieniami ślizgowymi (15) (wykonane z metalu dobrze przewodzącego prąd elektryczny i odpornego na ścieranie). Pierścienie ślizgowe współpracują ze szczotkami węglowymi (5). Szczotki węglowe wykonuje się jako lite kompozycje węglowe z wyprowadzeniami elektrycznymi w postaci linek miedzianych.



**Rys. 6.** Prądnica prądu przemiennego – alternator: 1– koło pasowe, 2 – wentylator chłodzący, 3 – pokrywa przednia, 4 – wał twornika, 5 –szczotka węglowa, 6 – uzwojenie stojana, 7–stojan, 8 – płytka osadcza diod, 9 –dioda dodatnia, 10 – dioda ujemna, 11 – zacisk prądu wyprostowanego, 12 – prostownik, 13 –gniazdo tylnego łożyska tocznego, 14 – pokrywa tylna, 15 – pierścień ślizgowy, 16– kieł rdzenia twornika 17 – uzwojenie twornika

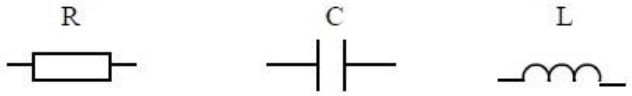
Odbiorniki energii elektrycznej w pojeździe samochodowym są to urządzenia elektryczne pojazdu samochodowego. Do podstawowych urządzeń elektrycznych pojazdu samochodowego – odbiorników energii należą między innymi: cewka zapłonowa, rozrusznik, rozdzielacz zapłonu, świece zapłonowe, świece żarowe, reflektory, lampy, przerywacz kierunkowskazów, włącznik świateł hamowania, lampki kontrolo-sygnalizacyjne, bezpieczniki, przekaźniki, sygnał dźwiękowy, elektryczna pompa paliwa, miernik poziomu paliwa, wskaźnik temperatury cieczy chłodzącej, wycieraczka szyby, silnik wentylatora chłodnicy, sprzęgło elektromagnetyczne wentylatora chłodnicy, prędkościomierz i licznik kilometrów, tylna szyba ogrzewana, zapalniczka elektryczna itp.

# 3. Obwód nierozgałęziony prądu stałego. Prawo Ohma

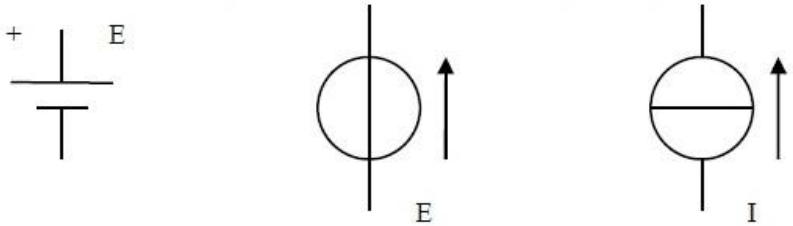
**Prąd elektryczny** jest to zjawisko uporządkowanego ruchu elektronów swobodnych lub jonów. W przewodnikach, w których znajduje się dostateczna liczba elektronów swobodnych, uporządkowany ruch elektronów - prąd elektryczny, następuje pod wpływem pola elektrycznego, wytworzonego przez różnicę potencjałów na końcach przewodnika. W roztworach wodnych kwasów, zasad i soli następuje dysocjacja cząsteczek, a prąd elektryczny tworzą jony przepływające przez ten roztwór. Podczas analizy obwodów elektrycznych przyjmuje się zwrot dodatni prądu w obwodzie zewnętrznym jako zgodny z kierunkiem ruchu ładunków dodatnich, tzn. od zacisku źródła o wyższym potencjale (+) do zacisku o niższym (-) potencjale.

**Napięcie elektryczne** jest różnica potencjałów pomiędzy punktami obwodu elektrycznego.

**Obwód elektryczny** jest to zespół elementów tworzących przynajmniej jedną zamkniętą drogę dla przepływu prądu elektrycznego. Elementami obwodu elektrycznego są: źródło energii elektrycznej (źródło napięcia), odbiorniki - jako elementy pobierające energię elektryczną, przewody łączące i wyłączniki służące do zamykania (zwierania) lub przerywania (rozwierania) obwodu elektrycznego.




**Rys.1.** Symbole elementów biernych [3, s. 68]




**Rys. 2.** Symbole idealnych źródeł napięcia i prądu [3, s. 69]

Obwody elektryczne przedstawia się na rysunkach za pomocą odpowiednich symboli elementów obwodu z zaznaczeniem ich połączeń ze sobą. Końcówki elementów obwodu, służące do połączenia z innymi elementami bezpośrednio lub za pomocą przewodów, nazywa się zaciskami.

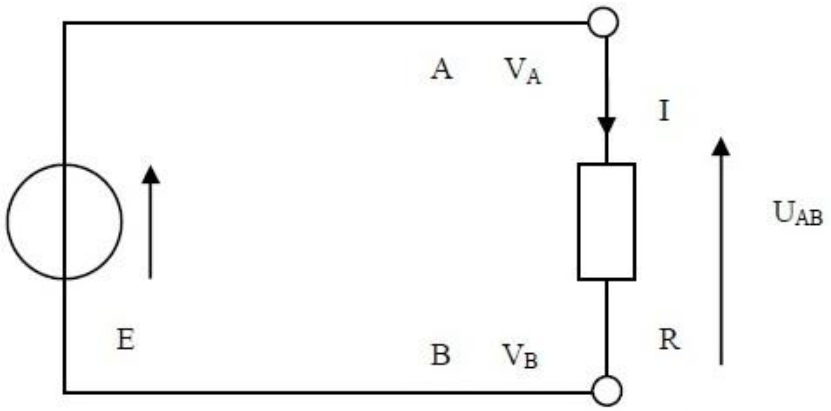
**Gałąź obwodu** tworzy jeden lub kilka elementów połączonych szeregowo, przez które przepływa ten sam prąd elektryczny.

**Oczkiem obwodu** elektrycznego nazywa się zbiór połączonych ze sobą gałęzi, tworzących nieprzerwaną drogę dla przepływu prądu. Usunięcie dowolnej gałęzi powoduje przerwanie ciągłości obwodu elektrycznego.

**Węzłem obwodu elektrycznego** nazywamy zacisk lub końcówkę gałęzi, do której jest przyłączona inna gałąź lub kilka gałęzi. Węzły obwodu elektrycznego oznaczane są zaczernionymi punktami.

**Przewodniki** charakteryzują się małą rezystywnością rzędu $\rho = (10^{-8} \div 10^{-7})\ \Omega\cdot m$. Przewodzą one dobrze prąd. Do przewodników zalicza się materiały, w których przepływ prądu polega na ruchu elektronów swobodnych (przewodnictwo elektronowe); należą do nich metale. Do przewodników zalicza się również materiały, w których przepływ prądu polega na ruchu jonów naładowanych dodatnio lub ujemnie (przewodnictwo jonowe) należą do nich wodne roztwory kwasów, zasad i soli, w których współczynnik temperaturowy rezystancji jest ujemny.

**Izolatory** charakteryzują się bardzo dużą rezystywnością, rzędu $\rho = (10^{8} \div 10^{18})\ \Omega\cdot m$. Są to materiały mające tylko nieznaczną liczbę elektronów swobodnych, wskutek czego praktycznie prądu nie przewodzą. Dlatego używa się ich jako materiałów izolacyjnych. Należą do nich gazy, oleje oraz ciała stałe z wyjątkiem przewodników. W elektrotechnice jako materiały izolacyjne są najczęściej stosowane: tkaniny bawełniane, jedwabne, szklane, porcelana, olej, guma, różne gatunki papierów, mika, igelit itp. W izolatorach na ogół przy wzroście temperatury wraz z nasileniem ruchu drgającego cząsteczek zwiększa się liczba elektronów swobodnych, co zwiększa konduktancję materiału. Na skutek tego rezystancja izolatorów maleje, współczynnik temperaturowy rezystancji jest ujemny.




**Rys. 3.** Schemat najprostszego obwodu elektrycznego nierozgałęzionego

Rozpatrując schemat obwodu z rys. 3 stwierdzamy, że w obwodu płynie prąd. Jeżeli do dalszych rozważań weźmiemy pod uwagę część obwodu zawartą między punktami A i B, to prąd elektryczny płynie od punktu A do B. W punkcie A potencjał jest wyższy niż w punkcie B. Jeżeli potencjał w punkcie A oznaczymy przez $V_A$, potencjał w punkcie B przez $V_B$, różnicą zaś potencjałów między punktami A i B przez $U_{AB}$, to otrzymamy napięcie między punktami A i B

$U_{AB} = V_A - V_B$

Jednostką napięcia i potencjału jest jeden volt (1 V).

Doświadczenia wykazały, że napięcie na odcinku AB jest proporcjonalne do prądu I przepływającego przez ten odcinek oraz do rezystancji $R_{AB}$, a zatem

$U_{AB} = R_{AB} I$

Zależność między napięciem, prądem i rezystancją określa **prawo Ohma**:

**Natężenie prądu I płynącego w przewodniku o rezystancji R jest wprost proporcjonalne do wartości napięcia U** a **odwrotnie proporcjonalne do rezystancji R.**

Rozpatrując obwód elektryczny (rys. 3), w którym uwzględniono również źródło napięcia (energii elektrycznej) z jego rezystancją wewnętrzną, otrzymamy prawo Ohma w następującej postaci

$$I = \frac{U}{\sum R}$$

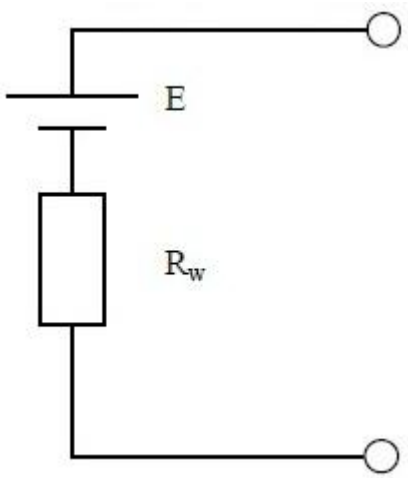
ΣR – rezystancja całego obwodu elektrycznego przez który płynie prąd I

Oporniki, grzejniki, żarówki stawiają przepływowi prądu elektrycznego pewien opór. Do jego pokonania potrzebne jest napięcie, które musi być dostarczone przez źródło napięcia. Źródłami napięcia stałego nazywać będziemy układ urządzeń, które daję nam energię elektryczną w postaci napięcia stałego. W zależności od tego, z jakiej postaci energii otrzymano energię elektryczną, źródła napięcia stałego dzielimy na: źródła elektromechaniczne, źródła chemiczne, źródła cieplne, źródła świetlne i źródła piezoelektryczne.

W każdym z powyższych źródeł zachodzi zamiana odpowiedniej postaci energii na energię elektryczną, objawiającą się napięciem.

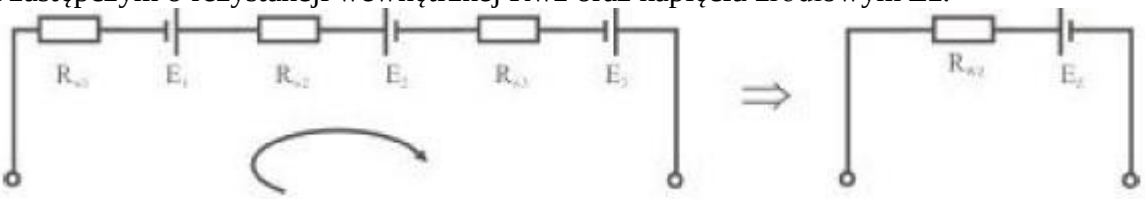
Rezystory, grzejniki, żarówki stawiają przepływowi prądu elektrycznego pewien opór. Do jego pokonania potrzebne jest napięcie, które musi być dostarczone przez źródło napięcia. Wielkością charakteryzującą każde źródło napięcia jest jego siła elektromotoryczna, czyli napięcie źródłowe, oznaczane literą E. Należy jednak pamiętać, że w źródłach elektromaszynowych prąd musi przepływać przez ich uzwojenia, a w źródłach elektrochemicznych przez elektrolit. Zarówno uzwojenia jak i elektrolit stawiają przepływowi prądu też pewien opór zwany **oporem wewnętrznym** albo **rezystancją wewnętrzną** źródła, którą oznaczamy literą R z dodaniem wskaźnika *w*, a więc $R_w$. W związku z tym zachodzi, wewnątrz źródła podczas przepływu prądu I strata mocy $P = R_w I^2$, powodująca wydzielanie się w czasie t ciepła $W = R_w I^2 t$.

**Idealnym źródłem napięcia** można by nazwać takie źródło napięcia, wewnątrz którego nie występuje strata mocy, co jest możliwe przy $R_w = 0$. Wówczas cała energia wytworzona w źródle zostaje przekazana odbiornikowi lub układowi odbiorczemu. Do opisania idealnego źródła napięcia potrzebna jest tylko znajomość jego siły elektromotorycznej.
**Rzeczywiste źródło napięcia** jest to źródło, do którego opisania potrzebne są dwie wielkości: siła elektromotoryczna i rezystancja wewnętrzna. W schematach elektrycznych umieszczamy obok symbolu źródła napięcia oznaczenie E dla źródła idealnego, a E, $R_w$ dla źródła rzeczywistego. Jeszcze wyraźniej można przedstawić w schematach rzeczywiste źródło napięcia za pomocą źródła idealnego E i połączonego w szereg z nim opornika o rezystancji $R_w$**,** co nazywamy schematem zastępczym rzeczywistego źródła napięcia.




**Rys. 4.** Rzeczywiste źródło napięcia

Jeżeli mamy kilka źródeł napięciowych połączonych szeregowo, to można je zastąpić jednym, tzw. źródłem zastępczym o rezystancji wewnętrznej Rwz oraz napięciu źródłowym Ez.



**Rys. 5.** Połączenie szeregowe źródeł napięcia oraz ich źródło zastępcze

Wartość napięcia źródłowego źródła zastępczego $E_z$ jest równa sumie algebraicznej napięć źródłowych $E_1$, $E_2$, $E_3$. Algebraiczna oznacza to, że należy obrać jeden kierunek i te napięcia źródłowe, które są zgodne z obranym kierunkiem mają znak plus, natomiast te, które są przeciwne znak minus

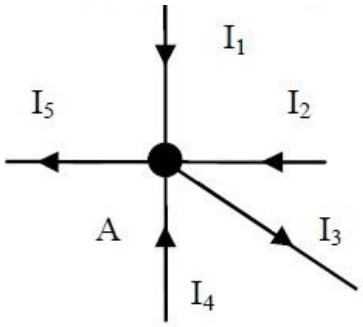
$$E_z = E_1 - E_2 + E_3$$

Rezystancja wewnętrzna $R_{wz}$ jest równa sumie rezystancji wewnętrznych poszczególnych źródeł.

$$R_{WZ} = R_{W1} + R_{W2} + R_{W3}$$

# 4.3. Obwód rozgałęziony prądu stałego. Prawa Kirchhoffa. Połączenie szeregowe, równoległe i mieszane rezystorów

Pierwsze prawo Kirchhoffa dla węzła obwodu prądu stałego można sformułować następująco: **„Dla każdego węzła obwodu elektrycznego suma prądów dopływających do węzła jest równa sumie prądów odpływających od węzła"**




**Rys. 7.** Węzeł obwodu elektrycznego

Dla węzła przedstawionego na rys. 7 pierwsze prawo Kirchhoffa można wyrazić równaniem:

$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5$$

Jeżeli wyrazy prawej strony równania przeniesiemy na lewą stronę, otrzymamy równanie:

$$I_1 + I_2 + I_4 - I_3 - I_5 = 0$$

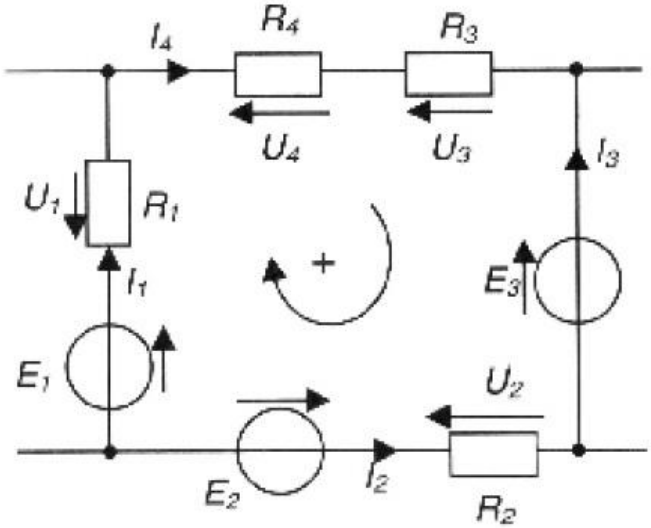
Równanie to wyraża sumę algebraiczną prądów w węźle obwodu elektrycznego, co stanowi alternatywną treść I prawa Kirchhoffa, mówiącą, że:

**„Dla każdego węzła obwodu elektrycznego, algebraiczna suma prądów jest równa zeru".**

**Drugie prawo Kirchhoffa** dotyczące bilansu napięć w oczku obwodu elektrycznego prądu stałego można sformułować następująco:

„**W dowolnym oczku obwodu elektrycznego prądu stałego suma algebraiczna napięć źródłowych oraz suma algebraiczna napięć odbiornikowych występujących na rezystancjach rozpatrywanego oczka jest równa zeru".**

Dla zrozumienia sposobu zapisywania II prawa Kirchhoffa w postaci równania rozpatrzymy dowolne wyodrębnione oczko obwodu elektrycznego (rys. 8).




**Rys. 8.** Wyodrębnione oczko obwodu elektrycznego

W oczku tym oznaczone są zwroty prądów w poszczególnych gałęziach oraz zwroty napięć na poszczególnych rezystorach (odbiornikach). Napięcia odbiornikowe zgodnie z prawem Ohma można zapisać jako:

$$U1 = I1 \cdot R1 \; ; \; U2 = I2 \cdot R2 \; ; \; U3 = I3 \cdot R3 \; ; \; U4 = I4 \cdot R4$$

Dla zapisania II prawa Kirchhoffa w postaci równania przyjmujemy pewien (dowolny) zwrot obiegowy oczka oznaczony strzałką wewnątrz oczka. Ten zwrot przyjmujemy za dodatni. Jeśli zwrot napięcia źródła lub odbiornika jest zgodny z tą strzałką, to te napięcia źródłowe i odbiornikowe przyjmujemy jako dodatnie. Jeśli zaś zwroty napięć są przeciwne, to znaki napięcia źródła lub odbiornika przyjmujemy jako ujemne. W rezultacie takich założeń otrzymujemy równanie:

$$E1 - E2 - E3 - U1 + U2 - U3 - U4 = 0$$

Po przeniesieniu napięć odbiornikowych na prawą stronę równania otrzymamy:

$$E1 - E2 - E3 = U1 - U2 + U3 + U4$$

Oznacza to, że II prawo Kirchhoffa możemy sformułować w postaci odpowiadającej powyższemu równaniu:

**„W dowolnym oczku obwodu elektrycznego prądu stałego suma algebraiczna napięć źródłowych jest równa sumie algebraicznej napięć odbiornikowych".**

**Szeregowe łączenie rezystorów**

Układ dwóch szeregowo połączonych rezystorów R1 i R2 (rys. 9a) chcemy zastąpić jednym równoważnym rezystorem R (rys. 9b), takim, który nie zmieni wartości prądu I. Zgodnie z II prawem Kirchhoffa możemy zapisać: U = U1 + U2

**Rys. 9.** Szeregowe połączenie rezystorów

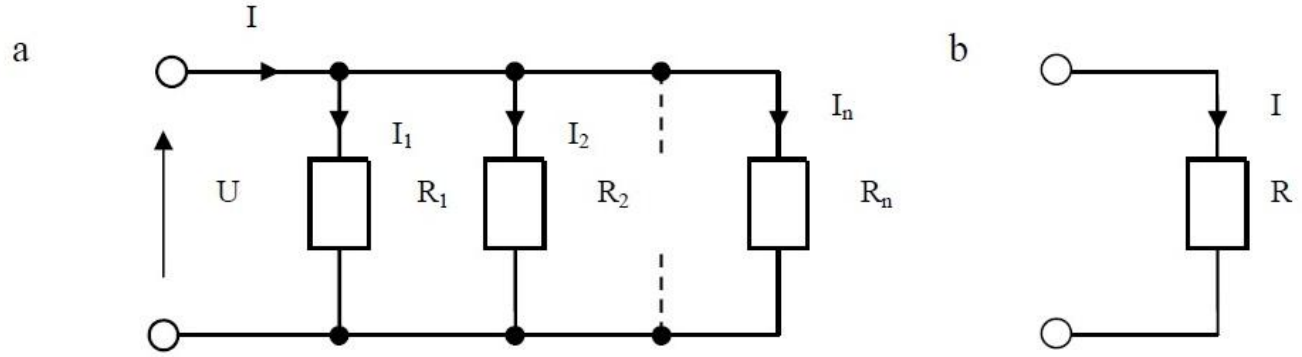
Po uwzględnieniu Prawa Ohma: U = I · R1 + I · R2 i po podzieleniu stron równania przez I otrzymamy: U/I = R1 + R2. Po zapisaniu prawa Ohma dla rys. 9b: U/I = R nietrudno zauważyć, że rezystancja zastępcza dwóch rezystorów połączonych szeregowo wynosi:

$$R = R1 + R2.$$

Analogiczna zależność obowiązuje dla dowolnej liczby rezystorów połączonych szeregowo i by uzyskać rezystancję zastępczą układu, należy zsumować rezystancję poszczególnych rezystorów obwodu. Napięcie na zaciskach układu szeregowego kilku rezystorów jest równe sumie napięć na poszczególnych rezystorach.

**Równoległe łączenie rezystorów**

Połączeniem równoległym kilku gałęzi w obwodzie elektrycznym nazywamy takie połączenie, przy którym na końcach tych gałęzi istnieje wspólne napięcie. Przykład takiego połączenia pokazano na rys. 10a.




**Rys. 10.** Równolegle połączenie rezystorów i jego schemat zastępczy

Prądy płynące poprzez poszczególne rezystory obliczamy dzieląc napięcie przez ich rezystancje albo mnożąc przez konduktancję:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = G_1 \cdot U$$

Prąd wypadkowy I, dopływający do rozpatrywanego układu równoległego, jest równy sumie prądów w poszczególnych rezystorach.

$$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n$$

Gdybyśmy chcieli badany układ równoległy rezystorów zastąpić jednym opornikiem, który by przy tym samym napięciu U pobierał taki sam prąd I, to:

$$I = G \cdot U$$

$$G = G_1 + G_2 + \ldots + G_n$$

Wobec powyższego możemy stwierdzić, że konduktancja (przewodność) zastępcza układu równoległego kilku rezystorów jest równa sumie ich konduktancji.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{Rn}$$

Odwrotność rezystancji zastępczej układu równoległego kilku rezystorów jest równa sumie odwrotności ich rezystancji.

Przy połączeniu równoległym n jednakowych rezystorów, każdy o rezystancji $R_1$ ich rezystancja zastępcza jest $n$ razy mniejsza niż rezystancja jednego rezystora.

$$R = \frac{R_1}{n}$$

Niekiedy stosuje się szeregowo-równoległe połączenia rezystorów, zwane też połączeniami mieszanymi. Ze względu na możliwości takich połączeń nie istnieją wzory ogólne na obliczenie rezystancji zastępczej. Wyznacza się ją zwykle po kolei etapami obliczając rezystancję poszczególnych układów szeregowych i równoległych.