



Uniwersytet
Wrocławski

**Wydział Fizyki
i Astronomii**
Instytut Fizyki Doświadczalnej

pl. M. Borna 9
50-204 Wrocław
tel. +48 71 375 93 02, +48 71 328 73 65
fax +48 71 328 73 65
e-mail: sekr@ifd.uni.wroc.pl
www.ifd.uni.wroc.pl

Elektronika (konspekt)

Franciszek Gołek (golek@ifd.uni.wroc.pl)

www.pe.ifd.uni.wroc.pl

Elektronika zajmuje się korzystaniem z możliwości manipulowania ładunkami elektrycznymi oraz kwantami światła.

W przyszłości bardzo użytecznym może stać się manipulowanie amplitudami i fazami stanów kwantowych.

Literatura

- 1) T. Stacewicz, A. Kotlicki, *Elektronika w laboratorium naukowym*, PWN, Warszawa 1994.
- 2) P. Horowitz, W. Hill, *Sztuka elektroniki*, WKŁ, Warszawa 1992, 1995.
- 3) T.C. Hayes, P. Horowitz, *Student Manual for The Art of Electronics*, Cambridge U.P. 1991.
- 4) U. Tietze, Ch. Schenk, *Układy półprzewodnikowe*, WNT, Warszawa 1976, 1987, 1996.
- 5) R. Śledziwski, *Elektronika dla fizyków*, PWN, Warszawa 1984.
- 6) Internet.

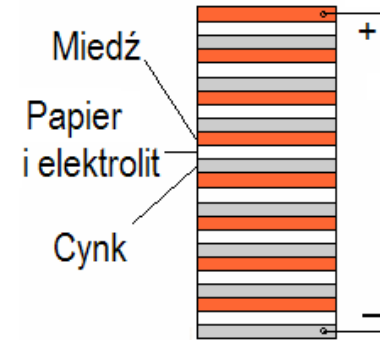
Początki elektrotechniki i elektroniki

Za początek ery elektryczności można uznać zbudowanie **ogniwa elektrycznego (baterii) w 1799 roku przez A.G.A. Voltę.**

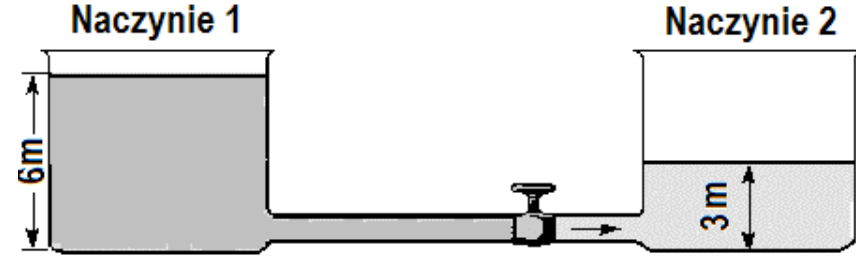
Za początek ery radia oraz radiotechniki a później elektroniki

można uznać pierwsze bezprzewodowe przesłanie sygnału elektrycznego, którego dokonał Guglielmo **Marconi w 1895r.** Jednak nie należy niedoceniać znaczenia wielu innych wydarzeń jak np. **1827r. – G.S. Ohm** odkrywa oporność elektryczną i prawo Ohma. **1827r.- C. Wheatstone** konstruuje mikrofon. **1846r. G. Kirchhoff** definiuje prawa zwane obecnie prawami Kirchhoffa.

1861r. do 1873r. - J. C. Maxwell opublikował prace, w których zebrał i przedstawił w formie równań wcześniejszą wiedzę o zjawiskach elektromagnetycznych. Były to między innymi: nieistnienie pojedynczego (odosobnionego) bieguna magnetycznego, generowanie pola elektrycznego przez ładunki elektryczne (prawo Gaussa), generowanie pola elektrycznego przez zmienne pola magnetyczne (prawo Faradaya). Ponadto dodając od siebie równoważność między prądem elektrycznym a zmieniającym się polem elektrycznym w generowaniu pola magnetycznego rozszerzył prawo Ampère'a. Z równań tych można wyprowadzać nie tylko wcześniej znane prawa ale przewidywać wiele nowego, w tym np. fale elektromagnetyczne rozchodzące się z prędkością światła (patrz dodatek A). **W 1874 r. F. Braun** odkrywa, że pewne kryształy (jak galena) w pewnych warunkach (kontakt z metalowym drutem) przewodzą prąd tylko w jedną stronę. **W 1885 r. W. Stanley** wynajduje transformator.



Obwód elektryczny



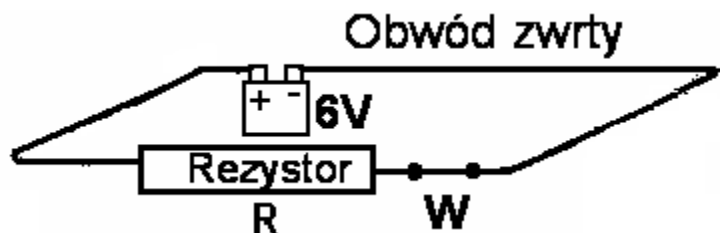
Wodny analog źródła różnicy potencjałów i wymuszenia przepływu (prądu).

Obwód elektryczny jest podstawowym i uniwersalnym pojęciem w elektrotechnice i elektronice. Obwód elektryczny musi zawierać elementy pozwalające na wymuszony ruch ładunku elektrycznego oraz powinien zawierać jedno lub więcej źródeł energii elektrycznej – przyczynę wymuszenia prądu elektrycznego.

Intensywność przepływu elektronów w obwodzie elektrycznym (natężenie prądu) jest proporcjonalne do różnicy potencjałów wymuszających ten przepływ, podobnie jak intensywność przepływu wody w rurze na rysunku jest proporcjonalne do różnicy poziomów.

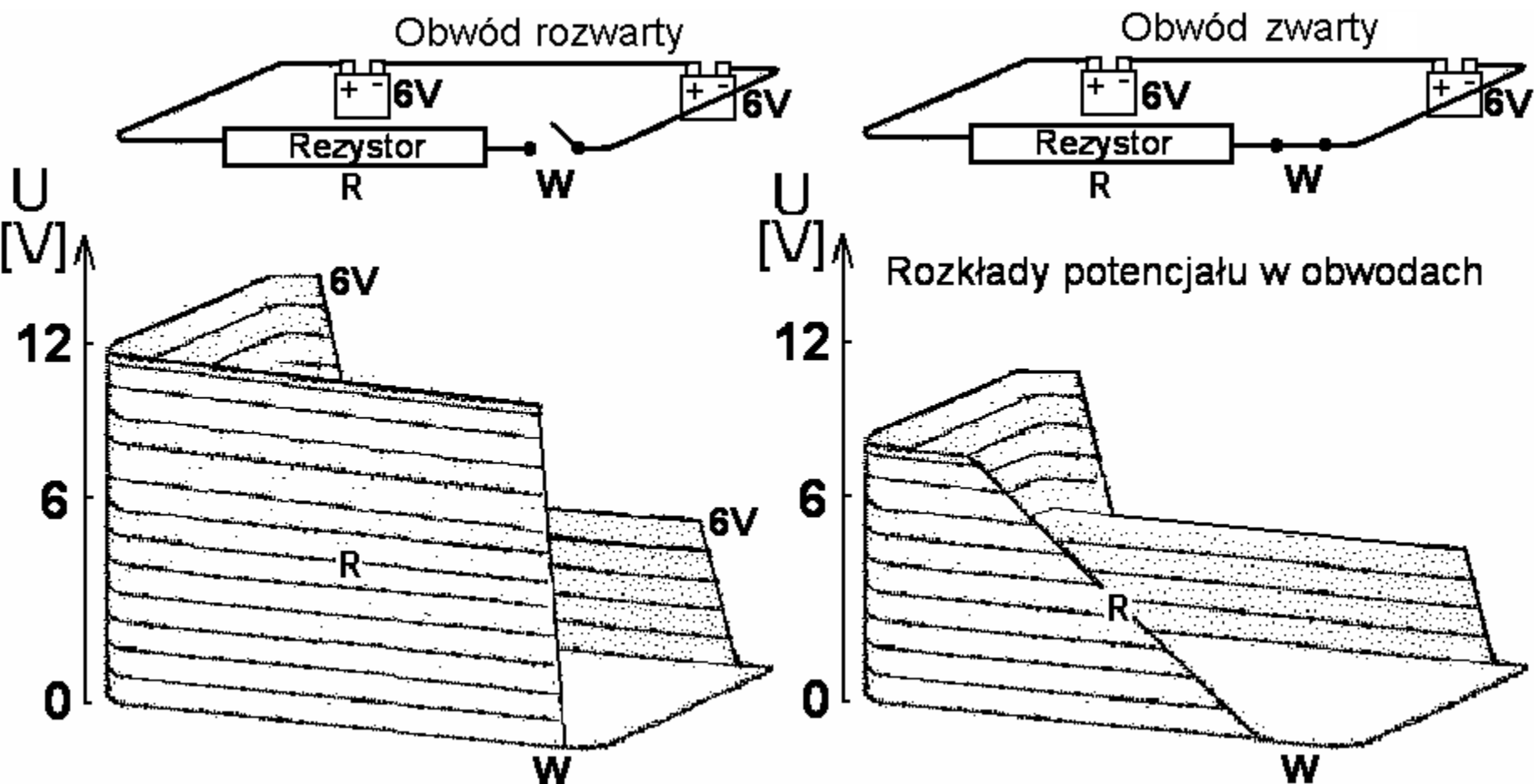
Dla małych napięć elementami odvodu elektrycznego zwykle są przewodniki.

Dla bardzo dużych napięć istotnym elementem obwodu może być nawet taki izolator jak powietrze.

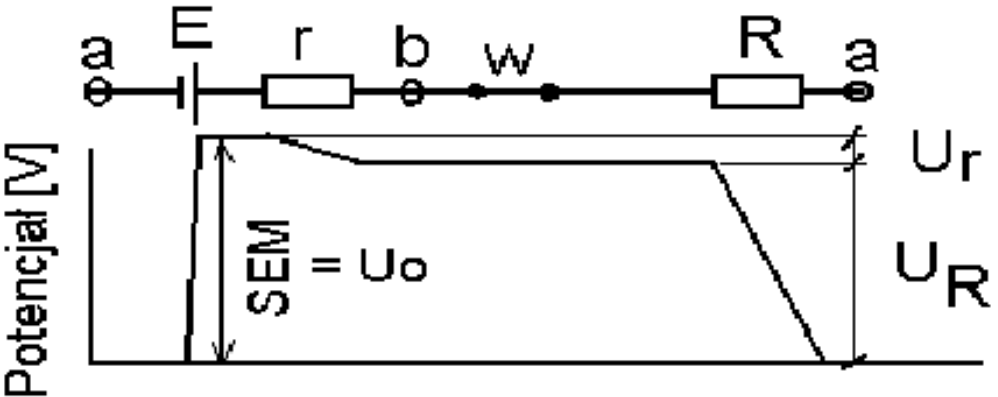
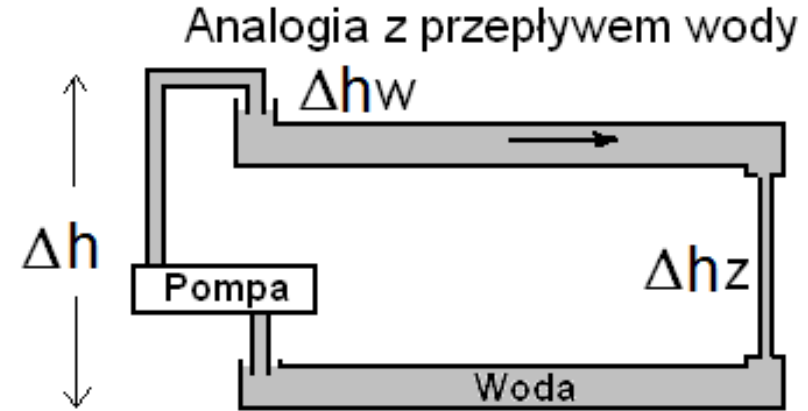
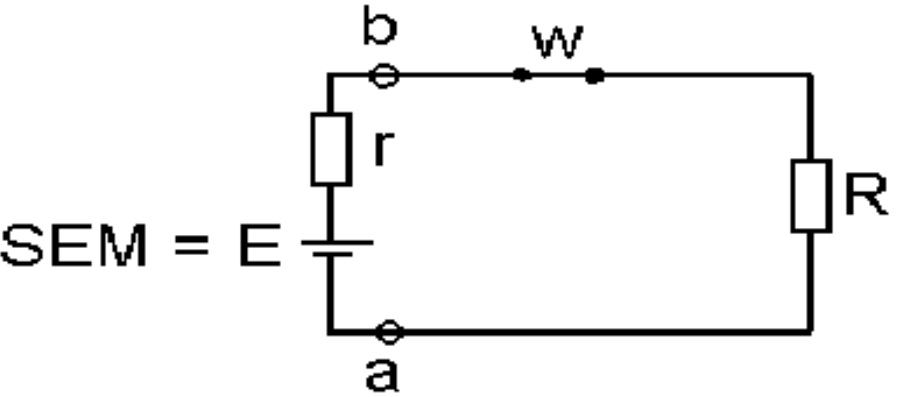


Rozkład potencjału w układach prądu stałego.

W praktycznych obwodach elektrycznych a zwłaszcza w obwodach elektronicznych zaniedbujemy spadki napięcia na przewodach gdyż typowe oporności metali wynoszą 10^{-8} - 10^{-6} Ωm (oporność przewodu miedzianego o przekroju 1 mm^2 i długości 1m wynosi zaledwie około $0.017\ \Omega$). Znaczne skoki potencjału występują na elementach o znacznej oporności, a gdy natężenie prądu jest duże, również na rezystancjach wewnętrznych źródeł napięcia.



Potencjał i jego różnice (napięcia) w obwodzie elektrycznym oraz różnice poziomów w obwodzie z cyrkulującą cieczą.

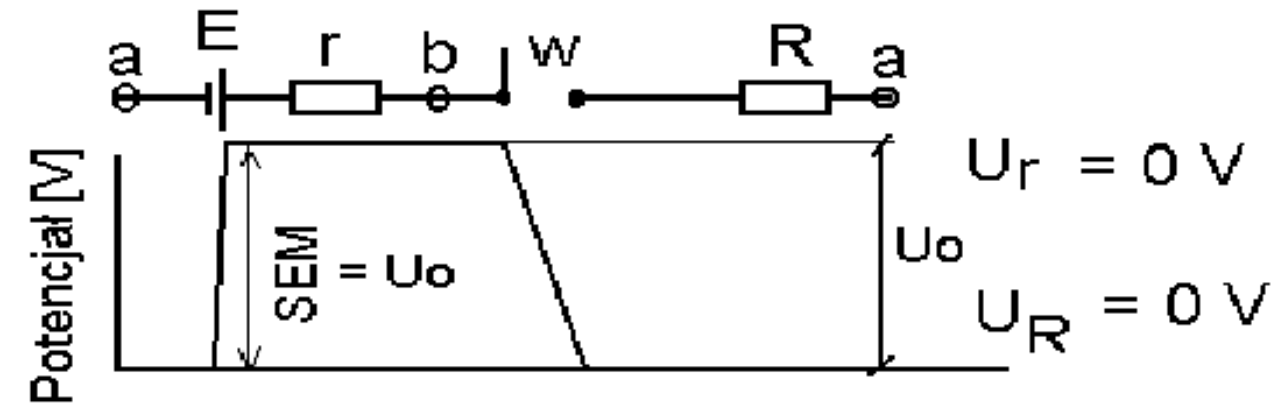


Równanie różnic poziomu

$$\Delta h = \Delta h_w + \Delta h_z$$

Równanie napięć (różnic potencjału)

$$U_0 = U_r + U_R$$



Poziomy abstrakcji w elektronice

Natura poprzez nasze obserwacje i eksperymenty, stanowi podstawę wszelkiej abstrakcji.

I poziom abstrakcji to modele fizyczne.

Przykładając do opornika kolejno małe i większe napięcia oraz mierząc te napięcia U i prądy I płynące pod ich wpływem otrzymujemy np.

U : 1V, 2V, 3V, 4V, 5V, 6V itd.

I : 2A, 4A, 6A, 8A, 10A, 12A itd.

Analiza powyższych wyników może wykazać jakąś prawidłowość.

Usiłując wyrazić w prosty i dający do myślenia sposób otrzymywane wyniki pomiarowe tworzymy np. formułę:

$U = R_{(\text{stała})} \times I$ (prawo Ohma). Taka formuła podobnie jak równania

Maxwella i wiele praw fizycznych stanowią **I poziom abstrakcji**.

Niektóre z równań i praw są złożone i trudne do bezpośredniego zastosowania w praktyce. Taka sytuacja zmusza do czynienia uproszczeń i dalszych poziomów abstrakcji.

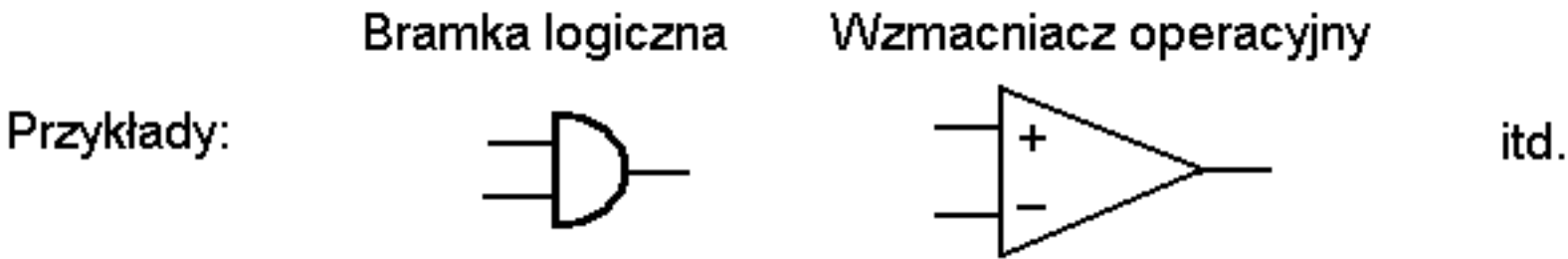
II poziom abstrakcji – symbole elementów

Na drugim poziomie abstrakcji definiujemy uproszczone prawa np. prawa Kirchhoffa (wynikające z równań Maxwella) dotyczące szczególnych ale często spotykanych sytuacji. Na tym poziomie będziemy również definiować symbole poszczególnych prostych elementów i uważać je za elementy dyskretne („niemal punktowe”).



Wyższe poziomy abstrakcji

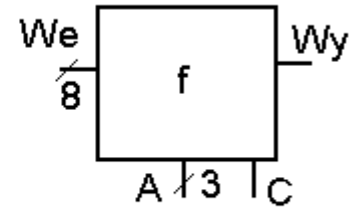
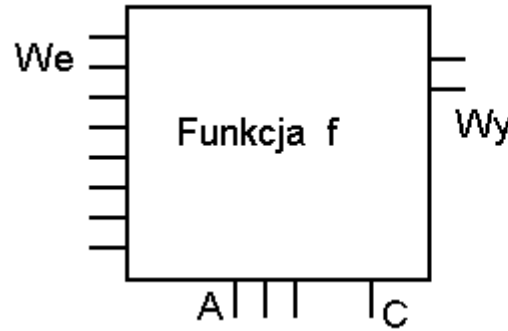
Inżynierski poziom abstrakcji – na tym poziomie definiuje się symbole bardziej złożonych jednostek (złożonych z wielu rezystorów, kondensatorów diod, tranzystorów itp.) oraz projektuje i analizuje układy z nich złożone. Wewnętrzne szczegóły takich jednostek pomijamy a w zamian formułujemy proste reguły ich działania (i tu nie stosujemy już r. Maxwella – byłoby to zbyt skomplikowane).



Wyższe poziomy abstrakcji

Dalsze przykłady:

Jednostki funkcyjne,
multipleksery, zasilacze
sensory, pamięć itp.



Poziom programowania urządzeń. Na tym poziomie abstrakcji mamy do czynienia z układami programowanymi poprzez odpowiednie instrukcje. Jest to poziom programów komputerowych (np. LabVIEW) oraz złożonych urządzeń programowalnych zawierających procesory, pamięci, nośniki informacji itp.

Dzięki pracy na odpowiednim poziomie abstrakcji możemy rozwiązywać problemy, projektować złożone systemy i wykonywać trudne zadania.



Dodatek A. Równania Maxwella

Równania Maxwella to zestaw czterech równań, który w roku 1884 opublikował Oliver Heaviside. Nazywamy je jednak równaniami Maxwella, gdyż są one równoważne większej liczbie równań, które wcześniej zostały opublikowane przez Maxwella w kilku pracach w latach 1861 – 1873 [Phil. Mag. **21** (1861) 161, 281, 338, Phil. Mag. **22** (1862) 12, 85, Phil. Trans. Roy. Soc. **155** (1865) 459, Phil. Trans. Roy. Soc. **158** (1868) 643, *Treatise in Electricity and Magnetism* (1873)].

Oliver Heaviside, dzięki zastosowaniu notacji wektorowej uzyskał bardzo zgrabną postać równań Maxwella, dlatego ta właśnie postać równań pojawia się we wszystkich współczesnych podręcznikach poświęconych elektryczności. Te cztery równania uzupełnione o równanie na siłę Lorentza stanowią podstawę klasycznej elektrodynamiki.

$$\text{I.} \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Dywergencji pola elektrycznego \mathbf{E} równa jest gęstości ładunku ρ podzielonej przez ϵ_0 , co oznacza, że strumień pola \mathbf{E} przez powierzchnię zamkniętą = ładunkowi wewnątrz tej powierzchni podzielonemu przez ϵ_0 . **Prawo Gaussa dla elektryczności.**

$$\text{II.} \quad \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Rotacja pola elektrycznego \mathbf{E} równa jest minus pochodnej czasowej pola magnetycznego \mathbf{B} , co oznacza, że całka krzywoliniowa z pola \mathbf{E} wzdłuż dowolnej pętli = -d(strumień pola \mathbf{B} przez tę pętlę)/dt. **Prawo Faradaya.**

Dodatek A.

III. $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Dywergencja pola magnetycznego \mathbf{B} wynosi 0, co oznacza, że strumień pola \mathbf{B} przez powierzchnię zamkniętą = 0. Można to rozumieć jako nieistnienie monopoli magnetycznych.

IV. $\mathbf{c}^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

Rotacja pola magnetycznego \mathbf{B} mnożona przez \mathbf{c}^2 jest równa sumie gęstości prądu dzielonej przez ϵ_0 oraz pochodnej czasowej pola elektrycznego \mathbf{E} . Oznacza to, że \mathbf{c}^2 (całka wektora \mathbf{B} po dowolnej zamkniętej pętli) = (prąd przez tę pętlę)/ ϵ_0 + ∂ (strumień pola \mathbf{E} przez tę pętlę)/ ∂t . **Uogólnione prawo Ampère'a.**

Powyższe równania uzupełnione wyrażeniem określającym siłę Lorentza:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

stanowią podstawę całej klasycznej elektrodynamiki, a w tym i elektroniki.

Z równań tych można wyprowadzić między innymi wszystkie podstawowe prawa dla elektroniki. Przykładowo różniczkując po czasie równanie I oraz biorąc dywergencję równania IV z łatwością można wyprowadzić prawo zachowania ładunku.

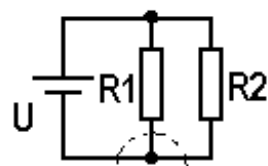
$$\nabla \cdot \mathbf{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Prawo zachowania ładunku. Dywergencja gęstości prądu równa jest minus pochodnej czasowej gęstości ładunku, co oznacza, że strumień prądu przez zamkniętą powierzchnię = ∂ (ładunek wewnątrz tej powierzchni)/ ∂t . Jest to równanie ciągłości.

Gdy założymy, że w danym węźle nie jest gromadzony ładunek (nie zmienia się jego potencjał elektryczny) to pierwsze prawo Kirchhoffa jest natychmiastową konkluzją z prawa zachowania ładunku.

Dodatek A.

Równość uzyskana z równań Maxwella: $\nabla \cdot \mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$
dotyczy każdego punktu przestrzeni.



Objętość V
zawierająca
węzeł prądowy

Zatem możemy te równie wielkości
wysumować po pewnej objętości
zawierającej węzeł prądowy:

$$\int_{\text{Objętość } V} \nabla \cdot \mathbf{j} \, dV = \int_{\text{Objętość } V} -\frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV$$

Obie całki możemy uprościć:

$$\int_{\text{Powierzchnia } S \text{ otaczająca objętość } V} \mathbf{j} \, dS = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{Objętość } V} \rho \, dV$$

Jeżeli ilość ładunku w objętości V
się nie zmienia to mamy:

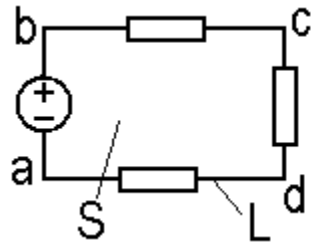
$$\int_{\text{Powierzchnia } S \text{ otaczająca objętość } V} \mathbf{j} \, dS = 0$$

Prądowe prawo Kirchhoffa

Całka gęstości prądu przez całą
powierzchnię S sprowadza się do
całek przez przekroje drutów bo
tylko tam może być $\mathbf{j} \neq 0$

$$\sum_k I_k = 0$$

Dodatek A. Całkując II r. Maxwella po pewnym kawałku powierzchni S , którego brzegiem L jest jakiś obwód elektryczny dostrzegamy,



$$\int_S \nabla \times \mathbf{E} \, ds = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \, ds; \quad \int_L \mathbf{E} \, dL = - \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} \, ds; \quad \int_L \mathbf{E} \, dL = - \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

że gdy strumień pola magnetycznego przez obszar S nie zmienia się ($d\Phi/dt = 0$) to II równanie Maxwella przyjmuje postać:

$$\int_L \mathbf{E} \, dL = 0$$

i staje się **napięciowym prawem Kirchhoffa**:

$$\int_L \mathbf{E} \, dL = 0; \quad \int_a^b \mathbf{E} \, dL + \int_b^c \mathbf{E} \, dL + \int_c^d \mathbf{E} \, dL + \int_d^a \mathbf{E} \, dL = 0; \quad U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} = 0.$$

$$\sum_{\text{w pętli}} U_i = 0.$$

Dodatek A.

Fale EM w próżni.

Zapiszmy równania Maxwella dla obszaru bez ładunków i prądów ($\rho=0$, $\mathbf{J}=0$).

$$\begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{array}$$

Stosując rotację do dwu ostatnich równań a potem pochodną po czasie otrzymamy :

użyliśmy tożsamość

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \Delta \mathbf{E} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

$\mathbf{A} \times \mathbf{B} \times \mathbf{C} = \mathbf{B}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{C}) - \mathbf{C}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})$.

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{B}) - \Delta \mathbf{B} = \nabla \times \left(\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

Ponieważ w przestrzeni bez ładunków $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ i $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

otrzymujemy:

$$\Delta \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

Widzimy, że każda składowa kartezyjska wektorów \mathbf{E} i \mathbf{B}

spełnia równanie falowe typu:

$$\Delta f = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

$$\Delta \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

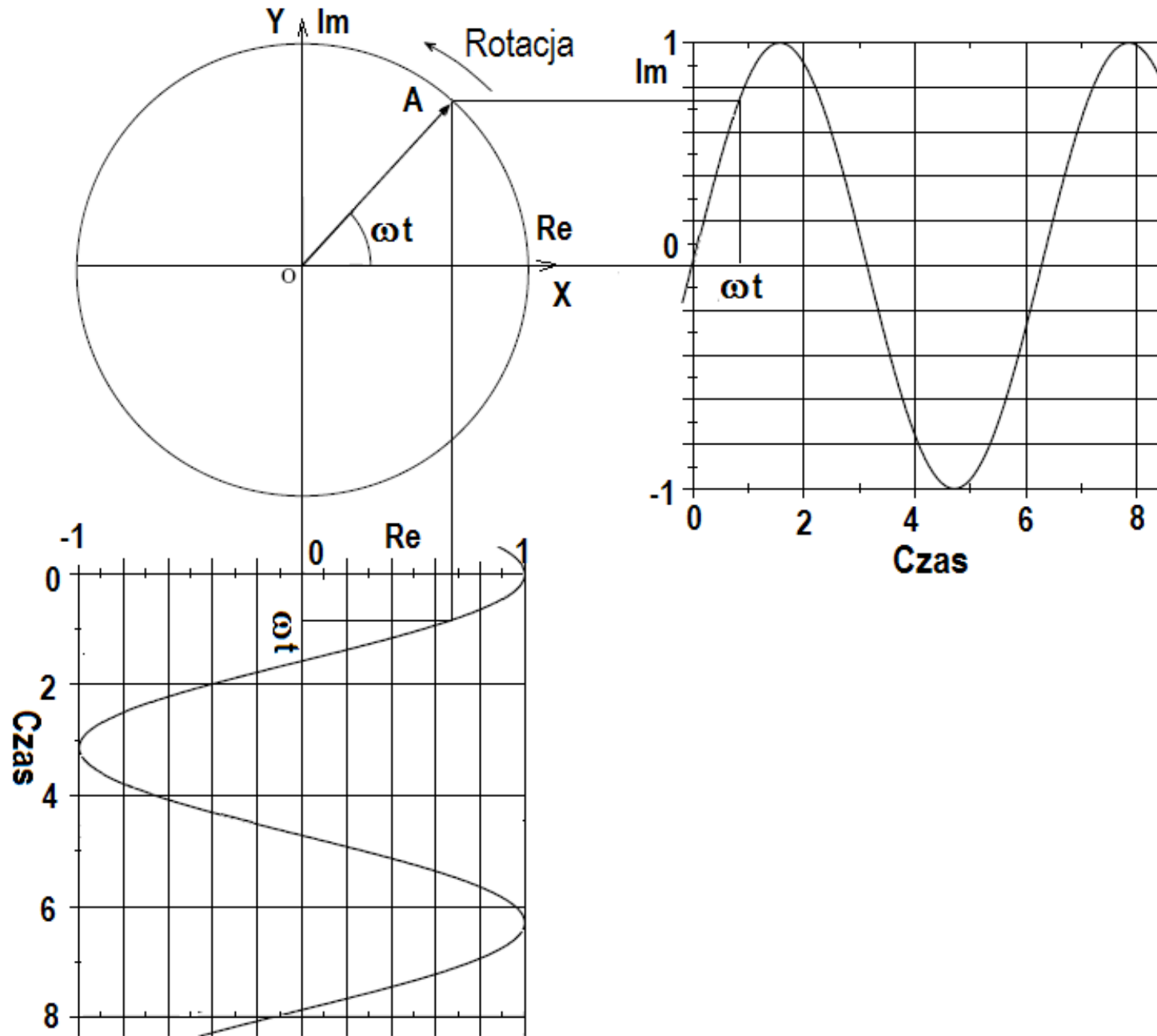
wiemy, że funkcje typu $f = f(\mathbf{z}-v\mathbf{t})$ lub $f = f(\mathbf{z}+v\mathbf{t})$ spełniają takie równania.

Dodatek B. Liczby i funkcje zespolone w elektronice.

Liczby zespolone mają postać dwuskładnikową (zespoloną): $Z = x + jy$. Gdzie $j = \sqrt{-1}$ jest pierwiastkiem kwadratowym z -1 . Taka notacja przypomina zapis położenia punktu na płaszczyźnie przy pomocy dwóch (równoprawnych) współrzędnych: $Z = (x, y)$. W dziedzinie liczb zespolonych jest jednak pewna asymetria np. kwadrat liczby czysto rzeczywistej ($x + j0$) jest wielkością czysto rzeczywistą dodatnią ($x^2 + j0$) a kwadrat liczby czysto urojonej ($0 + jy$) jest wielkością czysto rzeczywistą ujemną ($-y^2 + j0$) bo $j^2 = -1$. Dlatego liczby zespolone traktujemy jako zapis położenia punktu na płaszczyźnie zespolonej. Wielkości zespolone (liczby i funkcje) są wyjątkowo udaną abstrakcją stosowaną w opisie oscylacyjnych przebiegów napięć i prądów w elektryczności oraz elektronice. Dobrym tego przykładem są tzw. wykresy wskazowe, które zastosujemy przy analizie układów RLC zasilanych napięciami sinusoidalnymi. Zapis przebiegów sinusoidalnych w postaci funkcji zespolonych jest niezastąpiony przy analizie zależności amplitudowych i fazowych.

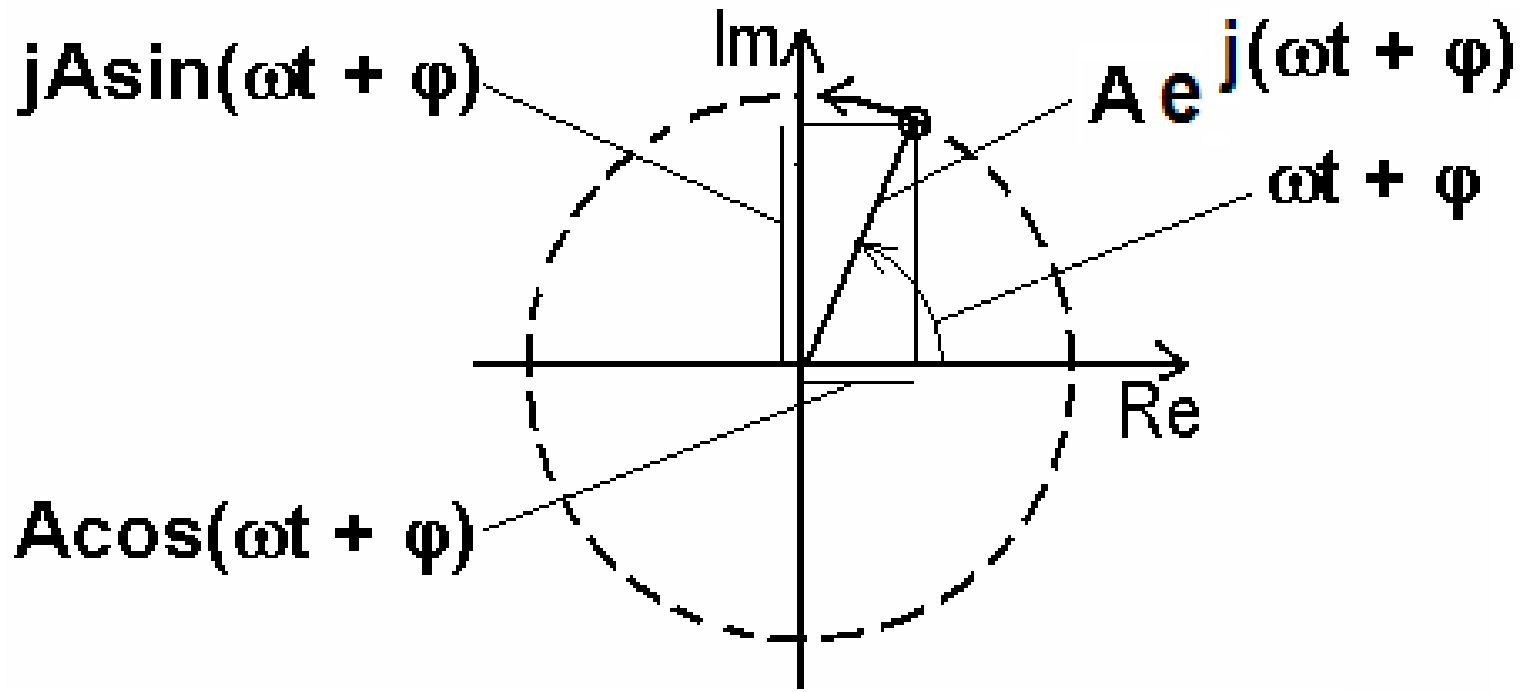
Dodatek B.

Projekcje wirującego wektora

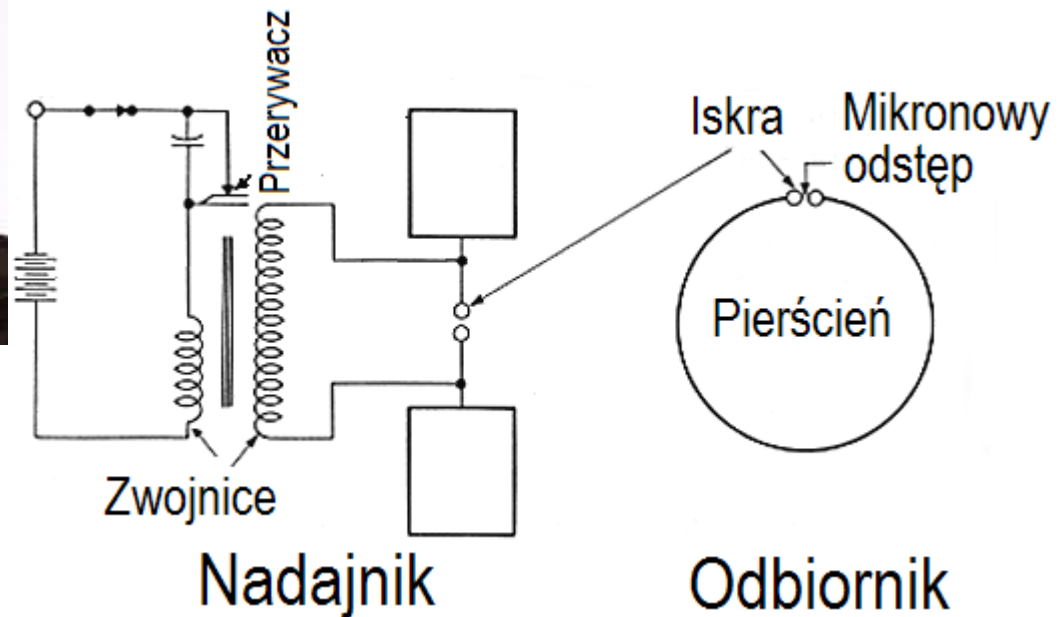
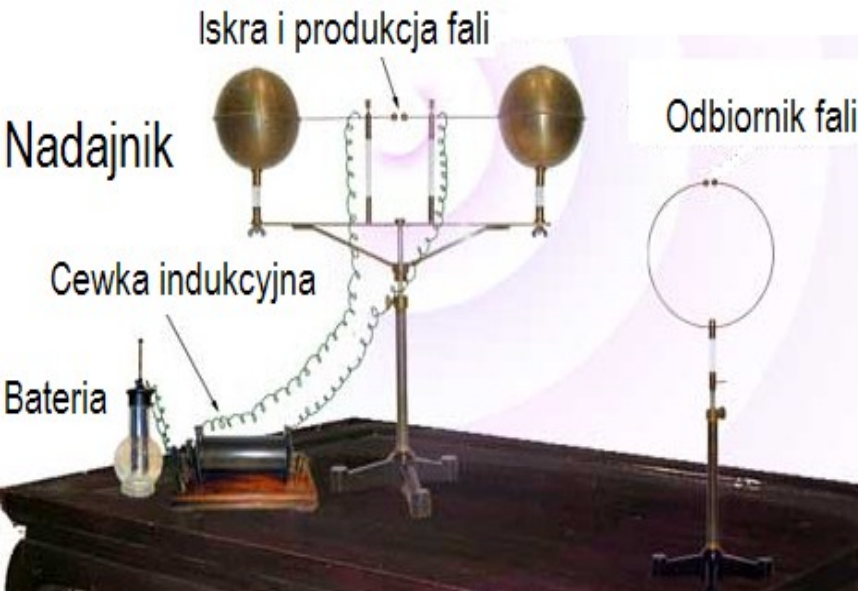


Dodatek B.

Przypomnijmy równość Eulera: $e^{jx} = \cos(x) + j\sin(x)$ oraz równoważność formuł: $\mathbf{A}e^{j(\omega t + \varphi)} = \mathbf{A}(\cos(\omega t + \varphi) + j\sin(\omega t + \varphi))$ z obrazem punktu wirującego na płaszczyźnie zespolonej z prędkością kątową ω - pulsacją. Przykładowo zapis iloczynu $\mathbf{U} = \mathbf{I} \times \mathbf{Z} = \mathbf{I}e^{j(\omega t + \alpha)} \times \mathbf{Z}e^{j\beta} = \mathbf{Z}\mathbf{I}e^{j(\omega t + \alpha + \beta)} = \mathbf{U}e^{j(\omega t + \theta)}$ doskonale ilustruje relacje amplitudowe $U = IZ$ i fazowe $\theta = \alpha + \beta$ oraz zależności faz od czasu: np. faza $\mathbf{U} = \text{argument } \mathbf{U} = \omega t + \theta$.



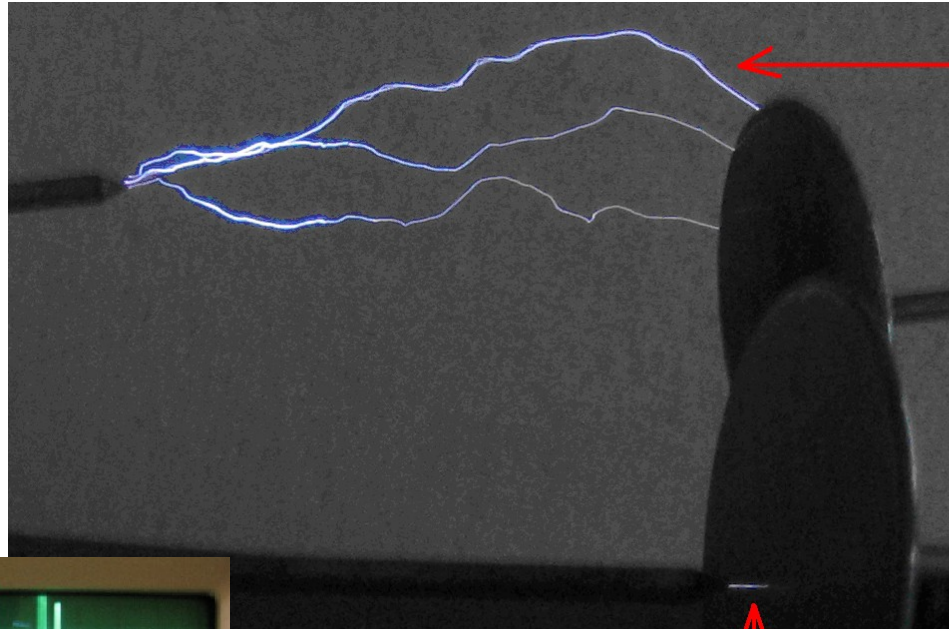
Z równań Maxwella wynika, że istnieją fale elektromagnetyczne o prędkości światła. Tę sensację potwierdził w roku 1888 H.R. Hertz dając początek radiotechnice – poprzedniczce elektroniki.



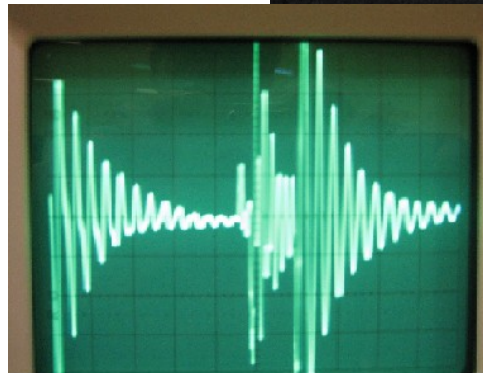
Zanik energii sygnałów elektrycznych

$$\sim 1/r^2$$

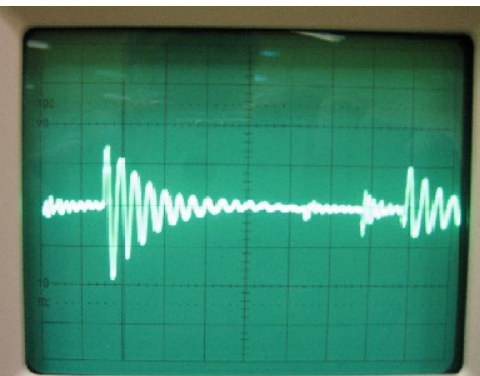
Marconi, jego współpracownicy i wielu innych w okresie 1895 – 1912 r. sądziło, że iskra jest istotnym elementem w bezprzewodowym przekazie energii i komunikacji.



Iskra w nadajniku



Iskra w odbirniku



Amplituda fali elektromagnetycznej maleje z odległością od nadajnika

Podstawowe definicje i prawa w elektronice

Ładunki elektryczne zwykle oznaczamy symbolem q lub Q .

Elektryczny ładunek jednostkowy to 1 C (-1 kulomb $\approx 6.24 \times 10^{18}$ elektronów, elektron posiada ładunek o wartości: $-e = -1.6 \times 10^{-19}$ C). Elektron obdarzony jest ładunkiem przeciwnym do protonu. Przyjęto, że elektron posiada ładunek ujemny a proton dodatni. W zasadzie każdy obiekt materialny może przyjąć określony ładunek elektryczny (stając się naładowanym ujemnie zawierając nadmiar elektronów lub dodatnio przy niedoborze elektronów).

Ciecz Fermiego to „ciecz” złożona z elektronów mogących swobodnie poruszać się w objętości przewodnika. W materiałach przewodzących prąd elektryczny, tj. w przewodnikach, mobilnymi nośnikami ładunku najczęściej są tzw. swobodne elektrony, najslabiej związane i pochodzące z najbardziej zewnętrznych orbitali. Możemy je z dobrym przybliżeniem traktować jako ciecz obdarzoną ładunkiem elektrycznym.

Prąd – ukierunkowany ruch ładunku elektrycznego (symbole: i lub I). Natężenie prądu wyrażane jest w amperach (A) i oznacza szybkość przepływu ładunku przez “coś”. Prąd o natężeniu 1 A oznacza, że przez przekrój jakiegoś elementu w ciągu 1 sekundy przepływa 1 C ładunku.

Napięcie

Napięcie (symbole: U lub E) jest różnicą potencjału elektrycznego między dwoma wybranymi punktami i jest wyrażane w woltach (V), czyli jest pracą przypadającą na jednostkowy (próbny) ładunek: $U[V]_{a-b} = W[J]_{a-b} / Q[C]$, $1V = 1J/C$. Zatem napięcie między dwoma punktami A i B oznacza pracę, która zostanie wykonana nad próbnym ładunkiem przy jego transporcie z B do A podzieloną przez wartość tego ładunku. $U_{EB} = 5 V$ oznacza, że między punktami E i B występuje napięcie $5 V$. Punkt E ma potencjał elektryczny dodatni (lub wyższy) względem punktu B . $U_C = 5 V$ oznacza, że między punktem C a wspólnym punktem odniesienia ("masą") występuje napięcie o wartości $5 V$.

Należy odróżniać napięcia wymuszające prąd czyli siły elektromotoryczne – SEM od spadków napięcia będących skutkiem wymuszania prądu. SEM występuje na zaciskach źródeł energii np. baterii elektrycznych, zasilaczy czy nawet elektrowni (symbole: E lub U). Spadki napięć (symbole: tylko U) to po prostu obniżenia potencjału na elementach zamykających obwód elektryczny poza siłami elektromotorycznymi.

Moc *(czyli tempo wykonywania pracy)*

Moc jest ilością pracy wykonywaną, oddawaną lub pobieraną w jednostce czasu, jest to ilość pracy przypadająca na jednostkę czasu. W elektryczności moc wyraża się zwykle symbolem P , i obliczana jest jako iloczyn napięcia i prądu: $P[\text{W}] = P[\text{J/s}] = U[\text{V}] \cdot I[\text{A}]$. Dla „ U ” w woltach i „ I ” w amperach mamy P w watach $[\text{W}]$. $U[\text{V}] \cdot I[\text{A}]$ jest iloczynem: (praca/ładunek) \cdot (ładunek/czas) = (praca/czas). Gdy kierunek prądu jest zgodny z napięciem danego źródła napięcia (czyli, gdy na zewnątrz źródła ładunek płynie od dodatniego do ujemnego bieguna) to znak mocy jest dodatni i mówimy, że źródło to wykonuje (oddaje pracę). W przeciwnym wypadku moc będzie ujemna, a źródło będzie pobierać pracę (i gromadzić energię). W układach elektronicznych moc wydziela się w postaci ciepła i podnosi temperaturę do momentu uzyskania równowagi cieplnej tj. strumień ciepła odprowadzanego zrównoważy wydzielaną moc. Zbyt wysoka temperatura równowagi często bywa przyczyną uszkodzeń elementów elektronicznych. Zatem nie powinny nas dziwić liczne wiatraki we współczesnych systemach cyfrowych.

Rezystancja

Rezystancja, czasem zwana opornością lub oporem czynnym, symbol **R**, jednostka Ω - Ohm, jest miarą utrudniania przepływu prądu. **Konduktancja** zwana też przewodnością, symbol **G**, jednostka **S** – Simens, jest odwrotnością rezystancji $\mathbf{G} = \mathbf{R}^{-1}$.

(W literaturze zachodniej można spotkać jednostki konduktancji jako „mho” – odwrotność do Ohm: *L.P. Huelsman „Basic Circuit Theory*)

Prawo Ohma: $I = U/R$ (lub $I = GU$) - natężenie prądu **I** w elemencie obwodu elektrycznego jest wprost proporcjonalne do napięcia **U** między końcami (zaciskami) tego elementu.

Rezystancja między określonymi punktami obwodu to stosunek napięcia do natężenia prądu między tymi punktami $\mathbf{R}[\Omega] = \mathbf{U}[\text{V}]/\mathbf{I}[\text{A}]$, konduktancja to $\mathbf{G}[\text{S}] = \mathbf{I}[\text{A}]/\mathbf{U}[\text{V}]$. Szybkość wydzielania się ciepła przy zadanym prądzie: $\mathbf{P} = \mathbf{IU} = \mathbf{I}^2\mathbf{R}$, a przy zadanym napięciu $\mathbf{P} = \mathbf{IU} = \mathbf{U}^2\mathbf{G}$. Materiały lub elementy spełniające prawo Ohma, czyli wykazujące proporcjonalność prądu do napięcia, nazywamy omowymi lub liniowymi. **Prawo Ohma** jest idealizacją, która nie uwzględnia takich zjawisk jak np. zmiana oporności wywołana zmianą natężenia pola elektrycznego czy natężenia prądu.

Rezystancja statyczna i dynamiczna

Wiele elementów wyróżnia specyficzna nieliniowa zależność prądu od przyłożonego napięcia (np. **żarówka lub dioda**). Elementy takie nazywamy nieliniowymi lub nieohmowymi i przy ich opisie posługujemy się pojęciami oporu statycznego R i oporu dynamicznego r_d .

Oporność statyczną definiujemy jako stosunek napięcia do prądu w danym punkcie zależności (charakterystyki) między napięciem i prądem danego elementu:

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

Oporność dynamiczną (zwaną też opornością przyrostową lub małosygnałową) danego elementu definiujemy jako pochodną:

$$r_d = \frac{dU}{dI}$$

Generalnie rezystancja dynamiczna (stosunek przyrostów napięcia i prądu) dowolnego elementu różni się od rezystancji zwanej też rezystancją statyczną (stosunek napięcia do prądu). Równość między tymi wielkościami zachodzi tylko dla oporników idealnych czyli idealnie spełniających prawo Ohma.

Wartość pochodnej dU/dI , dla elementów o nieliniowej zależności między natężeniem prądu i przyłożonym napięciem, zależy od aktualnej wartości przyłożonego napięcia. Zatem oporność dynamiczna nie jest wartością stałą tak jak nie jest wartością stałą nachylenie charakterystyki prądowo napięciowej tego elementu. Wartość r_d może dodatkowo zależeć od wielu czynników takich jak, czas, temperatura itp..

Ważnym jednak jest dostrzeżenie faktu, że nieliniową zależność można rozłożyć na małe „kawałki” liniowych zależności i dla małych przyrostów napięć (i prądów) korzystać z równań liniowych.

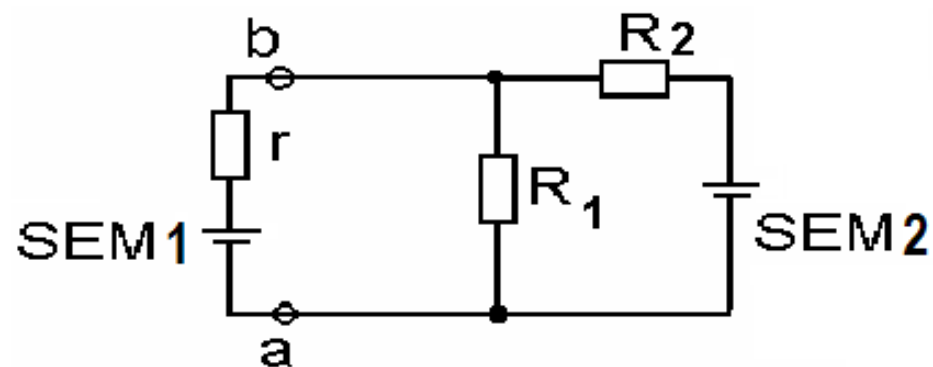
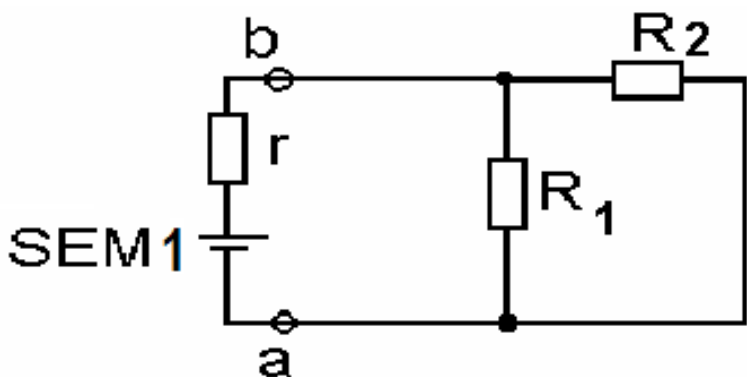
Podział elementów elektrycznych (i elektronicznych) na liniowe i nieliniowe

Do elementów liniowych zaliczamy takie, które wykazują proporcjonalność między „przyczynami” a „skutkami”, (przynajmniej w pewnym interesującym zakresie) i można je składać bez utraty tej proporcjonalności. Przykładowo idealny rezystor jest elementem liniowym bo płynący przez niego prąd (skutek) jest proporcjonalny do przyłożonego doń napięcia (przyczyny), a współczynnikiem proporcjonalności jest tu $1/R$ (zgodnie z prawem Ohma). Połączone rezystory można zastąpić jednym rezystorem zastępczym. Wiemy, że w praktyce przyłożenie zbyt dużego napięcia do rezystora powoduje utratę powyższej proporcjonalności a nawet zniszczenia samego rezystora. Mimo podobnych efektów (braku idealnej liniowości) wiele elementów traktujemy jako liniowe gdyż obwody złożone z elementów liniowych są łatwe do obliczeń przy pomocy układów równań liniowych. Bez wahania za elementy liniowe uznamy i takie, dla których współczynnik proporcjonalności jest liczbą zespoloną (jak zobaczymy: kondensatory i cewki)!

Do elementów nieliniowych zaliczamy te, które powyższej proporcjonalności nie wykazują. Przy rozwiązywaniu obwodów z takimi elementami konieczne będą inne sposoby, np. metody graficzne.

Połączenia szeregowe i równoległe

O tym czy rezystory (lub inne elementy) są połączone szeregowo lub równoległe nie decyduje ułożenie symboli tych elementów na schemacie lecz to jak rozplywa się ładunek elektryczny gdy w danym układzie płynie prąd wymuszany źródłem napięcia. Jeżeli prąd w tym układzie cyrkuluje w taki sposób, że ładunek przepływa najpierw przez jeden a następnie przez drugi rezystor to mamy do czynienia z połączeniem szeregowym. Równoległe połączenie ma miejsce wtedy, gdy ładunek rozdziela się (rozplywa) na dwa lub więcej strumieni (dróg) by po pokonaniu pewnych odcinków z powrotem złąć się w jeden strumień. Na poniższym lewym rysunku rezystory R_1 i R_2 są połączone równoległe, natomiast r jest do nich obu połączony szeregowo. Taki jest „punkt widzenia” źródła napięcia SEM1! Gdyby w tym układzie wstawić nowe, dodatkowe wymuszanie np. SEM2 tak jak na prawym rysunku to z „punktu widzenia” SEM2 rezystancje r i R_1 okazują się być połączonymi równoległe a R_2 do nich szeregowo.



I prawo Kirchhoffa - prądowe prawo Kirchhoffa

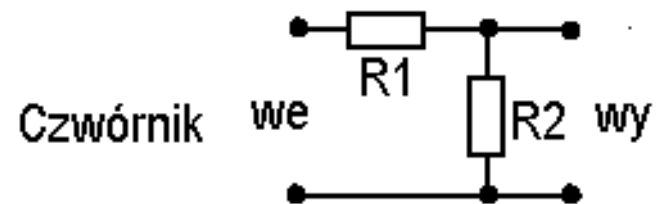
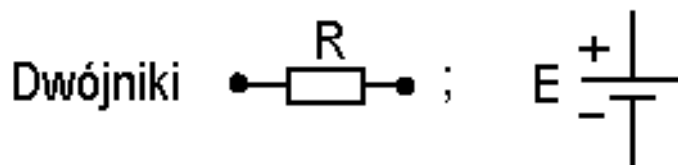
Suma prądów wpływających do danego węzła jest równa sumie prądów wypływających z niego. Prawo to wynika z zasady zachowania ładunku i stosuje się tylko do węzłów o stałej ilości ładunku (tj. nie zmieniających swojego potencjału elektrycznego).

II prawo Kirchhoffa - napięciowe prawo Kirchhoffa.

W dowolnym układzie suma spadków napięcia i sił elektromotorycznych (ogólnie skoków potencjału) na elementach połączonych w zamknięty obwód równa się zeru. Inaczej: na elementach połączonych równolegle występuje to samo napięcie. Lub: suma spadków napięcia między punktami A i B układu, obliczana dla jednej drogi między tymi punktami, jest równa sumie spadków napięcia dla każdej innej drogi i równa się napięciu między A i B.

Drugie prawo Kirchhoffa opiera się na stwierdzeniu, że potencjał przewodnika w dowolnym punkcie względem wybranego potencjału odniesienia jest jednoznaczna funkcją tego punktu. Zatem po obejściu dowolnego obwodu, wracając do punktu początkowego wracamy zarazem do potencjału początkowego. Prawo to stosuje się dla obwodów, przez które nie przenika gwałtownie zmieniający się strumień pola magnetycznego. (Czyli tam gdzie równanie Maxwella $\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ można zastąpić przez: $\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0}$)

Układy o stałych skupionych zawierają elementy zlokalizowane (dyskretne), tj. małe w porównaniu z długością fal prądów, na których pracują. Długość fali przy częstotliwości 100MHz wynosi około 3 m zatem przy częstotliwościach niższych rozmiary zwykłych układów z opornikami, kondensatorami itp. są układami o stałych skupionych. Zazwyczaj będziemy omawiać obwody z elementami dyskretnymi czyli takie obwody, w których impedancje poszczególnych elementów będą zlokalizowane i odseparowane od siebie. Sytuacja taka ma miejsce gdy mamy do czynienia z napięciami i prądami stałymi oraz powoli zmiennymi tj. o małych częstotliwościach. Wówczas rozmiary elementów nie są istotne a na przewodach łączących te elementy mamy tak małe różnice potencjałów, że je zaniedbujemy. Można z powodzeniem stosować klasyczną teorię obwodów i odpowiednie abstrakcje. Wśród elementów skupionych wyróżniamy dwójniki – elementy o dwóch zaciskach (np. rezystory) oraz czwórniki – elementy o czterech zaciskach (np. dzielniki napięcia). W czwórnikach zwykle mamy dwa zaciski wejściowe (na które np. można przykładać napięcie, sygnał) i dwa zaciski wyjściowe gdzie można „odebrać” wynik działania czwórnika (ułamek napięcia wejściowego czy przetworzony sygnał wejściowy). Przykłady dwójnika i czwórnika:



Układy o stałych rozłożonych to układy, w których ciągły (nie punktowy) rozkład pojemności, indukcyjności czy rezystancji staje się istotny (np. długie kable albo obwody z sygnałami o gigahercowych częstotliwościach f , gdzie długości fali λ stają się porównywalne z rozmiarami obwodów elektrycznych). Wiadomo, że długość fali = (prędkość fali)/częstotliwość, $\lambda = v/f$. Prędkość fali v w danym ośrodku zwykle jest nieco mniejsza od prędkości światła c , $v = c / \sqrt{\epsilon\mu}$. W przybliżeniu zatem $\lambda \approx 3 \times 10^8 [\text{m/s}] / f [\text{Hz}]$. W technice mikrofalowej przedział 0,3 – 1000 GHz odpowiada falom o długości 1m do 0,3 mm i rozmiary elementów tej techniki są współmierne z długościami fal na których pracują. W sytuacjach gdy mamy do czynienia ze stałymi rozłożonymi należy posługiwać się wielkościami R , L i C przypadającymi na jednostkę długości: $R' [\Omega/\text{m}]$, $L' [\text{H}/\text{m}]$ i $C' [\text{F}/\text{m}]$. Często obserwujemy efekty odbicia fal na końcach kabli oraz wielokrotne nakładanie się fal odbitych. Tu dopasowanie obciążeń do charakterystycznej impedancji kabli jest problemem fundamentalnym. Generalnie przy wyższych częstotliwościach teoria obwodów traci zastosowanie, dobry opis daje teoria pola elektromagnetycznego.

Sygnaly. Ogólnie sygnałem może być dowolna zmiana dowolnej wielkości fizycznej. W elektronice istotnymi sygnałami są: zmiany ładunku elektrycznego, napięcia, prądu oraz pola elektromagnetycznego.

Klasyfikacje sygnałów elektrycznych

- 1) Sygnały: a) stochastyczne (losowe), b) deterministyczne.
- 2) Sygnały: a) jednowymiarowe, b) wielowymiarowe.
- 3) Sygnały: a) periodyczne, b) nieperiodyczne.
- 4) Sygnały zmodulowane: a) m. amplitudy, b) m. częstotliwości, c) m. fazy.
- 5) Sygnały impulsowe i skokowe.
- 6) Szумы – wszelkie zakłócenia sygnału użytecznego.

Wartość skuteczna (ang. **RMS** = root mean square).

Wartości skuteczne periodycznych napięć i prądów zdefiniowane są jako:

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{\int_0^T u^2(t) dt}{T}}$$
$$I_{sk} = \sqrt{\frac{\int_0^T i^2(t) dt}{T}}$$

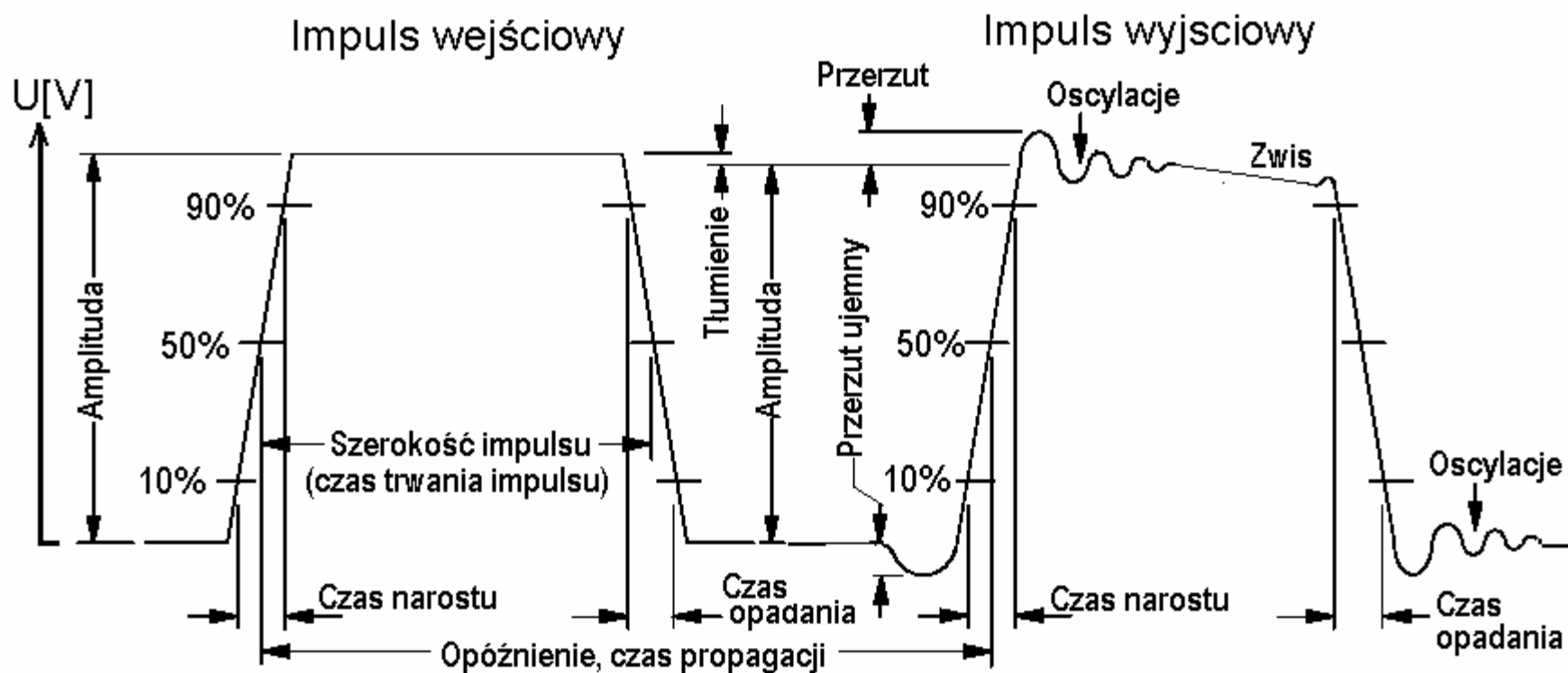
U_{sk} (danego U) to taka wartość, że napięcie stałe o tej wartości, w czasie T , $n \cdot T$ lub w bardzo długim okresie czasu, zapewnia identyczny skutek jak samo U – czyli identyczną ilość energii w odbiorniku. To samo dotyczy I_{sk} .

I_{sk} oraz samo I skutkują tą samą ilością energii

w czasie T , $n \cdot T$ lub bardzo długim okresie czasu.

Dla przebiegów sinusoidalnych wartość skuteczna jest pierwiastek z 2 razy mniejsza od amplitudy. Wartości skuteczne używamy do obliczeń energii lub mocy. Mierniki napięć i prądów zwykle pokazują wartości skuteczne.

Parametry transmitowanego impulsu elektrycznego



Zakłócenie szumem



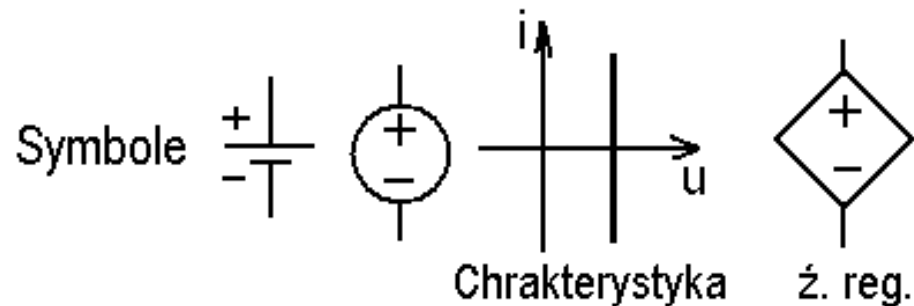
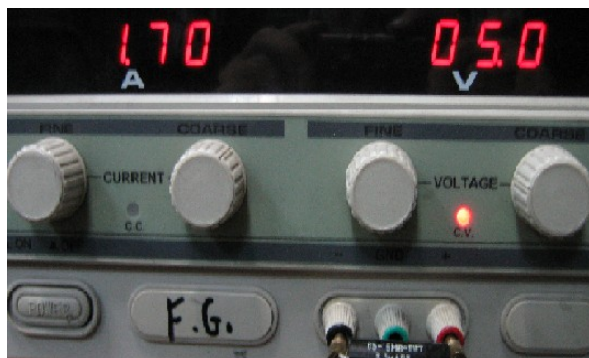
Impuls elektryczny - to składnik sygnałów w układach cyfrowych, komputerach, telekomunikacji itp.

Dodatek C. Decybel

Decybel to jednostka logarytmiczna. $1B = \log_{10}(P/P_0)$, $1dB = 0,1B$. Decybele służą do porównania dwóch sygnałów (oczywiście o identycznych jednostkach) i wyrażają ich logarytmiczny stosunek. Decybele stosujemy przede wszystkim w akustyce (tam gdzie reakcja układu biologicznego jest proporcjonalna do logarytmu natężenia bodźca). Stosujemy je również w elektronice. W przypadku porównywania amplitud mocy obowiązuje: $k_p[dB] = 10\log_{10}(P_2/P_1)$. Dla napięciowych lub prądowych amplitud mamy: $k_A[dB] = 20\log_{10}(A_2/A_1)$ bo $10\log_{10}(A_2^2/A_1^2) = 10\log_{10}(A_2/A_1)^2 = 20\log_{10}(A_2/A_1)$. Przy porównywaniu sygnałów o różnych przebiegach np. sygnału sinusoidalnego i szumu bierzemy wartości RMS czyli wartości skuteczne. Czasem wyrażamy daną wielkość odniesioną do wzorca lub wartości progowej np. 1V, lub w akustyce $20\mu P$ jako próg słyszalności (120dB oznacza $20\ 000\ 000\ \mu P$). Jako wartości odniesienia można spotkać napięcia zapewniające wydzielanie mocy 1mW na standardowej oporności $50\ \Omega$ lub $600\ \Omega$. Wartości skuteczne napięć wyrażone jako "0 dBm" (m oznacza mW) wynoszą odpowiednio 0.22V dla obciążenia $50\ \Omega$ i 0.78V dla $600\ \Omega$).

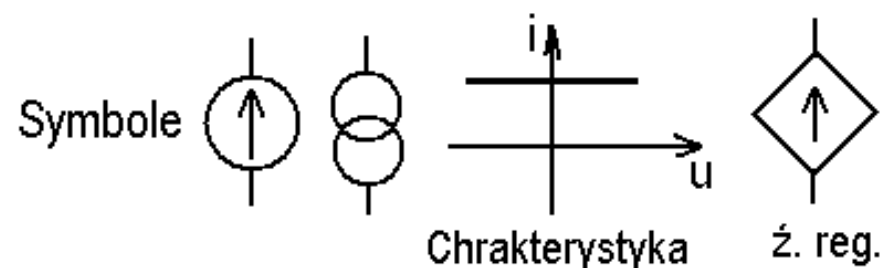
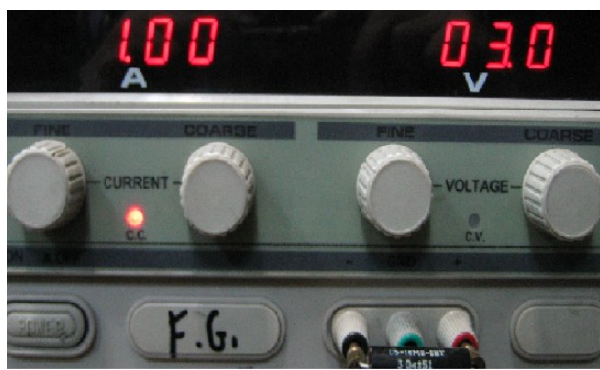
Źródło napięciowe

Idealne źródło napięciowe jest dwójnikiem, na którego zaciskach występuje stała różnica potencjałów niezależnie od natężenia i kierunku prądu. W szczególności napięcie takiego źródła nie zależy od wartości rezystancji obciążenia. Rzeczywiste źródło napięciowe zachowuje się jak idealne źródło napięciowe z szeregowo połączonym rezystorem o małej wartości rezystancji. Ogniwo elektryczne, baterię, akumulator można uważać za przybliżone źródła napięciowe.



Źródło prądowe

Idealne źródło prądowe jest dwójnikiem, który wymusza prąd o stałym natężeniu w dołączonym obwodzie, niezależnie od wartości napięcia na jego zaciskach. Rzeczywiste źródło prądowe charakteryzuje się pewną graniczną wartością napięcia wyjściowego a wydajność prądowa jest tylko w przybliżeniu stała.

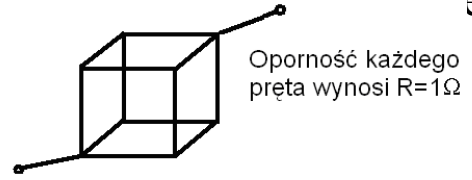


Elektronika – Lista 1.

1) Jaki ładunek zostanie przeniesiony prądem elektrycznym o natężeniu 1 A w ciągu 10 min? Jak długo musi trwać prąd o natężeniu 1 mA aby przenieść identyczny ładunek? Przy jakim napięciu ma się to odbywać aby energia przekazana przez źródło napięcia wyniosła 6 kJ? Jaką rezystancję powinien mieć odbiornik tej energii?

2) Wyprowadzić wzór na rezystancję zastępczą dwóch rezystorów połączonek: a) szeregowo, b) równoległe.

3) Oblicz rezystancją zastępczą układu:



4) Mając do dyspozycji oporniki o wartościach rezystancji 10Ω i 100Ω na moc nominalną $0,5\text{ W}$. Zaproponuj tani układ złożony z tych oporników mający rezystancję 60Ω i moc nominalną conajmniej 1 W .

5) Wyprowadzić wzór na wartość skuteczną napięcia sinusoidalnego o amplitudzie A .

6) Oblicz amplitudę oraz wartość średnią napięcia w sieci 240 V .

7) Pewien element pod wpływem przykładanego napięcia przepuszczał przez siebie prąd w taki sposób, że zwiększenie napięcia o 1 V zwiększało prąd o 1 A . Po przekroczeniu 10 V prąd przestał się zmieniać a po przekroczeniu 20 V zaczął maleć według zależności $I = 10e^{-(U-20V)}\text{ [A]}$. Przedstaw zależność rezystancji dynamicznej od napięcia. Czy ten element spełnia prawo Ohma?

8) Oblicz siłę działającą na kawałek przewodu o długości $0,1\text{ m}$ z prądem o natężeniu 5 A umieszczonym pod kątem 80° do wektora pola magnetycznego B o wartości 2 T (przyjąć, że $\sin 80^\circ = 0,985$).

9) Oblicz natężenia wszystkich prądów elektrycznych w podanym obwodzie.

