

# Podstawy Elektrotechniki i Elektroniki

## część 2

dr hab. inż. Stanisław Hałgas, prof. PŁ



# Wprowadzenie

## Wiadomości wstępne

Każde **urządzenie elektryczne i elektroniczne** składa się z pewnej liczby odpowiednio połączonych **modułów** (rys. 1).

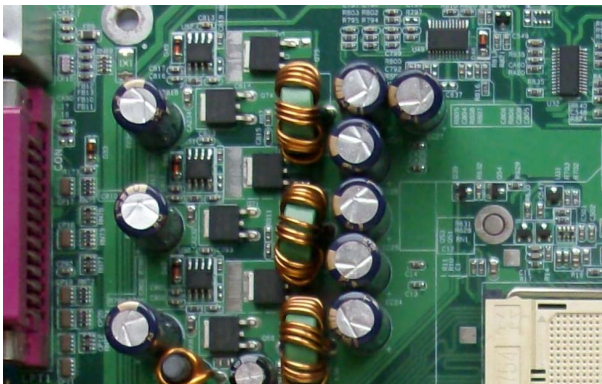


Rys. 1: Budowa typowego komputera klasy PC

## Wprowadzenie

### Wiadomości wstępne

Moduły z kolei złożone są z wielu **elementów** (rys. 2).



Rys. 2: Zdjęcie fragmentu płyty głównej

# Wprowadzenie

## Element obwodu

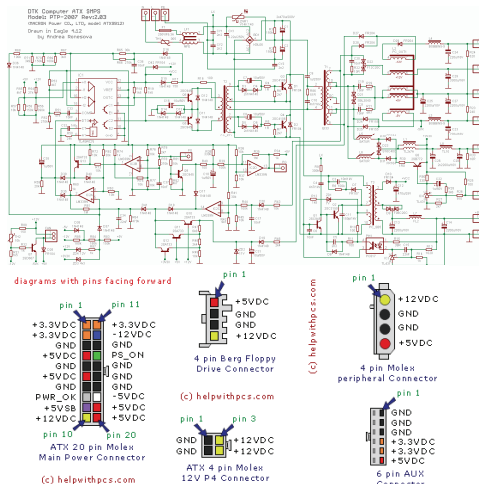
- **Element obwodu** – model pewnego zjawiska lub cechy fizycznej związanej z obwodem elektrycznym.
- Elementy obwodów dwu- lub więcej końcówkowe (zaciskowe) łączymy **przewodami**, na ogół idealnie przewodzącymi (rezystancja zerowa).
- **Przykłady elementów**: opornik, kondensator, cewka, tranzystor, wzmacniacz operacyjny, źródło napięcia i prądu.
- **Każdy element** — rezystor liniowy, cewka liniowa, kondensator liniowy — **model tylko jednej cechy fizycznej** (opór, indukcyjność, pojemność), z pominięciem cech pozostałych.

# Wprowadzenie

## Schemat obwodu

- **Schemat obwodu** – graficzny obraz obwodu pokazujący połączenie elementów reprezentowanych za pomocą odpowiednich symboli.
- Elementy dwukońcówkowe wyznaczają **gałęzie** obwodu, zaś punkty, w których łączą się dwie lub więcej gałęzi to **węzły** i oznaczane za pomocą kropki.

# Schemat zasilacza komputerowego klasy ATX

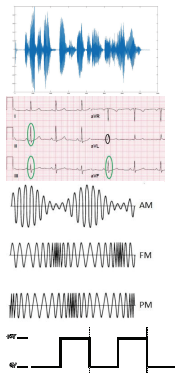


Rys. 3: Schemat zasilacza klasy ATX

# Wprowadzenie

## Sygnał

- **Sygnał** – pewna funkcja jednej lub więcej zmiennych niezależnych.
- Rozważane będą tylko sygnały jednej zmiennej – czasu.



Rys. 4: Różne rodzaje sygnałów

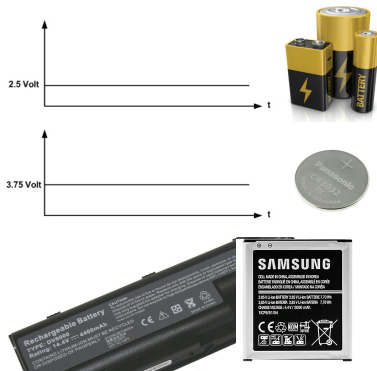
# Wprowadzenie

## Sygnał

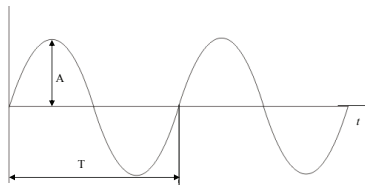
- **Przykładowe sygnały:** napięcie i prąd w obwodzie elektrycznym, sygnał mowy, zmiany ciśnienia atmosferycznego, temperatury itp.
- **Sygnał ciągły** – sygnał określony w każdej chwili czasu.
- **Sygnał dyskretny** – sygnał określony w dyskretnych chwilach czasu (np. liczba telefonów komórkowych sprzedawanych w sklepie każdego dnia).
- **Sygnały ciągle spotykane w praktyce:** sygnałami stały (rys. 5), sinusoidalnie zmienny (rys. 6), okresowo zmienny (np. trójkątny, piłokształtny).



## Przykłady sygnałów



Rys. 5: Sygnał stały w czasie i przykładowe jego źródła



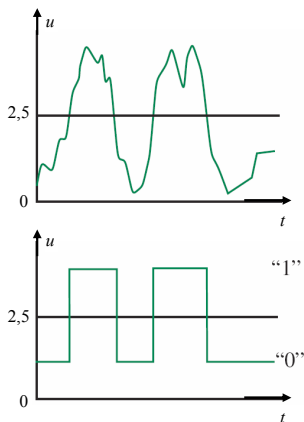
Rys. 6: Sygnał sinusoidalny

# Wprowadzenie

## Sygnał cyfrowy

- **Proces kwantyzacji** wartości sygnału – podstawa tzw. przetwarzania cyfrowego (cyfrowej abstrakcji)
- **Główna zaleta:** większa odporność na zakłócenia w porównaniu do sygnału analogowego.
- Ilustracja dyskretyzacji wartości – sygnał napięciowy pokazany na rys. 7.

# Wprowadzenie



Rys. 7: Przykład dyskretyzacji napięcia

- Kwantyzacja dwupoziomowa: dwa poziomy o nazwie „0” i „1”
- **Napięcie poniżej 2,5 V – interpretacja poziom informacji „0”** – dowolne napięcie o wartości mniejszej niż 2,5 V (np. 1,25 V)
- **Napięcie powyżej 2,5 V – interpretacja poziom informacji „1”** – dowolne napięcie o wartości powyżej 2,5 V (np. 3,75 V)
- **Reprezentacja binarna** – rodzaj dyskretyzacji dwupoziomowej.
- **Reprezentacja cyfrowa obecnie synonim reprezentacji binarnej.**

# Wprowadzenie

## Prąd

- **Prąd elektryczny** – ruch ładunków elektrycznych
- **Prąd stały** (ang. dc) – ładunki przemieszczają się w jednym kierunku.
- **Prąd zmienny** (ang. ac) – ładunki przemieszczają się tam i z powrotem.
- Sygnał prądowy może być też inną funkcją czasu (np. wykładniczą).

# Wprowadzenie

## Napięcie

- **Prądy są mierzone jako płynące przez element obwodu** – prawidłowe jest stwierdzenie, że prąd przez rezystor wynosi 10 A.
- **Napięcia mierzone są na elementach** – prawidłowe jest stwierdzenie, że napięcie na rezystorze (jego zaciskach) wynosi 12 V.
- **Napięcia są zawsze mierzone w odniesieniu do czegoś** – np. napięcie dodatniego zacisku baterii to „tyle i tyle woltów” w odniesieniu do ujemnego zacisku.
- ***Punkt odniesienia dla napięć w obwodzie jest często oznaczony symbolem masy, odniesienia, uziemienia, potocznie ziemi (ang. ground).***
- Jeżeli na schemacie jest obecny symbol uziemienia, powinno uważać się go za punkt odniesienia, w którym napięcie jest określone jako zerowe.

# Wprowadzenie

## Napięcie

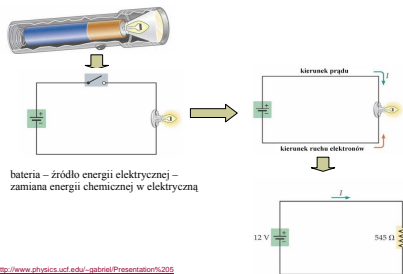
- **Typowe wartości napięć stałych** spotykanych w życiu codziennym:
  - ① 1,5 V (baterie typu AAA oraz AA),
  - ② 3 V (np. baterie 2032),
  - ③ 9 V (bateria 6F22)
  - ④ napięcia: +12 V, -12 V, +5 V, +3,3 V z zasilacza komputerowego.
- Wartość skuteczna napięcia sinusoidalnie zmiennego wykorzystywanego w gospodarstwach indywidualnych wynosi 230 V, a jego częstotliwość 50 Hz.

# Problem modelowania rzeczywistości

## Obwody i elementy skupione

- **W postępowaniu inżynierskim często rozwiązywane są problemy na pewnym poziomie abstrakcji.** – pozwala to na płynne przejście od ścisłej nauki do inżynierii i pominięcie przez inżyniera naukowych drobiazgów odgrywających drugorzędną rolę w danym zastosowaniu.
- **Traktowanie elementów jako dyskretne (skupione) jest podstawowym poziomem abstrakcji w klasycznej teorii obwodów** – polega na przypisaniu pojedynczej wartości każdemu elementowi, ignorując rozkład wartości wewnątrz elementu.

## Problem modelowania rzeczywistości



<http://www.physics.ucf.edu/~gabriel/Presentation%205.pdf>

Rys. 8: Typowy proces modelowania obiektu fizycznego

- Prosty obwód składający się z baterii, przewodów, przełącznika i tradycyjnej żarówki pokazany na rys. 8.
- Bateria dostarcza energię potrzebną do wymuszenia ruchu elektronów w pętli, nagrzewania włókna żarówki – żarówka emituje dużo ciepła i trochę światła.
- Energia przenoszona jest ze źródła, czyli baterii, do obciążenia, czyli żarówki.
- **Jaki prąd płynie przez żarówkę???**





- Żaden prąd nie płynie, dopóki wyłącznik nie zostanie zamknięty.
- Przybliżenie polega na zastąpieniu (modelowaniu) żarówki (elementu nieliniowego) rezystorem liniowym o wartości  $545\ \Omega$ , pominięciu rezystancji wewnętrznej baterii, rezystancji wyłącznika i rezystancji przewodów.
- Przy takich założeniach,  

$$i = \frac{12}{545} = 22\text{ mA} - \text{z prawa Ohma.}$$

# Problem modelowania rzeczywistości

## Obwody i elementy skupione

- **Obwody o parametrach skupionych** zbudowane są z elementów skupionych (dyskretnych) połączonych idealnymi przewodami.
- Założenie o obwodzie, że jest obwodem skupionym – **fundamentalne założenie umożliwiające przeniesienie obliczeń układów elektrycznych z dziedziny fizyki do dziedziny inżynierii** zwanej teorią obwodów (elektrotechniką).
- Z punktu widzenia fizyki muszą być spełnione prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej jest pomijana, czyli pomijane są efekty opóźnień w przepływie sygnału (innymi słowy: reakcja na pobudzenie jest natychmiastowa w każdym punkcie układu).

## Obwody o parametrach rozłożonych

Analiza układu, w którym wykorzystywane są sygnały o okresach porównywalnych z czasem propagacji fali – nie można skorzystać z omawianego poziomu abstrakcji (czyli analizować obwodów skupionych) – tzw. **układy o parametrach rozłożonych** – prawa i narzędzia matematyczne z zakresu teorii pola elektromagnetycznego.

# Kierunki odniesienia

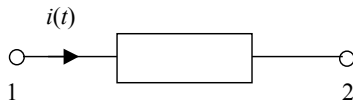
## Kierunki odniesienia

- W obwodach elektrycznych rozpatruje się *napięcia pomiędzy węzłami* oraz *prądy płynące w gałęziach*.
- Na ogół zarówno napięcia, jak i prądy zmieniają się w czasie, a ich kształty mogą być różnorodne (napięcie/prąd stały, sinusoidalnie zmienny, przebiegi odkształcone itp.).
- Z tego powodu ogólnie nie jest możliwe określenie rzeczywistego kierunku przepływu prądu oraz biegunowości napięcia.
- Konieczne jest więc przyjęcie pewnych **kierunków odniesienia**.

## Kierunki odniesienia

## Kierunki odniesienia

Dla każdego prądu przyjmuje się *kierunek odniesienia* zaznaczony za pomocą strzałki.



Rys. 10: Gałąź obwodu z zaznaczoną strzałką kierunku odniesienia prądu

$$i(t_1) = 1,6 \text{ A}$$

w rozpatrywanej chwili prąd równy 1,6 A płynie zgodnie ze strzałką

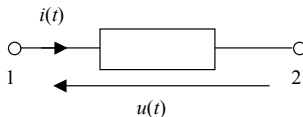
$$i(t_2) = -0,2 \text{ A}$$

w rozpatrywanej chwili prąd płynie w kierunku przeciwnym do wskazanego przez strzałkę

## Kierunki odniesienia

Znajomość znaku i wartości prądu w danej chwili oraz kierunku odniesienia umożliwia jednoznaczne określenie rzeczywistego prądu w tej chwili.

## Kierunki odniesienia



Rys. 11: Gałąź obwodu z zaznaczonymi strzałkami kierunku odniesienia prądu i napięcia

$$u(t_1) = 12 \text{ V}$$

w rozpatrywanej chwili potencjał elektryczny zacisku 1 jest o 12V większy niż potencjał zacisku 2

$$u(t_2) = -6 \text{ V}$$

w chwili  $t_2$  potencjał zacisku 1 jest o 6 V mniejszy od potencjału zacisku 2

## Kierunki odniesienia

Napięcie  $u(t)$  wzdłuż elementu – napięcie gałęziowe

# Kierunki odniesienia

## Kierunki odniesienia

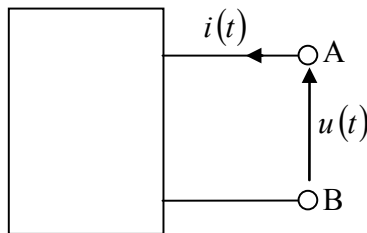
- Jeżeli strzałki prądu  $i$  i napięcia mają przeciwne zwroty – prąd  $i$  i napięcie mają **stowarzyszone kierunki odniesienia**.
- Często zastępujemy zwrot kierunku odniesienia prądu lub napięcia zwrotem uproszczonym: **kierunek prądu lub napięcia**.
- Jeżeli napięcie  $u$  oraz prąd  $i$  dla elementu są określone zgodnie z tą konwencją, moc chwilowa w elemencie jest dodatnia, gdy obie wielkości  $u$  oraz  $i$  są dodatnie.
- W zależności od rodzaju elementu, energia jest rozpraszana (np. rezystor liniowy) lub przechowywana (np. kondensator).

## Moc i energia

## Moc i energia

Rozpatrujemy obwody 2–końcówkowe, zwane dwójnikami.

**Dwójnik**– pojedynczy element 2–końcówkowy lub połączenie elementów, z których wyprowadzono na zewnątrz dwie końcówki.



Rys. 12: Dwójnik z oznaczeniem napięcia i prądu

# Moc chwilowa

## Moc chwilowa

Moc chwilowa dwójnika – iloczyn napięcia  $u(t)$  oraz prądu  $i(t)$ .

$$p(t) = u(t) i(t). \quad (1)$$

$$1\text{W} = 1\text{VA}$$

- Przy standardowym ostrzałkowaniu prądu i napięcia moc ta jest mocą pobieraną przez element z otoczenia
- Jeżeli w chwili  $t_0$ :  $p(t_0) > 0$  — moc w tej chwili jest pobierana przez element.
- Jeżeli w chwili  $t_0$ :  $p(t_0) < 0$  — moc w tej chwili jest oddawana przez element do otoczenia.



# Źródła napięcia stałego

## Źródła napięcia stałego

- **Baterie (akumulatory)** do: telefonów komórkowych, laptopów, latarek, zegarków, kalkulatorów, nadajników zdalnego sterowania (pilotów), akumulatory samochodowe – powszechnie wykorzystywane w życiu codziennym.
- **Bateria – źródło energii elektrycznej, pochodzącej z wewnętrznej reakcji chemicznej.**
- Na rynku dostępne są dwa rodzaje źródeł: **baterie pierwotne i odnawialne (akumulatory).**

# Źródła napięcia stałego

## Baterie pierwotne

- **Bateria pierwotna – budowa umożliwia całkowite rozładowanie tylko raz.**
- Często baterie pierwotne są zbudowane z materiałów używanych w produkcji baterii odnawialnych – ich konstrukcja i proces produkcji jest zupełnie inny – nie należy ładować baterii pierwotnych.

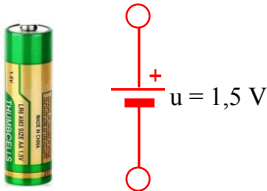
## Baterie odnawialne

- **Bateria odnawialna** działa na tej samej zasadzie co bateria pierwotna, z tą różnicą, że **zachodzące procesy chemiczne mogą być odwrócone poprzez mechanizm ładowania.**
- W wyniku tego działania bateria *odzyskuje* pierwotne właściwości.
- W zależności od konstrukcji baterie takie mają żywotność pomiędzy 100 i 1000 cykli.

# Źródła napięcia stałego

## Baterie

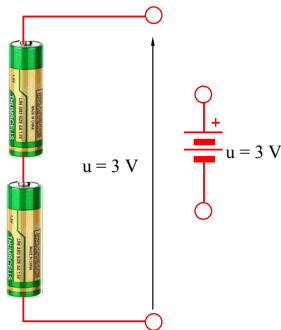
- **Najważniejsze parametry baterii: napięcie znamionowe, zgromadzona energia i wewnętrzna rezystancja.**
- Napięcie mierzone na zaciskach baterii (pojedynczym jej ogniwie, ang. cell) jest wynikiem reakcji chemicznej uwalniającej energię.



Rys. 13: Pojedyncze ogniwo (bateria) i jej symbol

## Źródła napięcia stałego

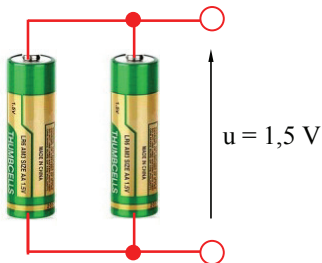
Większa wartość napięcia – kilka ogniw połączonych szeregowo, tzn. dodatni zacisk pierwszego ogniwa połączony jest z ujemnym zaciskiem drugiego, i tak dalej



Rys. 14: Szeregowe połączenie dwóch baterii

## Źródła napięcia stałego

Zwiększenie pojemności akumulatora (w sensie gromadzonej energii) bez zwiększania napięcia na zaciskach – pojedyncze ogniwa mogą być łączone równolegle



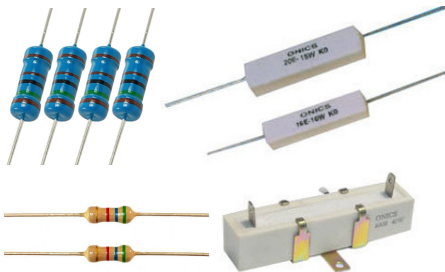
Rys. 15: Równoległe połączenie dwóch baterii

**Istotne jest, aby łączone w ten sposób ogniwa miały prawie identyczne napięcia – zapobiega to zniszczeniu jednego ogniwa przez drugie.**

# Opornik liniowy

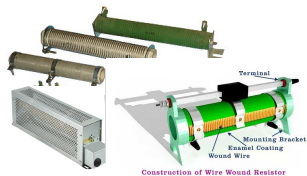
## Opornik liniowy

- **Rezystory występują w wielu formach**, jako elementy dyskretnie do montażu powierzchniowego lub przeplatane, jako elementy składowe struktur scalonych i hybrydowych oraz jako grzałki np. z chromonikieliny (Nichrome).
- Podział ze względu na sposób wykonania: warstwowe, objętościowe i drutowe.



Rys. 16: Rezystory warstwowe i objętościowe

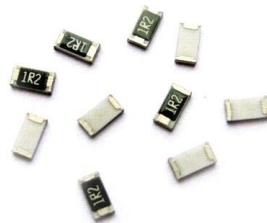
## Opornik liniowy



Rys. 17: Rezystory drutowe

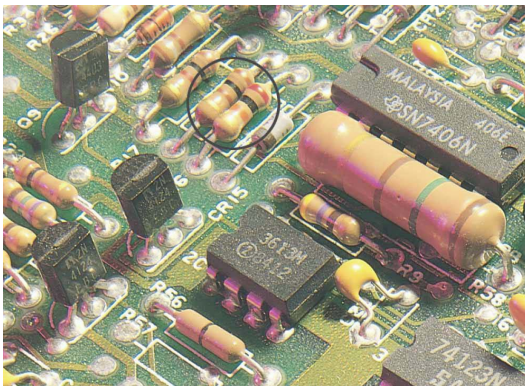


Rys. 18: Rezystory stałe i zmienne



Rys. 19: Rezystory do montażu powierzchniowego

## Fragment płytki drukowanej



©2004 Thomson - Brooks/Cole

Rys. 20: Fragment płytki drukowanej



# Rezystory

## Parametry i oznaczenia

**Dla rezystorów określa się m.in. następujące parametry:**

- **rezystancja znamionowa** – jest to rezystancja, jaką powinien mieć rezystor.
- **tolerancja rezystancji znamionowej** – ponieważ ze względu na rozrzuty produkcyjne rezystory nie mają rezystancji dokładnie zgodnej z rezystancją znamionową, podaje się maksymalne dopuszczalne odchyłki. Wyraża się je w procentach wartości znamionowej.
- **moc znamionowa** – jest to największa dopuszczalna moc wydzielana na rezystorze przy pracy ciągłej przy temperaturze otoczenia mniejszej niż  $+70^{\circ}\text{C}$  (dla niektórych typów  $+40^{\circ}\text{C}$ ). W temperaturach wyższych rezystory wolno obciążać mniejszą mocą.
- **temperaturowy współczynnik rezystancji** – oznaczany w krajowych źródłach TWR, lub z angielskiego TCR, określa zmiany rezystancji pod wpływem temperatury. Im mniejsza wartość TCR, tym bardziej stabilny rezystor. Wartość TCR podaje się w  $\%/K$  lub  $\text{ppm}/K$  ( $1\% = 10^4\text{ppm}$ ).
- **napięcie graniczne** (definiowany tylko dla r. warstwowych)
- **rezystancja krytyczna**
- **napięcie szumów**

# Rezystory

## Rezystancja znamionowa

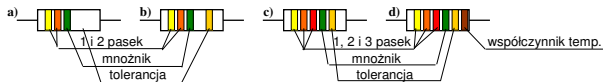
- **Rezystancje znamionowe rezystorów tworzą szeregi (ciągi) odpowiadające różnym dokładnościom wykonania.**
- Szeregi te, oznacza się symbolami E6, E12, E24, E48, E96, E192, odpowiadają one tolerancjom  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 2\%$ ,  $\pm 1\%$ ,  $\pm 0.5\%$ .
- Rezystancja znamionowa jest oznaczana korpusie rezystora kodem cyfrowo-literowym lub barwnym.
- Stosowane są różne kody cyfrowo-literowe, np. rezystor  $5.1\Omega$  oznacza się jako 5.1 lub 5R1,  $510\Omega$  jako 510, 510R, K51,  $5.1M\Omega$  jako 5.1M, 5M1.
- Rezystory miniaturowe oznacza się kodem barwnym (rys. 22).

## Szeregi wartości rezystancji znamionowej

Szereg E6 ( $\pm 20\%$ )	Szereg E12 ( $\pm 10\%$ )	Szereg E24 ( $\pm 5\%$ )
10	10	10
-	-	11
-	12	12
-	-	13
15	15	15
-	-	16
-	18	18
-	-	20
22	22	22
-	-	24
-	27	27
-	-	30
33	33	33
-	-	36
-	39	39
-	-	43
47	47	47
-	-	51
-	56	56
-	-	62
68	68	68
-	-	75
-	82	82
-	-	91

Rys. 21: Szeregi wartości rezystancji znamionowej

## Kody barwne rezystorów



Rys. 22: Kody barwne rezystorów cz.1

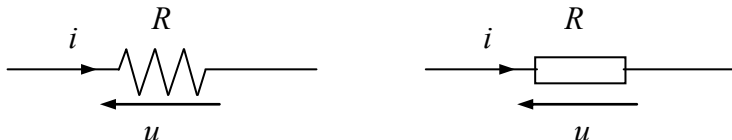
Kolor	Cyfry znaczące	Mnożnik	Tolerancja	Współczynnik temperaturowy [ppm/K]
Srebrny	-	0,01	10%	-
Żółty	-	0,1	5%	-
Czarny	0	1	-	250
Brązowy	1	10	1%	100
Czerwony	2	100	2%	50
Pomarańczowy	3	1 000	15%	-
Żółty	4	10 000	-	25
Zielony	5	100 000	0,5%	20
Niebieski	6	1 000 000	0,25%	10
Fioletowy	7	10 <sup>7</sup>	0,1%	5
Szary	8	10 <sup>8</sup>	-	1
Biały	9	10 <sup>9</sup>	-	-
Brak paska	-	-	20%	-

Rys. 23: Kody barwne rezystorów cz.2

## Prawo Ohma

## Prawo Ohma

## Opornik liniowy – symbol graficzny



Rys. 24: Symbol graficzny opornika liniowego

## Prawo Ohma

Opornik liniowy spełnia **prawo Ohma**

$$u = Ri \quad \longleftrightarrow \quad i = Gu, \quad (2)$$

$R$  – opór w omach  $1\Omega = 1\frac{\text{V}}{\text{A}}$

$G = R^{-1}$  – przewodność w simensach  $1\text{S} = 1\frac{\text{A}}{\text{V}}$

# Moc w oporniku

## Moc w oporniku

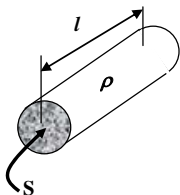
$$u(t) = Ri(t)$$

$$i(t) = \frac{1}{R}u(t)$$

$$p(t) = u(t)i(t) = R(i(t))^2 = \frac{1}{R}(u(t))^2$$

Moc opornika liniowego jest w każdej chwili  $t$  nieujemna.

# Zależność rezystancji od wymiarów



Rys. 25: Fragment przewodu

## Zależność rezystancji od wymiarów

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3)$$

$\rho$  – opór właściwy  
[ $\Omega\text{m}$ ]

$l$  – długość [m]

$S$  – przekrój [ $\text{m}^2$ ]

## Opór właściwy wybranych materiałów

$$\rho_{\text{aluminium}} = 24 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{miedz}} = 16 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{srebro}} = 15 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{szklo}} = 10^9 \Omega\text{m}$$

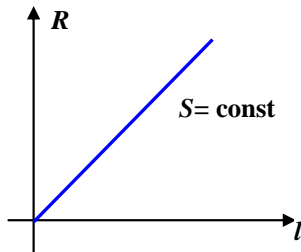
$$\rho_{\text{woda destylowana}} = 2,6 \cdot 10^5 \Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{woda morska}} = 0,22 \Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{silikon}} = 640 \Omega\text{m}$$

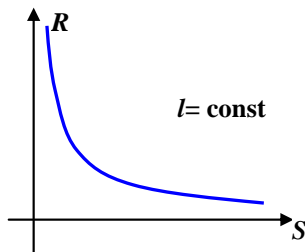
$$\rho_{\text{guma}} = 10^{15} \Omega\text{m}$$

## Zależność rezystancji od wymiarów



Rys. 26: Wykres zależności rezystancji od długości przy ustalonym przekroju

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



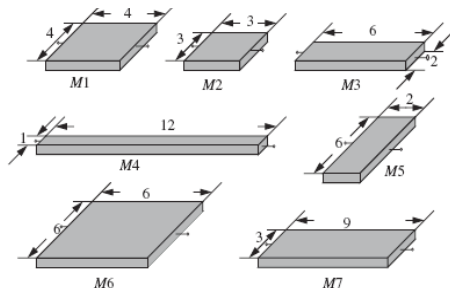
Rys. 27: Wykres zależności rezystancji od przekroju przy ustalonej długości

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



# Rezystancja planarnych materiałów wewnątrz układu scalonego

- Wszystkie rezystory mają tę samą grubość.
- Rezystancja elementu w kształcie prostopadłościanu jest określona przez stosunek długości do szerokości.
- $R_o$  – rezystancja elementu o jednostkowej długości i szerokości
- Rezystancja opornika o długości  $L$  i szerokości  $W$  wynosi:  $R = R_o \frac{L}{W}$ .

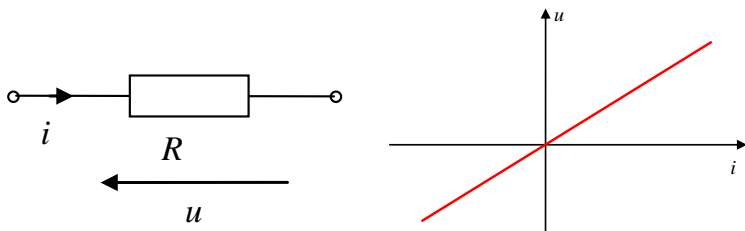


Rys. 28: Rezystory planarne o różnych kształtach [Agrawal 2005]



# Rezystory

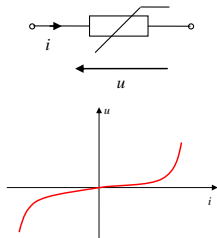
Rezystor liniowy – szczególny przypadek



Rys. 30: Symbol opornika liniowego i jego charakterystyka

# Rezystory

**Rezystor – dowolny dwuzaciskowy element, który można scharakteryzować za pomocą zależności algebraicznej między chwilowym prądem, a napięciem.**



**Rys. 31:** Symbol opornika nieliniowego i przykładowa charakterystyka

## Rezystory - przykłady

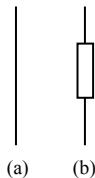
- $u(t) = R(t)i(t)$  – rezystor liniowy niestacjonarny
- $u(t) = Ri(t)$  – rezystor liniowy stacjonarny
- $u(t) = 0,73(i(t))^3$  – rezystor nieliniowy

Rezystor może być liniowy lub nieliniowy, niezmienny w czasie (stacjonarny) lub zmieniający się w czasie (niestacjonarny).

## Połączenia (przewody)

### Idealne i rzeczywiste połączenia (przewody)

- **Przewód traktowany jest jako idealny** – może płynąć przez niego dowolny prąd bez strat mocy (a zatem i pojawienia się napięcia na jego końcach).
- Symbol idealnego przewodu rys. 32(a) – linia.
- **Każdy rzeczywisty przewód o określonej długości posiada niezerową rezystancję, rozprasza energię i reprezentuje straty energii w układzie.**
- Jeśli ta rezystancja jest istotna w konkretnym zastosowaniu – modelem połączenia jest idealny przewód szeregowo połączony z rezystorem (rys. 32(b)).

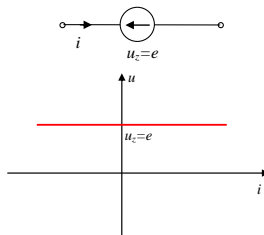


Rys. 32: Symbol obwodowy połączenia (a) idealnego, (b) rzeczywistego

# Niezależne idealne źródło napięcia

## Niezależne idealne źródło napięcia

- **Idealne źródło napięcia** element, który utrzymuje stałe napięcie na zaciskach, niezależnie od wartości prądu pobieranego z tych zacisków.
- W celu odróżnienia takiego idealnego elementu od baterii, oznaczamy źródło napięcia okręgiem o biegunowości wskazywanej przez strzałkę (grot wskazuje „+”).
- Niezależne idealne źródło napięcia – napięcie na zaciskach jest funkcją tylko czasu  $t$ .



Rys. 33: Symbol niezależnego źródła napięcia stałego i jego charakterystyka

## Sterowane źródła napięcia

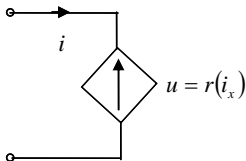
### Sterowane źródła napięcia

- **Dwa typy źródeł napięcia: niezależne i sterowane (zależne).**
- **Sterowane źródło napięcia** dostarcza napięcie o wartości zależnej od wartości pewnego sygnału w obwodzie (sygnału prądowego lub napięciowego), którego źródło jest częścią.
- **Źródła te wprowadzono na potrzeby modelowania fizycznych obiektów**, takich jak: tranzystory, wzmacniacze operacyjne, transformatory.
- Bez ich istnienia nie byłoby możliwe obliczanie numeryczne układów elektronicznych, a zatem nie byłoby programów typu SPICE.
- Występują dwa rodzaje tych źródeł, a zależności je opisujące mogą mieć charakter liniowy lub nieliniowy.

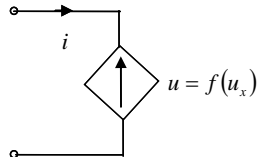
# Sterowane źródła napięcia

## Sterowane źródła napięcia

- W przypadku źródeł liniowych – zależności:  $u = k_r i_x$  oraz  $u = k_f u_x$ , gdzie współczynniki  $k_r$  oraz  $k_f$  zwane są współczynnikami sterowania i mają odpowiednie jednostki.



Rys. 34: Symbol idealnego źródła napięciowego sterowanego prądowo



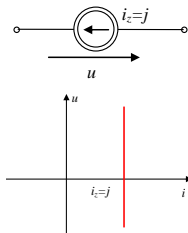
Rys. 35: Symbol idealnego źródła napięciowego sterowanego napięciowo



# Niezależne idealne źródło prądu

## Niezależne idealne źródło prądu

- **Niezależne idealne źródło prądu** – prąd w nim płynący jest funkcją tylko czasu  $t$ , niezależnie od tego, jakie napięcie występuje na jego zaciskach.
- Istnieją specjalne układy elektroniczne zawierające tranzystory lub wzmacniacze operacyjne będące bardzo dobrymi źródłami prądu.

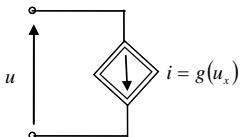


Rys. 36: Symbol niezależnego źródła prądu stałego i jego charakterystyka

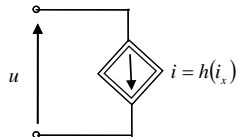
# Sterowane źródła prądu

## Sterowane źródła prądu

- **Sterowane źródła prądu (liniowe i nieliniowe)** – stosowane w modelowaniu
- Źródła liniowe – zależności:  $i = k_g u_x$ ,  $i = k_h i_x$ , gdzie współczynniki  $k_g$ ,  $k_h$  zwane są współczynnikami sterowania i mają odpowiednie jednostki.



Rys. 37: Symbol źródła prądowego sterowanego napięciowo



Rys. 38: Symbol źródła prądowego sterowanego prądowo

# Wprowadzenie

## Prawa Kirchhoffa

- Prawa Kirchhoffa to **najbardziej ogólne i fundamentalne zasady** obowiązujące w obwodach elektrycznych, które zostały stwierdzone eksperymentalnie przez niemieckiego profesora, Gustava Roberta Kirchhoffa (1824–1887).
- **Prawa Kirchhoffa dotyczą struktury geometrycznej obwodu, czyli jego topologii i nie zależą od rodzaju elementów umieszczonych w poszczególnych gałęziach.**
- Rozróżniamy: napięciowe prawo Kirchhoffa (w skrócie NPK) oraz prądowe prawo Kirchhoffa (w skrócie PPK).
- W celu ich sformułowania wprowadzimy najpierw pojęcie węzła i pętli.
- Wszystkie analizy będą przeprowadzane na obwodach zawierających dwójniki (elementy dwukońcówkowe).

# Wprowadzenie

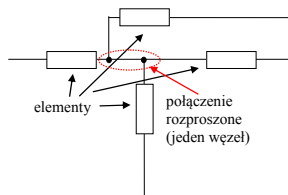
## Prawa Kirchhoffa

- Elementy wielozaciskowe będą modelowane przy użyciu odpowiednich połączeń dwójników.
- Przykładami dwójników są: rezystory, źródła napięcia i źródła prądu (sterowane i niezależne).
- Dostęp do elementu odbywa się za pośrednictwem zacisków.
- Obwód elektroniczny tworzony jest poprzez łączenie ze sobą pewnej liczby elementów.
- Punkty, w których są połączone zaciski dwóch lub więcej elementów, są nazywane węzłami obwodu.
- Fragmenty obwodu pomiędzy węzłami określane są jako gałęzie obwodu.

# Wprowadzenie

## Prawa Kirchhoffa

- Ponieważ zakładamy, że połączenia między elementami są idealne, nie jest konieczne aby elementy, które mają być ze sobą połączone w pojedynczym punkcie przestrzeni (czyli były traktowane jako jeden węzeł), na rysunku dochodziły do jednego punktu.
- Przykład tego pokazano na rys. 39. Podczas gdy cztery elementy na rysunku są ze sobą połączone, ich połączenie nie występuje w jednym punkcie przestrzeni. Raczej jest to połączenie rozproszone, ale tworzące jeden węzeł.

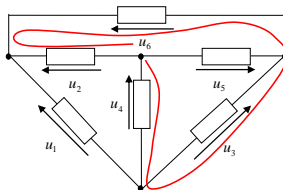


Rys. 39: Połączenie rozproszone tworzące jeden węzeł

# Prawa Kirchhoffa

## Wprowadzenie

- Pętla jest pojęciem topologicznym, a jej dokładna definicja wykracza poza ramy tego przedmiotu.
- W uproszeniu możemy przyjąć, że jest to zbiór elementów zaczynających się w jednym węźle, obejmujący kolejne połączone ze sobą gałęzie i kończący się w tym samym węźle.
- Przykład pętli, którą tworzą gałęzie o numerach 2, 6, 3, 4 pokazano na rys. 40.



Rys. 40: Obwód z zaznaczoną przykładową pętlą

# Prawa Kirchhoffa

## Napięciowe prawo Kirchhoffa

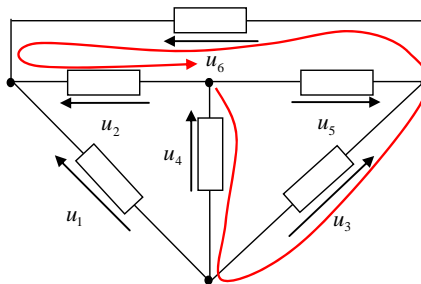
- Napięciowe prawo Kirchhoffa formułujemy w danej pętli, przyjmując dowolnie kierunek obiegu w tej pętli. Kierunek obiegu może być zgodny lub przeciwny do ruchu wskazówek zegara.
- **W każdej chwili czasu algebraiczna suma napięć gałęziowych w rozpatrywanej pętli równa się zero. Składniki sumy algebraicznej piszemy ze znakiem plus, jeżeli kierunki napięć gałęziowych są zgodne z kierunkiem obiegu i ze znakiem minus w przypadku przeciwnym.**

# Prawa Kirchhoffa

## Napięciowe prawo Kirchhoffa

Dla przykładu z rys. 41, przy zaznaczonej pętli i kierunku obiegu, NPK przyjmuje postać

$$u_3 + u_6 - u_2 - u_4 = 0. \quad (5)$$



Rys. 41: Obwód z zaznaczoną przykładową pętłą i kierunkiem obiegu



# Prawa Kirchhoffa

## Napięciowe prawo Kirchhoffa

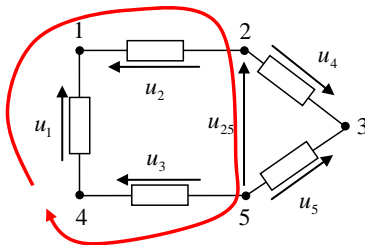
- Bardziej ogólną wersję napięciowego prawa Kirchhoffa otrzymujemy rozpatrując tzw. **zamknięty ciąg węzłów**, czyli zbiór węzłów zaczynający się i kończący w tym samym węźle.
- W dowolnym obwodzie, dla każdego zamkniętego ciągu węzłów w dowolnej chwili, **algebraiczna suma napięć występujących pomiędzy węzłami tworzącymi ciąg zamknięty, jest równa zero.**
- Kierunek obiegu jest obecnie wymuszony przez przyjęty ciąg węzłów.

# Prawa Kirchhoffa

## Napięciowe prawo Kirchhoffa

W układzie pokazanym na rys. 42 zamknięty ciąg węzłów 1, 2, 5, 4, 1 wyznacza kierunek obiegu i prowadzi do równania

$$-u_2 - u_{25} + u_3 + u_1 = 0. \quad (6)$$



Rys. 42: Obwód z zaznaczonym ciągiem węzłów

# Prawa Kirchhoffa

## Prądowe prawo Kirchhoffa

- Dla każdego obwodu i dowolnego jego węzła, w każdej chwili, algebraiczna suma prądów w gałęziach zbiegających się w tym węźle jest równa zeru.
- W wyznaczonej wyżej sumie algebraicznej przypisujemy prądowi **znak plus**, jeżeli jego **kierunek jest od węzła** i znak minus w przypadku, gdy strzałka prądu jest skierowana do węzła.
- Dopuszczalne jest również przyjęcie przeciwnej reguły.

# Prawa Kirchhoffa

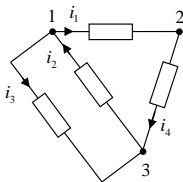
## Prądowe prawo Kirchhoffa

W układzie pokazanym na rys. 43 formułujemy PPK w węźle pierwszym

$$i_1 - i_2 + i_3 = 0 \quad (7)$$

oraz trzecim

$$i_2 - i_3 - i_4 = 0. \quad (8)$$



Rys. 43: Przykładowy obwód

# Prawa Kirchhoffa

## Prądowe prawo Kirchhoffa - komentarz

Należy podkreślić, że łącząc idealne źródła prądowe można zbudować układy, które nie spełniają PPK, np. dołączając do węzła tylko trzy jednakowo zorientowane źródła o wartości 1 A. Takie obwody nie będą jednak rozważane, gdyż jeżeli PPK nie jest spełnione w pewnym węźle, to ładunek elektryczny musi się gromadzić w tym węźle, co narusza założenie dotyczące obwodów skupionych.

## Napięciowe prawo Kirchhoffa - komentarz

Należy podkreślić, że łącząc idealne źródła napięciowe można zbudować układy, które nie spełniają NPK, np. włączając w pętli tylko trzy jednakowo zorientowane źródła o wartości 1 V. Takie obwody nie będą jednak rozważane, gdyż jeżeli NPK nie jest spełnione w pewnej pętli to narusza to założenie dotyczące obwodów skupionych.

# Prawa Kirchhoffa

## Maksymalna liczba niezależnych praw Kirchhoffa. Wnioski

- Dla obwodu, w którym jest  $\alpha$  węzłów można ułożyć  $\alpha - 1$  niezależnych PPK.
- Dla obwodu, w którym jest  $\alpha$  węzłów i  $\beta$  gałęzi można ułożyć  $\beta - \alpha + 1$  niezależnych NPK.
- Dla obwodu, w którym jest  $\alpha$  węzłów i  $\beta$  gałęzi można ułożyć  $\beta$  niezależnych praw Kirchhoffa.