



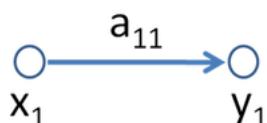
# 1. Wybrane zagadnienia teorii obwodów

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

## ▼ a) zastosowanie grafów przepływowych i schematów blokowych do analizy obwodów

### Grafy przepływowne

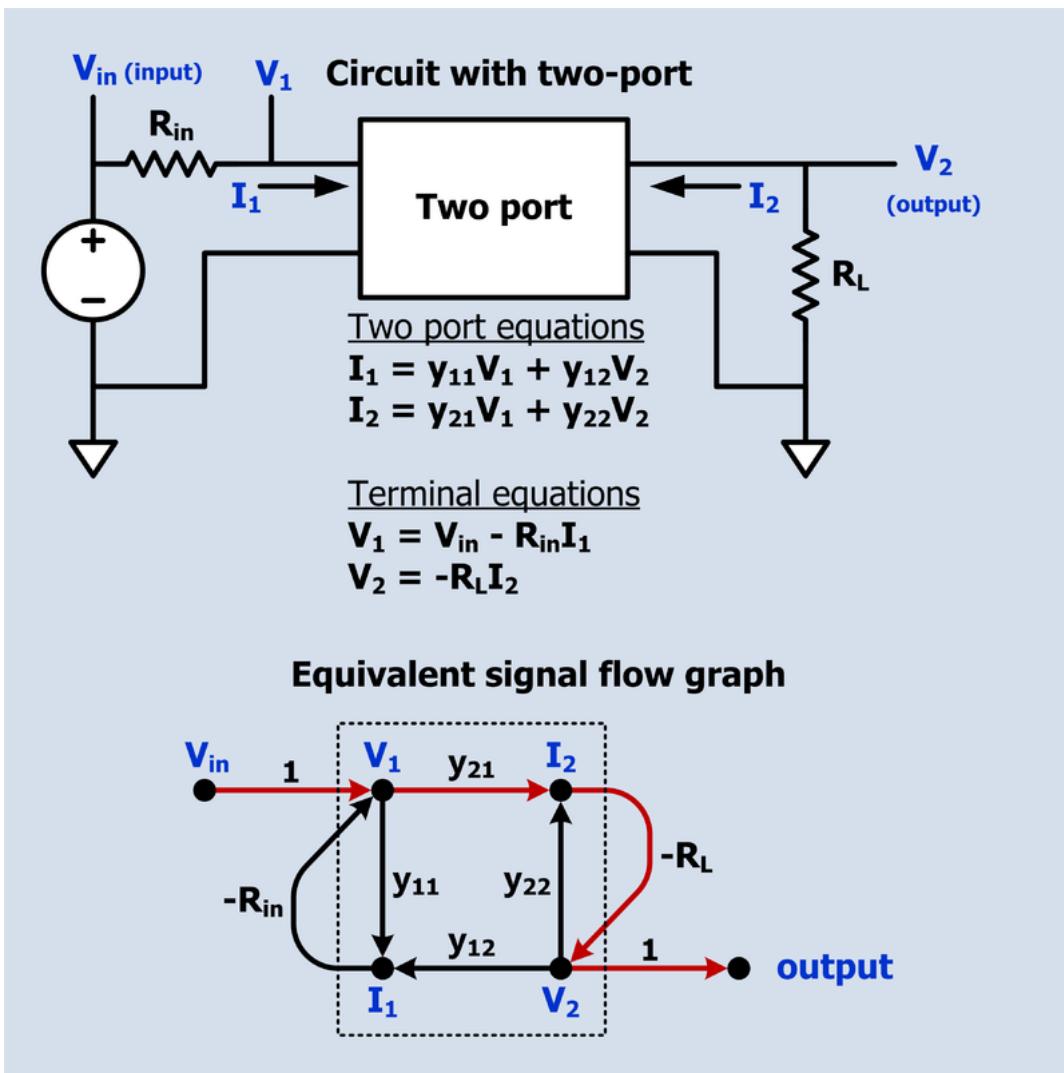
Grafy przepływowne to sposób opisu przesyłu sygnałów w obwodach elektrycznych i układach automatyki. Opisując układ grafem przepływowym, zmienne układu rysuje się jako **węzły** połączone **strzałkami** wskazującymi **kierunek przepływu sygnału**. Założeniami tej metody jest fakt, że **sygnały mogą płynąć w tylko jednym kierunku**, określonym końcem strzałki. Powiązania są zatem przyczynowo-skutkowe.



Podstawowy zapis grafu przepływowego.  $x_1$  i  $y_1$  to zmienne,  $a_{11}$  to transmitancja której poddawany jest sygnał.

**Każda strzałka ma natomiast przypisaną transmitancję**, przez którą mnożony jest sygnał przekształcany z jednej zmiennej w drugą. Wykorzystanie grafów przepływowych i ich dostępnych przekształceń pozwala na obliczenie wypadkowej transmitancji całego rozpatrywanego układu. Do takich obliczeń wykorzystuję się **teorię grafów zorientowanych**.

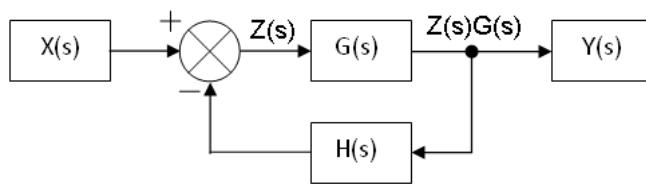
Przykład zapisu czwórnika prądowego w postaci grafu przepływowego przedstawiono poniżej.



Przykładowy zapis czwórnika elektrycznego w postaci grafu przepływowego.  $y_{11}$ ,  $y_{21}$ ,  $y_{22}$  i  $y_{12}$  są tutaj transmitancjami pomiędzy zmiennymi. Należy tu zauważyć, że wejście i wyjście stanowią napięcia, natomiast pomiędzy nimi zmiennymi układu są prądy. Transmitancje opisują zatem, jak układ przekształca napięcia na prądy, a także jak prądy oddziałując z rezystancjami na wejściu i wyjściu pozwalają na uzyskanie napięć.

### Schematy blokowe

Schematy blokowe to powszechniejsza, przynajmniej na W5, metoda przedstawiania układów automatyki czy obwodów elektrycznych. W schematach blokowych, **bloki są transmitancjami**, natomiast **połączenia między nimi są zmiennymi** - czyli zmienna jest jednocześnie wyjściem bloku i wejściem kolejnego.



Przykładowy układ regulacji automatyki ze sprzężeniem zwrotnym, zapisany w postaci schematu blokowego.

Schematy blokowe można analizować przy wykorzystaniu tzw. **algebry schematów blokowych**, pozwalającej na upraszczanie układów wieloelementowych i sprowadzanie ich do pojedynczej transmitancji.

### Podsumowanie

Schematy blokowe oraz grafy przepływowo-wiązaniowe to metody matematyczne pozwalające opisywać rzeczywiste układy, złożone ze zbioru prostych elementów. Układy takie zapisuje się wybraną metodą, aby następnie analizować ich wypadkowy wpływ na przetwarzanie sygnału (zmiennej) wejściowego na wyjściowy.

Choć obie te metody mogą być stosowane dla różnego rodzaju układów fizycznych, to jednak ich główną domeną są układy regulacji automatycznej, a rzadziej obwody elektryczne.

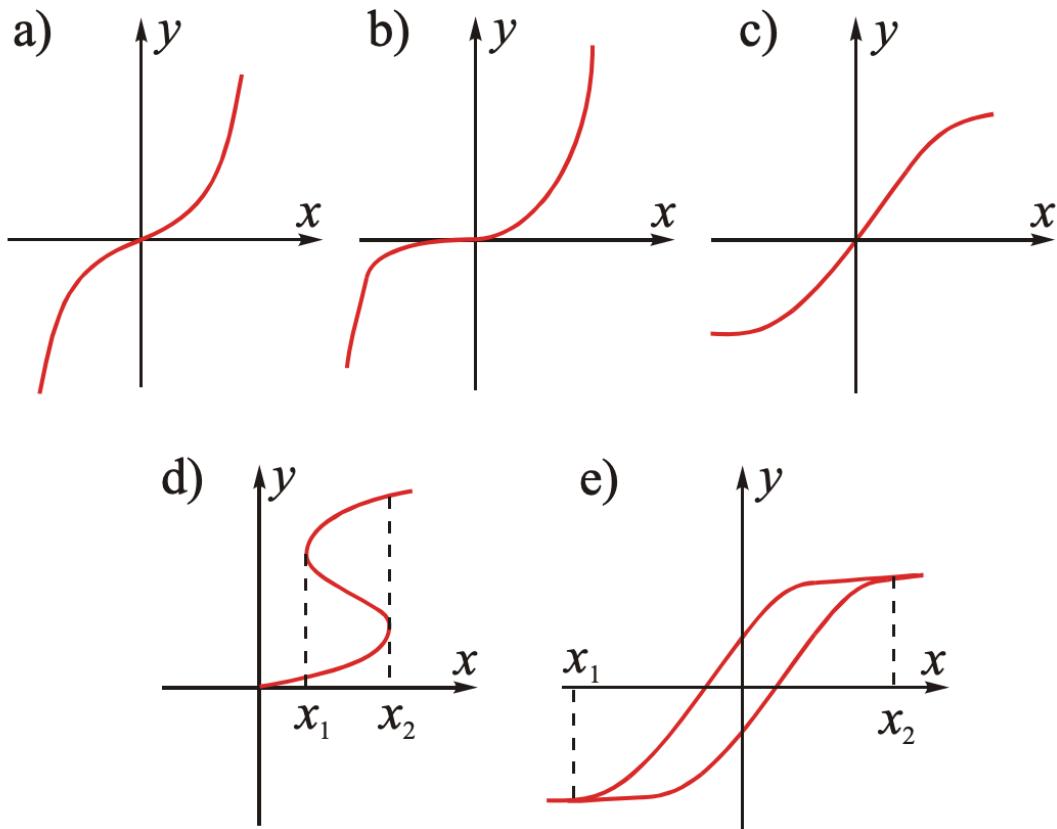
#### Źródła

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-flow\\_graph](https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-flow_graph)
- [2] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Graf\\_przepływu\\_sygnałów](https://pl.wikipedia.org/wiki/Graf_przepływu_sygnałów)
- [3] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Schemat\\_blokowy\\_\(automatyka\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Schemat_blokowy_(automatyka)).

#### ▼ b) obwody nieliniowe na przykładzie obwodu z łukiem elektrycznym i obwodów z rdzeniem ferromagnetycznym - zagadnienia stabilności i rezonansu

Obwody elektryczne nieliniowe to takie obwody, w których występuje co najmniej jeden element o nieliniowej charakterystyce lub kilka elementów nieliniowych, nierównoważących się nawzajem. **Element nieliniowy** to taki, którego charakterystyka prądowo-napięciowa nie może być opisana równaniem prostej  $y=ax+b$ .

Zależnie od kształtu krzywej charakterystyki elementu, wyróżnia się elementy nieliniowe **symetryczne, niesymetryczne, jednoznaczne i wieloznaczne**. Symetryczne i niesymetryczne nazywa się zależnie od przebiegu charakterystyki w zakresie dodatnim i ujemnym. Jednoznaczne i wieloznaczne - zależnie od tego, czy pojawiają się w nich punkty na osi x z dwiema wartościami na osi y - czyli, w praktyce, wieloznaczne obwody to obwody z histerezą.



Rys. 5.2. Przykładowe przebiegi charakterystyk elementu nieliniowego.

W obwodach nieliniowych obowiązują prawa Kirchhoffa, zasada kompensacji, twierdzenie Thevenina i twierdzenie Nortona. Nie obowiązują natomiast prawo Ohma, zasada superpozycji i zasada wzajemności.

#### Stabilność

**Stabilność układu** definiuje się jako **zdolność tego układu do powrotu do punktu równowagi po zmianie wymuszenia lub wystąpieniu zakłócenia**. Znaczy to tyle, że w nowych warunkach pracy układ powinien przyjąć nowy punkt pracy zamiast np. w nieskończoność zwiększać obroty silnika czy prąd płynący przez obwód.

Stabilność układów nieliniowych analizuje się przede wszystkim dwiema metodami Lapunowa. Pierwsza metoda Lapunowa to metoda pośrednia pozwalająca na badanie stabilności lokalnej, w obrębie pewnego punktu pracy. Druga metoda Lapunowa, nazywana bezpośrednią - służy do badania stabilności w ograniczonym lub nieograniczonym obszarze przestrzeni stanów układów nieliniowych.

### Rezonans

Rezonans jest zjawiskiem fizycznym, w którym przy określonej częstotliwości sił wymuszających następuje znaczne zwiększenie amplitudy drgań układu.

W obwodach elektrycznych, rezonans jest zjawiskiem pojawiającym się, gdy częstotliwość wymuszenia (np. napięcia) odpowiada częstotliwości rezonansowej obwodu (zależnej od impedancji elementów LC). Moc bierna pobierana przez obwód spada do zera.

W przypadku elementów LC szeregowych, występuje rezonans napięciowy i prąd znacznie wzrasta. W przypadku elementów LC równoległych, prąd maleje praktycznie do zera, ale jednocześnie wzrastają znacznie napięcia na elementach obwodu.

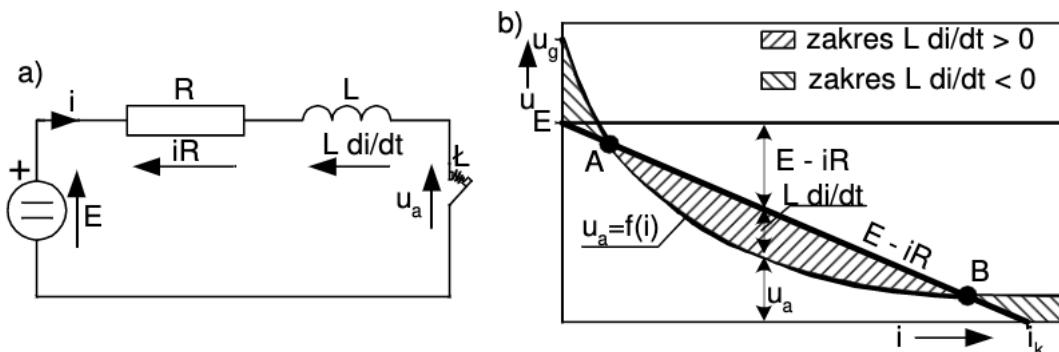
Rezonans elektryczny można wykorzystać do kompensacji mocy biernej (przez wyzerowanie prądu składowej biernej, czyli rezonans prądów), a także jako filtry lub wzmacniacze określonych częstotliwości w radiotechnice.

Szczególnym typem rezonansu jest ferrorezonans. Ferrorezonans pojawia się w obwodach, w których nieliniowa indukcyjność jest zasilona ze źródła z szeregowo wpiętą pojemnością i dojdzie do zakłócenia np. w postaci załączenia nowego odbiornika. W takim przypadku mogą wystąpić znaczne przetężenia i przepięcia w obwodzie.

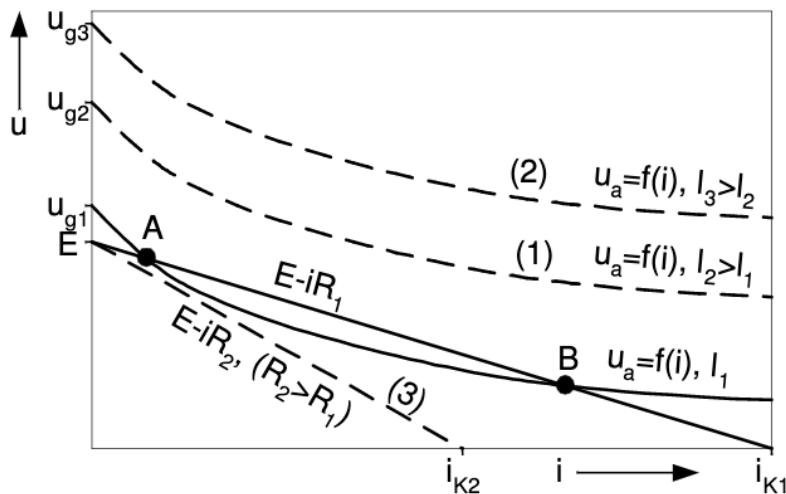
Praktyczną sytuację z ferrorezonansem jest np. wystąpienie w 3-fazowym układzie elektroenergetycznym zakłócenia w jednej z faz. Transformatory są elementami typu L, linie kablowe - elementami typu C. Zakłócenie w jednej fazie powoduje znaczne zmiany napięcia w pozostałych fazach. Ta gwałtowna zmiana może wywołać ferrorezonans, co z kolei może prowadzić do uszkodzenia izolacji w systemie.

### Obwód z łukiem elektrycznym

Obwód prądu stałego z łukiem elektrycznym jest przykładem obwodu nieliniowego. W takim obwodzie, elementem nieliniowym jest sam łuk elektryczny. Jego charakterystyka przecina się z liniową charakterystyką obwodu w dwóch miejscach. Te dwa punkty nazywa się kolejno punktem równowagi chwiejnej (A) i punktem równowagi stabilnej (B). Punkty te wydzielają dwa obszary napięcia obwodu: zakres dodatni, przy którym  $L \frac{di}{dt} > 0$  oraz ujemny, przy którym  $L \frac{di}{dt} < 0$ . W zakresie dodatnim, prąd łuku wzrasta. W zakresie ujemnym - maleje.



Wytrącenie łuku z punktu równowagi A poprzez zmniejszenie prądu, powoduje jego zgaszenie - wejście w zakres ujemny napięć i w związku z tym dalsze osłabienie prądu. Jeżeli prąd w tym punkcie równowagi się zwiększy, prąd zacznie rosnąć i łuk znajdzie się ostatecznie w nowym punkcie pracy, czyli B. Zgaszenie łuku oznacza zatem wytrącenie obwodu z punktu równowagi, czyli de facto jego destabilizację.



Rys. 3.2. Ilustracja wzajemnego przesunięcia statycznej charakterystyki łuku  $u_a = f(i)$  względem charakterystyki obwodu  $E - iR$  w celu uzyskania ujemnej wartości pochodnej prądu  $di/dt$ ;  $l_1, l_2, l_3$  – długości łuku, pozostałe oznaczenia jak na rys 3.1; charakterystyka  $u_a = f(i)$  dla najmniejszej długości łuku  $l_1$  jest charakterystyką wyjściową.

#### Obwód z rdzeniem ferromagnetycznym

Obwód z rdzeniem ferromagnetycznym jest **obwodem nieliniowym** ze względu na **histerezę rdzenia** dławika, transformatora czy innej maszyny elektrycznej. Histerea opisuje zmianę indukcji magnetycznej materiału przy zmianie natężenia pola magnetycznego, któremu materiał jest poddawany.

W obwodzie elektrycznym, histerea sprawia że **charakterystyka prądowo-napięciowa jest nieliniowa** i od pewnego punktu, zwanego nasyceniem, **zwiększenie płynącego w obwodzie prądu wymaga znacznego zwiększenia napięcia zasilającego**. Ta właściwość obwodów magnetycznych sprawia, że są one podatne na zjawisko **ferrorezonansu**.

**Ferrorezonans** w przypadku nieliniowej cewki wynika z faktu **nieliniowego przebiegu reaktancji**. Pojawienie się nagłego skoku napięcia w systemie trójfazowym wskutek zakłócenia w jednej fazie może sprawić, że zmiana indukcyjności cewki w połączeniu z pojemnością lini kablowych spowoduje pojawienie się rezonansu. Ferrorezonans, w przeciwieństwie do rezonansu liniowego, objawia się skokową zmianą prądu lub napięcia. To może prowadzić do uszkodzenia linii czy izolacji transformatorów.

#### Źródła

- [1] [https://zoise.wel.wat.edu.pl/dydaktyka/WEL\\_niestacjonarne/Wyklady/05\\_Obwody\\_nieliniowe\\_pradu\\_stalego.pdf](https://zoise.wel.wat.edu.pl/dydaktyka/WEL_niestacjonarne/Wyklady/05_Obwody_nieliniowe_pradu_stalego.pdf)
- [2] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Stabilność\\_układu\\_automatycznej\\_Regulacji#Stabilność\\_układów\\_nieliniowych\\_i\\_niestacjonarnych](https://pl.wikipedia.org/wiki/Stabilność_układu_automatycznej_Regulacji#Stabilność_układów_nieliniowych_i_niestacjonarnych)
- [3] <https://docplayer.pl/3362988-3-luk-elektryczny-pradu-stalego-i-przemiennego.html>
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Resonance#RLC\\_series\\_circuits](https://en.wikipedia.org/wiki/Resonance#RLC_series_circuits)
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ferroresonance\\_in\\_electricity\\_networks](https://en.wikipedia.org/wiki/Ferroresonance_in_electricity_networks)
- [6] [https://zoise.wel.wat.edu.pl/dydaktyka/ENERGETYKA/CW\\_6\\_Badanie\\_obwodow\\_magnetycznych.pdf](https://zoise.wel.wat.edu.pl/dydaktyka/ENERGETYKA/CW_6_Badanie_obwodow_magnetycznych.pdf)

#### ▼ c) opis układu cyfrowego za pomocą równania różnicowego - transmitancja układu cyfrowego

**Układ cyfrowy** to układ **dyskretny**. Oznacza to, że przynajmniej jeden jego sygnał ma charakter dyskretny, czyli przyjmuje tylko określone wartości tylko dla określonych chwil czasu - tzw. próbki. Próbki sygnału są przesunięte od siebie w czasie o okres próbkowania.

#### Równania różnicowe

Różnica pierwszego rzędu to po prostu zmiana wartości sygnału między następną a aktualną próbką, czyli:  $\Delta f(n) = f(n+1) - f(n)$ . Różnicę uzyskuję się poprzez zastąpienie czasu ciągłego ( $dt$ ) operatorem dyskretnym różniczki czasu. Różnica jest analogią do różniczki w równaniu różniczkowym. Można też obliczać różnice wyższych rzędów, czyli niejako "pochodne" wyższych rzędów w równaniach dyskretnych.

Równanie różnicowe to sposób opisu układów dyskretnych analogiczny do zapisu układów ciągłych przez równania różniczkowe. Równanie różnicowe to suma różnic pierwszego i wyższych rzędów sygnału wejścia i wyjścia układu, zapisane w jednolitej postaci. Równanie różnicowe opisuje przebieg próbki w dziedzinie czasu i przyjmuje postać:

$$\sum_{i=0}^n \frac{a_i}{T^i} \Delta^i y(k) = \sum_{l=0}^m \frac{n_l}{T^l} \Delta^l u(k)$$

Powyższe równanie utożsamia wejście do wyjścia układu. Parametr  $k$  jest numerem rozpatrywanej próbki.

#### Transmitancja układu cyfrowego

Transmitancja dyskretna układu cyfrowego to **stosunek dyskretnej transformaty Laplace'a sygnału wyjściowego  $Y(z)$  do transformaty sygnału wejściowego  $U(z)$** , przy założeniu **zerowych warunków początkowych**. Stąd równanie  $G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)}$ .

W celu uzyskania transformat równań różnicowych stosuje się tzw. **transformatę Z, czyli dyskretną wersję transformaty Laplace'a**. Transformata Laplace'a ciągi (bo próbki dyskretne opisuje się ciągami) przekształca do zespolonej zmiennej ciąglej  $z$ . Transformata stosowana w analizie układów dyskretnych jest **transformatą dwustronną**, czyli obejmuje obszar od minus do plus nieskończoności.

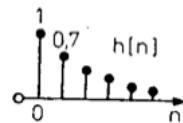
Dzięki transmitancji dyskretnej, układy dyskretne można analizować w sposób podobny do układów ciągłych pomimo dyskretyzacji. Można przy tym stosować kryteria podobne do tych układów oraz korzystać z podobnej algebry schematów blokowych.

#### Źródła

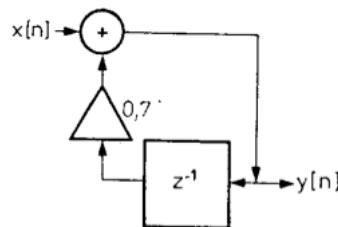
- [1] [https://home.agh.edu.pl/~sypka/dydaktyka/materiały/2E\\_CPS\\_2020-2021\\_08\\_B.pdf](https://home.agh.edu.pl/~sypka/dydaktyka/materiały/2E_CPS_2020-2021_08_B.pdf)
- [2] [http://wikizmsi.zut.edu.pl/uploads/6/63/Lab2\\_WDAC.pdf](http://wikizmsi.zut.edu.pl/uploads/6/63/Lab2_WDAC.pdf)
- [3] [https://ioisp.el.pcz.pl/images/instrukcje/air/Komputery\\_w\\_sterowaniu/Cw.4\\_Dyskretne\\_uklady\\_liniowe.pdf](https://ioisp.el.pcz.pl/images/instrukcje/air/Komputery_w_sterowaniu/Cw.4_Dyskretne_uklady_liniowe.pdf)

#### ▼ d) splot dyskretny oraz odpowiedź układu cyfrowego na dowolne wymuszenie

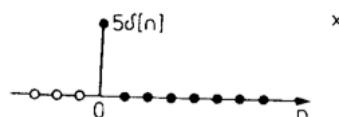
Odpowiedź impulsowa  $h[n]$  układu cyfrowego to wyjście tego układu  $y[n]$ , gdy wymuszenie  $x[n]$  jest deltą Koneckera  $\delta[n]$  - pojedynczym impulsem o wartości 1. Typowa odpowiedź impulsowa układu cyfrowego wygląda tak:



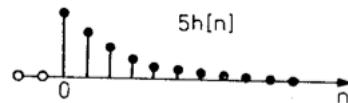
Każda kolejna widoczna na niej "szpila" to wartość początkowa przemnożona kolejny raz przez 0,7 (niejako stała czasowa układu). Można to przedstawić w postaci następującego bloku:



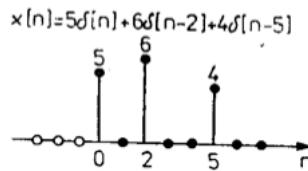
Stąd, jeżeli na wejściu damy wymuszenie  $x[n] = 6\delta[n-2]$ , wyglądające tak:



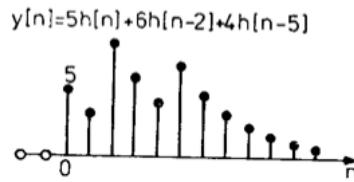
To odpowiedź układu będzie przemnożeniem wymuszenia przez odpowiedź impulsową - czyli jak poniżej:



Odpowiedź  $y[n]$  na dowolne wymuszenie  $x[n]$  jest tak naprawdę superpozycją odpowiedzi impulsowych na poszczególne składowe wymuszenia. To znaczy, że jeżeli sygnał wymuszający to  $x[n] = 5\delta[n] + 6\delta[n-2] + 4\delta[n-5]$ , narysowany poniżej:



To odpowiedzią tego wymuszenia jest odpowiedź impulsowa na każdą "szpilę" z osobna, co wygląda jak poniżej.



Odpowiedź układu na dowolne wymuszenie można więc przedstawić tak, jak powyżej. **Dowolne wymuszenie dyskretnie można przedstawić jako nieskończoną sumę delt Koneckera**, co z zasady superpozycji pozwala określić odpowiedź układu na to wymuszenie.

Patrząc na obrazek powyżej można więc zauważać zależność:

$$y[0] = x[0]h[0]$$

$$y[1] = x[0]h[1] + x[1]h[0]$$

$$y[2] = x[0]h[2] + x[1]h[1] + x[2]h[0]$$

I tak dalej, co można przedstawić ogólnie za pomocą sumy, w której  $x[k]$  to wymuszenie w próbce  $k$ , natomiast  $h[k]$  to odpowiedź impulsowa na wymuszenie w próbce  $k$ :

$$y[n] = \sum_{k=0}^n x[k]h[n-k] = \sum_{k=0}^n x[n-k]h[k]$$

Powyższe równanie z prawej strony definiuje dwuargumentową operację pomiędzy ciągami  $x[n]$  i  $h[n]$ . Operacja ta to właśnie **splot dyskretny**.

Cały powyższy wywód mówi jedno: **odpowiedź wymuszona  $y[n]$  układu liniowego jest równa splotowi dyskretnemu sygnału wejściowego  $x[n]$  z odpowiedzią impulsową  $h[n]$  tego układu**. Stąd, żeby wyznaczyć sygnał wyjściowy  $y[n]$ , wystarczy znaleźć odpowiedź impulsową  $h[n]$  układu i spleść ją z sygnałem wejściowym  $x[n]$ . Dotyczy to każdego wymuszenia.

#### Właściwości splotu dyskretnego

Właściwością splotu dyskretnego jest to, że transformata Z splotu dwóch ciągów jest równa iloczynowi transformat tych ciągów, czyli  $f_1[n] * f_2[n] \leftrightarrow F_1(z)F_2(z)$ .

Poza tym, splot jest:

- operacją przemianą, czyli  $f_1[n] * f_2[n] = f_2[n] * f_1[n]$
- operacją łączną, czyli  $\{f_1[n] * f_2[n]\} * f_3[n] = f_1[n] * \{f_2[n] * f_3[n]\}$

#### Źródła

[1] Athanasios Papoulis - *Obwody i układy*

## 2. Metody numeryczne w technice

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

### ▼ a) metody rozwiązywania zagadnień nieliniowych

Zagadnienia nieliniowe rozwiązuje się przy użyciu metod numerycznych nazywanych **metodami kolejnych przybliżeń** lub **metodami iteracyjnymi**. Polegają one na tym, że na określonym przedziale poszukiwane jest **przybliżone położenie pierwiastka**. W kolejnych krokach **powtarza się obliczenia** uzyskując coraz dokładniejsze położenie tego pierwiastka, **aż do utrzymania zadowalająco niskiego błędu** (który również powinien być szacowany przez stosowaną metodę).

Wśród metod rozwiązywania zagadnień nieliniowych można wymienić metodę bisekcji, metodę regula-falsi, metodę siecznych, metodę Newtona oraz wszelkie modyfikacje metody Newtona.

#### Metoda bisekcji

W metodzie bisekcji zakłada się, że funkcja jest ciągła na analizowanym przedziale  $\langle a, b \rangle$ , natomiast **granice tego przedziału - a i b - mają przeciwnie znaki**. Przeciwne znaki oznaczają, że na tym przedziale funkcja musi przecinać zero. **Metoda ta znajduje tylko jeden pierwiastek funkcji**, nawet jeżeli w zadanym przedziale jest ich kilka.

Na czym polega metoda bisekcji?

1. Oblicza się wartość funkcji w środku przedziału  $\langle a, b \rangle$ , czyli  $f(x_1 = \frac{a+b}{2})$ .
  - jeżeli wartość w tym punkcie jest równa 0 lub wystarczająco bliska 0, mamy pierwiastek (miejsce zerowe)
  - jeżeli nie, przechodzimy do kolejnego kroku
2. Mamy dwa przedziały, czyli  $\langle a, x_1 \rangle; \langle x_1, b \rangle$ , czyli przedziały od punktu a do centrum całego badanego przedziału, i od centrum do końca badanego przedziału
  - Wybieramy przedział, w którym znaki końców granic są sobie przeciwe.
  - Na wybranym przedziale ponownie wyznaczamy wartość funkcji w jego środku.

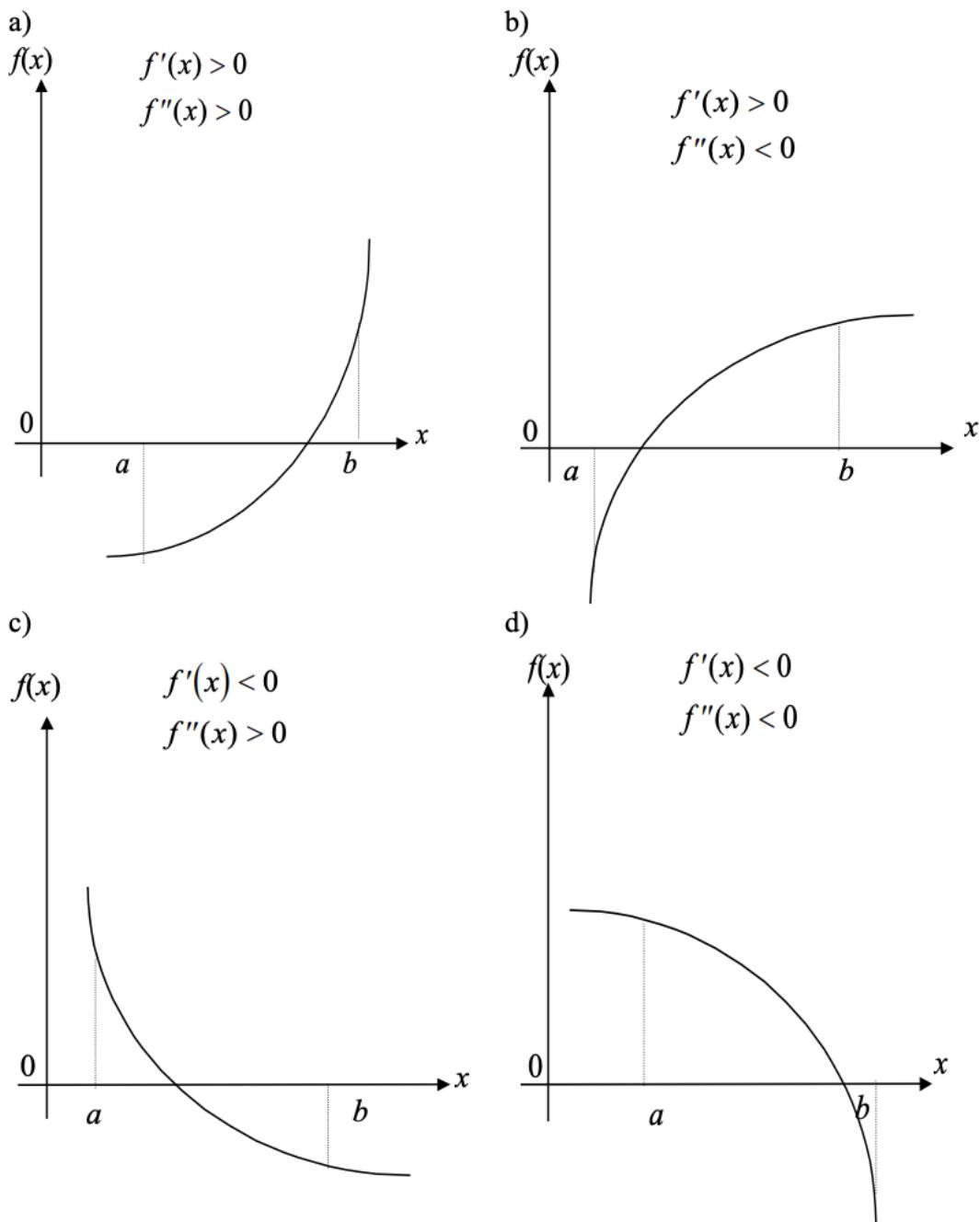
- Jeżeli otrzymana wartość jest równa 0 lub wystarczająco bliska 0, mamy pierwiastek (miejsce zerowe)
- jeżeli nie, powtarzamy znowu ten krok.

Obliczenia kończy się, gdy uzyskany przedział jest wystarczająco mały, żeby z wystarczającą pewnością założyć położenie pierwiastka funkcji.

Z zasady działania, metoda ta nazywana jest czasem metodą połowienia lub metodą równego podziału.

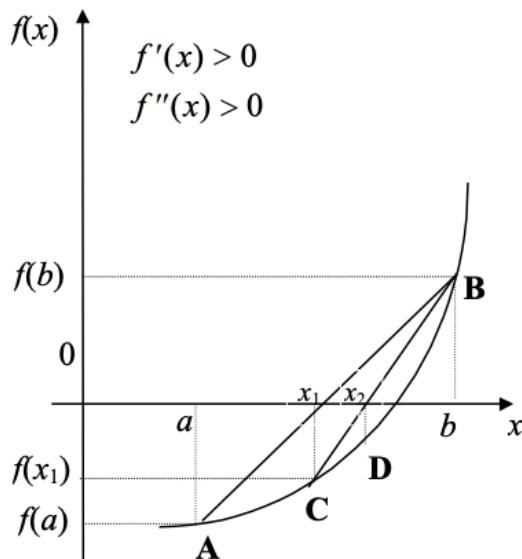
### **Metoda regula-falsi**

Metoda regula-falsi jest nazywana też *metodą fałszywego założenia liniowości funkcji*. Przyjmuje się w niej założenia, że **funkcja ma dwie ciągłe pochodne niezerowe**, przy czym **ich znaki na przedziale  $a,b$  są stałe. Znaki granic przedziału a i b muszą być sobie przeciwe** - co oznacza, że funkcja na tym przedziale przecina osią x.



Rys. 5.1. Wykres funkcji  $f(x)$  w przedziale  $\langle a, b \rangle$  w zależności od znaku pierwszej i drugiej pochodnej funkcji

Metoda polega na tym, że prowadzi się cięciwą od punktu A( $a, f(a)$ ) do punktu B( $b, f(b)$ ). Cięciwa przecina w jakimś miejscu oś x - miejsce to można określić jako  $x_1$  i jest ono przybliżeniem pierwiastka. Jeżeli ma wystarczającą dokładność - to jest to koniec rozumowania.



Rys. 5.2. Interpretacja geometryczna metody regula falsi, jeśli  $f'(x) > 0$  i  $f''(x) > 0$

Jeżeli jednak dokładność nie jest zadowalająca, to prowadzi się kolejną cięciwą, tym razem od punktu C( $x_1, f(x_1)$ ) do punktu A albo B, zależnie od tego, w którym funkcja ma znak przeciwny do  $f(x_1)$ . Ponownie, punkt w którym cięciwa przecina oś x jest kolejnym przybliżeniem pierwiastka i można go użyć jako miejsca zerowego, jeżeli dokładność jest zadowalająca.

### Metoda siecznych

**Metoda siecznych** to modyfikacja metody regula falsi, która jest od niej szybsza. W przypadku metody siecznych, **nie wymaga się, żeby w punktach wyznaczających kolejną cięciwę funkcja miała przeciwe znaki**.

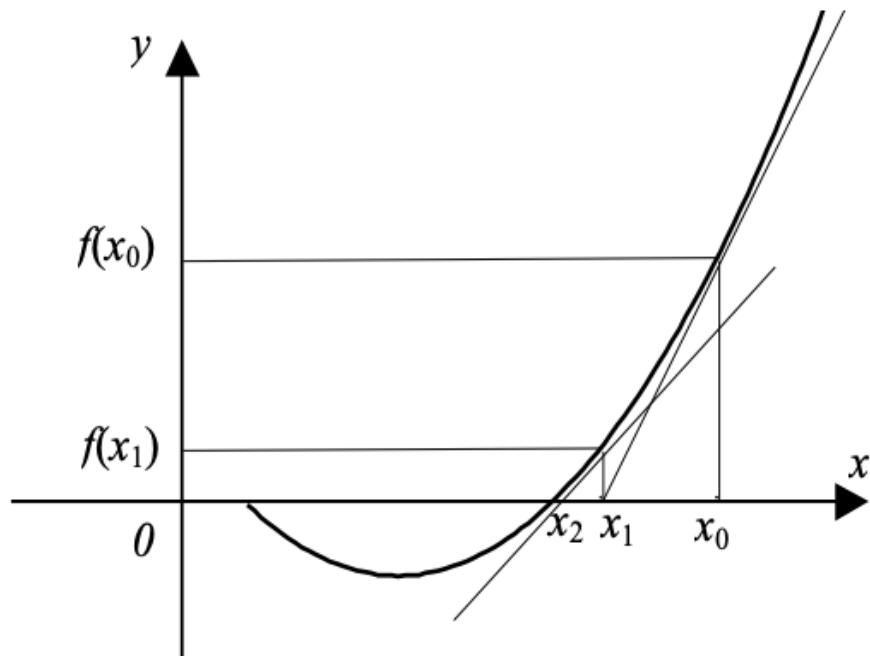
Do kolejnych przybliżeń wykorzystuje się punkty  $x_1, x_2$  itd. Obliczenia w tej metodzie mogą po uzyskaniu określonego przybliżenia zacząć generować coraz większe niepewności. Moment, w którym odchyłki są najmniejsze od zera, uznaje się za końcowy moment obliczeń, a gdy potrzebna jest większa dokładność, proces iteracji zaczyna się od początku, ale na zmniejszonym przedziale.

### Metoda Newtona

Metoda Newtona nazywana jest też metodą Newtona-Raphsona lub metodą stycznych. W tej metodzie wybieramy tylko jeden punkt początkowy rozwiązywania równania. W punkcie tym prowadzona jest styczna do wykresu funkcji. Przecięcie tej stycznej z osią x jest pierwszym przybliżeniem pierwiastka.

Jeżeli przybliżenie nie jest zadowalające, to w punkcie pierwszego przybliżenia oblicza się wartość funkcji i ponownie prowadzi styczną do tego punktu wykresu funkcji.

Ponownie, punkt przecięcia jest kolejnym przybliżeniem. Równania te wykonuje się ponownie aż do uzyskania zadowalającego przybliżenia.



Rys. 5.3. Interpretacja geometryczna metody Newtona-Raphsona

Metodę Newtona można rozszerzyć na układy równań nieliniowych.

### Źródła

[1] Pańczyk, Łukasik, Sikora, Guziak - *Metody numeryczne w przykładach* -  
[http://www.math.uni.wroc.pl/~ikrol/metody\\_num.pdf](http://www.math.uni.wroc.pl/~ikrol/metody_num.pdf)

## ▼ b) analityczne metody optymalizacyjne

**Metody optymalizacyjne** to w skrócie metody numeryczne mające na celu **znalezienie ekstremum** zadanej funkcji (nazywanej też **funkcją celu**). Metody analityczne optymalizacji opierają się na znajomości postaci analitycznej badanej funkcji (lub zestawu badanych funkcji).

### Algorytmy optymalizacji funkcji jednej zmiennej

Grupa algorytmów do optymalizacji funkcji jednej zmiennej ma na celu znalezienie minimum tej funkcji, czyli  $\min(f(x))$ . Algorytmy te można wykorzystać również w celu znajdowania maksimów - wtedy po prostu wyszukuje się minimum funkcji o znaku przeciwnym, czyli  $\min(-f(x))$ .

Wyróżnia się metody bezpośrednich poszukiwań oraz metody oparte na gradientach. Metody bezpośrednich poszukiwań bazują po prostu na obliczanych wartościach funkcji

celu. Metody gradientowe uwzględniają natomiast również pochodne pierwszego i/lub drugiego rzędu funkcji celu.

Metody optymalizacji funkcji jednej zmiennej zakładają, że funkcja jest unimodalna - czyli ma tylko jedno minimum; w praktyce jednak funkcję dzieli się na fragmenty i dla każdego z nich szuka minimum.

Znajdowanie minimum funkcji odbywa się w dwóch krokach. W pierwszym, ustala się przedział, w którym znajduje się minimum. Dopiero w drugim znajduje się minimum z odpowiednią dokładnością.

Wśród metod ustalania przedziału, w którym znajduje się minimum funkcji można wymienić:

- **metodę wyczerpującego poszukiwania** - porównuje ona wartości funkcji celu w kilku punktach przy równych odstępach i wybiera przedział, w którym funkcja zdaje się mieć minimum
- **metodę przyspieszonego poszukiwania** - opiera się ona o jeden punkt startowy i kierunek poszukiwań, a krok sprawdzania wartości może się tu zmieniać wykładniczo (lub wolniej lub szybciej).

Natomiast wśród metod znajdowania minimum z określona dokładnością można wymienić:

- **metody eliminowania obszarów** - np. metoda dzielenia obszaru na pół, metoda złotego podziału, metoda liczb Fibonaciego - w tych metodach w każdym kolejnym kroku iteracji pomniejsza się obszar, w którym poszukiwane jest minimum - aż do uzyskania zadowalająco małego przedziału;
- **metody estymacji punktowej** - np. metoda interpolacji kwadratowej Powella - oprócz informacji o wartości funkcji w różnych punktach, metody te wykorzystują informację o wielkości różnic wartości funkcji;
- **metody oparte na gradientach** - np. metoda Newtona-Raphsona, metoda siecznych - metody te oprócz informacji o wartości funkcji, do znajdowania minimów wykorzystują również informacje o pochodnych analizowanych funkcji celu.

### **Algorytmy optymalizacji funkcji wielu zmiennych**

Metody te analogicznie polegają na poszukiwaniu minimów funkcji, przy czym mówimy tutaj o funkcjach wielu zmiennych - niejako wielowymiarowych. Stąd, złożoność obliczeniowa jest odpowiednio większa.

Wśród metod optymalizacji funkcji wielu zmiennych można wymienić metody bezpośrednich poszukiwań oraz metody gradientowe.

**Metody bezpośrednich poszukiwań** bazują na określaniu wartości funkcji w różnych punktach. Można tu wyróżnić:

- **metodę hipersześcianu:** w przestrzeni wielowymiarowej wybiera się  $2^N + 1$  punktów, z czego jeden jest środkiem, pozostałe wierzchołkami hipersześcianu. Wybiera się punkt z najmniejszą wartością funkcji. Jeśli był on wcześniej wierzchołkiem, to teraz staje się centrum hipersześcianu. Jeżeli był centrum, to zmniejsza się hipersześćan i tak aż do uzyskania odpowiedniej niepewności.
- **metodę sympleksu Neldera-Meada:** zamiast hipersześcianu, na przestrzeni funkcji celu rysuje się sympleks - figurę, która ma liczbę wierzchołków o 1 większą niż liczba zmiennych funkcji celu. Czyli w przypadku funkcji dwóch zmiennych, w przestrzeni trójwymiarowej pojawia się trójkąt. Punkty takiego trójkąta nie mogą być na jednej linii (albo punkty czworokąta nie mogłyby być na jednej płaszczyźnie na funkcji 3 zmiennych). Sympleks z każdą iteracją jest zmniejszany.
- **metodę kierunków sprzężonych Powella:** najpopularniejsza z tych metod; tworzy się  $N$  liniowo niezależnych kierunków poszukiwań minimum i sekwencyjnie wykonuje się serię poszukiwań w tych kierunkach, startując za każdym razem z poprzednio znalezionej punktu.

W przypadku metod gradientowych, oblicza się gradient funkcji celu - ponieważ gradient opisuje kierunek najszybszego wzrostu wartości funkcji. Minus gradient natomiast oznacza najszybszy spadek. Wśród metod gradientowych, można wymienić:

- **metodę Cauchy'ego:** oblicza się (ujemny) gradient funkcji a następnie poszukiwania minimum wykonuje się w kierunku tego gradientu; określa się tu liczbę iteracji, bo im bliżej minimum tym gradient mniejszy i tym więcej iteracji trzeba żeby zwiększać dokładność o coraz mniejszy krok; im dalej znajduje się punkt początkowy od minimum funkcji, tym algorytm jest sprawniejszy
- **metodę Newtona:** metoda ta operuje na szeregach Taylora, ale pomijając niuanse matematyczne, jej istotną cechą jest to, że najlepiej sprawdza się gdy punkt początkowy działania algorytmu znajduje się blisko minimum
- **metodę Marquardta:** metoda ta na początku stosuje algorytm Cauchy'ego, a następnie - bliżej minimum - zaczyna stosować algorytm metody Newtona. Dlatego jest najbardziej efektywna z nich obu.

W przypadku, **gdy poszukujemy minimów funkcji o ograniczonym obszarze**, stosuje się jeszcze inne metody. Są to **metoda funkcji kar i barier** oraz **metoda Rosena rzutowanego gradientu**.

## Źródła

- [1] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Optymalizacja\\_\(matematyka\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Optymalizacja_(matematyka))
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical\\_optimization#Iterative\\_methods](https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_optimization#Iterative_methods)
- [3] Michał Lewandowski - *Metody optymalizacji - teoria i wybrane algorytmy*  
[https://web.sgh.waw.pl/~mlewan1/Site/MO\\_files/mo\\_skrypt\\_21\\_12.pdf](https://web.sgh.waw.pl/~mlewan1/Site/MO_files/mo_skrypt_21_12.pdf)
- [4] Dahlquist - *Metody Numeryczne*

## ▼ c) metaheurystyczne algorytmy optymalizacyjne

**Heurystyka** to z definicji algorytm znajdowania rozwiązań, pozwalający na znalezienie "zadowalającego" rozwiązania w krótkim czasie. Heurystyki stosuje się tam, gdzie algorytm szukający dokładnego rozwiązania jest zbyt skomplikowany lub czasochłonny.

**Metaheurystyka** to ogólny algorytm (heurystyka) do rozwiązywania problemów. Metaheurystyka nie rozwiązuje problemu, metaheurystyka podaje sposób na utworzenie odpowiedniego algorytmu do rozwiązania problemu.

Metody metaheurystyczne są często inspirowane mechanizmami biologicznymi czy fizycznymi i można wśród nich wymienić algorytmy ewolucyjne, sztuczne sieci neuronowe, systemy rozmyte, algorytmy immunologiczne czy systemy mrówkowe.

**Metody metaheurystyczne dzieli się na:**

- **lokalne i globalne:** zależnie od tego, czy szukają minimów lokalnych czy minimów globalnych
- **pojedyncze rozwiązania lub rozwiązania oparte na populacji:** w tym pierwszym przypadku jest jedna ścieżka, która jest zmieniana w trakcie algorytmu, w drugim - istnieje kilka równoległych ścieżek na podstawie których wybierane są optymalne
- **Hybrydowe i memetyczne:** algorytmy hybrydowe wiążą metaheurystykę i tradycyjne metody optymalizacyjne; algorytmy memetyczne opierają się jedynie na środowisku do którego zostały stworzone
- **Równoległe metaheurystyki:** opierają się na uruchomieniu kilku równolegle działających algorytmów
- **Inspirowane naturą metaheurystyki:** wspomniane już wyżej metody bazujące na analogiach do natury.

Poniżej opisano przykładowe algorytmy metaheurystyczne:

### **Symulowane wyżarzanie (simulated annealing)**

Proces symulowanego wyżarzania opiera się na analogii tego, w jaki sposób metal schładza się. Przyjmuje się, że na początku algorytm ma "temperaturę wirtualną". Algorytm ten losowo wybiera punkt startowy i sprawdza wartość funkcji w tym miejscu. Następnie "temperatura" jest obniżana, co ogranicza możliwość algorytmu o przeskakiwanie z miejsca losowego do innego losowego - ogranicza zakres funkcji, w której algorytm szuka optimum.

Ta sztuczna temperatura ogranicza w zasadzie możliwość przeskakiwania algorytmu z miejsca w miejsce. Na początku, algorytm może przeskakiwać z miejsca w miejsce po całej przestrzeni funkcji. Z każdym obniżeniem temperatury, możliwość skoku się zawęża i im niższa temperatura, tym mniejszy skok może wykonać algorytm. Poniżej GIF ilustrujący ten algorytm, na przykładzie poszukiwana najwyższej wartości wartości na wykresie.



### Poszukiwanie Tabu

Algorytm wybiera sobie punkt na przestrzeni funkcji i w jego sąsiedztwie poszukuje punktów bardziej optymalnych. Jeżeli znajdzie punkt najbardziej optymalny w danym sąsiedztwie, to wybiera go na lokalne optimum. Jeżeli nie ma już bardziej "optymalnych" punktów, to to potencjalne optimum zostaje oznaczone jako tabu i algorytm przestaje poszukiwać w jego miejscu nowych rozwiązań - przeskakuje do nowego sąsiedztwa i zaczyna ponowne poszukiwanie minimum.

### Algorytm mrówkowy

Algorytm ten jest analogią do mrówek poszukujących pożywienia dla kolonii. Mrówki poruszają się w sposób losowy, ale gdy jedna z nich zaznaczy ścieżkę, reszta zaczyna podążać tą ścieżką. Oznaczanie odbywa się przez feromony. Feromony na dłuższych ścieżkach od jedzenia do mrowiska mają więcej czasu na odparowanie, dlatego mrówki z czasem skracają ścieżkę na taką, która możliwe najbardziej skróci drogę. Ostatecznie wszystkie mrówki idą tą samą drogą.

Tę obserwację można zastosować w algorytmach metaheurystycznych. W nich na początku wybiera się dwie "ścieżki feromonowe", a następnie aktualizuje je. Takie sztucznie tworzone ścieżki po pewnym czasie działania algorytmu prowadzą do znajdowania optimów funkcji.

### Algorytmy immunologiczne

Tego typu algorytmy naśladują systemy odpornościowe jako bardzo odporne, adaptujące się do warunków, samoorganizujące się i działające w sposób równoległy. W skład odporności wchodzą różnego rodzaju komórki i przeciwnicała, pełniące różne funkcje. Ponadto wyróżnia się odporność wrodzoną i nabytą.

### Inne

Ogólnie rzecz ujmując, inne algorytmy mogą opierać się na podobnego typu analogiach. Algorytmy oparte o naturę często nazywa się **algorytmami ewolucyjnymi**. Mogą naśladować - oprócz mrówek i systemów odpornościowych - również pszczoły, kukułki czy embriogenezę.

### Źródła

[1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Heuristic\\_\(computer\\_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Heuristic_(computer_science))

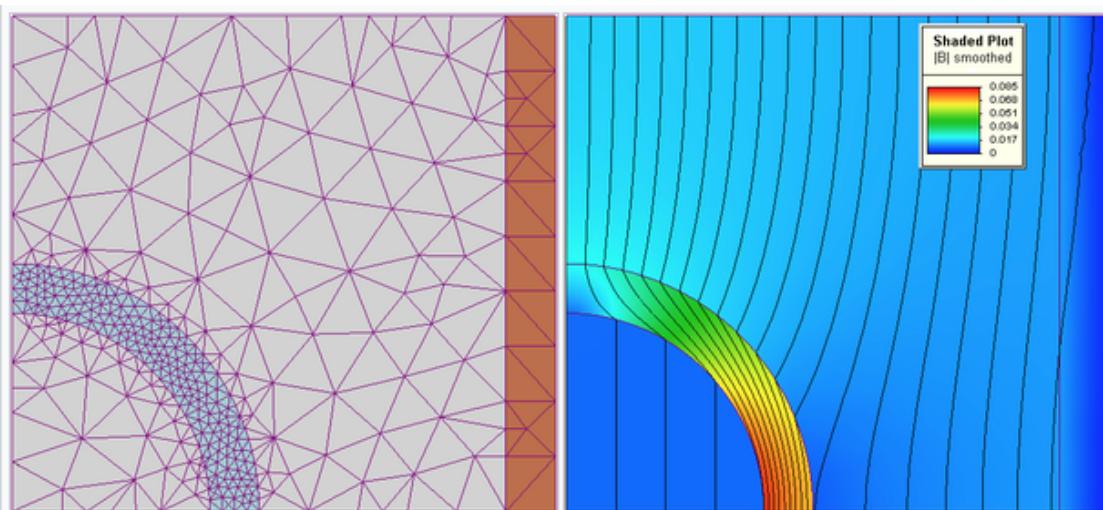
[2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Metaheuristic>

- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical\\_optimization#Iterative\\_methods](https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_optimization#Iterative_methods)
- [4] [https://wwwdbc.wroc.pl/Content/23599/PDF/Janiak\\_Advanced\\_algorithms.pdf](https://wwwdbc.wroc.pl/Content/23599/PDF/Janiak_Advanced_algorithms.pdf)
- [5] <http://www.imio.polsl.pl/mh-mibm.aspx>
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_metaphor-based\\_metaheuristics](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_metaphor-based_metaheuristics)
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary\\_algorithm#Comparison\\_to\\_biological\\_processes](https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_algorithm#Comparison_to_biological_processes)

#### ▼ d) metoda elementów skończonych

**Równanie różniczkowe cząstkowe** to równanie, w którym występuje niewiadoma funkcja dwóch lub więcej zmiennych oraz niektóre z jej pochodnych cząstkowych.  
**Metoda elementów skończonych** to metoda numeryczna służąca właśnie do rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych w dwóch lub trzech zmiennych przestrzennych.

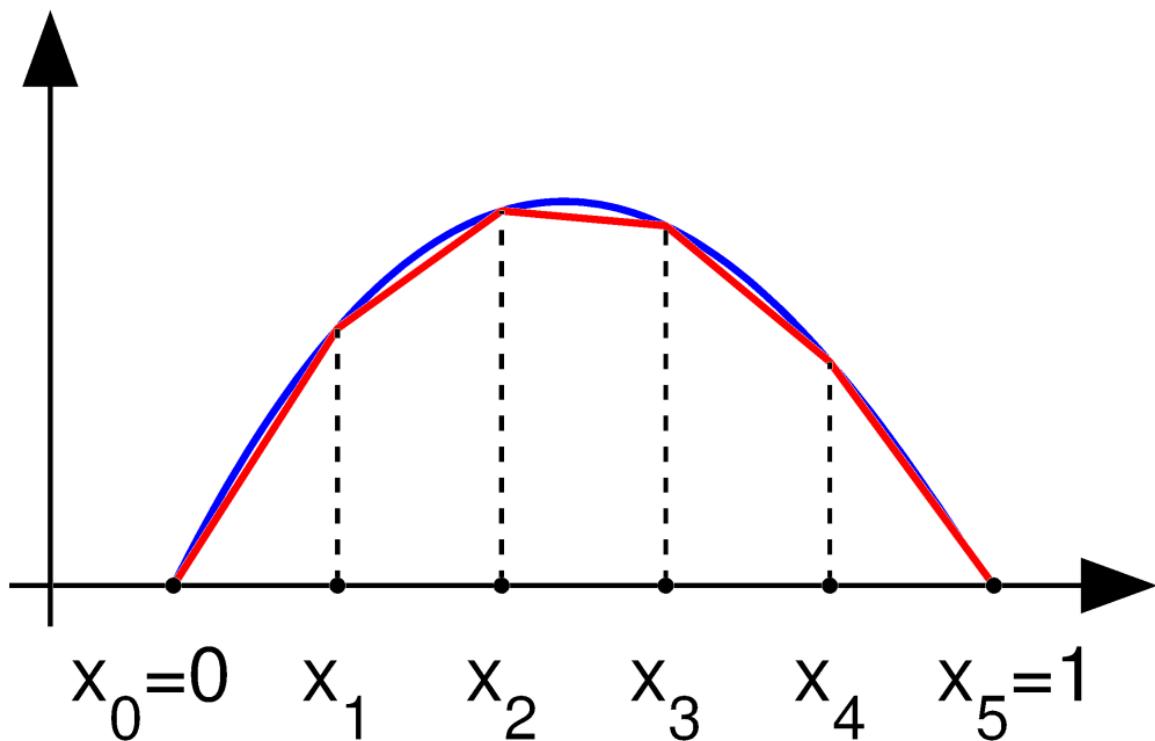
W celu rozwiązania takiego równania różniczkowego, MES (FEM) dzieli duże systemy na mniejsze, prostsze części nazywane **elementami skończonymi**. Odbywa się to przez **dyskretyzację przestrzeni** w jej wymiarach - w uproszczeniu, przestrzeń funkcji dzieli się na siatkę mniejszych elementów o skończonej liczbie punktów.



FEM **mesh** created by an analyst prior to finding a solution to a **magnetic** problem using FEM software. Colors indicate that the analyst has set material properties for each zone, in this case, a **conducting** wire coil in orange; a **ferromagnetic** component (perhaps **iron**) in light blue; and air in grey. Although the geometry may seem simple, it would be very challenging to calculate the magnetic field for this setup without FEM software, using **equations alone**.

FEM solution to the problem at left, involving a **cylindrically** shaped **magnetic shield**. The **ferromagnetic** cylindrical part is shielding the area inside the cylinder by diverting the magnetic field **created** by the coil (rectangular area on the right). The color represents the **amplitude** of the **magnetic flux density**, as indicated by the scale in the inset legend, red being high amplitude. The area inside the cylinder is the low amplitude (dark blue, with widely spaced lines of magnetic flux), which suggests that the shield is performing as it was designed to.

Taki podział przestrzeni jest bardzo istotny: zamiast dopasowywać jakiś wielomian czy inną funkcję do zadanego modelu, **model dzieli się na mniejsze elementy i rozpatruje przez pryzmat prostszych funkcji** - na przykład funkcję jednej zmiennej, zamiast opisywać wielomianem, można opisać od jednego do drugiego kawałka odcinkami prostymi i wyznaczać po prostu ich wartości. **Im mniejsze elementy, tym większa dokładność odwzorowania rzeczywistości, jednak wymaga to coraz większej mocy obliczeniowej.**



Po takim podziale i obliczeniu, pomniejsze elementy są ponownie składane w duży model początkowy. Po powrocie do tego modelu, MES aproksymuje rozwiązanie matematyczne poprzez analityczne minimalizowanie związanej z nią funkcji błędu.

Podstawowa zaleta MES to możliwość uzyskania rozwiązań dla obszarów o skomplikowanych kształtach, gdzie ścisłe obliczenia analityczne są trudne lub niewykonalne. MES jest dlatego stosowana często zwłaszcza w obliczeniach mechanicznych, termodynamicznych czy elektromagnetycznych.

Wadą MES jest to, że obliczenia wymagają dużej mocy, a na dodatek są wykonywane iteracyjnie, więc **małe błędy z czasem mogą rosnąć w duże** - co wymaga dodatkowego uodparniania algorytmu.

**MES może zawierać różne błędy** w swoich rozwiązaniach. Między innymi są to:

- **błąd modelowania:** model matematyczny nieoddający idealnie rzeczywistych warunków

- **błąd wartości współczynników:** założenia co do materiałów, etc. są obarczone błędem, co przekłada się na błąd współczynników równań różniczkowych w symulacji
- **błąd odwzorowania obszaru:** np. model trójwymiarowy ma wymiary nie do końca oddające wymiary obiektu rzeczywistego
- **błąd numeryczny:** np. błąd dyskretyzacji, czyli za mały krok do obliczeń lub błąd maszynowy
- **błąd zaokrągleń:** reprezentacja liczb w komputerze ma skończoną liczbę znaków, więc są one po prostu ucinane.

Inną wadą MES jest to, że symulacje nie mogą być wykonywane w czasie rzeczywistym, bo policzenie układu może zajmować bardzo dużo czasu.

## Źródła

- [1] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_elementów\\_skończonych](https://pl.wikipedia.org/wiki/Metoda_elementów_skończonych)
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method)



## 3. Pomiary wielkości nieelektrycznych

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

### ▼ a) metody stykowe pomiaru temperatury - błędy metod

#### Termopary

Podstawową metodą stykowego badania temperatury jest wykorzystanie termopary. Termopary są oparte na zjawisku Seebecka, w którym różnica temperatur na materiale powoduje powstanie napięcia między punktami na różnych temperaturach. Zależność Seebecka jest liniowa.

Błędy metod pomiarowych w termoparach wynikają z tego, że czułości termopar nie mają przebiegu liniowego - powstające napięcie nie jest wprost proporcjonalne do mierzonej temperatury. Dlatego pomiar termoparą jest możliwy tylko na pewnym zakresie temperatur, zależnie od typu termopary. Typy są unormowane.

W celu linearyzacji termopar, stosuje się współczynniki (poprawki) na przetwornikach.

#### Rezystancyjne czujniki temperatury

- **Czujniki metalowe:** wykorzystuje się tu zmiany rezystancji przy zmianach temperatury materiału. Podobnie jak w przypadku termopar, funkcja rezystywności nie jest wprost proporcjonalna do temperatury. Dlatego czujniki np. platynowe wykorzystuje się tylko dla określonego zakresu temperatur, zależnie od zastosowanego materiału. Platyna ma najszerzy zakres liniowy.
- **Termistory półprzewodnikowe PTC i NTC:** są to czujniki zbudowane z materiałów półprzewodnikowych, których rezystancja silnie zmienia się wraz ze zmianami temperatury. Wyróżnia się czujniki PTC i NTC, o dodatnim lub

ujemnym współczynnikiem temperaturowym rezystancji. Ich błędy pomiarowe biorą się głównie z tego, że współczynniki temperaturowe rezystancji silnie zmieniają się wraz z temperaturą. Ich charakterystyki rezystancji w funkcji temperatury przedstawiane są w skaliach logarytmicznych, co powoduje że wymagane są układy do linearyzacji.

- **Czujniki półprzewodnikowe:** mówi się tu o diodach i tranzystorach, jako scalonych czujnikach temperatury. Ich zaletami są duża czułość i liniowość charakterystyki, natomiast wadą jest mały zakres pomiarowy. Charakterystyki nie są idealnie liniowe, ale lepsze niż w pozostałych czujnikach.

#### Ogólne źródła błędów przy stykowych pomiarach temperatury:

Po pierwsze, przyłożenie termometru czy innego czujnika powoduje pobranie pewnej ilości ciepła z mierzonego punktu. Wprowadzi to zakłócenie termiczne badanego obiektu. Jest to podstawowym źródłem błędu pomiarowego.

Powыższy błąd można zmniejszyć przez zastosowanie płatki pośredniczącej z pastą przewodzącą na obiekcie, do której można przyłączyć stykowy czujnik.

Druga rzecz: w przypadku pomiaru temperatur cieczy i gazów, błąd pomiaru może być generowany dlatego, że element na którym zamocowany jest czujnik w rurze, może odprowadzać ciepło. Dlatego pomiar wykazuje niższą temperaturę, niż ma ciecz czy gaz przepływające przez rurę.

Eliminacja powyższego błędu sprowadza się do zmniejszania wypromieniowywania ciepła z czujnika. Osiaga się to przez stosowanie przesłon ograniczających promieniowanie, polerowanie osłon czujnika (zmniejszenie współczynnika emisjności powierzchni) oraz zwiększenie współczynnika wnikania ciepła - czyli zwiększenie prędkości przepływu gazu czy cieczy w rurze.

#### Źródła:

[1] Materiały z wykładu *Pomiary elektryczne wielkości niewielkiej*

### ▼ b) pomiary tensometryczne - pomiar momentu skręcającego na wale

#### Typy tensometrów

Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje tensometrów: tensometry oporowe oraz tensometry półprzewodnikowe.

**Tensometry oporowe** opierają się o najprostszy wzór na rezystancję,  $R = \rho \frac{l}{S}$ , oraz o fakt, że przy rozciąganiu metalowego elementu, zwęża się on. Spadek

przekroju i wzrost długości powodują wzrost rezystancji materiału. Zmianę grubości materiału przy zmianie jego długości wiąże współczynnik Poissona.

Względna zmiana rezystancji tensometru wiąże się ze zmianą jego długości tzw. **współczynnikiem czułości tensometru** (dla tensometrii oporowej: 2 - 4).

Współczynnik ten zależy od współczynnika Poissona.

Tensometry oporowe stosuje się w zakresie rozciągania sprężystego. Zbyt mocne rozciągnięcie może je uszkodzić.

Pomiary w tensometrii oporowej wykonuje się na ogół w układach mostkowych. Ze względu na relatywnie niewielką czułość, duże naprężenia nie powodują dużej zmiany rezystancji tensometru.

**Tensometry półprzewodnikowe** opierają się o efekt piezorezystancyjny, zgodnie z którym rezystancja tensometru zmienia się wraz ze zwiększeniem naprężenia. Efekt ten jest związany z deformacją sieci krystalicznej materiału półprzewodnikowego. W praktyce, tensometry półprzewodnikowe dzięki innej naturze zjawisk zachodzących w nich, oferują dużo większą czułość na naprężenia, niż tensometry oporowe (współczynnik czułości tensometru przyjmuje wartości rzędu 40 - 400)

## Porównanie tensometrów

Parametr	metalowy	półprzewodnikowy
Zakres pomiarowy	0,1 ...40 000 $\mu\epsilon$	0,001 ...3000 $\mu\epsilon$
stała tensometru (czułość)	2 ...4	40...400
Rezystancja	120,350,600...5000 $k\Omega$	1k...5k $\Omega$
Tolerancja rezystancji	0,1% do 0,2%	1% do 2%
wymiary	0,4 do 150mm typowo 3 do 6mm	1...5mm

Ogólnie, tensometry najczęściej wykonuje się jako foliowe. Dawniej stosowano tensometry drutowe. Tensometry foliowe można budować w postaci membran, co służy np. do pomiaru ciśnienia.

### Zastosowania tensometrów

Tensometry stosuje się wszędzie tam, gdzie potrzebna jest znajomość sił działających na obiekt. Dlatego są one stosowane w czujnikach siły, momentu, wagach kuchennych, przy ciśnieniomierzach, przepływomierzach czy nawet czujnikach przesunięcia.

### Pomiar momentu skręcającego na wale

Tensometry można wykorzystywać do czujników momentu skręcającego na wale.

Można wyróżnić dwa rodzaje czujników momentu:

- **Czujniki momentu do pomiaru wałów statycznych (reakcyjne):** stosowane tam, gdzie wał się nie obraca, a jest poddawany tylko skręceniu. Tego typu czujniki nie muszą się obracać. Można je wykonać w postaci dwóch elementów - jednego przymocowanego nieruchomo, drugiego na wale silnika. Między tymi elementami (kołnierzami) umieszcza się tensometr. Ścislanie tensometru umożliwia pomiar siły, czyli de facto momentu, działającego na czujnik
- **Czujniki momentu do pomiaru na wałach ruchomych:** aby zmierzyć moment, tensometr montuje się na tzw. elemencie torsyjnym, którego skręcenie jest proporcjonalne do momentu przenoszonego z wału silnika na wał maszyny roboczej. Skręcenie mierzone jest właśnie tensometrem w układzie mostkowym. Jeżeli parametry materiału, z którego wykonany jest element torsyjny, są znane - można na podstawie wyniku pomiaru obliczyć moment elektromagnetyczny.

W związku z tym, że czujniki tego typu muszą się obracać na wale, komunikacja i dostarczanie zasilania coraz częściej zapewniane są w sposób bezprzewodowy (komunikacja radiowa oraz zasilanie indukcyjne).

### Źródła:

- [1] Materiały z wykładu *Pomiary elektryczne wielkości niewielkiej*
- [2] <https://www.futek.com/torque-meter>
- [3] <https://tilkom.pl/catalog/czujnik-momentu-obrotowego/>

## ▼ c) pomiary natężenia przepływu

Wszelkie pomiary natężenia przepływu opierają się o dwa równania, opisujące prawa dla dynamiki gazów i płynów. Pierwsze z nich to tzw. równanie stanu gazu doskonałego:

$$p = \frac{nRT}{V} \rightarrow \frac{pV}{T} = nR = \text{const}$$

Drugie to równanie Bernoulliego:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{const}$$

W których p - ciśnienie; n - liczba cząstek (masa); T - temperatura bezwzględna gazu; R - uniwersalna stała gazowa; h - wysokość (położenie), g - przyspieszenie ziemskie;  $\rho$  - gęstość cieczy lub gazu.

Z pierwszego równania wynika, że dla stałej masy gazu, temperatura, objętość i ciśnienie dopasowują swoje proporcje do siebie. Z drugiego równania wynika natomiast, że suma ciśnienia, energii kinetycznej i energii potencjalnej cieczy są w przybliżeniu stałe. Oznacza to tyle, że jak prędkość cieczy rośnie na tej samej wysokości, to ciśnienie spada. Jak ciśnienie i wysokość rosną, to spada prędkość - i tak dalej.

Pierwsze równanie pozwala na wyprowadzenie metod pomiaru przepływu gazu. Drugie równanie pozwala na wyprowadzenie metod pomiaru przepływu cieczy.

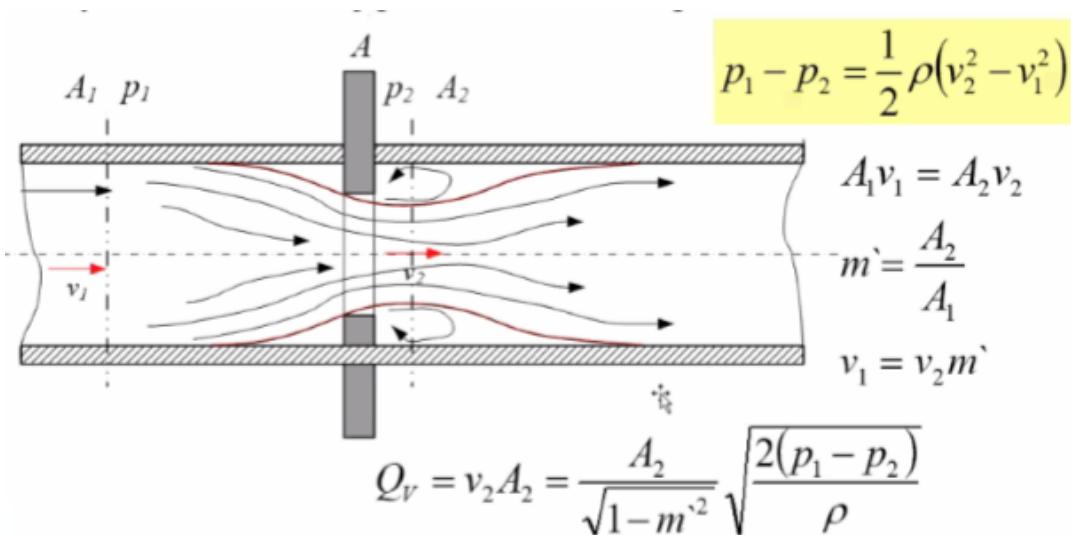
### **Typy pomiarów przepływu płynów:**

Zasadniczo, można wyróżnić cztery różne zasady działania przepływomierzy:

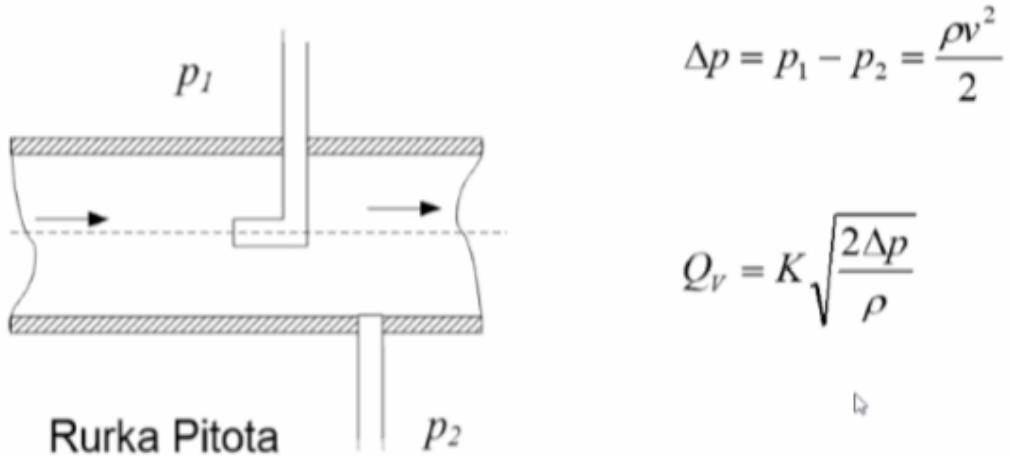
- **Pomiar różnicy ciśnienia:** przepływ oblicza się z różnicy mierzonych ciśnień. Do tego typu metod należą zwężki, kryzy, dysze, rotametry i rurki Pitota
- **Liczniki płynów:** są to np. liczniki bębnowe, z ovalnymi wirnikami czy z mimośrodową komorą wirnikową.
- **Pomiar prędkości:** pomiar przepływu opiera się tu o wielkości stricte mechaniczne, gdzie prędkość przepływu jest przekształcana bezpośrednio na inną wielkość, np. przepływomierze turbinkowe, elektromagnetyczne, ultradźwiękowe
- **Pomiar przepływu masy:** pomiary zależne od tego, jaka masa płynu została przepuszczona przez przepływomierz, chodzi tu np. o przepływomierze Coriolisa czy kalorymetryczne.

## Metody pomiaru przepływu płynów:

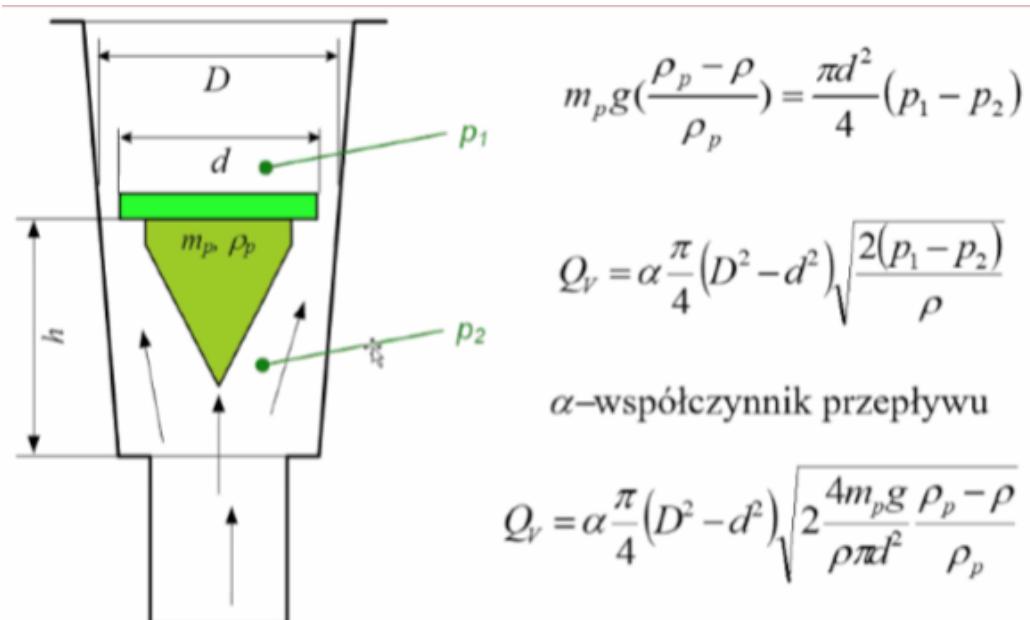
- **Metoda zwężkowa:** w rurze wprowadza się przegrodę zwężającą. Jeżeli mamy stałą wysokość, to z równania Bernoulliego wynika, że suma energii kinetycznej i ciśnienia musi pozostać stała. Przez zwężkę ciecz płynie z większą prędkością (bo płynie ta sama masa i objętość cieczy, ale przekrój przepływu się zmniejsza - przepływ rośnie). Ciśnienie za zwężką jest mniejsze, niż ciśnienie przed nią. Na podstawie znanych przekrojów rury i zwężki, a także gęstości płynu, można z różnicą ciśnień obliczyć przepływ cieczy.



- **Rurka spiętrzająca Pitota:** w tej metodzie, do rury z ciecza doprowadza się dwie rurki. Jedna jedynie styka się z rurą i mierzy ciśnienie statyczne cieczy - jakaś ilość cieczy jest w nią wciskana. Druga rurka jest doprowadzona w środek przepływu i płynącą ciecz jest w nią wciskana mocniej. Różnica między wskazaniem drugiej rurki i pierwszej rurki to ciśnienie dynamiczne przepływu.

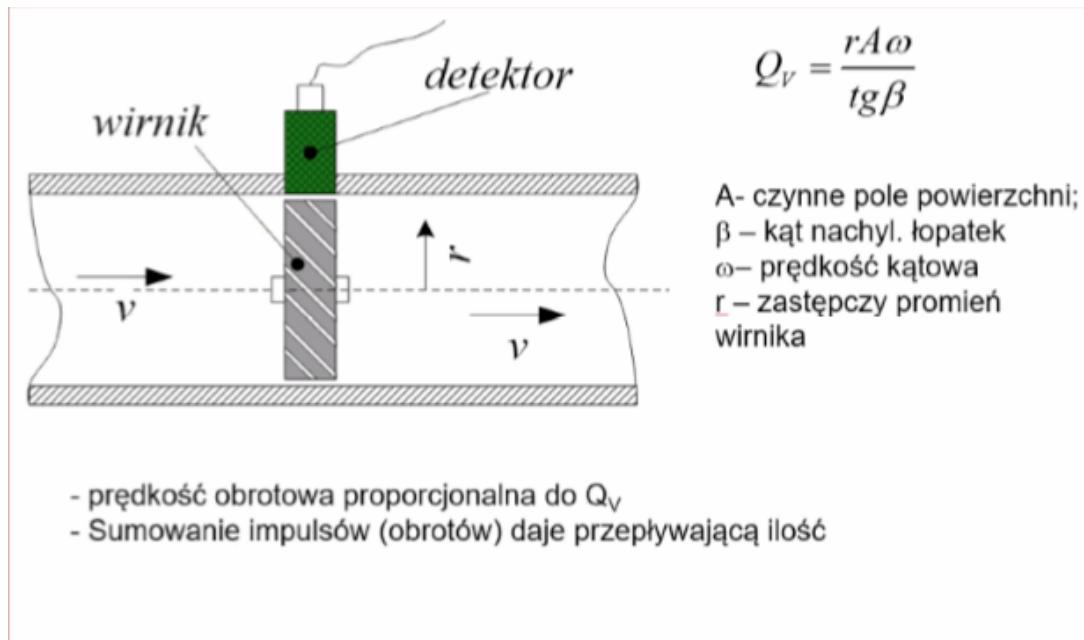


- Przepływomierz płynawkowy (rotametr):** w tej konstrukcji, w rurociągu pionowym umieszczony jest płynak o gęstości większej niż gęstość cieczy. Pływak opada, zamykając rurociąg. Im większy jest przepływ, tym wyżej płynak unosi się nad wlotem rurociągu. Siła cieczy napierającej na płynak jest równoważona przez oddziaływanie grawitacyjne, więc płynak w pewnym punkcie się zatrzymuje. Wysokość płynaka wyznacza nam przepływ, przy czym jest to zależność nieliniowa.

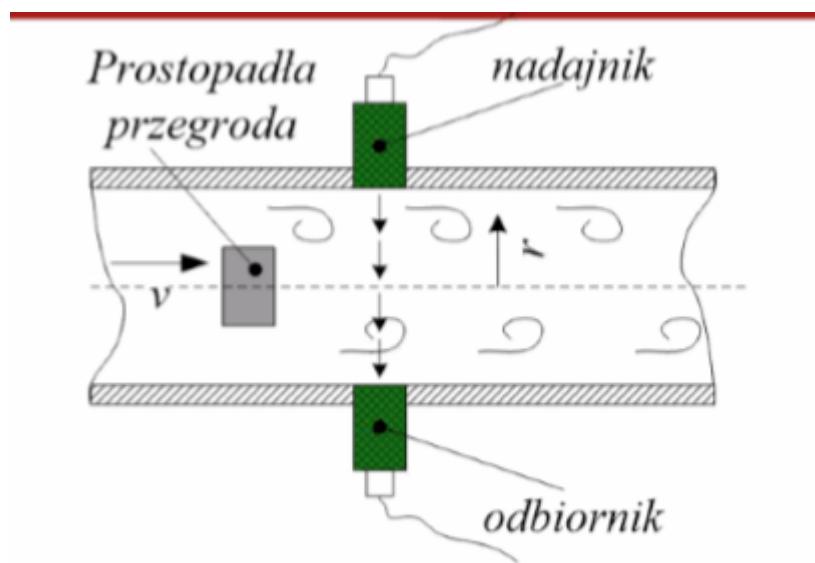


- Przepływomierz wirnikowy (turbinkowy):** w tym przypadku w rurze montuje się wiatraczek o określonym kącie nachylenia łopatek.

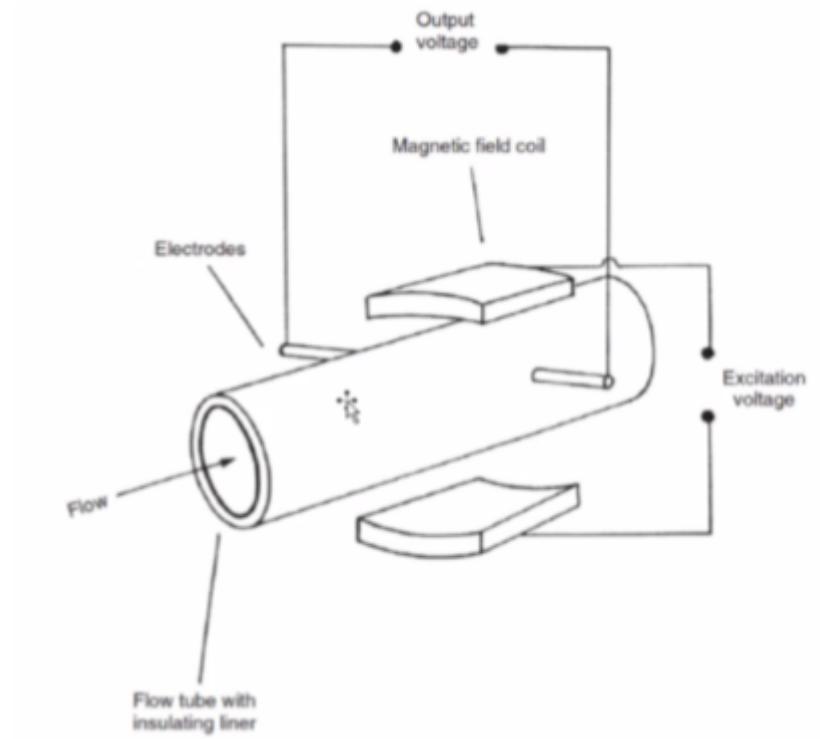
Przepływająca ciecz (lub gaz) powoduje obrót wiatraczka. Prędkość obrotowa jest proporcjonalna do przepływu, więc jej pomiar pozwala na określenie przepływu w rurze.



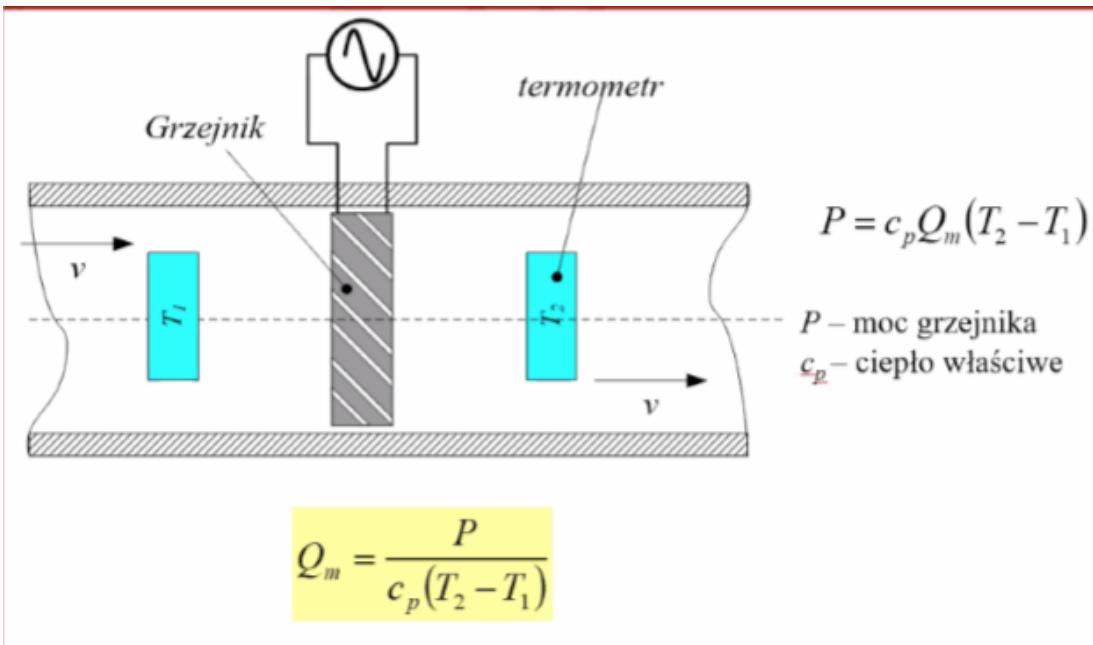
- **Przepływomierz wirowy:** w rurze wprowadza się prostopadłą przegrodę, która powoduje miejscowe zawirowania w przepływającej cieczy. Wskutek wiru, w badanym medium następuje zakłócenie komunikacji np. falami ultradźwiękowymi. Pomiar zakłóceń jest proporcjonalny do szybkości przepływu.



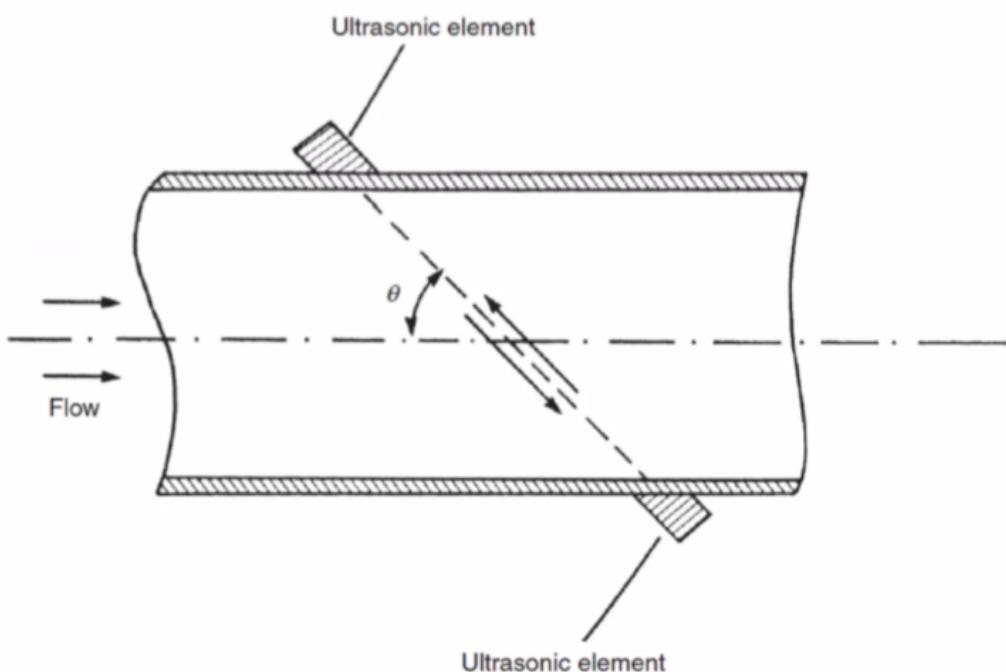
- **Przepływomierz elektromagnetyczny:** przepływomierz tego typu stosuje się tam, gdzie ciecz ma właściwości przewodzące. Na rurze naprzeciw siebie umieszcza się wiele elektrody, a prostopadle do nich umieszcza się cewki AC lub DC. Cewka zasilona napięciem powoduje wzbudzenie prądów wirowych w cieczy. Te indukują napięcie na elektrodach pomiarowych, wskutek względnego przemieszczenia ładunków względem elektrod. Im wyższy przepływ, tym wyższe indukowane napięcie.



- **Przepływomierz kalorymetryczny:** istnieje kilka konstrukcji przepływomierzy kalorymetrycznych. Ich działanie polega na tym, że w rurze umieszcza się element grzejny. Ciecz przepływając przez niego ogrzewa się. Przepływomierz mierzy temperatury przed grzejnikiem i za grzejnikiem. Im szybciej ciecz się porusza, tym cieplejsza dopływa do drugiego punktu pomiarowego. Czyli im większa różnica temperatur między termometrami, tym wyższy przepływ.



- **Przepływomierz Coriolisa (zyroskopowy):** opiera się o działanie siły Coriolisa oddziałującej na obracające się rurki, w których płynie ciecz. Przy stałej prędkości obrotowej, większy przepływ cieczy (większa prędkość cieczy) powoduje większe odchylenie się rurek od płaszczyzny obrotu.
- **Przepływomierz ultradźwiękowy:** w tej konstrukcji, ciecz przepuszczana jest przez rurkę, w której od nadajnika do odbiornika rozchodzą się fale akustyczne. Szybszy przepływ sprawia, że fale docierają do odbiornika szybciej, więc tempo rozchodzenia się ich jest proporcjonalne do przepływu.



## Źródła:

[1] Materiały z wykładu *Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych*

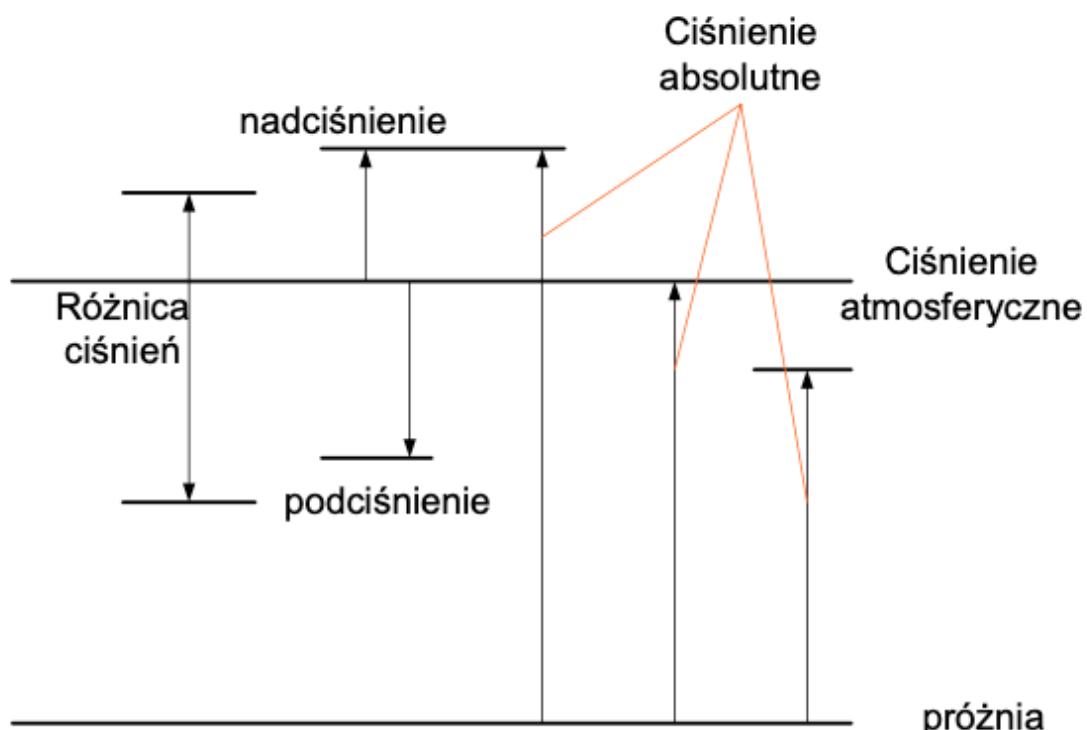
[2] [https://www.princeton.edu/~asmits/Bicycle\\_web/Bernoulli.html](https://www.princeton.edu/~asmits/Bicycle_web/Bernoulli.html)

## ▼ d) pomiary ciśnienia

### Podstawowe wielkości

W przypadku ciśnienia, zawsze mówimy o sile oddziałującej na pewną powierzchnię, wyrażonej w pascalach, czyli  $N/m^2$ . Jednak można tu wyróżnić trzy różne typy pomiarów:

- **Ciśnienie absolutne**, czyli ciśnienie mierzone w odniesieniu do próżni absolutnej. Pomiar ciśnienia atmosferycznego przy powierzchni ziemi jest pomiarem ciśnienia absolutnego.
- **Ciśnienie różnicowe**, czyli różnicę ciśnień między dwoma punktami poboru ciśnienia.
- **Ciśnienie względne**, czyli nadciśnienie lub podciśnienie mierzone w odniesieniu do ciśnienia atmosferycznego.

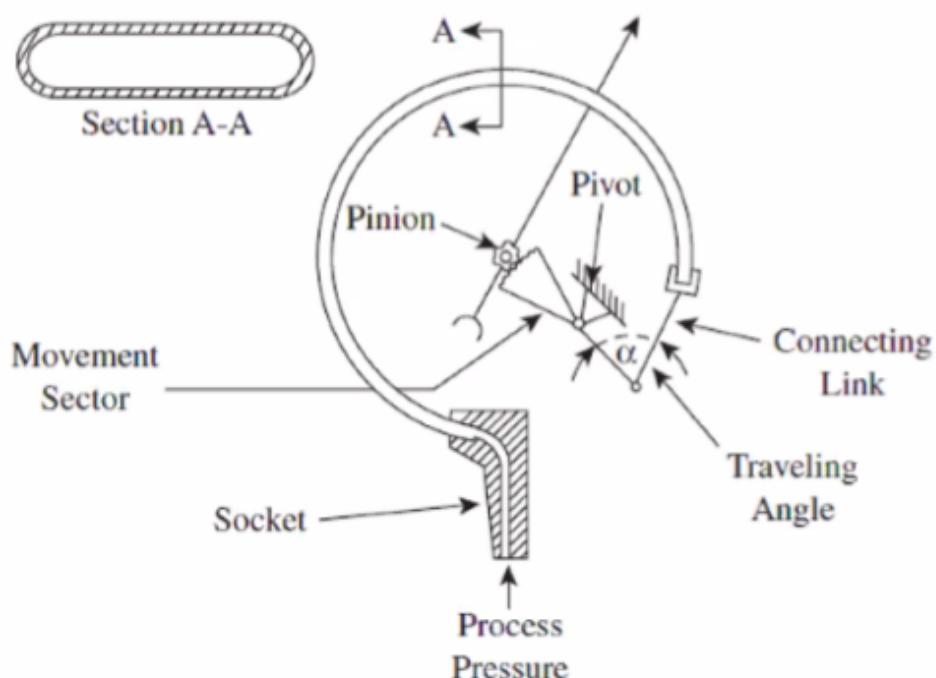


Rysunek 1. Ilustracja zależności pomiędzy ciśnieniami

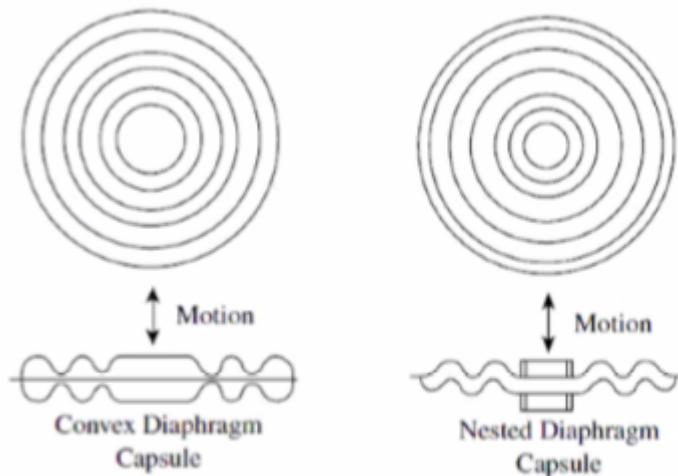
### Urządzenia do pomiaru ciśnienia

Wśród urządzeń do pomiaru ciśnienia można wyróżnić zarówno urządzenia analogowe, jak i elektroniczne. Wśród analogowych można znaleźć manometry i barometry różnej konstrukcji. Wśród urządzeń elektronicznych, wyróżnia się przetworniki rezystancyjne czy pojemnościowe. Mówiąc dokładniej:

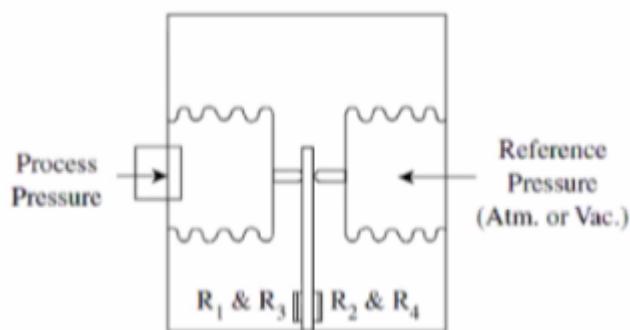
- **Manometr z rurką Bourdona:** proste urządzenie do pomiaru ciśnienia. Ma w konstrukcji rurkę podłączoną do mierzonego procesu. Wzrost ciśnienia w rurce powoduje jej odkształcenie się, natomiast odkształcenie rurki powoduje ruch wskazówki. Odkształcenie to na ogół po prostu rozszerzenie rurki i nacisk na wskazówkę.



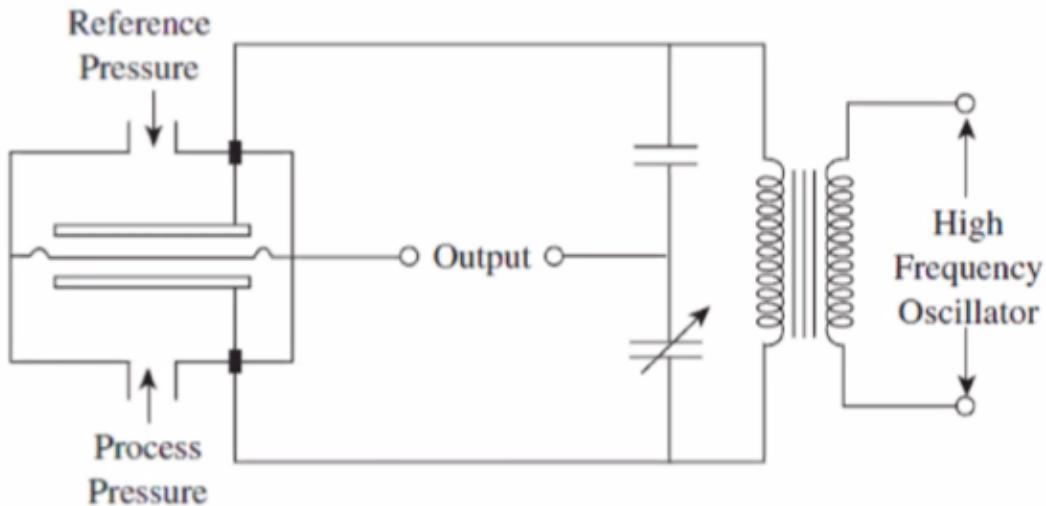
- **Manometr z puszką membranową:** w tym urządzeniu nie ma rurki, jest za to membrana. Większe ciśnienie oznacza większy nacisk na membranę. Membrana się rozszerza. Membrana jest sprężona ze wskazówką manometru, więc jej rozszerzenie powoduje ruch wskazówki.



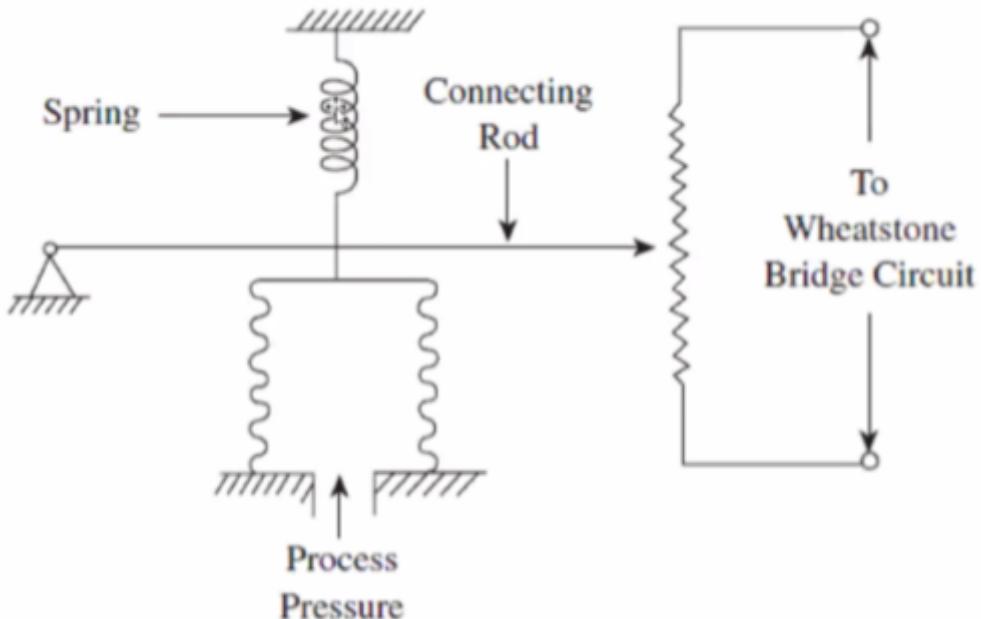
- **Tensometryczne pomiary ciśnienia:** w specjalnych typach mierników ciśnienia, można zastosować tensometry w układzie mostkowym, zamontowane na tej samej belce. Na belkę działają ciśnienie procesu i ciśnienie odniesienia. Różnica ciśnień powoduje odkształcenie belki w jedną ze stron - zależnie od tego, które jest większe. Odkształcenie belki zmienia rezystancje tensometrów - jeden się ścisla, drugi rozszerza. Zmiany rezystancji można zmierzyć i w ten sposób uzyskać różnicę między ciśnieniem mierzonym a ciśnieniem odniesienia.



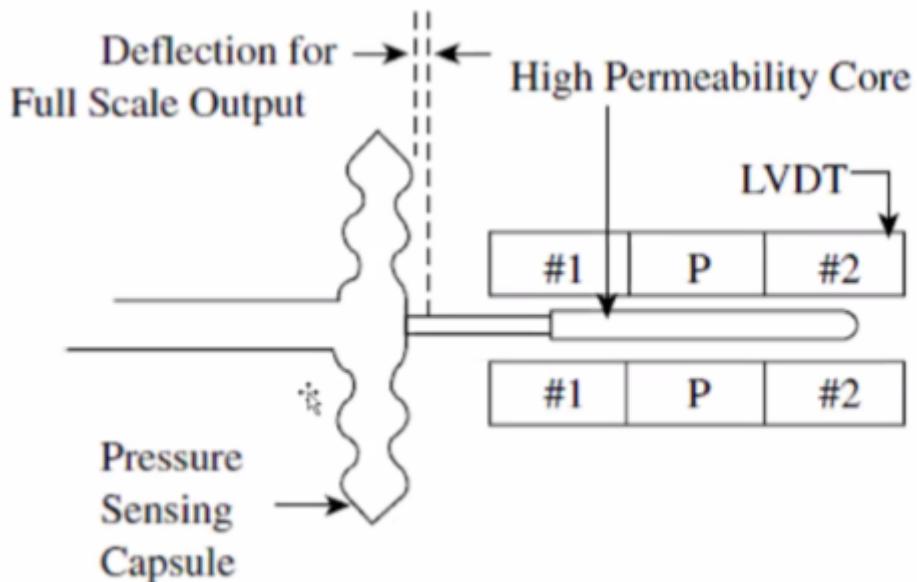
- **Pojemnościowe przetworniki ciśnienia:** ciśnienie odniesienia i ciśnienie procesu oddziałują na membranę między okładkami kondensatora. Stąd, membrana stanowi kondensator zarówno z górną jak i z dolną okładką. Przesunięcie okładki w jedną ze stron powoduje zmiany pojemności kondensatorów. Zmiany pojemności przelicza się na ciśnienie. Układ zasila się napięciem przemiennym.



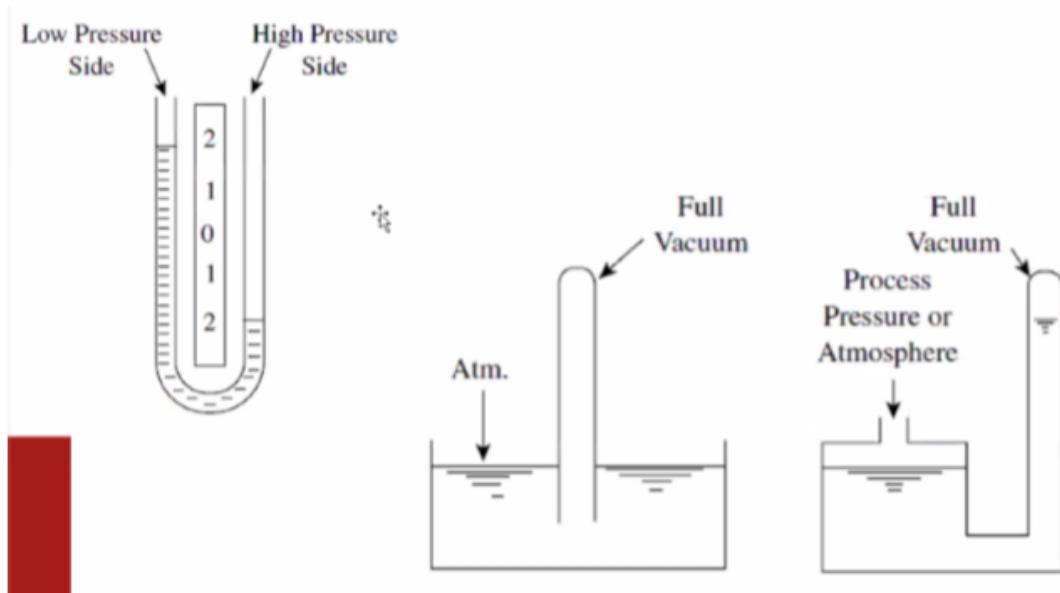
- **Rezystancyjne przetworniki ciśnienia:** ciśnienie procesu powoduje przesuwanie się regulatora rezystora w układzie mostka Wheatstone'a. Zmiana ta powoduje zmianę rezystancji mierzonej w układzie. To również można przeliczyć na ciśnienie.



- **Przetworniki ciśnienia z transformatorem różnicowym:** w tym przypadku ciśnienie powoduje przesuwanie rdzenia w transformatorze różnicowym z dwoma uzwojeniami wtórnymi. Zależnie od kierunku przesunięcia rdzenia, na jednym z uzwojeń powstaje napięcie wyższe, na drugim - niższe. Różnice napięć można przeliczać na ciśnienie.



- **Barometry cieczowe:** w tego typu urządzeniach ciecz wprowadzona jest do u-rurki, na której dwóch końcach działają różne ciśnienia. Mogą to być ciśnienie odniesienia i ciśnienie procesu, mogą być ciśnienie atmosferyczne lub próżnia. W podstawowym układzie, przemieszczenie cieczy powoduje zmianę wskazania ciśnienia, bo następuje wskutek różnicy ciśnień. Z jednej strony u-rurki ciecz się podnosi, z drugiej opada. W bardziej zaawansowanej konstrukcji, ruch cieczy może powodować przesuwanie się położenia rdzenia transformatora różnicowego.



**Źródła:**

[1] Materiały z wykładu *Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych*

[2] Instrukcja do laboratorium *Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych: Badanie czujników i przetworników ciśnienia*

## ▼ e) pomiar wilgotności

Pomiary wilgotności to de facto pomiary ciśnienia częściowego pary wodnej zawartej w powietrzu, czyli - mówiąc prościej - pomiar tego, jak dużo pary wodnej znajduje się w powietrzu.

### Podstawowe wielkości

W przypadku wilgotności, można wyróżnić dwie podstawowe wielkości:

- wilgotność bezwzględną, czyli dosłownie masę wody w jednostce objętości powietrza, co wyraża się na ogół w [g/m<sup>3</sup>]
- wilgotność względną, wyrażoną w [%], która mówi, ile wody jest w powietrzu w odniesieniu do maksymalnej ilości wody, która może być w powietrzu o tej temperaturze. Im wyższa temperatura, tym więcej wody może *pomieścić* powietrze, tj. ciśnienie pary nasyconej rośnie.

### Fizyczne podstawy pomiarów wilgotności

Wśród metod pomiaru wilgotności powietrza można wymienić:

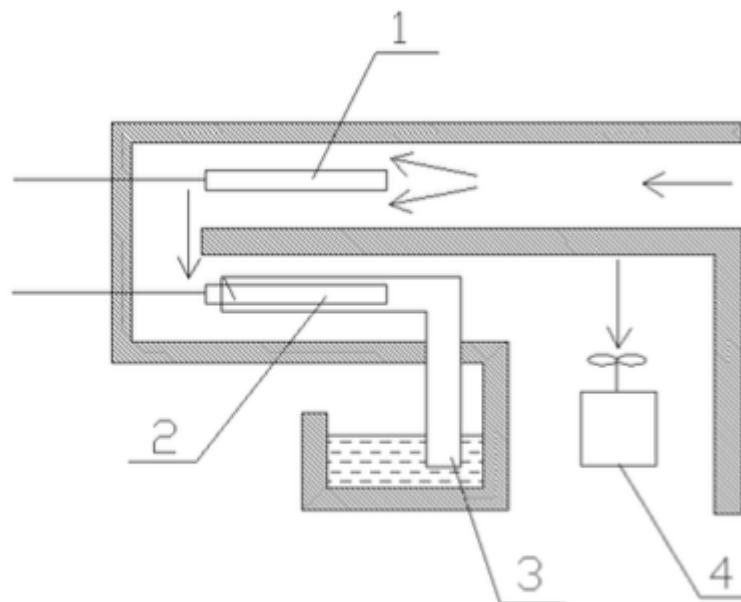
- pomiar masy pary pochłoniętej przez absorbent (higrometry grawimetryczne)
- analizę zmiany parametrów powietrza (tłumienie określonych częstotliwości promieniowania podczerwonego, zmiana prędkości rozchodzenia się fal elektromagnetycznych)
- badanie zmian parametrów materiałów (np. wydłużanie się wilgotnych włosów czy nici nylonowych)
- pomiary charakterystycznych temperatur (np. temperatura punktu rosy)

### Urządzenia do pomiaru wilgotności

Wśród urządzeń do pomiaru wilgotności można wymienić:

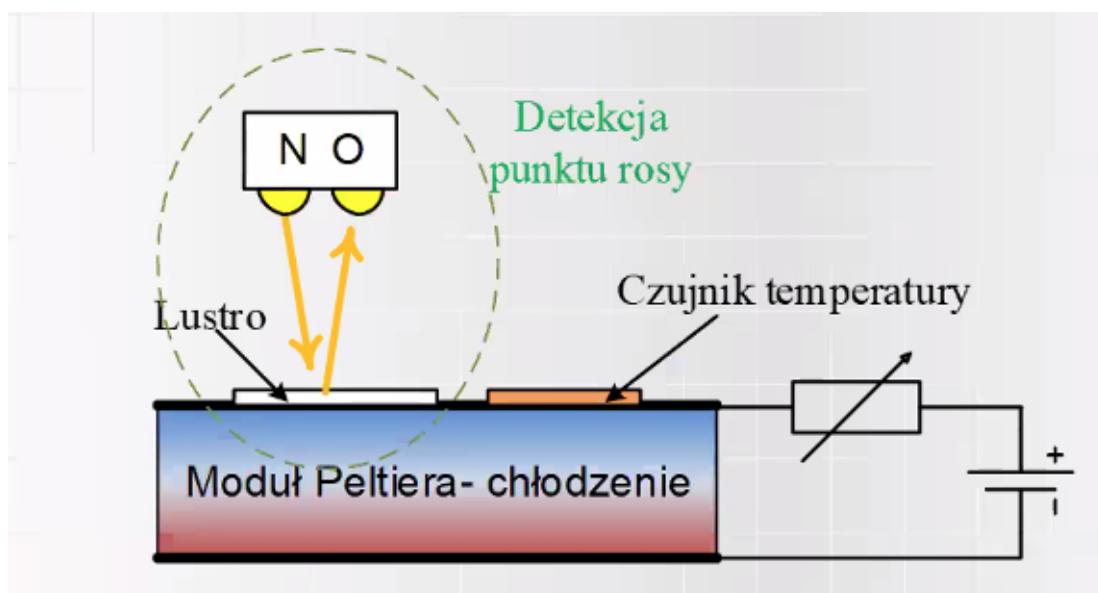
- **Psychrometr Augusta:** urządzenie składające się z dwóch termometrów, z czego jeden jest w zwilżanej koszulce. Woda ze zwilżonego termometru odparowuje, pobierając ciepło (tzw. ciepło utajone), więc wskazanie tego termometru spada. W przypadku 100% wilgotności powietrza, woda nie odparowuje, natomiast przy 0% - odparowuje bardzo szybko. Oznacza to tyle, że im większa różnica temperatur na termometrach, tym mniejsza

wilgotność względna powietrza. W celu eliminacji wpływu ruchu powietrza na wynik pomiaru, stosuje się też **psychrometr Assmanna**, w którym przepływ powietrza jest po prostu wymuszany na zadanym poziomie.

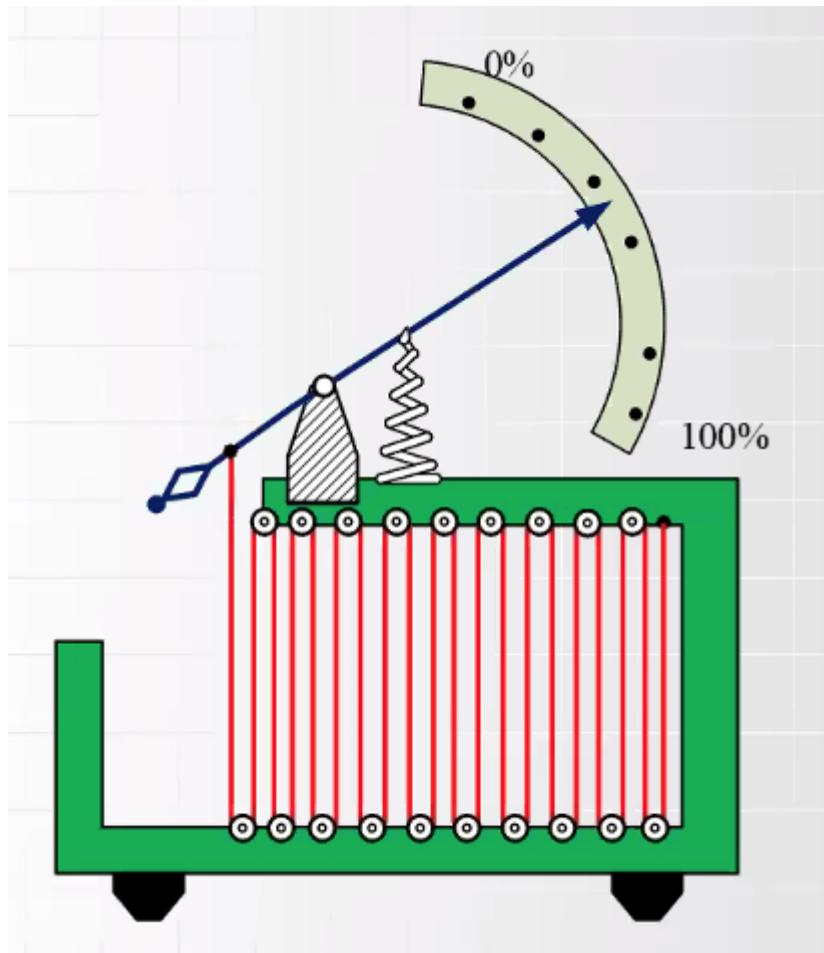


Rys.3.1 Model psychrometru Assmanna

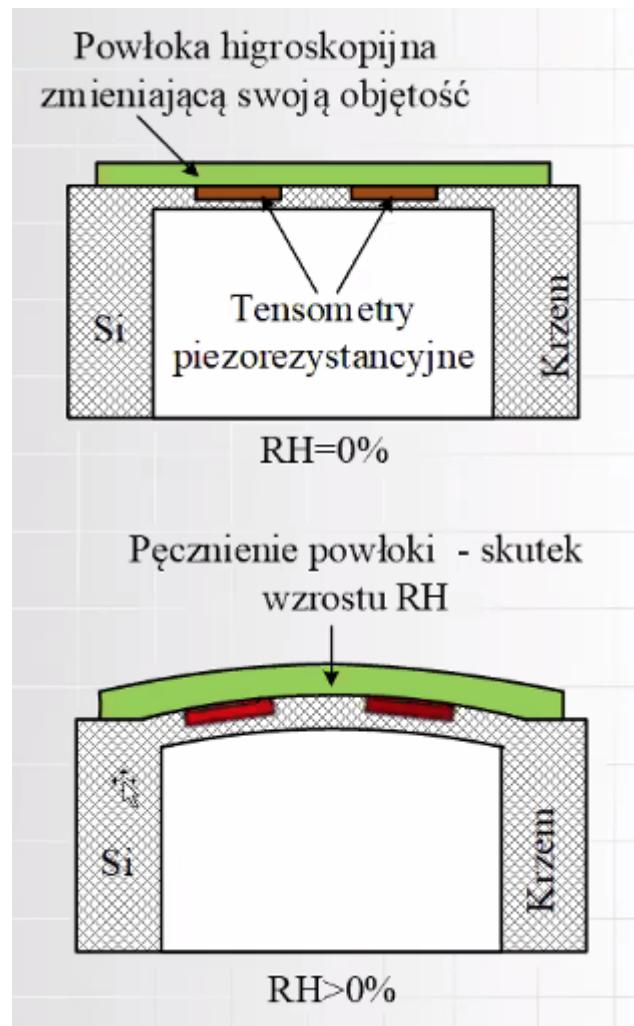
- **Higrometry punktu rosy:** urządzenia, w których miejscowo ochładza się powietrze i sprawdza, przy jakiej temperaturze para wodna skrapla się np. na lusterku. Temperatura ta jest temperaturą punktu rosy i pozwala na odczyt z krzywych psychrometrycznych wilgotności względnej powietrza w aktualnej temperaturze.



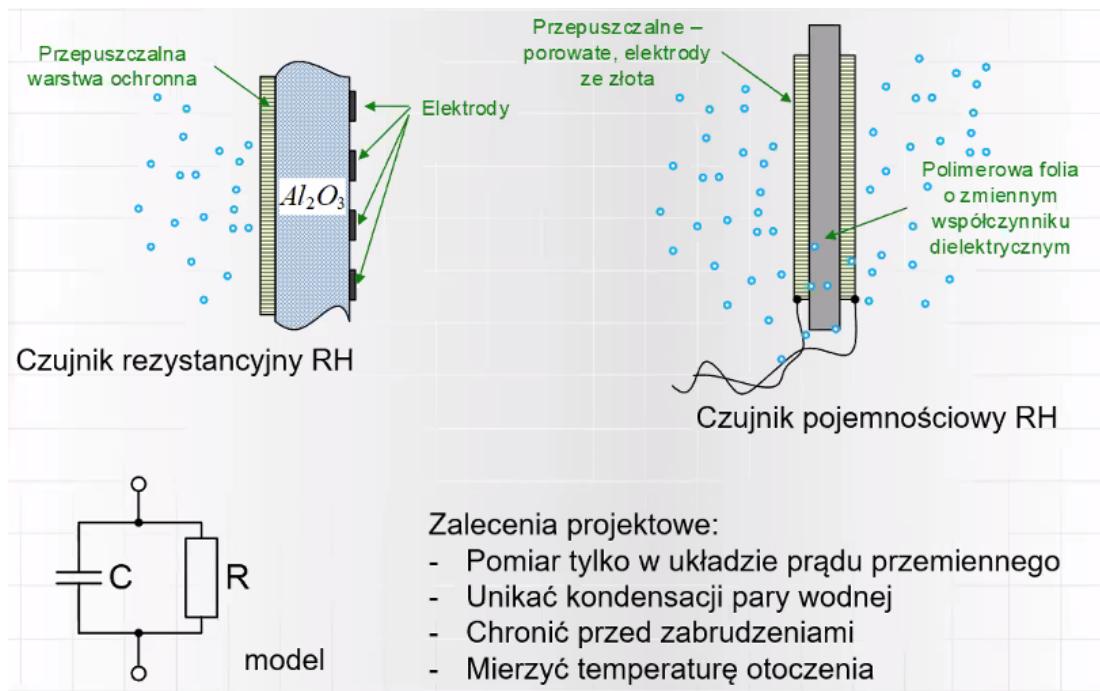
- **Higrometr włosowy:** urządzenie to opiera pomiar o zmianę geometrycznych wymiarów materiałów. Badaną wielkością jest długość włosa, aktualnie nylonowego. Większa wilgotność powoduje wydłużenie włosa, a odczyt tej długości pozwala na zbadanie zmiany wilgotności



- **Higrometr absorpcyjny:** urządzenie działa na podobnej zasadzie, co higrometr włosowy. Większa wilgoć powoduje większe odkształcenie membrany, która naciska na tensometry. Odkształcenie jej zmniejsza nacisk na tensometry, co powoduje zmianę sygnału pomiarowego.



- **Higrometr z czujnikami impedancyjnymi:** zasada działania tego higrometru opiera się o pomiar parametrów elektrycznych materiałów. Wraz ze zmianą wilgotności, zmieniają się rezystancja czy pojemność materiałów elektrycznych. Zmiana tych wielkości powoduje zmianę sygnału pomiarowego, co pozwala na odczyt wilgotności.



### Źródła:

- [1] Materiały z wykładu *Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych*
- [2] Instrukcja do laboratorium *Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych: Pomiary wilgotności*



## 4. Analiza procesów w elektromechanicznym systemie napędowym

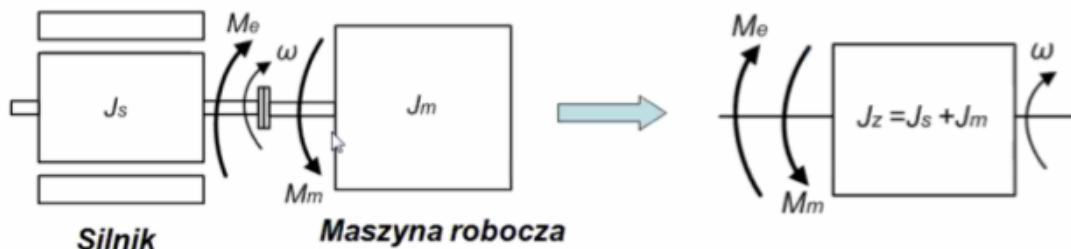
<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

- ▼ a) przy pominięciu procesów elektromagnetycznych silnika - równanie ruchu dla układu napędowego o ruchu obrotowym, schemat strukturalny układu

### Połączenie sztywne

W przypadku połączenia sztywnego, układ napędowy o ruchu obrotowym można przedstawić w postaci jednomasowego wału o momencie bezwładności równym sumie momentów bezwładności silnika i maszyny roboczej.

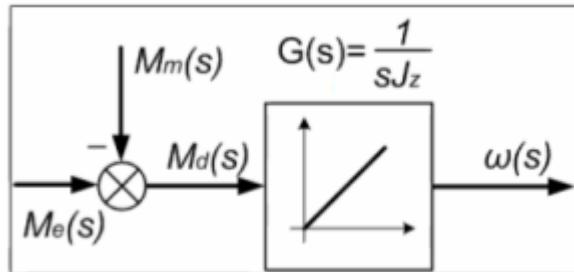
Moment pochodzący od silnika traktuje się jako zmienną zależną od układu sterowania, natomiast moment obciążenia jest traktowany jako zakłócenie zewnętrzne. Można również zdefiniować moment dynamiczny, czyli różnicę momentu obciążenia i momentu elektromagnetycznego w stanach dynamicznych układu.



J<sub>z</sub> - zastępczy moment bezwładności jest równy sumie momentu bezwładności J<sub>s</sub> wirnika silnika i momentu bezwładności J<sub>m</sub> maszyny roboczej

$$J_z = J_s + J_m$$

Połączenie sztywne można przedstawić w postaci schematu blokowego jako całkę z momentu dynamicznego o stałej równej momentowi bezwładności układu, jak poniżej:



Równanie ruchu dla układu napędowego z połączeniem sztywnym wyprowadza się z zasady zachowania energii. Energia elektryczna dostarczana do układu jest transformowana na energię użyteczną oraz energię kinetyczną. Energię kinetyczną stanowią energie obrotu mas bezwładności. Energia użyteczna to energia przenoszona na układ napędowy.

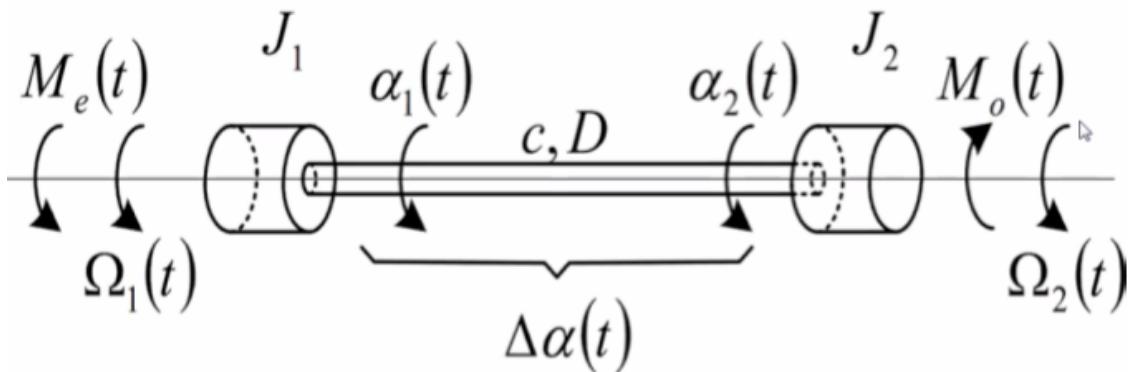
Ogólnie rzecz ujmując, równanie ruchu układu z połączeniem sztywnym przyjmuje postać:

$$m_e - m_o = m_d = J \frac{d\omega}{dt}$$

Czyli moment dynamiczny jest równy pochodnej prędkości pomnożonej przez moment bezwładności układu. Moment dynamiczny można przedstawić przy tym jako różnicę między momentem elektromagnetycznym silnika a momentem oporowym maszyny roboczej.

### Połączenie elastyczne

W przypadku połączenia elastycznego, w stanach dynamicznych prędkości obrotowe pędnika i maszyny roboczej są różne, zależnie od elastyczności połączenia. W tym przypadku, analizę układu sprowadza się do połączenia dwumasowego, w którym moment bezwładności wału dzieli się po połowie między pędnik a maszynę roboczą.

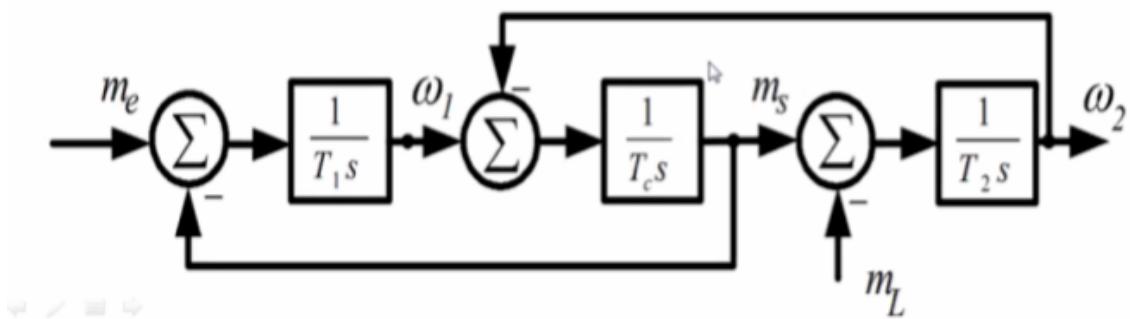


$$J_1 = J_e + \frac{J_s}{2}$$

$$J_2 = J_o + \frac{J_s}{2}$$

Schemat blokowy takiego układu jest bardziej złożony, ponieważ moment oprócz momentów obciążenia i elektromagnetycznego, pojawia się moment skrętny związany z elastycznością wału. W układzie pojawiają się zatem stałe czasowe silnika, wału oraz maszyny roboczej, co ilustruje poniższy schemat blokowy:

### Schemat układu:



Schemat blokowy układu jest jednoznacznie związany z równaniem ruchu. W układzie dwumasowym można wyróżnić równania ruchu dla poszczególnych jego elementów, kolejno połączenia silnik-wał, połączenia wał-obciążenie oraz samego wału:

$$m_e - m_s = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}$$

$$m_s - m_o = J_2 \frac{d\omega_1}{dt}$$

$$m_s = K_w \int_0^t (\omega - \omega_2) d\tau + D_w (\omega - \omega_2)$$

Przy czym  $K_w$  i  $D_w$  to kolejno współczynniki sprężystości i tłumienia wału.

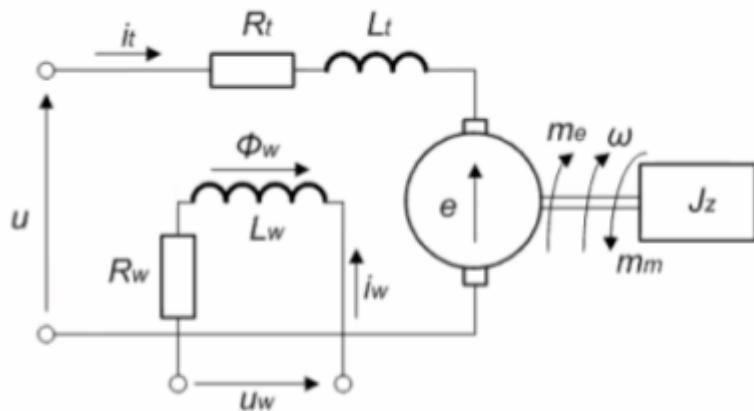
**Źródła:**

- [1] Materiały i notatki z wykładu *Elektromechaniczne systemy napędowe*
- [2] Zawirski, Deskur, Kaczmarek - *Automatyka napędu elektrycznego*

## ▼ b) z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego - model i równania stanu układu, elektromechaniczna i elektromagnetyczna stała czasowa układu i ich wpływ na charakter procesów elektromagnetycznych

### Model układu

Układ napędowy z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego można przedstawić schematycznie w poniższej postaci:



Widać więc, że w takim układzie można wyróżnić takie elementy jak obwód twornika, obwód wzbudzenia, generację siły elektromotorycznej oraz część mechaniczną.

**Obwód twornika** jest traktowany jako **element inercyjny** o stałej czasowej równej **elektromagnetycznej stałej czasowej twornika**. To oznacza, że przy skokowej zmianie napięcia zasilania lub siły elektromotorycznej, zmiana wartości prądu twornika wystąpi z opóźnieniem określonym przez tę stałą czasową.

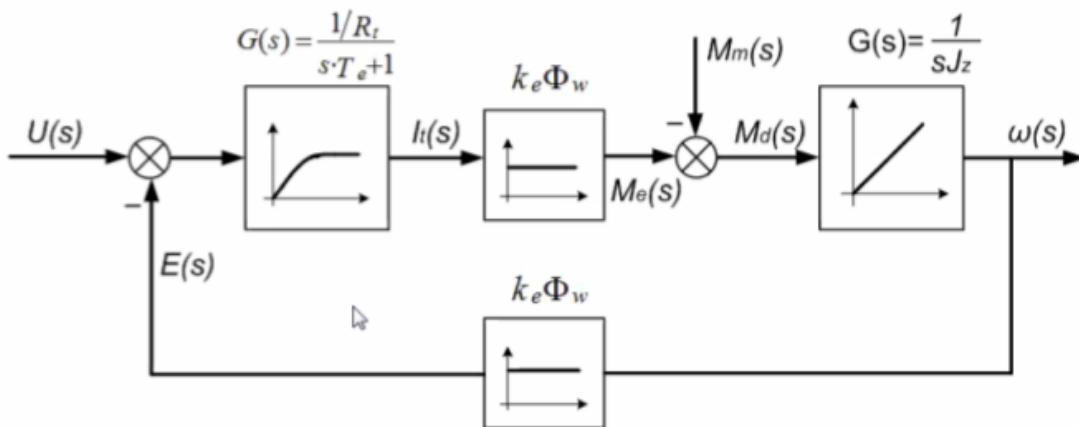
Elektromagnetyczną stałą czasową układu z silnikiem prądu stałego wyznacza się z parametrów obwodu twornika zgodnie z równaniem:  $T_e = \frac{L_t}{R_t}$ . Im wyższa indukcyjność, tym większa stała czasowa.

Podobnie, struktura **obwodu wzbudzenia** jest członem inercyjnym, przy czym najczęściej w przypadku silników obcowzbudnych pomijamy ten element.

**Generację siły elektromotorycznej** można traktować jako człon proporcjonalny o wzmacnieniu zależnym od wartości strumienia wzbudzenia oraz stałej konstrukcyjnej silnika.

**Układ mechaniczny** traktuje się jako element całkujący opisywany przez równanie ruchu  $m_e(t) - m_m(t) = m_d(t) = J_z \frac{d\omega(t)}{dt}$ . Jego stała całkowania jest równa momentowi bezwładności układu mechanicznego. Stąd, **mechaniczna stała czasowa** układu jest **zależna od momentów bezwładności** silnika i maszyny roboczej oraz od prędkości biegu jałowego oraz znamionowego momentu silnika, zgodnie z równaniem  $T_M = \frac{J\Omega_0}{M_N}$ . Od mechanicznej stałej czasowej zależy to, jak szybko silnik przyspiesza, więc również to, jak szybko siła elektromotoryczna silnika zrówna się z napięciem znamionowym.

Połączenie powyższych członów daje następujący układ napędowy z silnikiem prądu stałego:



Mając na uwadze powyższe, silnik prądu stałego można opisać następującymi równaniami stanu:

- obwód twornika:  $u(t) = R_t \cdot i_t(t) + L_t \cdot d/dt i_t(t) + e(t)$
- siła elektromotoryczna twornika:  $e(t) = k_e \cdot \Phi_w \cdot \omega(t)$
- moment elektromagnetyczny silnika:  $m_e(t) = k_e \cdot \Phi_w \cdot i_t(t)$

- równanie równowagi mechanicznej:  $m_e(t) - m_m(t) = J_z \cdot \frac{d}{dt}\omega(t)$

Silnik można opisać również poniższymi równaniami różniczkowymi:

$$T_e \frac{di_t}{dt} = -i_t + K_t(u_t - \psi_f \omega_m)$$

$$T_M \frac{d\omega_m}{dt} = \psi_f i_f - m_o$$

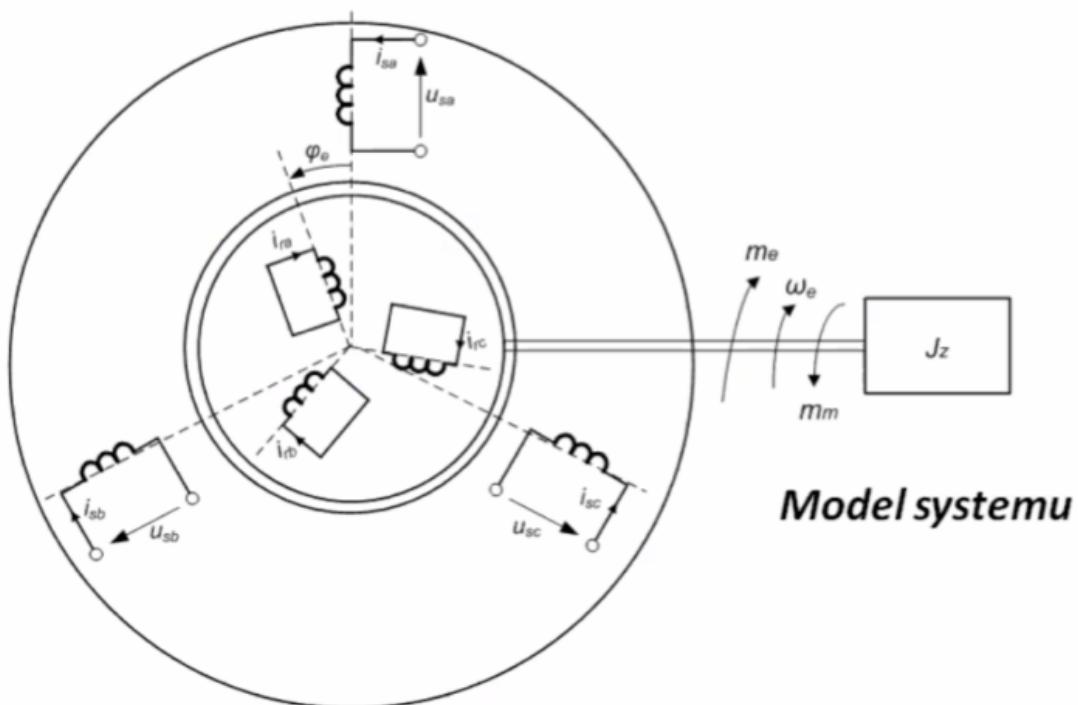
Gdzie  $K_t = \frac{U_{tN}}{I_{tN} R_{tN}}$  to współczynnik wzmacnienia obwodu twornika silnika prądu stałego

### Źródła

[1] Materiały i notatki z wykładu *Elektromechaniczne systemy napędowe*

## ▼ c) z silnikiem indukcyjnym - model i wektorowe równania stanu układu, współczynniki tłumienia i stałe czasowe układu elektromechanicznego

Silnik indukcyjny modeluje się jako maszynę z trzema uzwojeniami stojana oraz trzema uzwojeniami wirnika, a także z połączeniem mechanicznym.



Model trójfazowy można opisać układami równań dla każdej z faz osobno, jednak jest to rozwiązanie niewygodne, ponieważ składa się z wielu równań i

zmiennych. W celu uproszczenia układu pod kątem sterowania, stosuje się transformaty Clarke i Parka, przekształcające układy równań trójfazowych do zapisu wektorowego, stacjonarnego kolejno względem stojana lub wirnika.

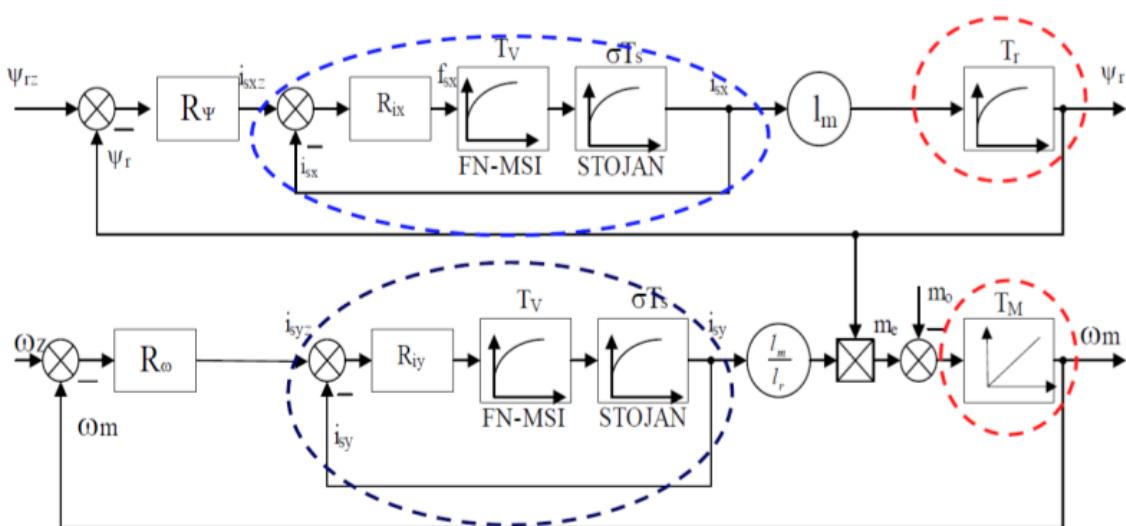
Wektorowe równania stanu są dużo wygodniejsze, ponieważ zmienne pojawiające się w trzech fazach opisywane są jednym wektorem, który może być sterowany przez układ regulacji.

Wśród równań stanu silnika indukcyjnego można wyróżnić:

- Równanie wektorowe stojana:  $\underline{u}_s = R_s \cdot \underline{i}_s + \frac{d}{dt} \underline{\psi}_s + j\omega_k \underline{\psi}_s$
- Równanie wektorowe wirnika:  $0 = R_r \cdot \underline{i}_r + \frac{d}{dt} \underline{\psi}_r + j(\omega_k - \omega_e) \underline{\psi}_r$
- Równanie wektorowe strumienia stojana:  $\underline{\psi}_s = L_s \cdot \underline{i}_s + L_m \cdot \underline{i}_r$
- Równanie wektorowe strumienia wirnika:  $\underline{\psi}_r = L_m \cdot \underline{i}_s + L_r \cdot \underline{i}_r$
- Równanie równowagi mechanicznej:  $m_e - m_m = \frac{J_z}{p} \cdot \frac{d}{dt} \omega_e$
- Równanie momentu elektromagnetycznego silnika:  $m_e = \frac{3}{2}p(\underline{\psi}_s \times \underline{i}_s) = -\frac{3}{2}p(\underline{\psi}_r \times \underline{i}_r)$

Najważniejsze spośród tych równań to równanie momentu elektromagnetycznego silnika, ponieważ to z niego wynika, że sterowanie wektorowe silnikiem indukcyjnym wymaga kontroli nad jego zmiennymi elektromagnetycznymi - prądem lub strumieniami.

W układach sterowania silnikami indukcyjnimi można wyróżnić następujące stałe czasowe:



- **stałą czasową obwodu stojana Ts** - człon stojana jest inercyjny i czas narostu prądu jest skończony
- **stałą czasową obwodu wirnika Tr** - człon wirnika jest inercyjny i w nim czas narostu prądu i procesów elektromagnetycznych jest znacznie dłuższy niż w obwodzie wirnika
- **stałą czasową mechaniczną TM** - połączenie mechaniczne przedstawia się jako człon całkujący moment dynamiczny na prędkość i jego stała czasowa wynika z niezerowej bezwładności wirnika i wału
- **stałą czasową przekształtnika TV** - tranzystory mają skończony czas przełączania i wprowadzają do układu sterowania kolejną stałą czasową

### **Współczynniki tłumienia**

W przypadku silnika indukcyjnego, można wyróżnić drgania elektromagnetyczne w uzwojeniach (stany nieustalone), drgania wynikające z regulacji i objawiające się oscylacjami prędkości oraz drgania skrętne, potencjalnie wynikające z elastycznych połączeń.

Można zatem wyróżnić współczynniki:

- tłumienia drgań elektromagnetycznych - czyli rezystancję poszczególnych uzwojeń;
- tłumienia oscylacji układu regulacji - czyli współczynnik ustalany przy doborze docelowej transmitancji, osiągany dzięki odpowiednim nastawom regulatorów
- tłumienia drgań skrętnych - ponownie, wynikający z doboru nastaw regulatorów w układzie regulacji

### **Źródła**

- [1] Materiały i notatki z wykładu *Elektromechaniczne układy napędowe*
- [2] Materiały i notatki z wykładu *Automatyka napędu elektrycznego - podstawy*
- [3] Notatki z wykładu *Komputerowo wspomagane projektowanie układów regulacji*

## **▼ d) wyznaczanie współczynników elektromagnetycznych i stałych czasowych dla elektromechanicznego systemu napędowego z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego i z silnikiem indukcyjnym**

## Silnik obcowzbudny

Silniki obcowzbudne prądu stałego można na podstawie ich obwodów twornika i wzbudzenia opisać za pomocą prostego układu równań Kirchhoffa. W przypadku takiego silnika, można wyróżnić następujące stałe czasowe:

- **elektromagnetyczną stałą czasową** obwodu twornika, opisaną równaniem  $T_e = \frac{L_t}{R_t}$ , w którym Lt i Rt to odpowiednio indukcyjność i rezystancja obwodu twornika
- **elektromechaniczną stałą czasową**, opisaną równaniem  $T_M = \frac{J\Omega_0}{M_N}$  czyli zgodnie z momentem znamionowym, prędkością biegu jałowego i bezwładnością masy wirnika
- **stałą czasową układu przekształtnika**, czyli czas przełączania zaworów;

Oraz następujące współczynniki:

- **współczynnik wzmacnienia obwodu twornika**, opisany równaniem  $K_t = \frac{U_{tN}}{I_{tN} R_{tN}}$ , czyli wiążący wielkości obwodu twornika odpowiedzialne za prąd

Powyższe wielkości definiują kolejno: czas odpowiedzi obwodu twornika na napięcie, czas narastania prędkości przy pojawienniu się momentu dynamicznego, czas przełączania przekształtnika, wzmacnienie członu twornika.

## Silnik indukcyjny

W przypadku silnika obcowzbudnego, można wyróżnić następujące stałe czasowe:

- **stałą czasową obwodu stojana**  $T_s = \frac{L_s}{R_s}$
- **stałą czasową obwodu wirnika**  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$
- **stałą czasową mechaniczną**  $T_M = \frac{J\Omega_0}{M_N}$
- **stałą czasową przekształtnika**  $T_0$

Oraz następujące współczynniki elektromagnetyczne:

- **poślizg** czyli stosunek różnicy prędkości wirowania pola stojana i wirnika do prędkości wirowania pola stojana (prędkości synchronicznej)
- **liczbę par bieguna**ów, czyli wielkość konstrukcyjną wiążącą prędkość elektryczną pola magnetycznego z prędkością mechaniczną wirnika

Z czego powyższe wielkości można w większości wyznaczyć z parametrów znamionowych silnika, z wyjątkiem poślizgu który wynika z obciążenia silnika

oraz inercji  $J$  która wynika z masy wirnika.

## Źródła

[1] Materiały i notatki z wykładu *Elektromechaniczne układy napędowe*



## 5. Zakłócenia w układach elektroenergetycznych

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

### ▼ a) identyfikacja zwarć w systemie el. en. – algorytmy detekcji, klasyfikacji oraz określania kierunku zwarcia

#### Detekcja zwarć (*fault detection*)

Detekcja zwarć jest potrzebna w celu umożliwienia zadziałania urządzeń zabezpieczających. Zasadniczym celem detekcji zwarcia jest wyodrębnienie przebiegu na interwały przed-zwarciowy i zwarniowy (tzw. fault interval).

W celu detekcji zwarć mierzy się różne wartości elektryczne, zależnie od użytej automatyki. Przykładami są amplitudy prądów fazowych, napięcia fazowe, impedancje fazowe czy prądy kolejności zerowej. Często operuje się też na pochodnych tych sygnałów.

Można wyróżnić dwa główne algorytmy detekcji zwarć:

- **algorytm próbka-po-próbce:** porównuje się dwie kolejne próbki ze sobą. Jeżeli różnica między nimi jest zbyt duża (powyżej ustalonego progu), aktywowany jest licznik. Jeżeli różnice kolejnych próbek wciąż są duże, licznik się przepelnia i aktywowane jest urządzenie zabezpieczające.
- **algorytm okres-po-okresie:** porównuje się ze sobą aktualną próbkę i jej odpowiednik w poprzednim okresie (próbkę przesuniętą w czasie o 20 ms w przypadku sieci 50 Hz). Jeżeli różnica między tymi próbками jest większa niż zakładane maksimum, to - podobnie jak wcześniej - aktywowany jest licznik i jeżeli kolejne różnice są również zbyt duże, licznik się przepelnia i aktywowane jest urządzenie zabezpieczające.

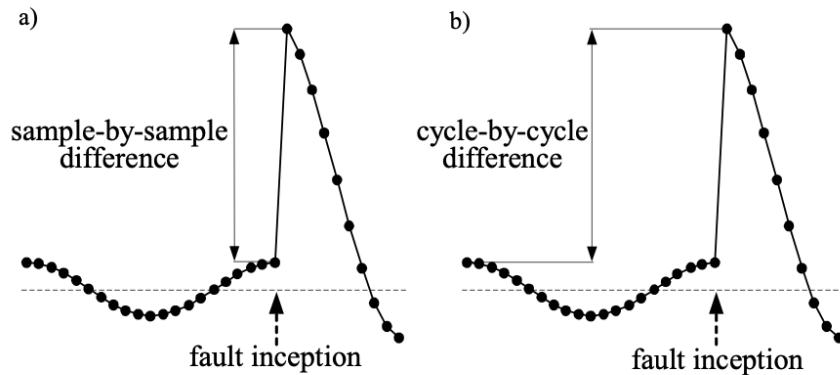
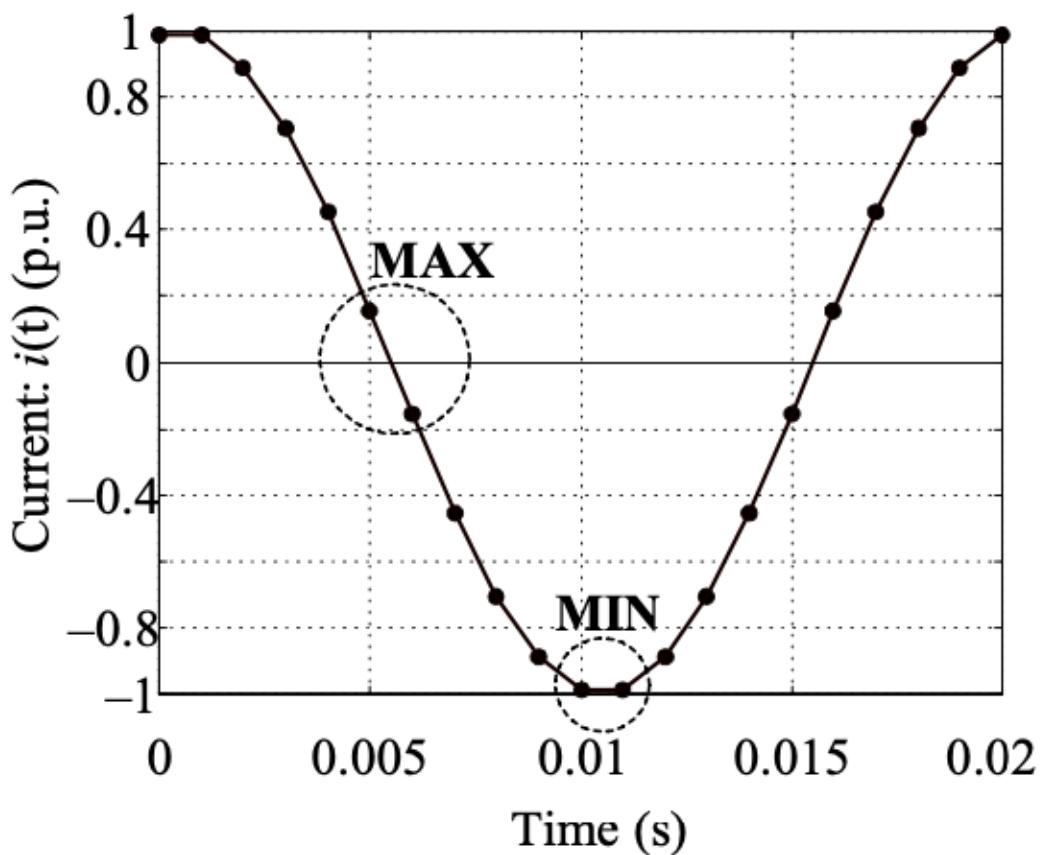


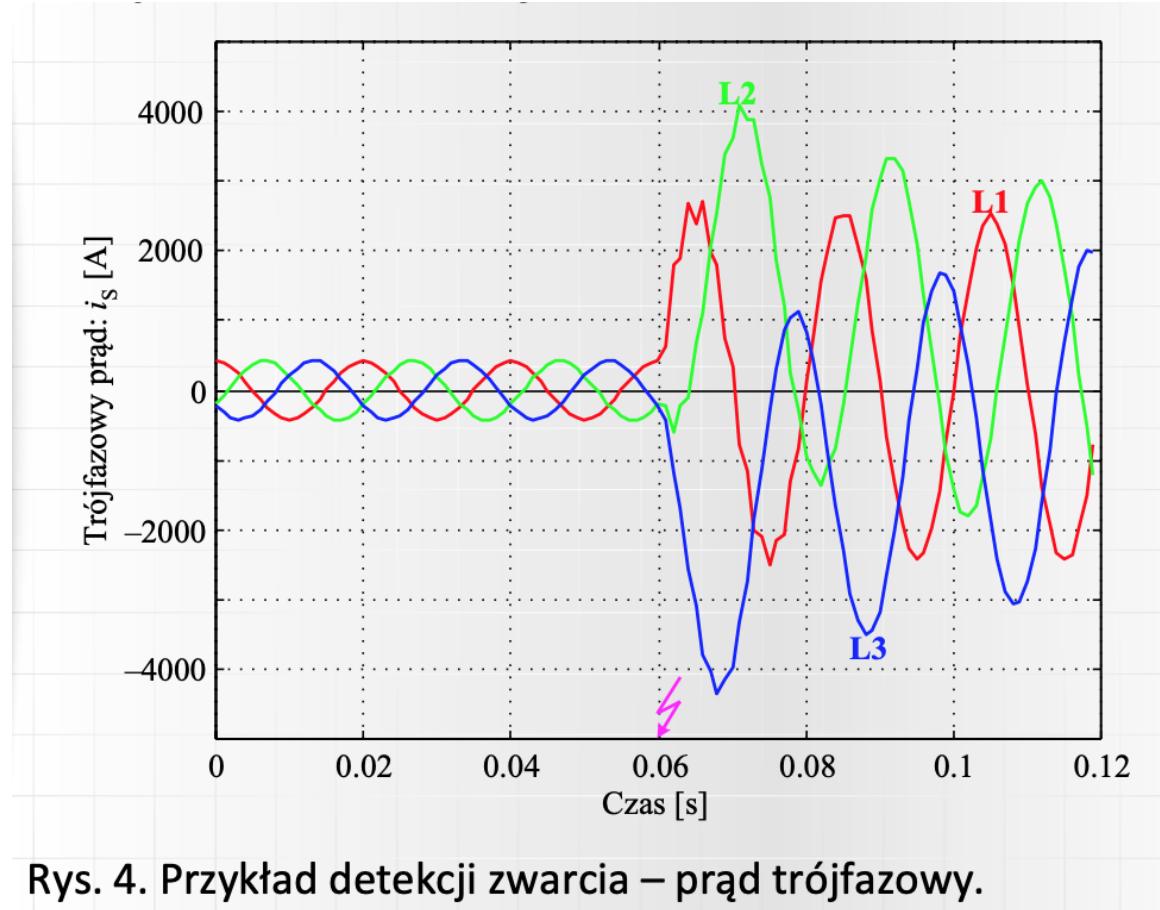
Fig. 13.1. Fault detection – illustration of differentiation methods: a) sample-by-sample, b) cycle-by-cycle

Wartości progowe można określić np. na podstawie typowego przebiegu, gdzie największe różnice między próbками zachodzą w pobliżu zera prądu czy napięcia, a najmniejsze - w szczytowych momentach sinusoidy.



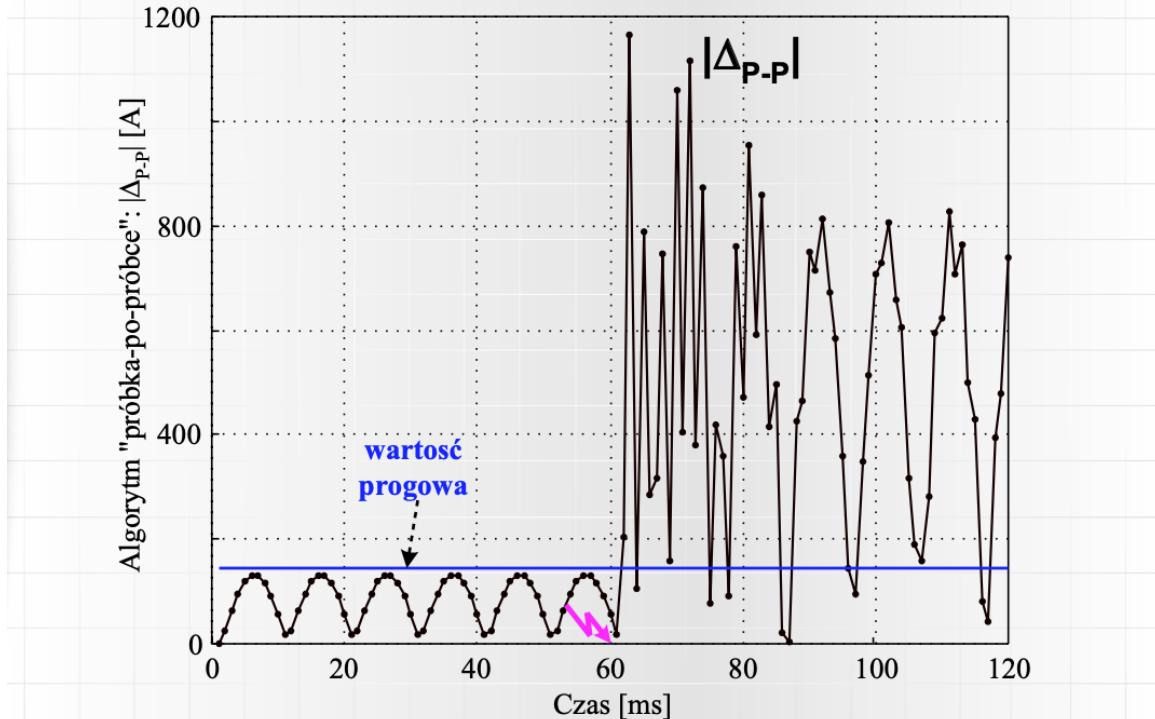
W każdym razie, ustawia się pewien próg, nazywany wartością progową, którego przekroczenie powoduje aktywację automatyki zabezpieczającej. Próg ten jest jakąś krotnością wybranej wartości, np. 1,2 spodziewanego prądu - ale wartość

jest różna zależnie od sytuacji stosowania zabezpieczenia. Dotyczy to obydwu algorytmów.



Rys. 4. Przykład detekcji zwarcia – prąd trójfazowy.

# Przykład detekcji zwarcia



Rys. 5. Przykład detekcji zwarcia – algorytm „próbka-po-próbce”.

## Określenie kierunków zwarć (fault direction discrimination)

Określenie kierunku zvarcia to obliczenie mające odpowiedzieć na pytanie, w którą stronę przebiega zvarcie. Informacja ta jest potrzebna, ponieważ urządzenia zabezpieczające zabezpieczają przed różnymi typami zvarć, mianowicie zvarciami do przodu lub do tyłu względem rozpatrywanego punktu (przykład: urządzenia przeciwwarciowe odległościowe mogą zabezpieczać np. 85% długości linii przed zvarciami w określonym kierunku, ale jednocześnie nie reagują w ogóle na zvarcia przebiegające w drugą stronę).

W celu określenia kierunku zvarcia, wyznacza się impedancję przyrostową dla składowej zgodnej napięcia i prądu. Impedancja przyrostowa to po prostu zmiana impedancji po wystąpieniu zvarcia. Liczy się ją z poniższego wzoru:

$$\underline{\Delta Z}_1 = \Delta R_1 + j\Delta X_1 = \frac{\underline{\Delta V}_1}{\underline{\Delta I}_1} = \frac{\underline{V}_1 - \underline{V}_1^{\text{pre}}}{\underline{I}_1 - \underline{I}_1^{\text{pre}}}$$

A mówiąc bardziej po ludzku, impedancja przyrostowa dla składowej zgodnej to impedancja, w której zamiast tradycyjnego  $U/I$ , na górze daje się różnicę między składową zgodną napięcia w trakcie zwarcia i przed zwarciem, a na dole - różnicę między składową zgodną prądu w trakcie zwarcia i przed zwarciem.

Jak już mamy przyrost impedancji, to **określenie kierunku zwarcia zależy tylko od położenia impedancji przyrostowej na płaszczyźnie zespolonej**. Jeżeli **impedancja jest w trzeciej ćwiartce, zwarcie jest zwarciem do przodu**. Jeżeli **impedancja jest w pierwszej ćwiartce, zwarcie jest zwarciem do tyłu**. Tak po prawdzie, wystarczy znać znak reaktancji, żeby określić kierunek zwarcia.

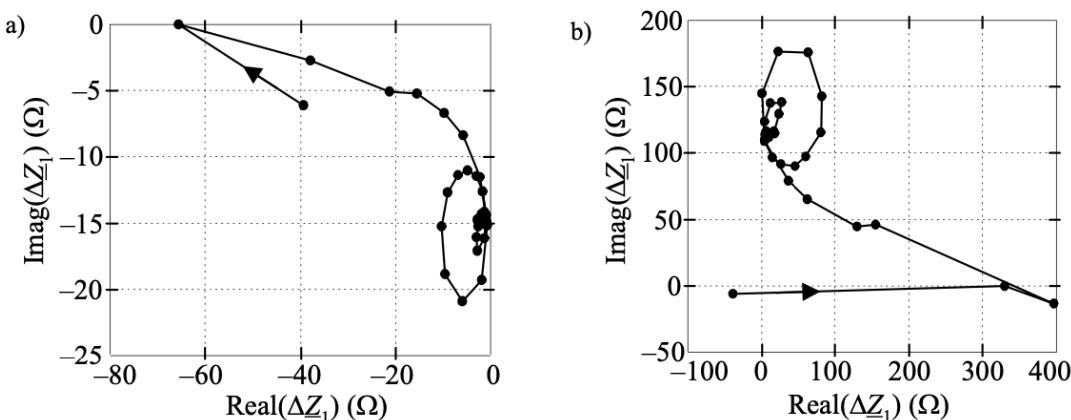


Fig. 13.4. Examples of directional discrimination: a) forward fault, b) backward fault

### Klasyfikacja zwarć (*phase selection*)

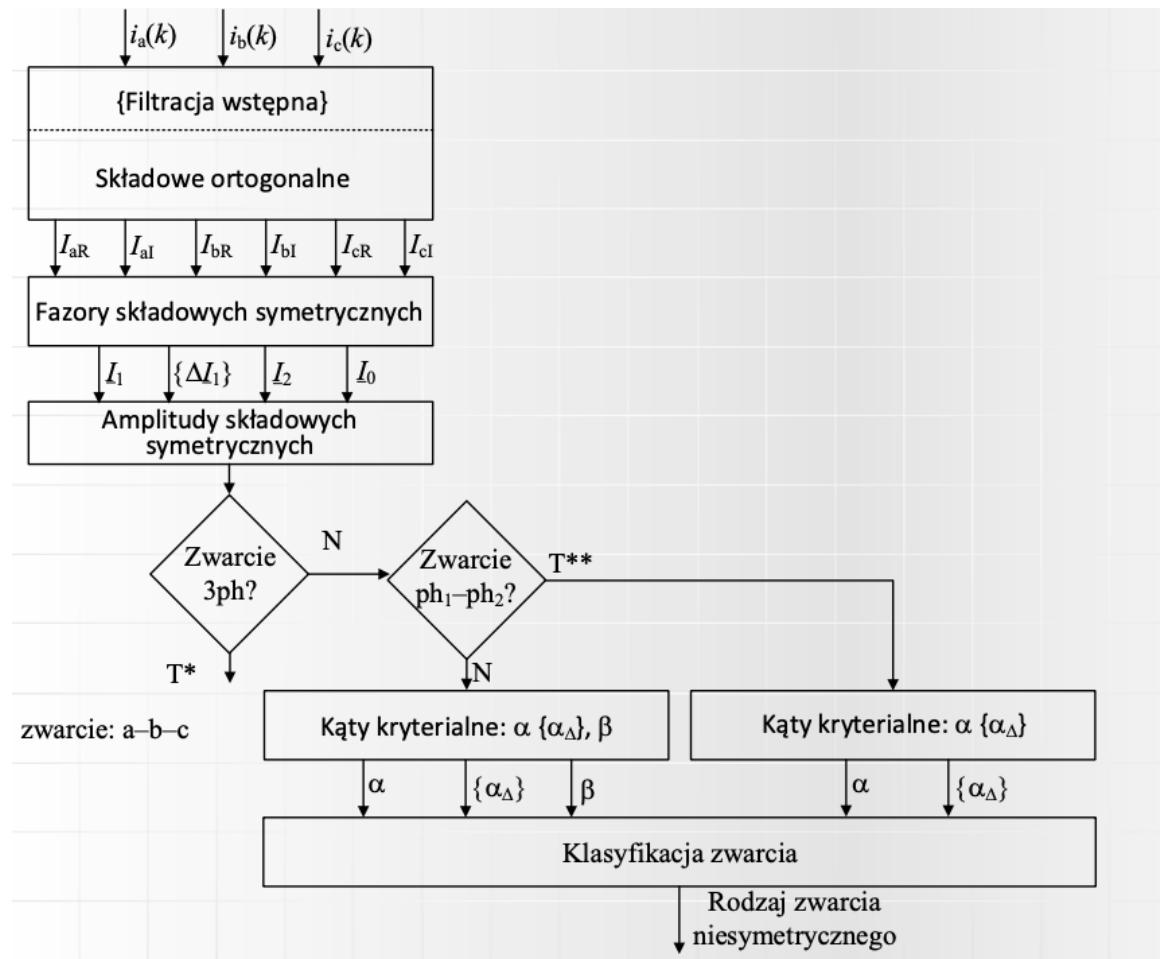
**Klasyfikacja zwarć to określenie rodzaju zwarcia - które fazy biorą w nim udział** (zwarcie jednofazowe, dwufazowe, trójfazowe) oraz **czy jest to zwarcie z udziałem ziemi**, czy bez. Informacja ta jest potrzebna w celu określenia odpowiedniej pętli zwarcioowej.

**Według informacji z wykładu, w celu klasyfikacji zwarć wykorzystuje się informacje o amplitudach składowej zgodnej, przeciwej i zerowej prądu.**

**Na podstawie informacji o tych składowych oblicza się kąty alfa, alfa przyrostowy oraz beta.** Kąt alfa to kąt stosunku składowej przeciwej do zgodnej (liczby zespolone!), kąt przyrostowy alfa to kąt stosunku składowej zgodnej do przyrostu składowej zgodnej, natomiast kąt beta to kąt stosunku składowej przeciwej do składowej zerowej).

**Ogólnie, bierze się tu pod uwagę stosunek składowej przeciwej do zgodnej, składowej przeciwej do składowej zerowej oraz duże zmiany składowej zgodnej przy braku pozostałych składowych.**

Z powyższego, klasyfikację zwać można opisać poniższym algorytmem. Wielkości oznaczone w nawiasach  $\{x\}$  to wielkości opcjonalne w klasyfikacji. Kąty alfa są uwzględniane zawsze, kąt beta tylko przy niesymetrycznych zwarcia z udziałem ziemi



Opisując to słowami:

- Zwarcie trójfazowe symetryczne** to zwarcie w którym następuje **przyrost składowej zgodnej**, natomiast **nie pojawiają się w ogóle składowa zgodna i przeciwna**.
- Zwarcia z udziałem ziemi**: w tych zwarcia pojawia się składowa zerowa, więc pojawia się kąt beta. Są tu zwarcia jednofazowe (doziemne) oraz dwufazowe niesymetryczne.
- Zwarcia izolowane**: zwarcia te nie mają składowej zerowej, są bez udziału ziemi. Liczy się tylko kąt alfa, kąt beta nie jest uwzględniany bo składowa zerowa jest równa 0.

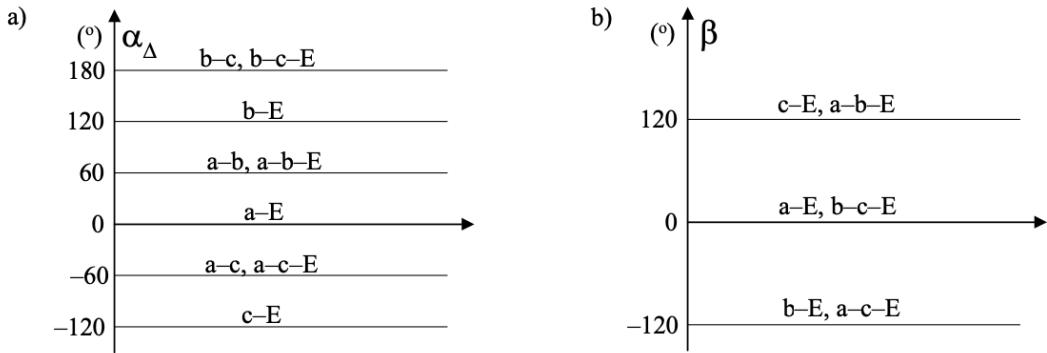


Fig. 13.7. Values of criteria angles for signatures: a) negative- *versus* incremental positive-sequence, b) negative- *versus* zero-sequence

## Źródła

[1] Materiały z wykładu *Zakłócenia w układach elektroenergetycznych*

[2] Jan Izykowski - *Power System Faults*

## ▼ b) obliczanie prądów i napięć podczas zwarć symetrycznych i niesymetrycznych w sieciach wysokiego napięcia z punktem neutralnym uziemionym bezpośrednio

**Zwarcia symetryczne** to zwarcia w których wektory prądów przewodowych i napięć fazowych są symetryczne - czyli są to zwarcia 3-fazowe. **Zwarcia niesymetryczne** to zwarcia w których fazy obciążone są nierównomiernie - czyli zwarcia 1-fazowe (**doziemne**), 2-fazowe oraz 2-fazowe z ziemią.

Do obliczania prądów i napięć podczas zwarć w sieciach wysokiego napięcia stosuje się **metodę składowych symetrycznych**. Ponadto, praca z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym oznacza, że punkt neutralny N oraz ziemia E są ze sobą elektrycznie połączone. Przekształcenia napięć i prądów fazowych na składowe symetryczne przedstawiono poniżej:

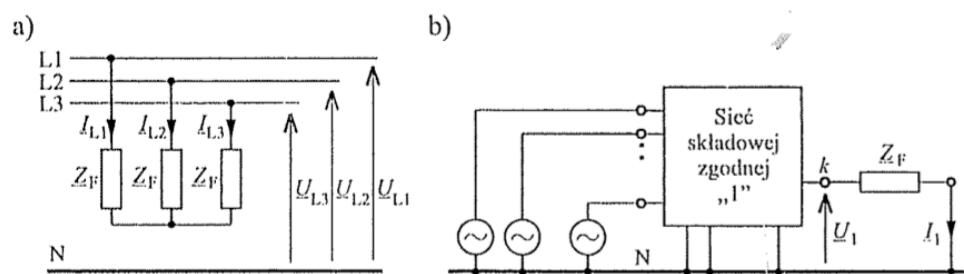
$$\begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix} \quad \text{oraz} \quad \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} \quad \text{oraz} \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

W obliczeniach przyjmuje się, że zwarcie dotyczy jednego węzła sieci, a w stanie przed zwarciem panują warunki symetrii fazowej napięć i prądów - czyli składowe zgodne są różne od zera, składowe zerowe i przeciwnie - równe zeru.

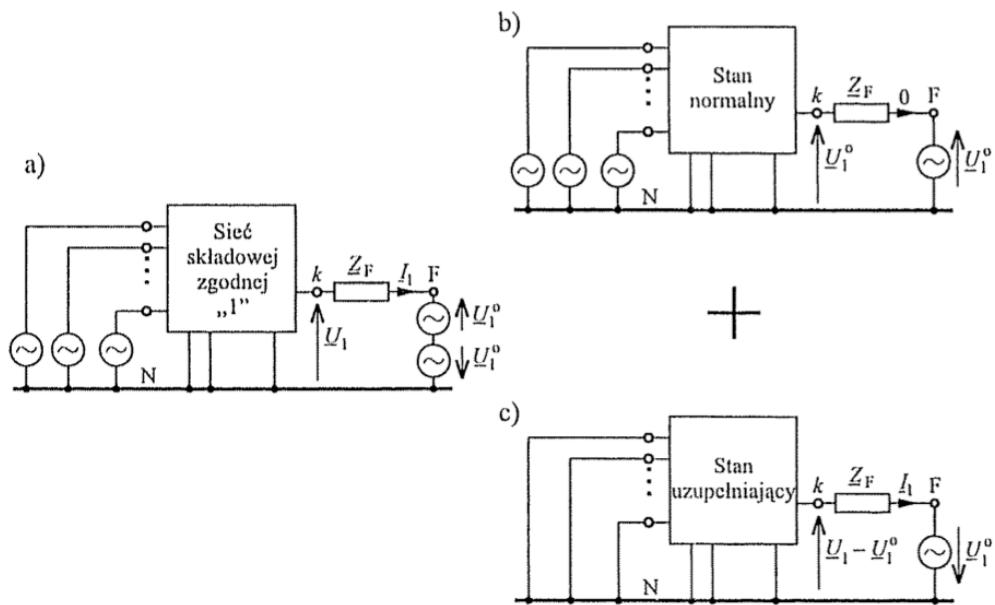
### Zwarcia symetryczne

W przypadku zwać trójfazowych, zakłada się że zwarcie trzech faz nastąpiło przez symetryczną impedancję. Prądy i napięcia składowej zgodnej są niezerowe, pozostałych składowych - równe zeru.



Rys. 4.1. Zwarcie trójfazowe: a) schemat fazowy (tylko węzeł  $k$ ); b) schemat sieci składowej zgodnej

W przypadku zwarcia trójfazowego, można przyjąć że prądy i napięcia w poszczególnych fazach są takie same, co upraszcza obliczenia. Do samych obliczeń stosuje się metodę Thevenina. Rozpatrywany układ przedstawia się jako uproszczony schemat zastępczy, a na to stosuje się zasadę superpozycji - sieć następuje się dwiema sieciami zastępczymi, w których jedna jest siecią w normalnym stanie pracy, druga - stanem uzupełniającym. Stan uzupełniający to sieć w której doprowadza się w punkcie zwarcia napięcie o kierunku zgodnym z napięciem przed zwarciem.

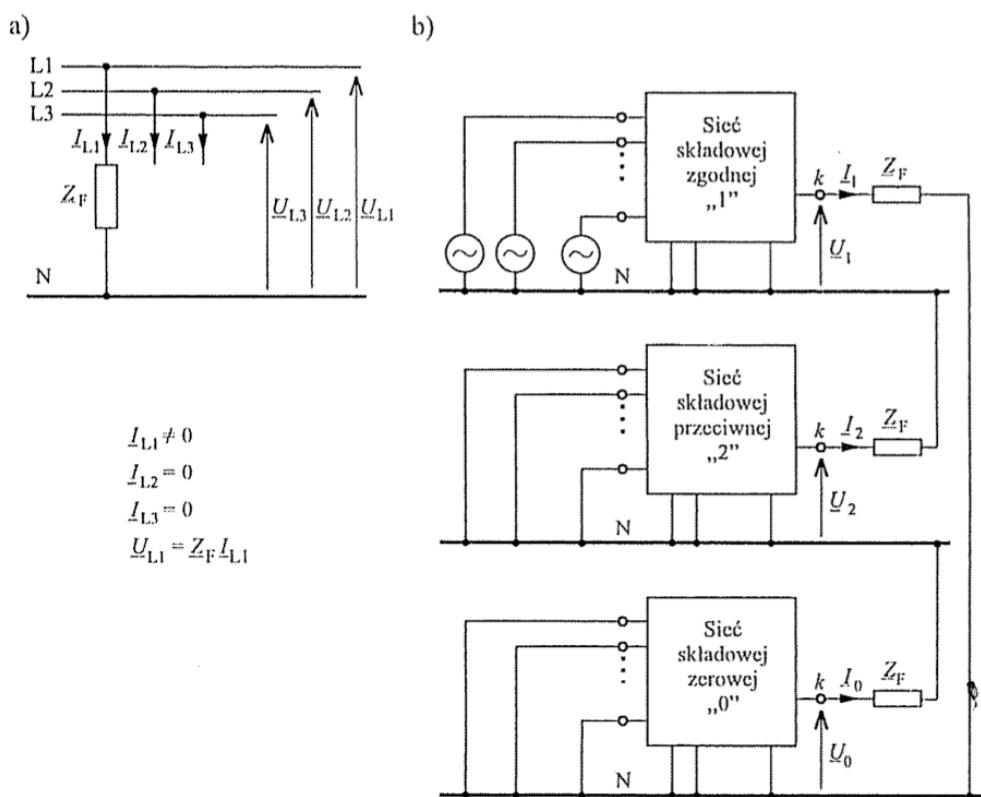


Rys. 4.2. Zastąpienie sieci ze zwarciem dwoma sieclami zastępczymi: a) rozpatrywana sieć zwarta; b) schemat zastępczy stanu normalnego sieci; c) schemat zastępczy sieci uzupełniającej

Po wykonaniu superpozycji, sieć upraszcza się do jednego elementu zastępczego Thevenina, z którego można policzyć składową zgodną prądu i napięcia - która jako jedyna występuje podczas tego typu zwarcia.

### Zwarcie jednofazowe

W przypadku zwarć jednofazowych rozpatruje się jako graficzną interpretację składowych symetrycznych. W takim zwarciu sieci dla składowych zgodnej, przeciwej i zerowej są ze sobą połączone szeregowo. Suma napięć poszczególnych składowych jest równa zeru, natomiast składowe prądu są sobie równe dla wszystkich składowych.



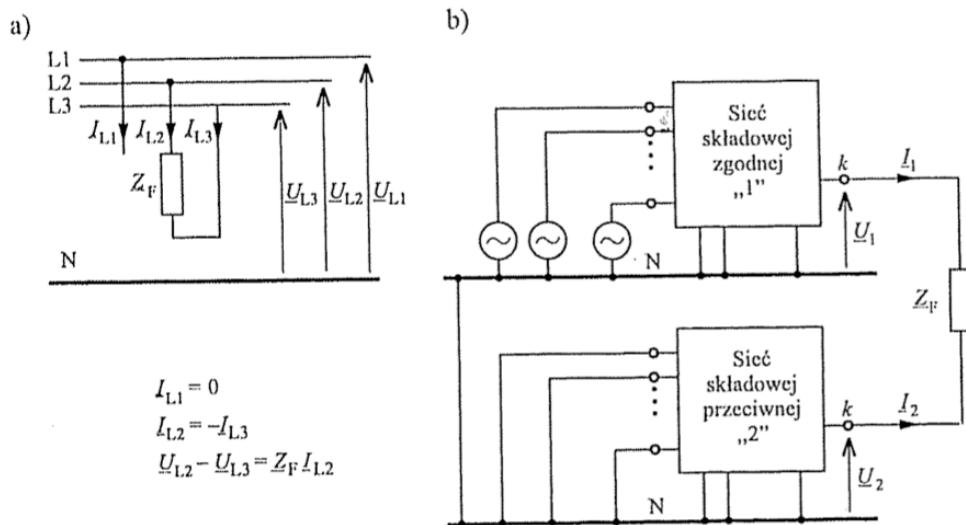
Rys. 4.4. Zwarcie jednofazowe fazy L1: a) schemat fazowy (tylko węzeł  $k$ ); b) schemat połączenia sieci składowych symetrycznych

Ponownie, zwarcie oblicza się stosując metodę Thevenina z zastępczym źródłem i obciążeniem. Analizę prądów i napięć prowadzi się w oparciu o składowe symetryczne.

W przypadku zwarć jednofazowych, pojawienie się zakłócenia w jednej z faz wpływa na inne fazy.

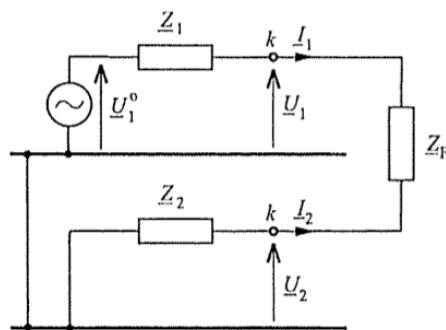
### Zwarcia dwufazowe

W przypadku zwarcia między dwiema fazami bez udziału ziemi, układ rozpatrujemy jako taki, w którym pojawiają się składowa zgodna i przeciwna, ale nie pojawia się składowa zerowa. W rozpatrywanym układzie sieci składowej zgodnej i przeciwniej przedstawia się jako połączone równolegle do siebie poprzez impedancję zwarcia.



Rys. 4.9. Zwarcie dwufazowe faz L2, L3: a) schemat fazowy (tylko węzeł k); b) schemat połączenia sieci składowych symetrycznych

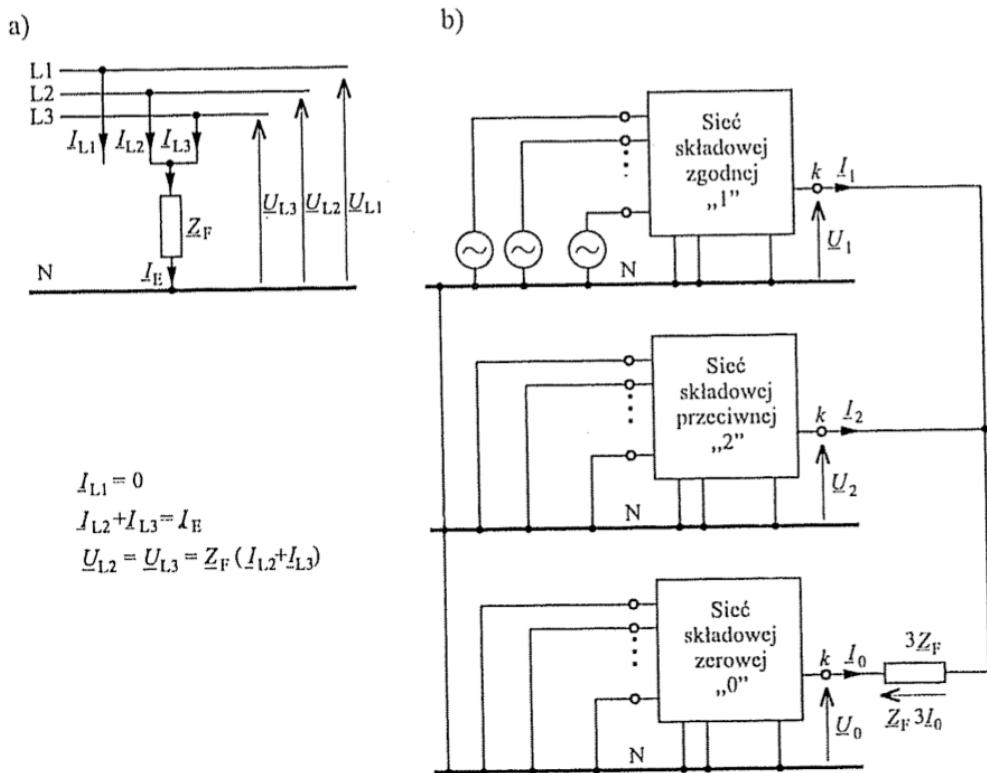
Ponownie, do obliczeń stosuje się metodę Thevenina i upraszcza obwód. Prądy i napięcia oblicza się kolejno z praw Ohma i Kirchhoffa dla przyjętych impedancji poszczególnych składowych symetrycznych oraz impedancji zwarcia.



Rys. 4.10. Schemat połączenia impedancji Thevenina w przypadku zwarcia dwufazowego faz L2, L3

### Zwarcia dwufazowe z ziemią

W przypadku zwarcia dwóch faz z ziemią, suma ich prądów płynie do ziemi. Odpowiada to trzykrotnej wartości składowej zerowej prądu zwarcia. Stąd, w schemacie składowych symetrycznych, łączy się je ze sobą w jednym węźle. W obwodzie składowej zerowej pojawia się natomiast trzykrotność impedancji zwarcia.



Rys. 4.12. Zwarcie dwufazowe z ziemią faz L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>: a) schemat fazowy (tylko węzeł k); b) schemat połączenia sieci składowych symetrycznych

W każdym razie, ponownie do obliczenia prądów i napięć zwarciowych stosuje się metodę Thevenina, a potem kolejne wartości prądów, napięć i impedancji oblicza na podstawie praw Kirchhoffa i Ohma.

### Podsumowanie

Ogólnie rzecz ujmując, w przypadku obliczania prądów i napięć podczas zwarć w sieciach wysokiego napięcia z punktem neutralnym bezpośrednio uziemionym, stosuje się w każdym przypadku metodę składowych symetrycznych.

Prądy, napięcia i impedancje dla poszczególnych składowych symetrycznych przedstawia się w postaci schematów zastępczych. Schematy te są ze sobą połączone w różne sposoby, zależnie od rodzaju zwarcia.

Przyjęte schematy zastępcze oblicza się następnie, korzystając z twierdzenia Thevenina oraz praw Kirchhoffa i Ohma. Otrzymane wartości poszczególnych składowych symetrycznych przekształca się z powrotem do układu trójfazowego.

A poniżej garść wzorów dla sportu.

TABLICA 4.1. Zestawienie wzorów do wyznaczania prądów i napięć w miejscu zwarcia

Wielkości	Rodzaj zwarcia			
	trójfazowe	dwu fazowe faz L2 i L3	jednofazowe fazy L1	dwu fazowe z ziemią faz L2 i L3
składowe symetryczne	$I_0$	0	0	$\frac{U_1^0}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F}$
	$I_1$	$\frac{U_1^0}{Z_1 + Z_F}$	$\frac{U_1^0}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F}$	$\frac{(Z_1 + Z_0 + 3Z_F)U_1^0}{2Z_1(Z_0 + 3Z_F) + (Z_1)^2}$
	$I_2$	0	$-\frac{U_1^0}{2Z_1 + Z_F}$	$\frac{U_1^0}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F}$
	$U_0$	0	0	$\frac{-Z_0}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F} U_1^0$
	$U_1$	$\frac{Z_F U_1^0}{Z_1 + Z_F}$	$\frac{(Z_1 + Z_0 + 3Z_F)U_1^0}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F}$	$\frac{(Z_0 + 3Z_F)U_1^0}{2(Z_0 + 3Z_F) + Z_1}$
	$U_2$	0	$\frac{Z_1}{2Z_1 + Z_F} U_1^0$	$\frac{-Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F} U_1^0$
wielkości fazowe	$I_{1,1}$	$\frac{U_1^0}{Z_1 + Z_F}$	0	$\frac{3U_1^0}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F}$
	$I_{1,2}$	$\frac{a^2 U_1^0}{Z_1 + Z_F}$	$-\frac{j\sqrt{3}U_1^0}{2Z_1 + Z_F}$	$-\frac{j\sqrt{3}(Z_0 + 3Z_F - aZ_1)U_1^0}{2Z_1(Z_0 + 3Z_F) + (Z_1)^2}$
	$I_{1,3}$	$\frac{a U_1^0}{Z_1 + Z_F}$	$\frac{j\sqrt{3}U_1^0}{2Z_1 + Z_F}$	$\frac{j\sqrt{3}(Z_0 + 3Z_F - a^2Z_1)U_1^0}{2Z_1(Z_0 + 3Z_F) + (Z_1)^2}$
	$U_{1,1}$	$\frac{Z_F U_1^0}{Z_1 + Z_F}$	$U_1^0$	$\frac{3Z_F}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F} U_1^0$
	$U_{1,2}$	$\frac{a^2 Z_F U_1^0}{Z_1 + Z_F}$	$-\frac{Z_1 - a^2 Z_F}{2Z_1 + Z_F} U_1^0$	$\frac{a^2 U_1^0 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F} U_1^0}{2(Z_0 + 3Z_F) + Z_1} U_1^0$
	$U_{1,3}$	$\frac{a Z_F U_1^0}{Z_1 + Z_F}$	$-\frac{Z_1 - a Z_F}{2Z_1 + Z_F} U_1^0$	$a U_1^0 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F} U_1^0$

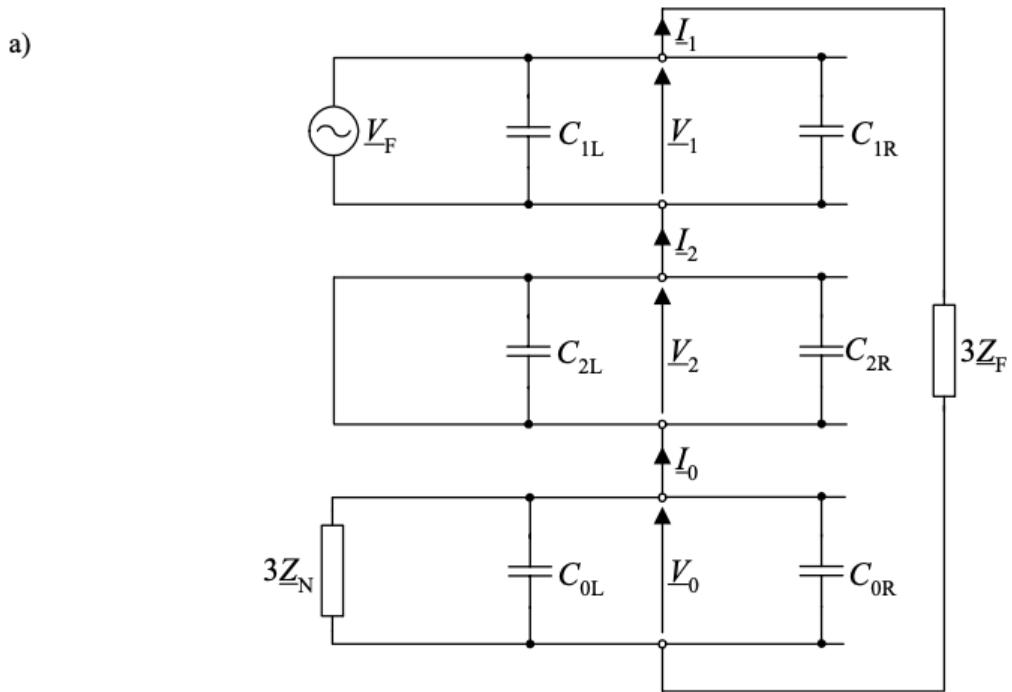
$U_1^0$  – wartość składowej zgodnej napięcia w miejscu zwarcia przed wystąpieniem zwarcia.  
 $Z_2 = Z_1$  – przyjęto równość impedancji dla składowej przeciwnie i zgodnej.

## Źródła

[1] Kacejko, Machowski - *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*

### ▼ c) zjawiska prądowe i napięciowe towarzyszące zwarciom doziemnym w sieciach rozdzielczych średniego napięcia

Sieci rozdzielcze średniego napięcia, w przeciwieństwie do sieci WN, są często sieciami z izolowanym punktem neutralnym lub z punktem neutralnym uziemionym przez dławik, rezystor lub obydwa. Ta sytuacja sprawia, że w przypadku zwarć doziemnych, składowa zerowa prądu zwarcioowego ma małą wartość. Wskutek tego, w analizie zachodzących zjawisk należy uwzględnić pojemności sieci równoległą do impedancji składowej zerowej.



(Fig. 11.3 to be continued)

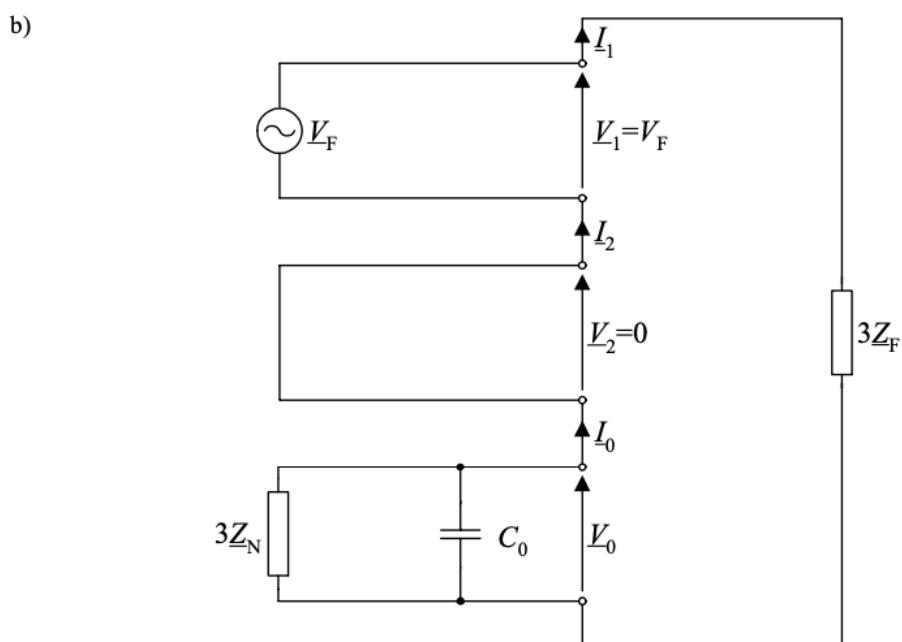


Fig. 11.3. Simplified circuit from Fig. 11.1:  
 a) omitting the series branches with negligible impedances,  
 b) introducing parallel connections of shunt capacitances.

Zjawiska prądowe i napięciowe w przypadku zwarć doziemnych zależą od tego, w jaki sposób uziemiony (lub izolowany) jest punkt zerowy układu. Izolowany punkt neutralny i uziemienie przez dławik (kompensację sieci) stosuje się w relatywnie niewielkich sieciach SN. Rezystory stosowane są natomiast w sieciach rozległych

W każdym przypadku można jednak zakładać, że wskutek wyładowania pojemności fazy zwieranej i doładowania pojemności faz zdrowych, nastąpią duże przepięcia, szybkie oscylacje i zapalenie łuku elektrycznego.

Stąd, można wyróżnić trzy przypadki:

### **1. Izolowany punkt zerowy**

W przypadku izolowanego punktu zerowego, impedancja dla składowej zerowej jest bardzo duża. Prąd zwarcia ma zatem charakter pojemnościowy. Prąd zwarciovy największą wartość ma w miejscu zwarcia, a im bliżej do źródła zasilania, tym jest ona niższa - co wynika z rozłożonej pojemności linii.

Jeżeli chodzi o napięcia, to napięcie fazy ze zwarem spada do 0, natomiast napięcia pozostałych faz wzrastają do wartości międzyfazowej. Pojawia się jednak przy tym niebezpieczne zjawisko polegające na wyładowaniu pojemności linii dla faz zdrowych, mających dużą wartość napięcia w czasie zwarcia. Rozładowanie tych pojemności może spowodować duże oscylacje i bardzo silne przepięcia w układzie. Może pojawić się tu też przerywany łuk elektryczny.

### **2. Punkt zerowy uziemiony przez dławik**

W celu kompensacji prądu pojemnościowego, sieć może być uziemiona przez dławik - jest nim np. cewka Petersena lub transformator Baucha albo Reithoffera. W celu takiego uziemienia, muszą być stosowane specjalne transformatory uziemiające.

W idealnym przypadku, kompensacja pojemności przez cewkę prowadzi do osiągnięcia prądu zwarcia równe 0. Składowe symetryczne napięcia w tej sytuacji stają się identyczne jak w przypadku sieci z izolowanym punktem neutralnym. Napięcie uszkodzonej fazy spada do zera, natomiast napięcia faz zdrowych wzrastają do wartości międzyprzewodowej. Prąd zwarciovy jest najmniejszy w miejscu zwarcia, a największy w punkcie gwiazdowym transformatora.

W przypadku uziemienia cewką powstają warunki do szybszego gaszenia łuku, co sprawia, że napięcia faz wracają do poziomu przed wystąpieniem

zwarcia w relativnie krótkim czasie. Co ciekawe, sieć uziemiona przez cewkę Petersena może działać przez dłuższy czas w stanie zwarcia.

W praktyce jednak nie istnieje idealna kompensacja (cewka jest dobrana tylko na podstawową harmoniczną), a co więcej - powodowałaby ona największe przepięcia w układzie przy rozładowywaniu pojemności. Cewki Petersena stosuje się wraz ze sterowaniem ich reaktancją.

### **3. Punkt zerowy uziemiony przez rezystor lub rezystor równoległy z dławikiem**

Stosowanie rezystora to metoda miesząca się między siecią z izolowanym punktem pracy a siecią skutecznie uziemioną. Tego typu uziemienia stosuje się po to, żeby w kontrolowany sposób zwiększyć prąd zwarciovy w celu przyspieszenia zadziałania zabezpieczeń - ustala się poziom prądu zwarcioowego na od kilkudziesięciu amperów do kilkuset amperów.

Zapewnienie odpowiedniej rezystancji podnóży stacji elektroenergetycznych jest trudne do zapewnienia, więc stosuje się też układ R-L równoległy. Rezystor działa w czasie zwarcia, natomiast cewka w normalnym stanie pracy (kompensuje ona sieć).

Przełączenie na rezystor można opóźnić - kompensacja zwarcia przez cewkę w początkowej fazie może ułatwić zgaszenie łuku elektrycznego.

### **4. Punkt zerowy uziemiony bezpośrednio**

Ten wariant raczej nie będzie potrzebny do zaliczenia egzaminu, ale można o nim wspomnieć. W przypadku, gdy dojdzie do zwarcia doziemnego w sieci z uziemionym bezpośrednio punktem neutralnym, przepływ prądu zwarcioowego przez ziemię i jego transformacja przez transformator na stronę sieci sprawiają, że generator zasilający sieć obciążony jest prądem zwarciozym w dwóch fazach.

Jeżeli punkt zerowy jest uziemiony, to ma on dużą wartość. Ma ona znacznie większe znaczenie niż składowa pojemnościowa prądu. Oczywiście znowu pojawia się zjawisko rozładowania pojemności fazy ze zwarciem i doładowania faz zdrowych, ale fazy zdrowe tym razem nie mają zwiększonej wartości napięcia, więc przebiegi i oscylacje są odpowiednio mniejsze.

## **Źródła**

[1] Iżykowski - *Power system faults*

[2] Kacejko, Machowski - *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*

## ▼ d) zapady napięcia i przerwy w zasilaniu - przyczyny, skutki i sposoby ochrony

Z definicji, **zapad napięcia** to nagłe zmniejszenie się napięcia zasilającego do wartości zawartej w przedziale od 90% do 1% napięcia znamionowego **Un**, po którym następuje wzrost napięcia do poprzedniej wartości. Umownie, czas trwania zapadu napięcia wynosi od 10 ms do 1 minuty.

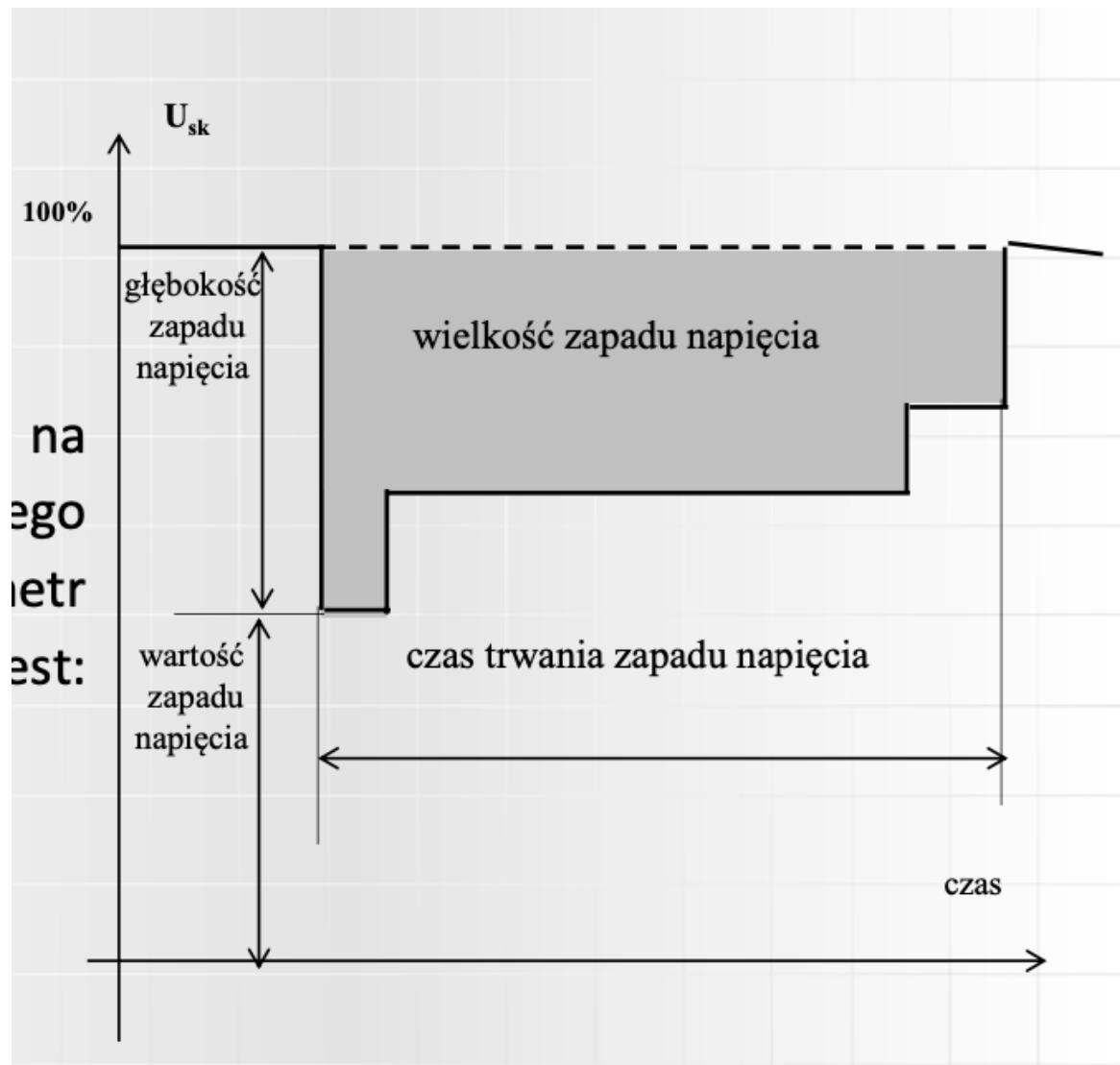
**Przerwa w zasilaniu** jest natomiast całkowitym odizolowaniem odbiorcy od źródła zasilania. Z definicji wyróżnia się krótkie przerwy w zasilaniu (do 1 minuty) oraz długie przerwy w zasilaniu (powyżej 1 minuty).



### Parametry

Zapady napięcia oraz przerwy w zasilaniu charakteryzuje się następującymi wielkościami:

- wartością zapadu napięcia
- czasem trwania
- głębokością zapadu napięcia
- wielkością zapadu napięcia



## Przyczyny

Wśród przyczyn zapadów napięcia, można wyróżnić przyczyny wewnętrzne i zewnętrzne.

**Przyczyny zewnętrzne** to przyczyny pojawiające się w systemie elektroenergetycznym i można do nich zaliczyć:

- zmiany konfiguracji sieci, prowadzące do wzrostu impedancji źródła (czyli np. zbyt duża impedancja nowej linii, transformatora i spadek napięcia na niej)
- zwarcia w sieci
- nieprawidłowa praca regulatora napięcia transformatora

**Przyczyny wewnętrzne** to natomiast przyczyny występujące w instalacji odbiorcy. Można wśród nich wymienić:

- Załączanie dużych odbiorników statycznych, np. pieców oporowych

- Rozruch bezpośredni dużych silników asynchronicznych
- Zwarcia w instalacji odbiorcy

Na podstawie powyższych, można wymienić trzy podstawowe, zasadnicze przyczyny zwarć:

- **duże prądy**: powodują one znacznie większy spadek napięć na impedancjach sieci lub instalacji, więc w miejscu odbiornika napięcie jest niższe
- **impedancje sieci**: jeżeli impedancje między źródłem zasilania a odbiornikiem są duże, napięcie na zaciskach odbiornika jest znacznie obniżone
- **regulacja**: jeżeli np. przy regulatorze napięcia transformatora coś działa nieprawidłowo, napięcie może zostać obniżone do poziomu poniżej wartości progowej.

### **Skutki**

Podstawowym skutkiem zapadów napięcia jest fakt, że urządzenia odbiorcze nie otrzymują wymaganej ilości energii elektrycznej, więc przestają działać prawidłowo. Dotyczy to zarówno bezpośrednio odbiorników, jak i układów regulacji.

Stąd, wśród skutków zapadów napięcia można wymienić:

- nieprawidłowe działanie wrażliwych odbiorników energii elektrycznej takich jak napędy elektryczne z regulacją prędkości, sprzęt informatyczny, urządzenia elektroniczne itd.
- zbędne wyłączenia odbiorników przez styczniaki lub układ sterowania
- zbędne wyłączenia odbiorników przez zabezpieczenie podnapięciowe
- zbędne wyłączenia silników przez zabezpieczenia od asymetrii zasilania

### **Sposoby ochrony**

Istnieje kilka różnych podejść mających na celu ochronę przed skutkami zapadów napięcia lub zapobiegających takim zjawiskom w systemie elektroenergetycznym. Celami nadzorującymi są redukcja czasu trwania zapadu, redukcja częstotliwości występowania zapadów oraz uodparnianie urządzeń na zapady napięcia. Wszystkie te zjawiska sprowadzają się natomiast do ograniczania skutków zwarć.

Stąd, można wymienić następujące metody ochrony przed negatywnymi skutkami zapadów napięcia:

### **1. Redukcja liczby zwarć**

Redukcję liczby zwarć można osiągnąć metodami bardzo konwencjonalnymi. Zastępuje się linie napowietrzne liniami kablowymi lub stosuje się w nich izolowane przewody. Przycina się drzewa w strefie tych linii i instaluje osłony przed zwierzętami. Ekranuje się przewody napowietrzne, zwiększa poziom izolacji i instaluje liniowe odgromniki. Można też po prostu zwiększyć częstotliwość remontów, przeglądów, mycia izolatorów itp.

### **2. Redukcja czasu eliminacji zwarć**

Redukcja czasu zwarć łagodzi ich skutki, nie ogranicza ich rzadszego występowania. Najprościej, stosuje się bezpieczniki z ograniczeniem prądu. Redukcja czasu eliminacji zwarć nie oznacza natomiast skrócenia czasu przerwy w zasilaniu.

### **3. Zmiana konfiguracji systemu zasilającego**

Rozwiązania tego typu są kosztowne, zwłaszcza w sieciach wysokich napięć, bo sprowadzają się do redundancji. Można zainstalować generator w pobliżu czułych odbiorów. Można zwiększyć liczbę szyn i rozdzielni w celu ograniczenia ilości odbiorców odczuwających zakłócenia lub instalować dławiki zwarciowe w celu zwiększenia elektrycznej odległości od miejsca zwarcia. Można też zasilać czułych odbiorów równolegle z kilku rozdzielni - wtedy zapad napięcia na jednej jest redukowany zasilaniem z innej.

### **4. Włączenie specjalnych urządzeń pomiędzy sieć zasilającą i zaciski czułego sprzętu (stabilizatory napięcia)**

Stabilizatory napięcia to najpowszechniej stosowane zabezpieczenie przed negatywnymi skutkami zapadów. Mogą być stosowane tak po stronie sieci jak i odbiorcy, ale raczej stosuje się je właśnie po stronie odbiorcy. Urządzenia tego typu mają na celu w razie zaburzenia szybko przełączyć urządzenie na zasilanie z alternatywnego źródła energii, zapewniając przy tym odpowiednie parametry zasilania. De facto są to wszelkiego rodzaju zasilacze UPS.

### **5. Poprawa odporności urządzeń**

Dobrą metodą ograniczania skutków zapadów napięcia, zwłaszcza u odbiorców przemysłowych, jest dobór urządzeń o odpowiedniej odporności na zakłócenia. W idealnym świecie można by na podstawie informacji o

pracy systemu w danym miejscu dobrać urządzenia o odpowiedniej czułości lub w oparciu o tę informację zdecydować się na UPS (bo tańszy). Niestety, aktualnie nie ma żadnych standardów tego typu i ciężko jest te informacje utrzymać. Stąd, poprawa odporności urządzeń sprowadza się do ich odpowiedniego zaprojektowania już na etapie produkcji.

## Źródła

- [1] Materiały z wykładu *Zakłócenia w układach elektroenergetycznych*
- [2] <https://www.cire.pl/pliki/2/hanelka-zapady1.pdf>
- [3] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Zapad\\_napięcia](https://pl.wikipedia.org/wiki/Zapad_napięcia)



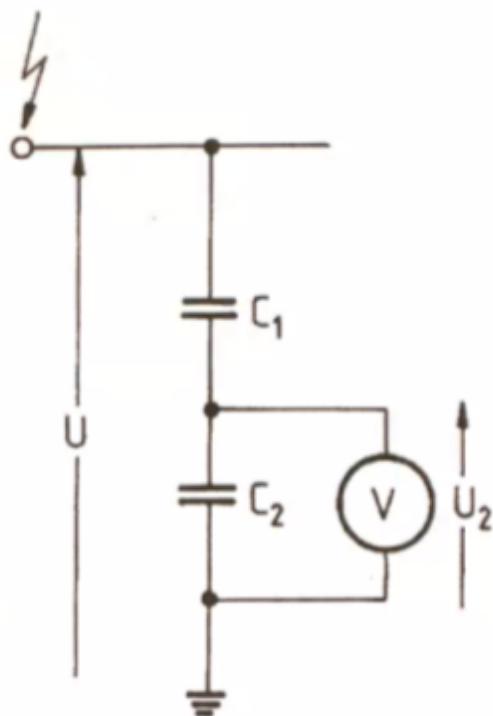
# 6. Miernictwo wysokonapięciowe i diagnostyka izolacji

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

## ▼ a) dzielniki wysokiego napięcia przemiennego - budowa, dobór elementów, niepewność pomiarowa

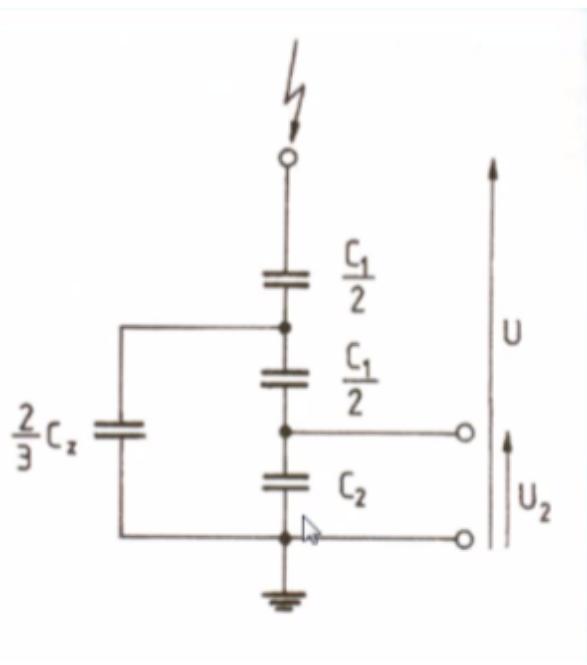
### Budowa dzielnika

W najprostszej wersji, dzielnik wysokiego napięcia przemiennego składa się z dwóch kondensatorów - jest to dzielnik pojemnościowy. Pojemności kondensatorów określają przekładnię dzielników.



Przekładnię dzielnika jak na powyższym obrazku można przedstawić zależnością  
 $\vartheta = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{U}{U_2}$ .

Po uwzględnieniu pojemności doziemnej, schemat zastępczy dzielnika przedstawia się następująco:



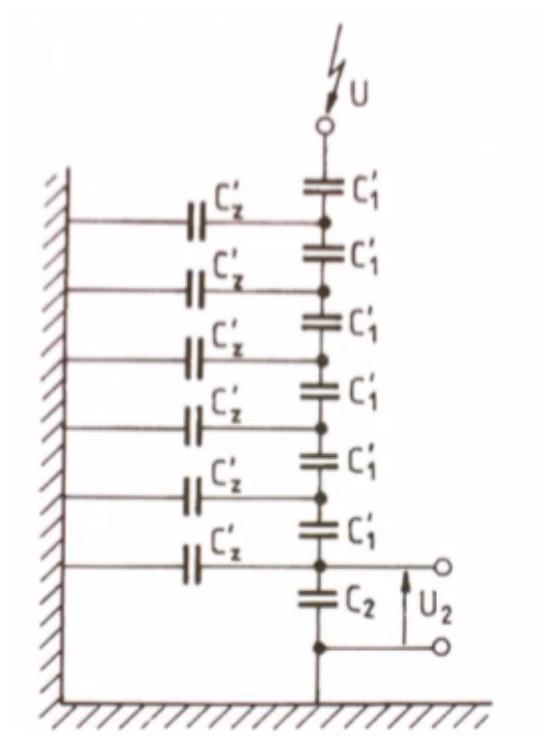
### Dobór elementów dzielnika

Kondensator C2 jest kondensatorem wzorcowym. Jego pojemność musi być możliwie mała, żeby reaktancja była duża - co pozwala na uzyskanie dużej wartości przekładni. W celu uzyskania małej pojemności, stosuje się duże odstępy izolacyjne między elektrodami - co zwiększa jednocześnie wytrzymałość układu.

Zgodnie ze schematem zastępczym, wypadkowa przekładnia zależy od stosunku pojemności doziemnej do pojemności kondensatora strony wysokonapięciowej. Stąd, duża pojemność tego kondensatora ogranicza wpływ pojemności doziemnej, powoduje jednak zmniejszenie przekładni.

### Niepewność pomiarowa

Główna przyczyną niepewności pomiarowej przy korzystaniu z dzielnika napięcia przemiennego jest pojemność doziemna układu. Powoduje ona wprowadzenie niedokładności przekładni takiego dzielnika. Z tego powodu, przekładnię dzielnika pojemnościowego wyznacza się drogą pomiarową, nie obliczeniową.



Niepewność pomiaru wartości skutecznej przy wykorzystaniu dzielnika napięcia określa zależność  $\delta \approx \frac{1}{2\omega^2 C_2^2 R^2}$ . Oznacza to, że dokładniejsze wartości pomiarów możemy uzyskać przy pomiarach napięć o wyższych częstotliwościach, wykorzystując kondensatory wzorcowe o większych pojemnościach oraz zwiększając rezystancję odbiornika - czyli np. impedancję układu pomiarowego.

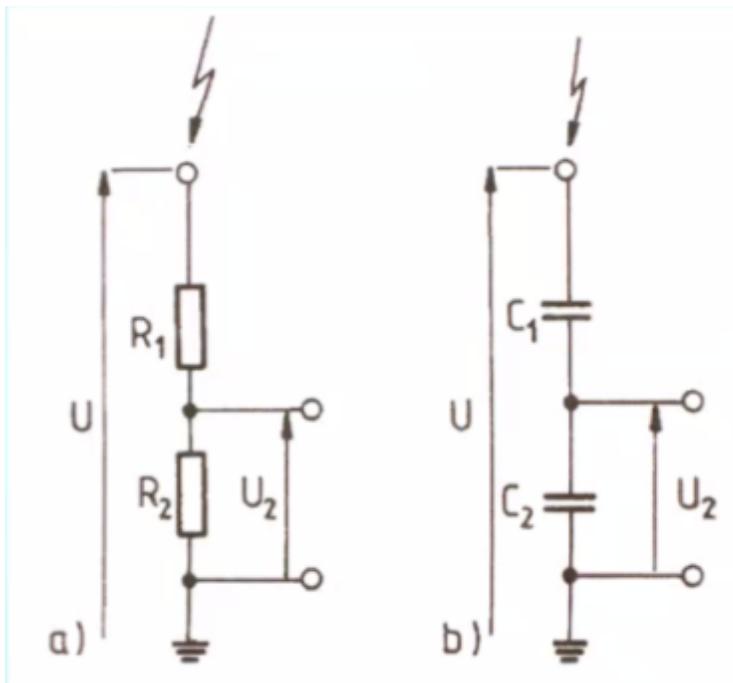
### Źródło

[1] Materiały z wykładu prof. Wieczorka

## ▼ b) dzielniki napięć udarowych - budowa, dobór elementów, współpraca z aparaturą pomiarowo-rejestrującą

### Budowa dzielnika

Dzielniki napięć udarowych buduje się jako rezystancyjne, pojemnościowe lub pojemnościowo-rezistancyjne. Najważniejsze jest, by charaktery impedancji strony wysokiej i strony niskiej były identyczne.



W przypadku dzielników napięć szczytowych, istotnymi parametrami są czas odpowiedzi na impuls prostokątny oraz częstotliwość rezonansowa dzielnika dla odpowiedzi periodycznej.

### Dobór elementów dzielnika

W przypadku dzielników napięć udarowych, należy zadbać przede wszystkim o to, żeby przekładnia pozostawała stała dla szerokiego zakresu częstotliwości napięć oraz dla szerokiego zakresu warunków pomiaru.

Sprowadza się to do doboru takich elementów, które charakteryzują się bardzo małymi parametrami pasożytniczymi - czyli pojemność i indukcyjność w przypadku dzielnika rezystancyjnego. Układ z minimalną indukcyjnością charakteryzuje się najlepszą odpowiedzią - stała czasowa jest pomijalna.

Indukcyjności można kompensować specjalnie wykonanymi rezystorami. Pojemności - stosując ekranowanie dzielnika.

### Niepewność pomiarowa

Jak już wspomniano wyżej, źródłem błędów pomiarowych w dzielnikach napięć udarowych są parametry pasożytnicze elementów dzielnika - pojemność i indukcyjność przy dzielnikach rezystancyjnych, indukcyjność przy dzielnikach pojemnościowych i pojemnościowo-rezystancyjnych.

### Źródła:

- [1] Fleszyński - Miernictwo wysokonapięciowe i laboratorium wysokich napięć

**▼ c) pomiary wyładowań niezupełnych w badaniach diagnostycznych izolacji wysokonapięciowej, model dielektryka z wtrąciną gazową, parametry wyładowań niezupełnych, metody elektryczne pomiaru, metody akustyczne pomiaru, lokalizacja wyładowań niezupełnych**

**Pomiary wyładowań niezupełnych w badaniach diagnostycznych izolacji wysokonapięciowej**

Pomiary wyładowań niezupełnych są konieczne w badaniach diagnostycznych izolacji wysokonapięciowej, ponieważ dostarczają informacji o stanie badanej izolacji. Wyładowania niezupełne mogą znacząco skrócić żywotność izolacji, powodując degradację materiału izolacyjnego.

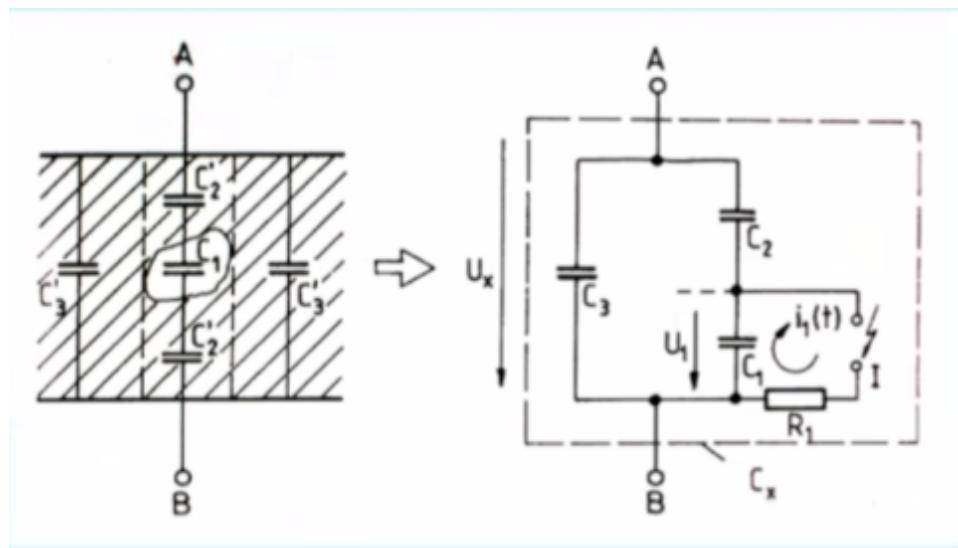
O ile pomiary kąta stratności pozwalają na wyznaczenie progu jonizacji (napięcia początkowego wyładowań niezupełnych), o tyle pomiary wyładowań niezupełnych skupiają się na określeniu intensywności tych wyładowań.

Warto pamiętać, że wśród wyładowań niezupełnych można wyróżnić wyładowania ulotowe, powierzchniowe i wewnętrzne.

Celem diagnostycznym badań wyładowań niezupełnych jest ich detekcja, określenie intensywności, lokalizacji, rodzaju defektu izolacji oraz przybliżonego czasu życia izolacji.

**Model dielektryka z wtrąciną gazową**

Do analizy zjawiska wyładowań niezupełnych w objętości izolacji wykorzystuje się model dielektryka z wnęką gazową. Można przyjąć, że pojemność C<sub>3</sub> to pojemność otoczenia wtrąciny powietrznej, pojemność C<sub>2</sub> - pojemność elementów izolacji pod i nad wtrącina, natomiast pojemność C<sub>1</sub> - pojemność samej wtrąciny.



Wyładowania niezupełne występują wtedy, gdy napięcie zasilające przekracza wartość napięcia krytycznego (wytrzymałości elektrycznej) wtrąciny. W tej sytuacji, można przyjąć, że następuje zwarcie wtrąciny - napięcie na niej spada do 0 i łuk gaśnie. Dalszy wzrost napięcia zasilającego - wzrost sinusoidy - powoduje ponowne zwiększenie napięcia na tej wtrącinnie i ponowne pojawienie się wyładowania.

### Parametry wyładowań niezupełnych

Podstawowym parametrem wyładowań niezupełnych jest ładunek odpowiadający rzeczywistemu ładunkowi przepływającemu we wtrącinie podczas wyładowania. Jednak jego bezpośredni pomiar jest niemożliwy. Dlatego stosuje się układy pomiarowe, w których zamiast tego mierzona jest wartość ładunku przepływającego przez impedancję pomiarową przy wyładowaniu - czyli wartość ładunku, który dopływa do miejsca wyładowania. Ładunek przepływający przez impedancję układu pomiarowego powoduje wygenerowanie fali napięciowej.

Ładunek płynący do miejsca wyładowania nazywa się **ładunkiem pozornym**. Jest to podstawowa miara intensywności wyładowań niezupełnych. Ładunek pozorny nie jest równy co do wartości rzeczywistemu ładunkowi wyładowania - jest do niego proporcjonalny.

Drugim podstawowym parametrem wyładowań niezupełnych jest **częstotliwość powtarzania impulsów wyładowań**.

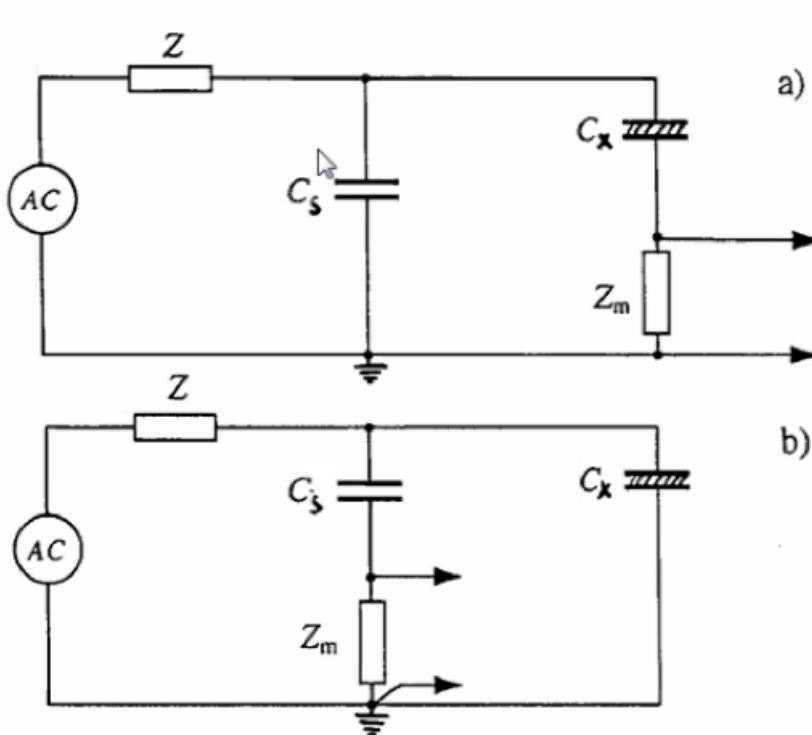
Na podstawie tych dwóch parametrów można wyznaczyć pozostałe parametry tzw. sumarycznej intensywności wyładowań, czyli średni prąd wyładowań niezupełnych, średni kwadrat ładunków wyładowań oraz moc wyładowań.

Innymi parametrami są :

- napięcie początkowe wyładowań - najniższa wartość napięcia, przy której obserwuje się wyładowania za pomocą układu probierczego na którym napięcie przyłożone jest zwiększone
- napięcie gaśnięcia - najniższa wartość napięcia, przy której obserwuje się wyładowania za pomocą układu probierczego na którym napięcie przyłożone jest zmniejszane
- kąt fazowy pojedynczego impulsu
- ładunek maksymalny wyładowań

### Metody elektryczne pomiaru

W pomiarach wyładowań niezupełnych, stosuje się układy w których mierzona jest wartość ładunku pozornego. Opisuje je schemat jak na rysunku poniżej:



Schematy zastępcze podstawowych układów pomiarowych wyładowań niezupełnych: a) układ szeregowy – impedancja pomiarowa  $Z_m$  szeregowo z  $C_x$ , b) układ równoległy – impedancja pomiarowa  $Z_m$  szeregowo z  $C_s$ .

Oprócz powyższych, stosuje się także układy mostkowe. Układy do pomiarów wyładowań niezupełnych metodami elektrycznymi wymagają kalibracji, są przy tym podatne na różne źródła zakłóceń od aparatury, sieci itd.

Oprócz układów do określenia ładunku pozornego, stosuje się również układy takie jak mostek Scheringa do określenia kąta stratności materiału izolacyjnego. Do pewnego poziomu napięcia tangens delta jest stały, powyżej pewnej wartości rośnie. Ta wartość to właśnie napięcie zapoczątkowania wyładowań niezupełnych.

### **Metody akustyczne pomiaru**

Wyładowania niezupełne są źródłem impulsów napięciowych i prądowych w obwodzie, można je więc badać metodami elektrycznymi. Jednak oprócz tego, są one źródłem impulsów mechanicznych: lokalnych zmian ciśnienia. Zmiana ciśnienia to de facto fala akustyczna. Dlatego do pomiaru wyładowań niezupełnych można wykorzystać bardzo czułe mikrofony.

Energia fali akustycznej jest proporcjonalna do prądu wyładowania niezupełnego, co pozwala na określenie intensywności wyładowań. Zaletą tego typu pomiarów jest też odporność na zakłócenia wskutek działania promieniowania elektromagnetycznego.

Do pomiarów akustycznych wykorzystuje się:

- hydrofony, przeznaczone do pomiarów ciśnienia w ośrodku ciekłym
- przetworniki stykowe, mikrofonowe, przeznaczone do pomiarów ciśnienia w ośrodku stałym
- przetworniki stykowe rezonansowe, służące do pomiaru przyspieszenia - akcelerometry.

Czyli de facto można tu stosować mikrofony lub czujniki ciśnienia.

### **Lokalizacja wyładowań niezupełnych**

Wyróżnia się dwie metody lokalizacji wyładowań niezupełnych:

- metoda triangulacyjna: polega na pomiarach czasów opóźnienia, z jakimi sygnały docierają do przetworników pomiarowych, rozmieszczonych w różnych punktach badanego urządzenia
- metoda największej głośności: polega na znalezieniu miejsca na obudowie urządzenia, w którym amplitudy sygnałów akustycznych są największe.

### **Źródła**

[1] Materiały z wykładu prof. Wieczorka

[2] J. Fleszyński - *Miernictwo wysokonapięciowe i laboratorium wysokich napięć*

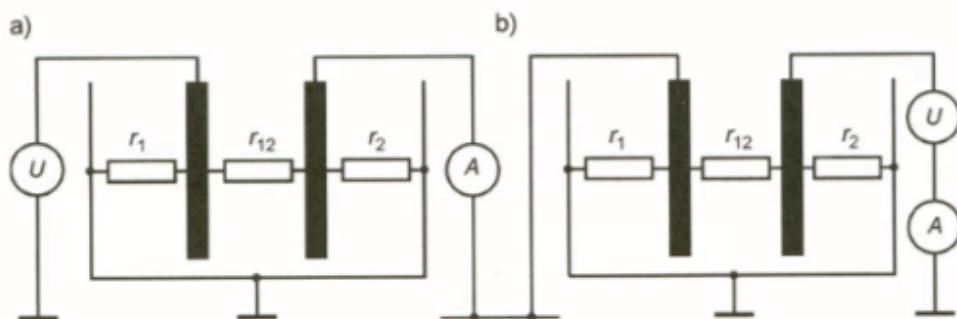
## ▼ d) badania diagnostyczne transformatorów elektroenergetycznych

Istnieje kilka badań diagnostycznych wykonywanych na transformatorach, które sumarycznie dają wiele informacji na temat stanu jego izolacji. Dla transformatorów na ogół prowadzi się dzienniki, w których zapisane są ich najważniejsze parametry w różnych punktach czasu - od badania do badania. Porównanie wartości tych wskaźników pozwala na ocenę aktualnego stanu izolacji względem stanu wyjściowego.

### Indeks rezystancyjny

Do układu izolacyjnego doprowadza się napięcie stałe, z narastającą stopniom wartość, na określony czas każdy stopień. Sprawdzana jest wartość prądu pojemnościowego w izolacji transformatora. Zmiany prądu w zależności od napięcia probierczego pokazują, w jakim stanie jest izolacja transformatora. Uzyskane wyniki porównuje się do wyników uzyskanych dla tego transformatora przy odbiorze.

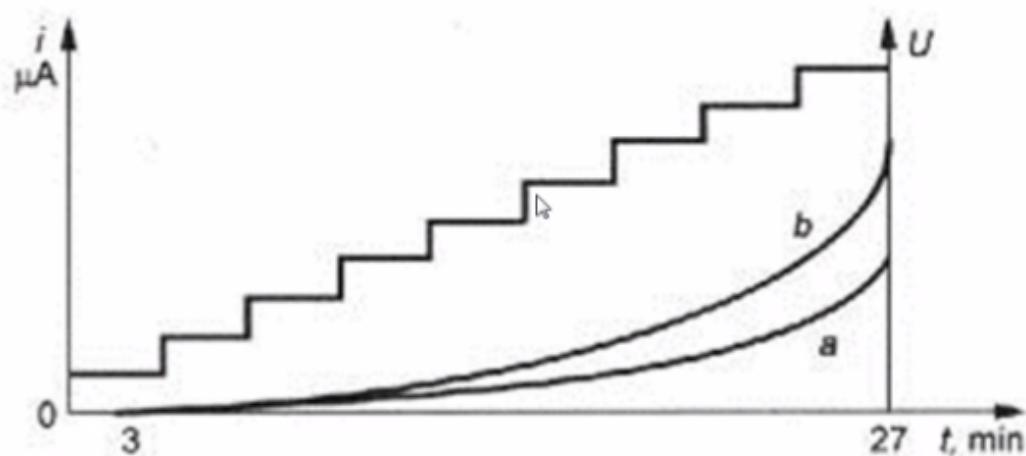
Układ pomiarowy wygląda jak poniżej:



Układy pomiarowe stosowane w metodzie schodkowej: a) próbie poddawana jest izolacja międzyuzwojeniowa; b) próbie poddawana jest izolacja międzyuzwojeniowa i doziemna badanego uzwojenia



Przy czym wyniki pomiarów wyglądają jak poniżej:



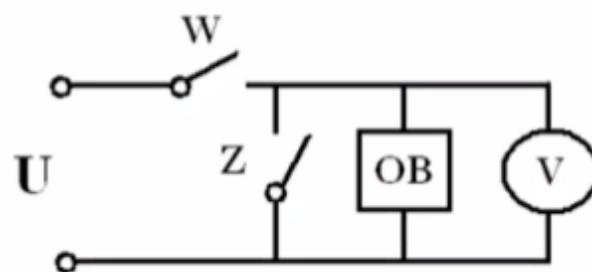
Próby napięciem DC, krzywe  $i=f(U)$  dla izolacji:

a – dobrej, b – zawiłgoconej.

### Pomiar napięcia powrotnego

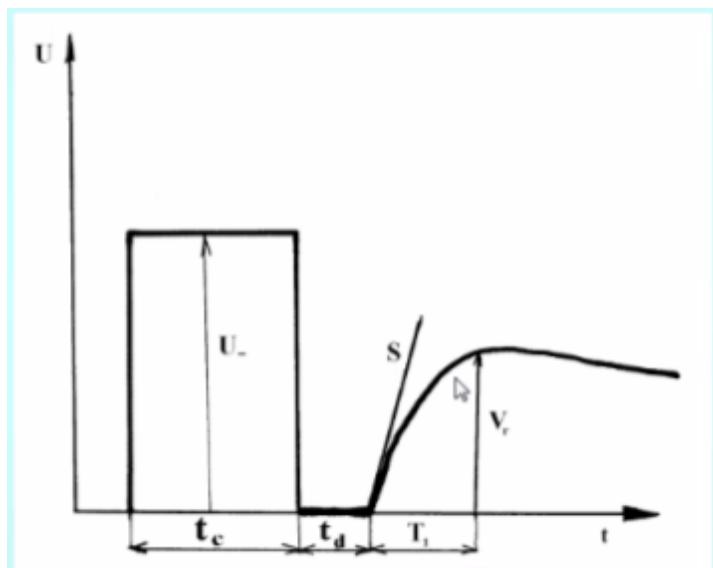
Jednym z badań stanu izolacji transformatora jest badanie napięcia powrotu, czyli przebiegu krzywej napięcia pojawiającego się na zaciskach uzwojenia po naładowaniu transformatora, a następnie rozładowaniu go.

Wykorzystuje się tu układ jak poniżej:



Schemat układu pomiarowego;  
OB – obiekt badań, w – wyłącznik, z – zwiernik

Natomiast otrzymywane przebiegi mają kształt jak poniżej:



Przy czym  $t_c$  to czas ładowania, natomiast  $t_d$  to czas rozładowania transformatora. Ponownie, uzyskane charakterystyki porównuje się z charakterystykami uzyskanymi dla nowo odebranego transformatora.

### **Diagnostyka wibroakustyczna**

Wśród metod diagnostyki transformatorów można wymienić również metodę wibroakustyczną, czyli analizę zmian poziomu drgań w czasie. Bada się tu stan rozruchu transformatora nieobciążonego.

### **Badania oleju**

Jednym z kluczowych badań diagnostycznych transformatora elektroenergetycznego jest analiza próbki oleju. Badania oleju są znormalizowane i mają na celu określenie wartości napięcia przebicia, współczynnika strat dielektrycznych oraz przebiegu jego zmian w funkcji temperatury, a także zbadanie rezystywności oleju i jej zmian w funkcji temperatury.

Oprócz parametrów elektrycznych, bada się także parametry fizykochemiczne oleju, takie jak napięcie powierzchniowe, liczba kwasowa, zawartość wody, PCB, furanów czy gazów rozpuszczonych w oleju.

Wszystkie te wskaźniki oczywiście odnotowuje się w dzienniku maszyny i porównuje z wartościami uzyskanymi w ramach badań nowego transformatora. Każdy z tych parametrów pozwala ocenić, w jakim stanie jest olej transformatora, czyli realnie w jakim stanie jest transformator i czy może być dalej eksploatowany.

### **Pozostałe próby napięciowe**

Oprócz powyższych, podczas badań diagnostycznych prowadzi się także inne badania, takie jak współczynnik stratności izolacji transformatora i przepustu,

pomiar pojemności transformatora i przepustu, pomiar wyładowań niezupełnych.

## Źródła

[1] Materiały z wykładu prof. Wieczorka

[2] <http://elektroonline.pl/a/6054,Badania-diagnostyczne-w-eksploatacji-transformatorow,,Energetyka>

## ▼ e) próby napięciowe izolacji, układy probiercze

Wśród prób napięciowych izolacji urządzeń elektroenergetycznych można wymienić następujące:

### Indeks rezystancyjny

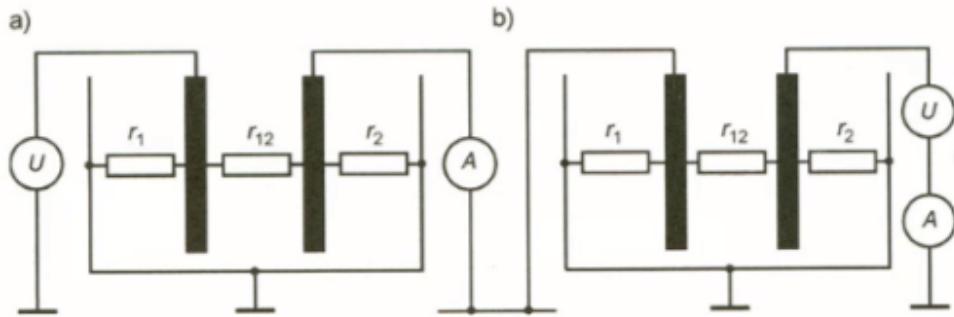
Indeks rezystancyjny to badania oporności izolacji urządzeń elektroenergetycznych, współczynnika absorpcji tej izolacji oraz prądu przewodnościowego.

Wykonuje się tu pomiary rezystancji po różnych czasach przyłożenia napięcia, często po 60 sekundach i 300 sekundach. Pomiary wykonuje się między fazami oraz do ziemi. Wskaźniki rezystancji izolacji zależą od wymiarów geometrycznych.

Współczynnik absorpcji jest de facto stosunkiem różnych wskaźników rezystancji, najczęściej  $R_{60}/R_{15}$ , czyli opisuje jak zmienia się rezystancja w czasie przyłożenia napięcia. Pomiary te wykonuje się przy napięciu 2,5 kV, przy wykorzystaniu megaomomierzy.

Prąd przewodnościowy jest mierzony przy wyższych napięciach - ostatni pomiar jest wykonywany przy dwukrotnej wartości napięcia znamionowego. Szybki wzrost wartości prądu przewodzenia podczas próby wskazuje na osłabienie stanu izolacji.

Pomiary indeksów rezystancyjnych wykonuje się metodą schodkową: przykładą się na 10 minut coraz większe wartości napięcia.



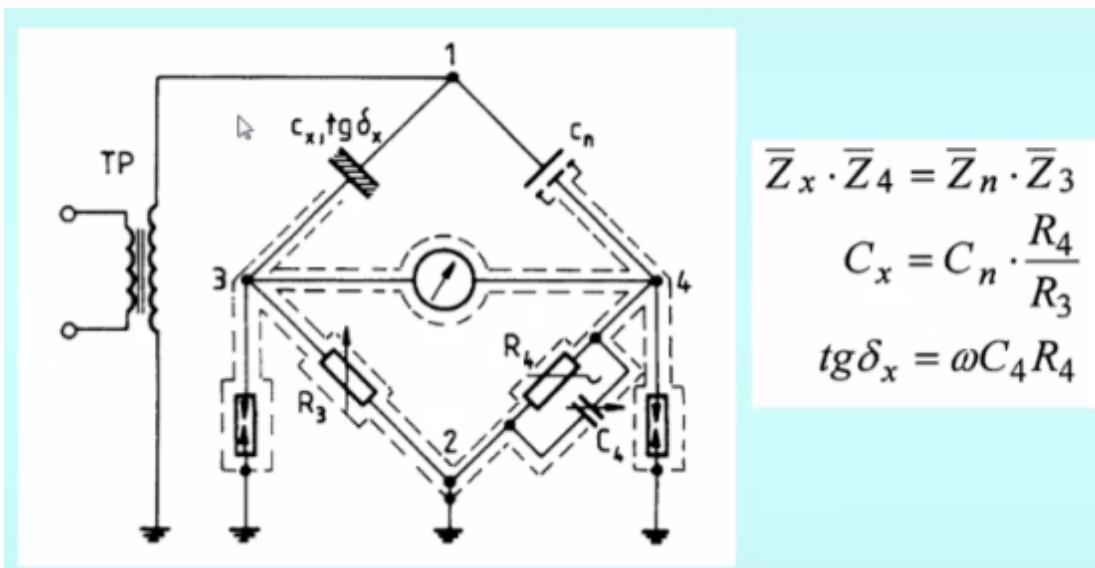
Układy pomiarowe stosowane w metodzie schodkowej: a) próbie poddawana jest izolacja międzyuzwojeniowa; b) próbie poddawana jest izolacja międzyuzwojeniowa i doziemna badanego uzwojenia



### Indeks pojemnościowy

Wskaźnikami typu pojemnościowego są współczynnik stratności (tangens delta), wartość pojemności badanego obiektu i napięcie powrotne.

Współczynnik stratności zależy od poziomu zawiłgocenia i zestarzenia izolacji oraz od poziomu wyładowań niezupełnych, a także od temperatury i poziomu napięcia. Współczynnik ten mierzy się korzystając z układu opartego o mostek Scheringa.



### Pojemność układu izolacyjnego

Pomiary pojemności izolacji mogą wskazywać na zmianę stanu jej zawiłgocenia - wnikanie wody w głąb izolacji zwiększa jej przenikalność elektryczną, co pozwala

dielektrykowi kumulować więcej ładunku. Powoduje to większe straty dielektryczne.

Pomiary pojemności układu izolacyjnego wykonuje się przy częstotliwości napięcia 2 Hz i 50 Hz, a następnie oblicza się wskaźnik C2/C50. Wskaźnik ten maleje przy wzroście zawiłgocenia.

Drugim wskaźnikiem jest pojemność wyznaczona przy różnych temperaturach:  $80^{\circ}C$ ,  $20^{\circ}C$ . Oblicza się wtedy wskaźnik będący stosunkiem C80/C20, który rośnie przy wzroście zawiłgocenia izolacji.

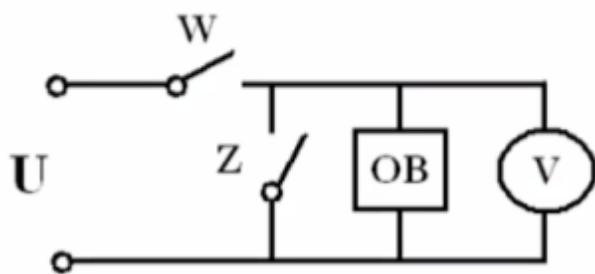
Pojemność układu izolacyjnego można zmierzyć korzystając z mostka Scheringa, jak w poprzednim podpunkcie.

### Pomiar napięcia powrotnego

Im większa zdolność do polaryzacji dielektryka, tym mocniejsze jest zjawisko napięcia powrotnego, czyli zjawiska utrzymywania się napięcia na zaciskach transformatora pewnego poziomu napięcia. Pomiar napięcia powrotnego stosowany jest właśnie w diagnostycznych pomiarach izolacji transformatorów.

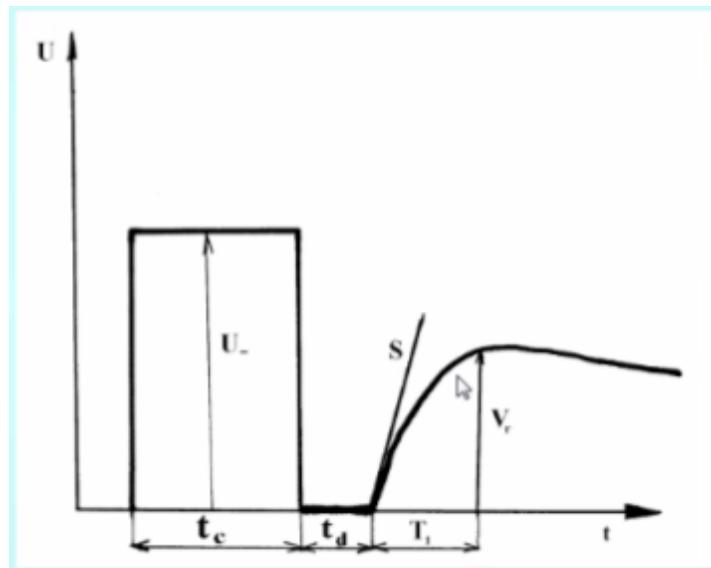
Napięcie powrotne mierzy się poprzez pomiar napięcia na zaciskach uzwojenia transformatora po jego uprzednim naładowaniu i rozładowaniu. Transformator ładuje się napięciem 2 kV, a następnie bada stromość narastania napięcia powrotnego.

Wykorzystuje się tu układ jak poniżej:



Schemat układu pomiarowego;  
OB – obiekt badań, w – wyłącznik, z – zwiernik

Natomiast otrzymywane przebiegi mają kształt jak poniżej:



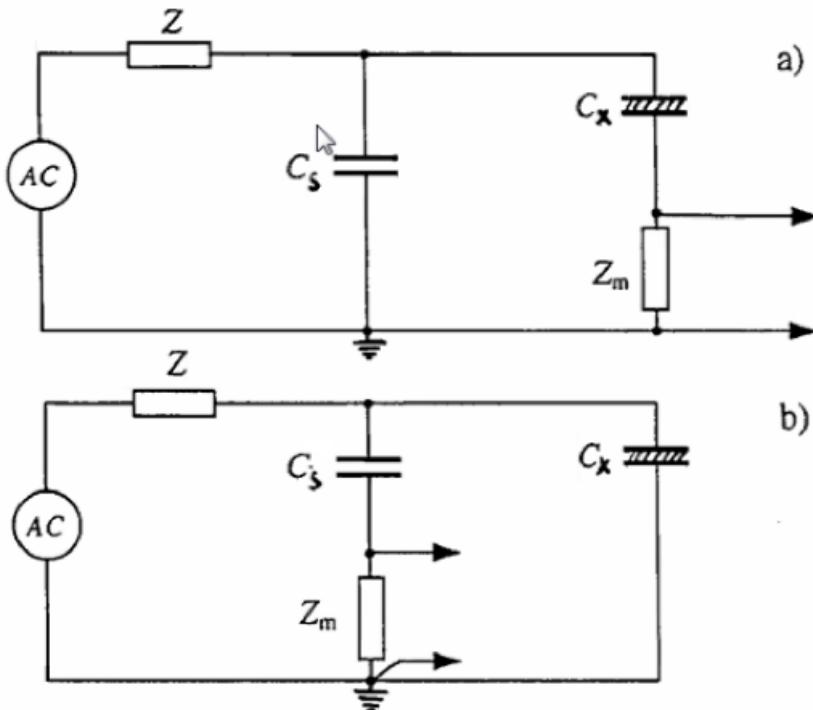
Przy czym  $t_c$  to czas ładowania, natomiast  $t_d$  to czas rozładowania transformatora. Ponownie, uzyskane charakterystyki porównuje się z charakterystykami uzyskanymi dla nowo odebranego transformatora.

### **Widmo polaryzacji dielektryka**

Dla dielektryków, można także zbadać widmo polaryzacji, czyli zależność przenikalności elektrycznej od częstotliwości napięcia. Badania te wykonuje się korzystając z mostków Scheringa przy częstotliwościach od 50 Hz do częstotliwości akustycznych, lub układami do pomiaru napięcia powrotnego w zakresie bardzo małych częstotliwości.

### **Pomiar wyładowań niezupełnych**

Inną miarą stanu izolacji jest pomiar wyładowań niezupełnych. Pomiary tych wyładowań polegają na badaniu wielkości ładunku przepływającego przez impedancję pomiarową do miejsca wyładowania niezupełnego w izolacji. Wielkość i częstotliwość wyładowań niezupełnych są większe w zestarzałych izolacjach, przy czym jednocześnie powodują one zwiększenie tempa dalszego starzenia izolacji.



Schematy zastępcze podstawowych układów pomiarowych wyładowań niezupełnych: a) układ szeregowy – impedancja pomiarowa  $Z_m$  szeregowo z  $C_x$ , b) układ równoległy – impedancja pomiarowa  $Z_m$  szeregowo z  $C_s$ .

### Badania stromym udarem

W przypadku badań izolatorów kompozytowych, stosuje się metodę opartą o strome udary. Poddanie izolatora oddziaływaniu wysokiego udaru powinno spowodować przeskok w powietrzu, nie na samej próbce. Pomiarы wykonuje się zgodnie z wymaganiami opisanymi w normie PN-IEC, co gwarantuje odpowiednie parametry udaru, takie jak czas narastania czy wartość szczytowa.

### Układ probierczy



GU – generator udarowy 1800 kV,

IK – iskiernik kulowy Ø 50 cm,

OKU – obwód kształtujący stromo narastający udar napięciowy

## Źródła

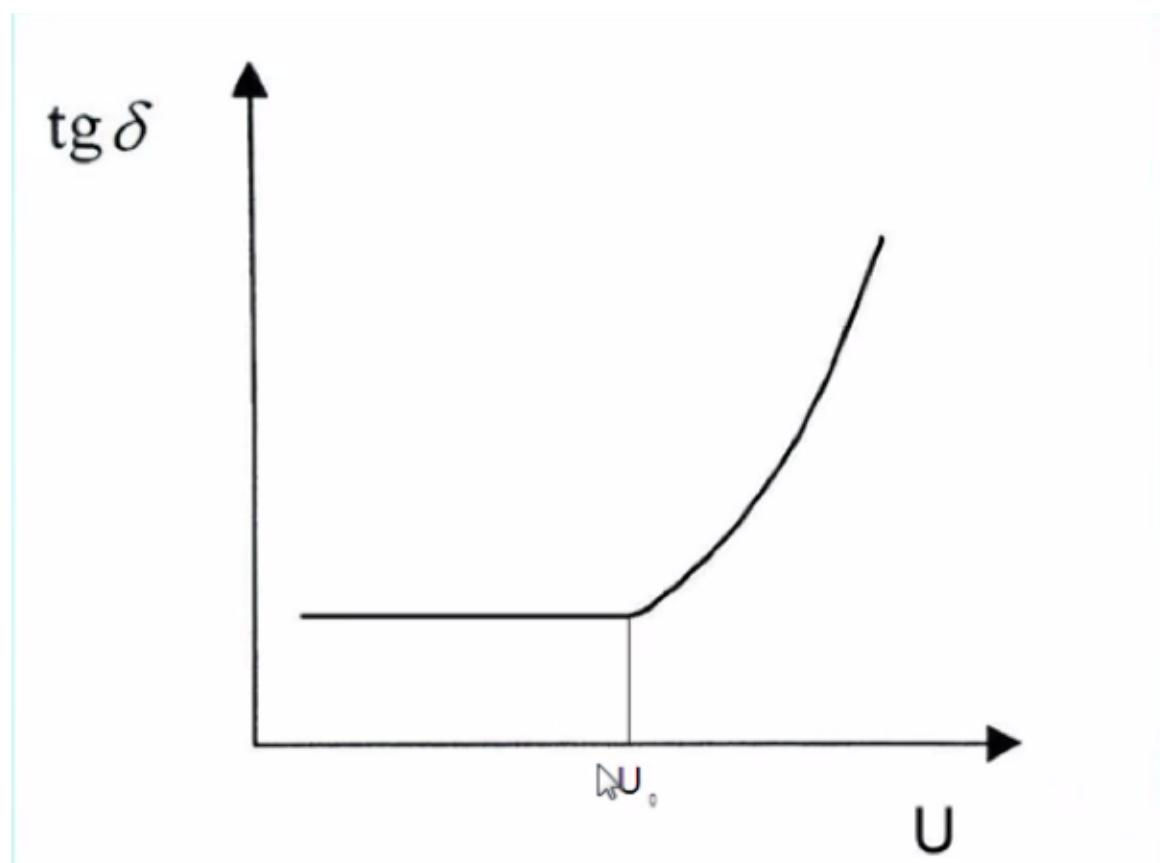
[1] Materiały z wykładu prof. Wieczorka

### ▼ f) współczynnik strat dielektrycznych $\operatorname{tg}\delta$ – zależność od częstotliwości, temperatury, napięcia; pomiar mostkiem Schering'a

Współczynnik strat dielektrycznych  $\operatorname{tg}\delta$  to kąt pomiędzy idealnym prądem pojemnościowym a rzeczywistym prądem mierzonym na izolacji (w zapisie wektorowym). Kąt ten mówi nam, jaka jest stratność dielektryczna badanego materiału, sam tangens delta jest proporcjonalny do strat cieplnych na izolacji. Większy kąt delta oznacza, że spadła rezystancja badanej izolacji.

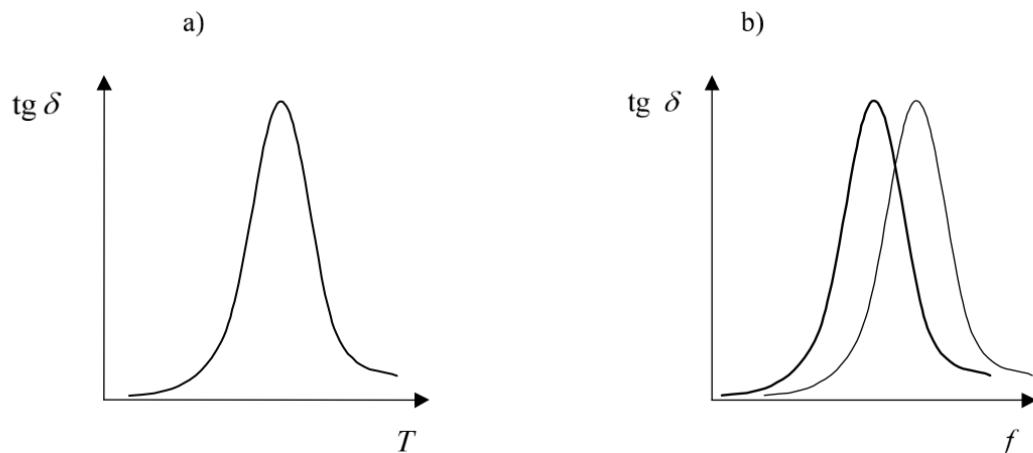
Pomiary współczynnika strat dielektrycznych pozwalają na określenie stanu izolacji: procesy starzeniowe, zawilgocenie izolacji czy oddziaływanie wyładowań niezupełnych powodują zwiększenie tego współczynnika.

Wartość współczynnika strat dielektrycznych rośnie wraz ze wzrostem przyłożonego napięcia, od pewnego etapu - progu wyładowań niezupełnych.

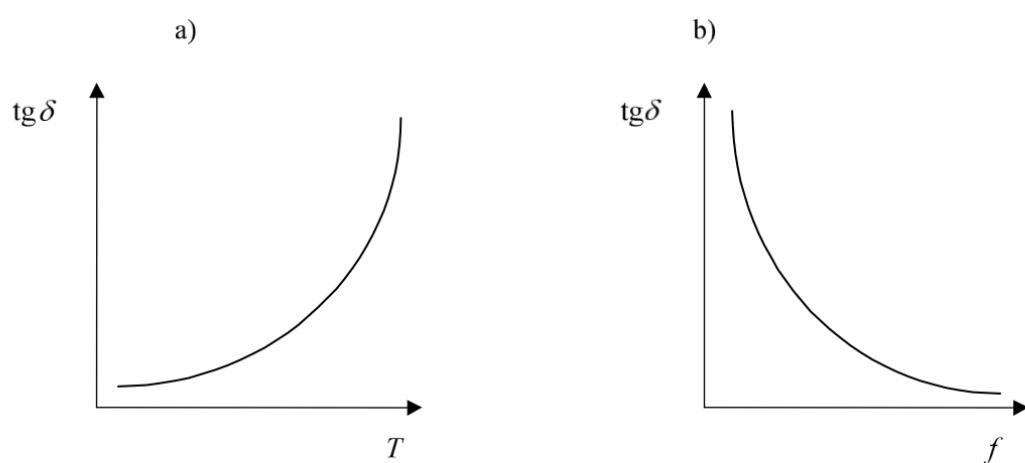


Natomiast wpływ częstotliwości i temperatury zależy od tego, który z mechanizmów strat dielektrycznych bierze górę: straty typu relaksacyjnego (związań z ruchem nośników, których zdolność do przemieszczania się w dielektryku jest ograniczona), czy straty przewodnościowe (związane z ruchem nośników swobodnych, w całym zakresie częstotliwości).

Charakterystyki strat można przedstawiono na poniższym obrazku:



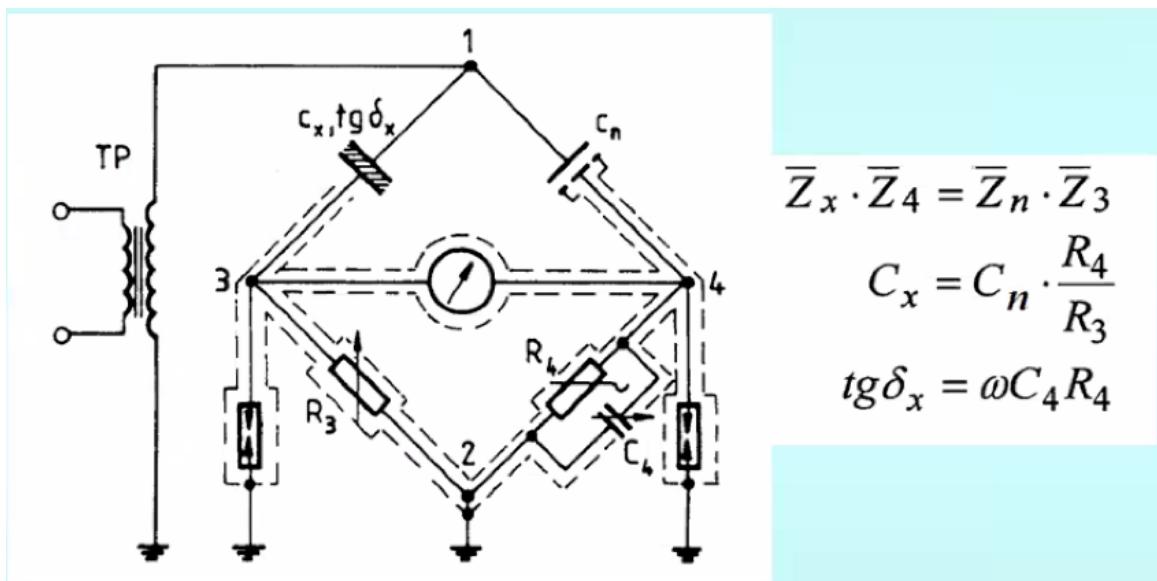
Rys. 3.5. Przebieg  $\operatorname{tg} \delta$  dla strat typu relaksacyjnego:  
a) w funkcji temperatury, b) w funkcji częstotliwości



Rys. 3.6. Przebieg  $\operatorname{tg} \delta$  dla strat typu przewodnościowego:  
a) w funkcji temperatury, b) w funkcji częstotliwości

### Pomiar mostkiem Scheringa

Mostek Scheringa przedstawiono na poniższym obrazku:



Pomiary mostkiem Scheringa wykonuje się przy wysokim napięciu, bo mechanizmy stratności zależą od natężenia pola elektrycznego. Pomiar polega na zrównoważeniu potencjałów 3 i 4 poprzez spełnienie warunków równowagi (iloczyny przeciwnie skierowanych impedancji powinny być sobie równe). Konstrukcja mostka i dobór kondensatora wzorcowego musi umożliwiać wyzerowanie mostka.

Równowagę potencjałów uzyskuje się poprzez dobór odpowiednich składowych impedancji poszczególnych gałęzi. W mostku Scheringa, elementem wzorcowym jest kondensator  $C_n$ , elementem mierzonym - pojemność  $C_x$ . Zrównanie iloczynów uzyskuje się przez sterowanie rezystorami  $R_3$  i  $R_4$  oraz pojemnością  $C_4$ .

W celu uniknięcia wpływu zakłóceń elektromagnetycznych, część mostka można ekranować klatką Faradaya. Pomiar mostkiem Scheringa można wykonać zdalnie.

Pomiar mostkiem Scheringa pozwala na wyznaczenie kąta strat dielektrycznych oraz pojemności badanej próbki.

#### Źródła:

- [1] [https://wwwdbc.wroc.pl/Content/1148/podstawy\\_inzynierii\\_materialowej.pdf](https://wwwdbc.wroc.pl/Content/1148/podstawy_inzynierii_materialowej.pdf)
- [2] J. Fleszyński - *Miernictwo wysokonapięciowe i laboratorium wysokich napięć*
- [3] Materiały z wykładu prof. Wieczorka
- [4] Materiały z wykładu *Miernictwo Elektryczne 2*



# 7. Ochrona odgromowa i przepięciowa w obiektach budowlanych

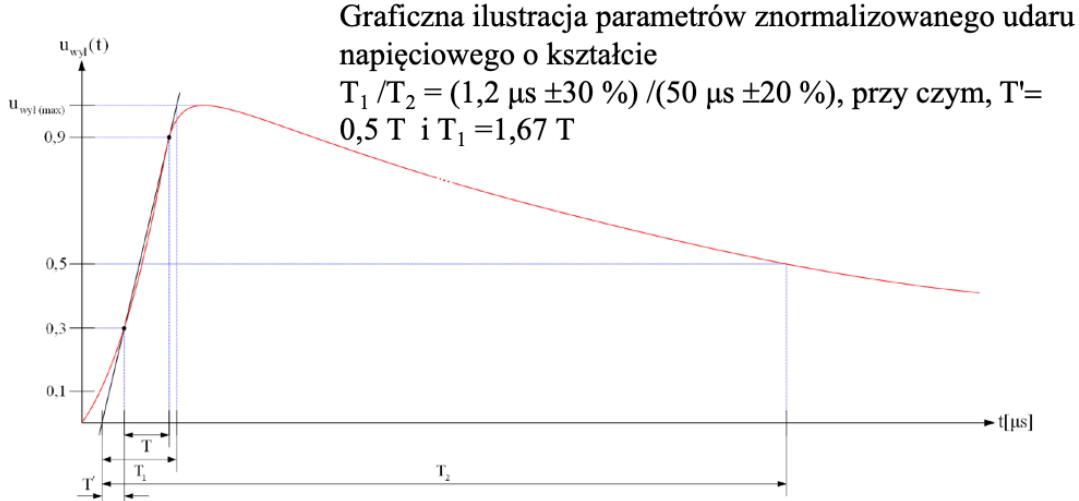
<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

## ▼ a) parametry piorunów chmura-ziemia

Podstawowymi parametrami, charakteryzującymi prąd piorunowy wyładowania doziemnego są:

- **wartość szczytowa udarów prądowych I [kA]** - decyduje o zagrożeniu przepięciami przewodzonymi i siłami dynamicznymi. Im większa wartość szczytowa, tym bardziej destrukcyjne wyładowanie.
- **stromość narastania czoła prądu piorunu S =  $di/dt$  [kA/s]** - wpływa na zagrożenia powodowane przepięciami indukowanymi - przy dużej stromości narastania udaru, w pobliskich obiektach przewodzących może dochodzić do indukowania napięć o bardzo dużych wartościach
- **ładunek przenoszony prądem wyładowania Q [As]** - decyduje o wpływie działań termicznych na wejściu do elementów przewodzących - czyli im większy ładunek, tym bardziej taki "styk" piorun-instalacja się topi.
- **energia właściwa W/R [J/Ohm]** - energia wydzielona przez prąd piorunowy na rezistorze o jednostkowej rezystancji. Im wyższa energia właściwa, tym mocniej nagrzewają się przewody przez które płynie prąd oraz tym silniej na siebie oddziaływują.
- **czas narastania czoła T1** - czas, w którym udar piorunowy wciąż narasta do wartości maksymalnej
- **czas trwania do połowy wartości szczytowej na grzbiecie fali prądu piorunowego T2** - czas, po którym fala udarowa opada do połowy swojej

wartości szczytowej.



### Źródła:

[1] Materiały z wykładu *Ochrona odgromowa i przepięciowa w obiektach budowlanych*

[2] [http://zwnike.iem.pw.edu.pl/zajecia/wtwn/7-8\\_TWN.pdf](http://zwnike.iem.pw.edu.pl/zajecia/wtwn/7-8_TWN.pdf)

## ▼ b) koordynacja izolacji

**Koordynacja izolacji** to zbiór działań, których celem jest dobór izolacji urządzeń elektrycznych oraz stosowanych środków ochrony przeciwprzepięciowej.

Izolacja powinna być zwymiarowana w taki sposób, żeby nie dochodziło do jej przebicia, a w przypadku jego wystąpienia - dotyczyło to tylko tych części izolacji równoległej, których przebicie nie powoduje trwałych uszkodzeń - np. izolacji powietrznej.

Izolacja i zabezpieczenia powinny także **maksymalnie ograniczać zakłócenia ruchowe** - czyli zakłócenia w pracy urządzeń.

W praktyce, koordynacja izolacji to **stopniowanie wytrzymałości elektrycznej izolacji** oraz **stosowanie ograniczników przepięć**, obniżających największe wartości przepięć do wartości mniejszych niż założony **poziom ochrony**.

**Poziom ochrony** jest poziomem napięcia, do którego ograniczone są przepięcia za pomocą środków ochrony przeciwprzepięciowej. Poziom ten określa się zależnie od rodzaju i warunków pracy układu.

Żeby zdefiniować poziom ochrony, definiuje się też **poziom podstawowy** napięcia, czyli wytrzymałość elektryczną najsłabszych części izolacji, których przebiecie nie pociąga za sobą większych strat - np. izolacja powietrzna. Izolacja stała czy ciekła mają wyższy poziom wytrzymałości - a więc **wyższy poziom izolacji** - i można tu mówić o wewnętrznej koordynacji izolacji.

W koordynacji izolacji, **marginesy bezpieczeństwa** - czyli różnicę napięć wytrzymywanych (probierczych - łączeniowych lub piorunowych) i szczytowych wartości przepięć - dobiera się dla określonych urządzeń w sposób arbitralny, bazując na kosztach urządzenia itp.

**Napięcia wytrzymywane (probiercze)** mają unormowane wartości, o określonej stromości narastania, czasu do półszczytu, kształcie itp.

Wśród **metod koordynacji izolacji** można wymienić:

- **Metodę deterministyczną:** sprowadza się do marginesu koordynacyjnego, czyli różnicy między poziomem podstawowym izolacji a poziomem ochronnym. Margines określany jest przez współczynnik ochrony, który dobiera się adekwatnie do urządzenia. Postępowanie w tej metodzie sprowadza się do porównania i doboru charakterystyk udarowych (napięciowo-czasowych) chronionej izolacji oraz urządzenia służącego jej ochronie w taki sposób, by się na siebie nie nakładały (jak w zabezpieczeniach instalacji).
- **Metody statystyczne:** pełną i uproszczoną. Dotyczą tylko izolacji regenerującej się - czyli powietrznej lub występującej na styku powietrze-dielektryk stałego. Przyjmuje się tu obliczenia w oparciu o metodę statystyczną i rozkład prawdopodobieństwa pojawienia się przepięć.

#### Źródła:

[1] Henryk Markiewicz - *Urządzenia elektroenergetyczne*

[2] Zdobyśław Flisowski - *Technika wysokich napięć*

### ▼ c) urządzenia zewnętrznej i wewnętrznej ochrony odgromowej

Po pierwsze, należy zdefiniować dwa terminy:

- **ochrona zewnętrzna:** zespół środków chroniących obiekt przed bezpośrednim uderzeniem pioruna;
- **ochrona wewnętrzna:** zespół środków chroniących wnętrze obiektu przed skutkami rozprływu prądu pioruna w urządzeniu piorunochronnym.

## **Urządzenia zewnętrznej ochrony odgromowej**

Urządzenia do ochrony zewnętrznej składają się ze zwodów, przewodów odprowadzających, przewodów uziemiających i uziomów. Mogą to być urządzenia naturalne - czyli występujące już w obiekcie - lub sztuczne, czyli instalowane specjalnie w tym celu. W pierwszej kolejności stosuje się na ogół elementy naturalne.

Wśród urządzeń ochrony zewnętrznej, można wymienić:

- **zwody**: zewnętrzne warstwy metalowe pokrycia dachu i ścian bocznych, a także metalowe dźwigary i wewnętrzne warstwy pokrycia dachu, etc. Stosuje się tu też elementy metalowe wystające nad dach i osłony typu klatkowego (zwody poziome). Urządzenia te mają na celu przechwycenie doziemnego wyładowania atmosferycznego.
- **przewody odprowadzające** - wszelkiego rodzaju stalowe i żelbetowe słupy nośne i pionowe metalowe elementy (pręty zbrojeniowe, rynny, drabinki, etc.). Przewody odprowadzające mają na celu bezpieczne odprowadzenie prądu pioruna.
- **uziomy** - zbrojone stopy, ławy i płyty fundamentowe oraz rurociągi i różne części metalowe w gruncie, jeżeli nie są izolowane. Uziomy mają na celu rozproszenie prądu pioruna w ziemi.

Urządzenia ochrony zewnętrznej dobiera się metodą toczącej się kuli, metodą kąta ochronnego lub metodą oczkową.

## **Urządzenia wewnętrznej ochrony odgromowej**

Wśród środków wewnętrznej ochrony odgromowej można wymienić ekwipotencjalizację, minimalne odstępy izolacyjne i dodatkowe zabezpieczenia. Mówiąc dokładniej:

- **ekwipotencjalizacja - połączenia eliminujące różnice potencjałów** - należy do najsilniejszych środków ochrony i powinna obejmować przede wszystkim wprowadzane do budynku instalacje metalowe.  
Ekwipotencjalizację realizuje się za pomocą połączeń bezpośrednich (gdy na elementach instalacji metalowej łączonych z urządzeniem piorunochronnym nie ma normalnie napięcia) lub ogranicznikowych (gdy łączone z urządzeniem piorunochronnym przewody znajdują się pod napięciem).
- **minimalny odstęp izolacyjny** - jeżeli połączenia wyrównawcze nie są dopuszczalne, to w miejscu zbliżenia instalacji metalowej do przewodu urządzenia piorunochronnego musi być zapewniony odstęp zapobiegający

powstawaniu iskry. Odstęp nie jest jednak wymagany, gdy konstrukcja obiektu jest stalowa lub żelbetowa lub gdy na drodze iskry nie może znaleźć się człowiek lub materiał palny.

- **dodatkowe zabezpieczenia** - mają na celu zabezpieczenie wyposażenia obiektu (urządzeń sterowniczych, sygnalizacyjnych, komputerów, etc.) przed skutkami spadków napięć oraz napięć indukowanych pod wpływem wyładowań piorunowych. Wśród środków ochrony dodatkowej wymienić można:
  - ekrany
  - elektromagnetyczne rozdzielenie obwodów
  - ograniczniki jedno- i wielostopniowe.

Wśród ograniczników przepięć można wymienić:

- **iskierniki** - najprostsze ograniczniki, składające się z dwóch elektrod rozdzielonych dielektrykiem gazowym - czyli powietrzem. Ich działanie następuje w przypadku wystąpienia przepięć większych niż wytrzymałość przerwy powietrznej iskiernika, co powoduje zwarcie obwodu z ziemią i spadek napięcia do zera. Wadą iskierników jest to, że po zadziałaniu płynie prąd następczy wywołany napięciem roboczym, który trzeba przerwać np. odpowiednim wyłącznikiem.
- **odgromniki wydmuchowe** - ich podstawowym elementem jest iskiernik umieszczony w rurze z materiału gazującego. Materiał gazowy pełni funkcję szybkiego wyłącznika przerywającego prąd następczy płynący po zadziałaniu odgromnika. Gaszenie łuku następuje wskutek wydmuchu gazów wydzielających się pod wpływem łuku ze ścianek rury osłaniającej iskiernik. Stremień gazów chłodzi łuk i kolumnę połukową, co powoduje zgaszenie go.
- **zaworowe ograniczniki przepięć** - są zbudowane z iskierników oraz rezystorów o nieliniowej charakterystyce, mających małą rezystancję dla dużych prądów i dużą rezystancję dla niewielkich prądów. W przypadku przepięć powodujących zadziałanie iskiernika, występuje przepływ prądu wyładowczego o znacznej wartości - spadek napięcia na ograniczniku jest niewielki, więc napięcie łuku jest niewielkie. Ten spadek napięcia na rezystancji nosi nazwę **napięcia obniżonego**. Przy napięciu roboczym, rezystancja ograniczników powinna mieć odpowiednio wysoki poziom, by ograniczyć prąd następczy do wartości, przy której może zostać przerwany przez iskiernik.

- **warystorowe ograniczniki przepięć** - stosuje się w nich bloki warystorowe w hermetycznej obudowie. Takie ograniczniki przyłącza się na stałe między przewód roboczy a ziemię. Charakterystyka warystorów sprawia, że przy napięciach roboczych mają one bardzo dużą rezystancję - więc mały prąd, rzędu 1 mA - natomiast przy przepięciach, spada ona niemal do zera co powoduje odprowadzenie prądu wyładowczego o znacznej wartości do ziemi. Po krótkim czasie warystor odzyskuje swoją pierwotną rezystancję - więc prąd następny praktycznie nie występuje.

## Źródła

- [1] Henryk Markiewicz - *Urządzenia elektroenergetyczne*
- [2] Zdobyśław Flisowski - *Technika wysokich napięć*
- [3] Materiały z wykładu *Ochrona odgromowa i przepięciowa w obiektach budowlanych*

## ▼ d) ochrona przepięciowa instalacji elektrycznej budynków

W instalacjach elektrycznych można wyróżnić przepięcia powodowane:

- czynnościami łączeniowymi (przepięcia wewnętrzne)
- wyładowaniami atmosferycznymi (przepięcia zewnętrzne)
- elektrycznością statyczną.

### Przepięcia wewnętrzne

Przepięcia wewnętrzne mogą występować w sieciach uszkodzonych i nieuszkodzonych. Wywoływane są m.in. przez załączenia niektórych odbiorników (kondensatory, transformatory, etc.), wyłączanie zwarć czy brak urządzeń regulacyjnych nadążających za zmianami obciążenia. Przepięcia łączeniowe mogą mieć wartości kilkukrotnie większe niż amplitudy napięć znamionowych urządzeń. Mogą więc prowadzić do uszkodzenia wrażliwych odbiorników.

Ochrona przed przepięciami wewnętrznymi oznacza w instalacjach stosowanie układów RC, diod Zenera oraz ograniczników przepięć z elementami warystorowymi. Układy RC i diody Zenera stosuje się przede wszystkim w urządzeniach o niewielkich mocach. Natomiast ograniczniki z elementami warystorowymi, jako zapewniające skutecną ochronę przy prostej budowie, stosowane są w instalacjach powszechnie, zwłaszcza tam, gdzie instalowane są odbiorniki indukcyjne (maszyny elektryczne).

### Przepięcia zewnętrzne

Przepięcia zewnętrzne spowodowane są wyładowaniami atmosferycznymi i charakteryzują się bardzo dużymi wartościami prądów szczytowych, dużą stromością narastania i krótkim czasem trwania. Mogą prowadzić m.in. do indukowania się w pobliskich liniach napięć o dużych wartościach, co też stwarza ryzyko uszkodzenia urządzeń.

Ochronę przed skutkami przepięć atmosferycznych w sieciach niskiego napięcia realizuje się za pomocą iskiernikowych ograniczników przepięć, zwanych dawniej odgromnikami. Najpowszechniej stosuje się tu ograniczniki przepięć zbudowane z iskierników i warystorów. Oferują one wysoką rezystancję dla małych prądów i wysoką dla dużych, co pozwala na samoczynne ograniczanie prądów następczych wyładowań w iskierniku.

### **Elektryczność statyczna**

Natomiast elektryczność statyczna jest związana stricte z tryboelektryzacją i faktyczne zagrożenia sprawia przede wszystkim w procesach przemysłowych. W celu niwelowania skutków elektryczności statycznej stosuje się neutralizatory.

### **Projektowanie instalacji z uwzględnieniem ochrony przepięciowej**

W normach wyróżnia się cztery typy urządzeń elektrycznych ze względu na kategorie przepięć. W praktyce, spełnienie wymagania norm oznacza zastosowanie w różnych miejscach instalacji ograniczników przepięć o różnych parametrach i właściwościach, które ograniczają przepięcia do wartości granicznych dopuszczalnych w określonych kategoriach instalacji.

Same ograniczniki przepięć można wyróżnić na klasy ze względu na docelowe zastosowania - np. klasa A to ochrona odgromowa linii napowietrznych niskiego napięcia, a klasa C - ochrona przepięciowa instalacji urządzeń elektrycznych w III kategorii przepięciowej.

**TABLICA 10.6. Podział ograniczników przepięć niskiego napięcia na klasy (kategorie), wg DIN VDE 0675/T6 oraz IEC 61643**

Klasa (kategoria) ogranicznika	Zakres zastosowania	Miejsce zainstalowania	Poziom ochrony	Obciążalność prądowa (znamionowy prąd wyładowczy)
A	ochrona odgromowa (przeciwprzepięciowa) linii napowietrznych niskiego napięcia	słupy linii elektroenergetycznych (rys. 10.7)	zgodnie z IEC 99.1	5÷15 kA ksztalt 8/20 µs
B I	ochrona odgromowa (przeciwprzepięciowa) instalacji i urządzeń elektrycznych w IV kategorii przepięciowej, wg PN-93/E-05009/443 [142] (ochrona podstawowa)	– złącze – rozdzielnica główna budynku o przeznaczeniu nieprzemysłowym – rozdzielnice przemysłowe (rys. 10.13, 10.14, 10.16)	<4 kV	100 kA ksztalt 10/350 µs
C II	ochrona przeciwprzepięciowa instalacji urządzeń elektrycznych w III kategorii przepięciowej, wg [142] (ochrona podstawowa)	– złącze, jeżeli nie stosuje się ograniczników klasy B – rozdzielnica główna – rozdzielnice na piętrach budynku (rys. 10.9, 10.13, 10.14)	<1,5÷2,5 kV	5÷15 kA ksztalt 8/20 µs
D III	ochrona przeciwprzepięciowa urządzeń w II kategorii przepięciowej, wg [142] (ochrona precyzyjna)	– puszki instalacyjne, gniazda wtyczkowe, przedłużacze (rys. 10.16, 10.17)	<1÷1,5 kV	1,5÷5 kA ksztalt 8/20 µs

### Źródła:

[1] Henryk Markiewicz - *Instalacje elektryczne*



# 8. Materiały elektromagnetyczne

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

## ▼ a) parametry materiałowe opisujące oddziaływanie materii z polem elektrycznym i magnetycznym

### Przenikalność elektryczna i magnetyczna

Podstawowe dwa parametry, charakteryzujące materiały pod względem użyteczności w procesach z silnymi polami, to przenikalność elektryczna  $\epsilon$  oraz przenikalność magnetyczna  $\mu$ . Obydwie te wielkości mówią, jak dużo energii z pól elektromagnetycznych są w stanie zgromadzić w sobie materiały.

Wynika to z zależności:

$$W_{VH} = \frac{1}{2} BH$$

$$W_{VE} = \frac{1}{2} DE$$

Przy czym wielkości w obydwu równaniach wiążą się ze sobą poprzez przenikalność odpowiednio magnetyczną i elektryczną, co opisują poniższe zależności:

$$D = \epsilon \epsilon_0 E$$

$$B = \mu \mu_0 H$$

### Parametry elektryczne

Istnieje kilka parametrów materiałów, które opisują ich oddziaływanie z polem elektrycznym. Na początek można wyróżnić **rezystwność** i jej odwrotność,

**konduktywność** - które dla danego materiału opisują, jak duża ilość nośników ładunku jest w stanie przepływać przez materiał, po przyłożeniu do niego pola elektrycznego.

Jedną z istotnych wielkości opisujących parametry materiału w obecności pola elektrycznego jest **wytrzymałość elektryczna**. Jest to maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego, przy której nie dochodzi do wyładowań w materiale. Wytrzymałość elektryczna wraz z przenikalnością elektryczną mówią, jak dużo energii jest w stanie zgromadzić materiał.

Najważniejszym parametrem materiałowym, który opisuje oddziaływanie pola elektrycznego na materię, jest jednak **przenikalność elektryczna**, która opisuje zdolność dielektryków do gromadzenia energii w polu elektrycznym.

Przenikalność elektryczną określa się jako stosunek pojemności kondensatora wypełnianego wybranym dielektrykiem do pojemności tego samego kondensatora *wypełnionego próżnią*. **Przenikalność zależy od stanu skupienia dielektryka, rodzajów polaryzacji, temperatury i częstotliwości**.

W przypadku materiałów przewodzących, czyli metali, istnieje multum wolnych nośników ładunku, które przemieszczają się w zależności od działającego pola. W dielektrykach sprawa ma się inaczej. Wszystkie ładunki są złączone z określonymi atomami co sprawia, że mogą się poruszać jedynie na małe odległości, w obrębie atomu lub cząsteczki. Stąd biorą się różne zjawiska polaryzacji.

Na **polaryzację** składa się kilka różnych mechanizmów. Pole elektryczne, oddziałując na ładunki związane w atomach i cząstkach powoduje ich przesuwanie. W najmniejszej skali, czyli atomowej, pojawia się **polaryzacja elektronowa**, czyli przesuwanie ładunków dodatnich i ujemnych w atomie. Kolejna jest **polaryzacja jonowa**, która polega na przesuwaniu ujemnych i dodatnich ładunków w polu elektrycznym w obrębie cząstki, co powoduje powstawanie dipoli. Poza tym, działa również **polaryzacja dipolowa**, czyli obracanie się w polu elektrycznym cząstek, które na stałe są dipolami. Ostatnia jest **polaryzacja makroskopowa**, czyli przemieszczanie się wolnych nośników ładunku w dielektryku zgodnie z kierunkiem działania sił pola.

Dodatkowo, można wyróżnić **podatność elektryczną**. Jest to niemianowana wielkość, która opisuje, jak materiał jest w stanie gromadzić energię poprzez polaryzację. Jest to wielkość bezpośrednio związana z przenikalnością elektryczną materiału ( $\varepsilon = 1 + \chi$ ).

## Parametry magnetyczne

Materiały magnetyczne klasyfikuje się na podstawie **podatności magnetycznej**, czyli proporcji magnetyzacji (momentu magnetycznego przypadającego na jednostkę objętości materiału) do przyłożonego pola zewnętrznego. Materiały podatności niższej od zera klasyfikowane są jako diamagnetyki. Materiały, których podatność jest w zakresie od 0 do 1 są nazywane paramagnetykami, natomiast materiały o większej podatności magnetycznej nazywa się ferromagnetykami.

Podatność paramagnetyków i ferromagnetyków zależy od temperatury. Właściwości magnetyczne wraz z temperaturą są osłabiane, a przy temperaturze zwanej **temperaturą Curie**, ferromagnetyki stają się paramagnetykami. Paramagnetyki natomiast wykazują coraz mniejszą podatność magnetyczną wraz ze wzrostem temperatury.

W przypadku pól magnetycznych, podstawowym parametrem opisującym materiał jest **przenikalność magnetyczna**. Opisuje ona, ile energii pola magnetycznego jest w stanie zgromadzić materiał. W przypadku materiałów ferromagnetycznych, przenikalność magnetyczna materiału zmienia się wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego. Z tej właściwości wynika pętla histerezy materiału.

### Źródła

[1] Opracowanie do przedmiotu *Silne pola elektromagnetyczne w procesach przemysłowych*

[2] David J. Griffiths - *Introduction to electrodynamics*

[3] Materiały z wykładu *Materiały elektromagnetyczne*

## ▼ b) przewodnictwo elektryczne metali czystych i stopów, reguła Matthiessena, prawo Wiedemann-Franza

Materiałoznawstwo elektrotechniczne: strona 78 - 91

### Przewodnictwo elektryczne metali czystych

Zgodnie z **elektronową teorią przewodnictwa**, w metalach znajdują się wolne elektrony, niezwiązane z jonami siatki krystalicznej, które domyślnie poruszają się zgodnie w sposób chaotyczny, z energiami kinetycznymi zależnymi od temperatury - jest to tzw. ruch cieplny. Jony siatki krystalicznej natomiast drgają wokół położeń równowagi.

W momencie przyłożenia pola elektrycznego, swobodne elektrony - nośniki ładunku - zaczynają oprócz ruchów, przemieszczać się powoli, w sposób

uporządkowany, w kierunku przeciwnym do linii sił pola elektrycznego. Ten powolny ruch elektronów w określonym kierunku nazywa się **dryfem**. Prędkość dryfu nazywa się **prędkością unoszenia**, natomiast proporcja prędkości unoszenia a natężeniem pola elektrycznego jest nazywana **ruchliwością elektronów**.

Rezystancja (lub konduktywność) materiału jest w tej teorii rozumiana jako ilość zderzeń elektronów z jonami siatki krystalicznej. Im wyższa temperatura, tym wyższe ruchy cieplne i większe drgania siatki, stąd większe prawdopodobieństwo zderzenia - ruchliwość elektronów maleje, prędkość unoszenia się zmniejsza. Stąd definiuje się **temperaturowy współczynnik rezystancji**.

Innymi teoriami, którymi można wyjaśnić przewodnictwo metali są **teoria kwantowa** oraz **teoria pasmowa**.

**Teoria kwantowa** opiera się na założeniu jamy potencjału - cząstki na zewnątrz metalu mają najwyższy poziom energii, wewnątrz - najniższy. Jako, że cząstki dążą do minimum energii, najniższe poziomy energetyczne są wypełnione, natomiast poziom najwyższy - jako pusty - pozwala na przewodnictwo. Poziom ten nazywa się poziomem Fermiego.

W **teorii pasmowej**, metale traktuje się jako duże atomy. Bliskość wielu atomów sprawia, że ich poziomy energetyczne (patrz: model atomu Bohra) są zbliżone, ale nie nakładają się na siebie - co można interpretować jako pasma energetyczne. Pasma energetyczne mogą być od siebie oddzielone lub nie. Jeżeli nie są oddzielone (jak w metalach), to materiały są w stanie przewodzić prąd przy minimalnym polu elektrycznym, tj. minimalnej dostarczonej energii - więc są traktowane jako przewodniki.

### **Przewodnictwo elektryczne stopów metali**

Wszelkiego rodzaju defekty sieci krystalicznej, domieszki i zanieczyszczenia powodują zmniejszenie drogi swobodnej elektronów w przewodniku. Oznacza to, że stopy metali oraz wszelkiego rodzaju domieszki zawsze będą posiadać mniejszą przewodność niż metale czyste. Wynika to z faktu, że wszelkie domieszki powodują zakłócenia regularnej budowy siatki krystalicznej, co zwiększa opory ruchu elektronów swobodnych.

Spadki konduktywności mogą być znaczne, przy czym w stopach aluminium są większe niż w stopach miedzi. Ponadto, w stopach jednorodnych (tworzących roztwory stałe) rezystywność jest znacznie większa niż rezystywności metali składowych. Natomiast w stopach niejednorodnych, rezystywność zależy od

procentowego udziału dwóch metali. Najwyższej wartości rezystywności można spodziewać się przy stosunku metali w stopie równym 1:1.

### **Reguła Matthiessena**

Reguła Matthiessena opisuje rezystywność materiału jako sumę dwóch składowych: składowej termicznej oraz składowej strukturalnej.

**Składowa termiczna** jest związana z drganiami siatki krystalicznej wywołanymi temperaturą. Składowa ta zanika wraz z dążeniem temperatury do 0 Kelwina.

**Składowa strukturalna** dotyczy natomiast rezystywności wynikającej z wszelkich defektów siatki krystalicznej i nawet przy zerze kelwina, jej wartość jest niezerowa.

W praktyce oznacza to, że przy zerze kelwina, rezystywności materiałów nie opadają do 0.

### **Prawo Wiedemanna-Franza**

Prawo Wiedemanna-Franza to prawo fizyczne, zgodnie z którym stosunek przewodności cieplnej do przewodności elektrycznej metali jest proporcjonalny do temperatury. Wielkości te wiążą stała Lorenza, zgodnie ze wzorem:

$$\frac{\kappa}{\sigma} = LT$$

Prawo to zostało wyprowadzone empirycznie jeszcze w XIX wieku. W 2011 i 2016 roku znaleziono materiały, które dowodzą, że prawo Wiedemanna-Franza nie w każdym przypadku obowiązuje - czyli że jego pierwotna forma przestała być aktualna.

### **Źródła:**

- [1] Zdzisław Celiński - *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*
- [2] Materiały z wykładu *Materiały elektromagnetyczne*
- [3] <http://www.ifmpan.poznan.pl/~urbaniak/cwiczenie1b.pdf>
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wiedemann–Franz\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Wiedemann–Franz_law)

## **▼ c) przewodnictwo elektryczne półprzewodników krystalicznych, półprzewodniki samoistne i domieszkowe**

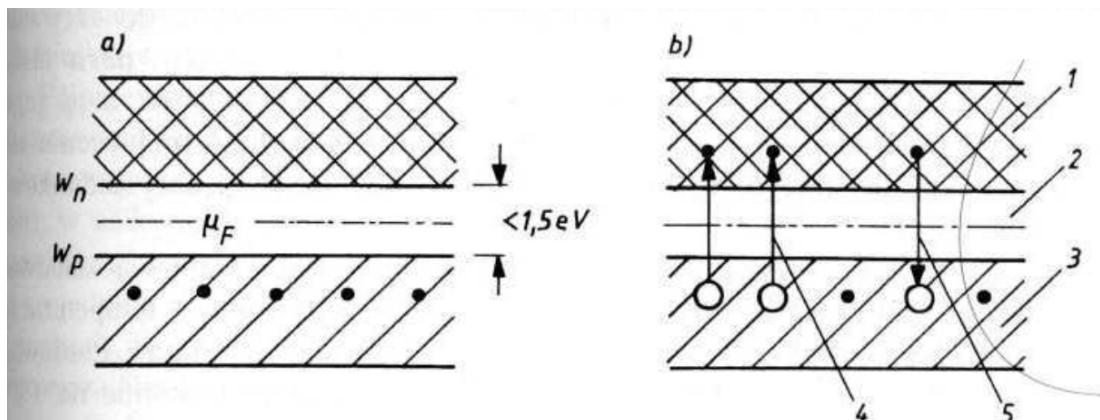
### **Przewodnictwo elektryczne półprzewodników krystalicznych**

Półprzewodniki to materiały, których przewodność elektryczna jest mniejsza niż przewodność metali, natomiast większa niż przewodność dielektryków. Przy tym,

konduktywność półprzewodników silnie zależy od warunków zewnętrznych, takich jak pole elektryczne, temperatura czy promieniowanie.

Przewodnictwo elektryczne półprzewodników najlepiej wyjaśnia **teoria pasmowa**. Półprzewodnikami są materiały, w których siatce krystalicznej elektrony są silnie związane z atomami, a ich oderwanie wymaga dostarczenia z zewnątrz relatywnie dużej porcji energii, zwanej **energią aktywacji**. Ilość wymaganej energii do aktywacji półprzewodnika jest zależna od **pasma wzbronionego**, czyli pasma energetycznego pomiędzy pasmami przewodnictwa i walencyjnym w pasmowym modelu półprzewodnika.

Pasmo walencyjne jest zakresem energii, jaką mają elektrony walencyjne związane z jądrem atomu. Pasmo przewodnictwa to zakres energii, którą mają elektrony uwolnione z atomu, będące (po uwolnieniu) nośnikami swobodnymi.



Rys. 3.2–2. Model pasmowy półprzewodnika samoistnego niewzbudzonego (a) i wzbudzonego (b): 1 – pasmo przewodnictwa, 2 – pasmo zabronione, 3 – pasmo walencyjne, 4 – jonizacja (tworzenie par elektron-dziura), 5 – rekombinacja,  $\mu_F$  – poziom Fermiego,  $W_n$  – dolna granica pasma przewodnictwa,  $W_p$  – góra granica pasma walencyjnego

### Półprzewodniki samoistne

Półprzewodniki samoistne to materiały, w których same **drgania cieplne elektronów walencyjnych mogą powodować ich wzbudzenie**, czyli przejście do pasma przewodnictwa. Przejście elektronu do pasma przewodnictwa powoduje powstanie **pary elektron-dziura**: elektron przeskakuje do innego pasma energetycznego, natomiast dziura jest de facto ubytkiem w paśmie walencyjnym - czyli, można powiedzieć, ładunkiem dodatnim (brakiem ładunku ujemnego) w tym paśmie.

Proces powstawania par elektron-dziura nazywa się procesem **jonizacji**.

Procesem odwrotnym do jonizacji jest proces **rekombinacji**, w którym pary

dziura-elektron zostają zneutralizowane wskutek przeskoczenia elektronu do pasma walencyjnego.

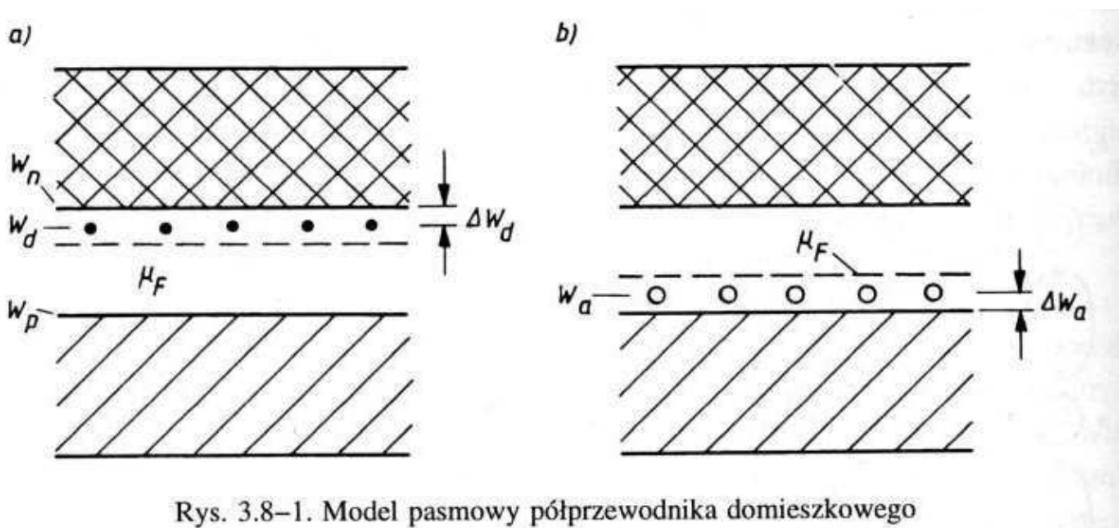
Elektrony w pasmie przewodnictwa stanowią niewielką liczbę wszystkich elektronów, co sprawia, że przewodność takiego półprzewodnika jest niewielka, np. w porównaniu do przewodności metali.

Dziury zachowują się podobnie do swobodnych ładunków - tu też może odbywać się ruch nośników, tylko w kierunku odwrotnym do kierunku elektronów. Oznacza to, że **prąd płynący przez półprzewodnik jest wypadkowo sumą ruchu ładunków dodatnich i ujemnych**.

### Półprzewodniki domieszkowe

Półprzewodniki domieszkowe to przewodniki, w których do materiałów bazowych (german, krzem) dodawane są odpowiednio dobrane domieszki. **Zależnie od dobranej domieszki, można uzyskać półprzewodnik typu n lub typu p.**

Wprowadzenie atomów domieszkowych sprawia, że w półprzewodniku powstają dodatkowe poziomy energetyczne.



Rys. 3.8-1. Model pasmowy półprzewodnika domieszkowego

**Półprzewodnik typu n (negative)** to taki, w którym domieszka sprawia, że w sieci krystalicznej pojawia się dodatkowy, słabo związany elektron. Taki elektron łatwo przechodzi do pasma przewodnictwa. Ta właściwość sprawia, że w półprzewodnikach typu n, większość nośników ładunku to elektrony, czyli mamy do czynienia z **elektronowym charakterem przewodnictwa elektrycznego** - stąd nazwa.

W **półprzewodniku typu p (positive)**, domieszka sprawia, że nad pasmem walencyjnym pojawia się dodatkowe pasmo energetyczne. Przez to,

większościowym nośnikiem ładunku stają się dziury elektronowe, więc mamy do czynienia z **przewodnictwem dziurowym**.

## Źródła

[1] Zdzisław Celiński - *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*

### ▼ d) mieszaniny dielektryczne

Mieszaniny dielektryczne to po prostu **połączenie różnych rodzajów dielektryków**. Stosuje się je w celu uzyskania pożądanej przenikalności elektrycznej. Wśród mieszanin dielektrycznych można wyróżnić mieszaniny regularne oraz mieszaniny nieregularne.

**Mieszaniny regularne** to takie, w których występuje regularność geometryczna. W tego typu mieszaninach, wypadkową przenikalność elektryczną można wyznaczyć analitycznie, w funkcji przenikalności i objętości materiałów składowych. Zależnie od ilości składników i ich proporcji, stosuje się różne równania - np. Clausius'a-Mossottiego, Boetchera czy Rayleigha.

**Mieszaniny nieregularne** to natomiast takie, w których nie ma regularności geometrycznej. Oznacza to, że mogą składać się ze zmieszanych ziaren o różnej wielkości (częściowo uporządkowane), mogą być zawiesinami (jeden składnik jest ośrodkiem dla drugiego) albo zbudowane tak, że ziarna jednego otaczają ziarna drugiego - i odwrotnie (mieszaniny równouprawnione).

W **mieszaninach nieregularnych dwuskładnikowych**, przenikalność elektryczną przedstawia się jako charakterystyki, tzw. **krzywe Wienera**, które są krzywymi granicznymi. Rzeczywista przenikalność mieszaniny zawiera się między tymi krzywymi granicznymi. Dlaczego? Bo pierwsza krzywa graniczna daje przenikalność elektryczną jak w przypadku szeregowego ustawienia materiałów, druga - jak w przypadku równoległego. W mieszaninach nieregularnych, układ materiałów jest gdzieś po środku. **Krzywe Wienera są zależne od kształtu ziaren.**

Jeżeli **kształt ziaren nie gra roli**, przenikalność mieszanin nieregularnych oblicza się za pomocą zależności podanych przez **Lichtenkera**, które są bardziej uogólnionym przypadkiem zależności Wienera.

W przypadku mieszanin dielektrycznych w układach kompozytowych dielektryk-przewodnik, można mówić też o **zjawisku tunelowania**. W tym zjawisku chodzi o to, że ładunki z rozłożonych w dielektryku częstek przewodzących mają pewne prawdopodobieństwo przeskoku przez barierę dielektryczną. Gdyby nie to, materiał tego typu byłby nieprzewodzący.

**Źródła:**

[1] Materiały z wykładu *Materiały elektromagnetyczne*



# 9. Silne pola elektryczne i magnetyczne w procesach technologicznych

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

## ▼ a) zastosowania silnych, stałych pól magnetycznych

Silne pola magnetyczne dzielimy na stacjonarne, quasi-stacjonarne oraz impulsowe.

Rodzaj pola	Natężenie pola	Czas trwania
Stacjonarne	$5T < B < 50T$	sekundy
Quasi-stacjonarne	$50T < B < 100T$	milisekundy
Impulsowe	$100T < B < 2500T$	mikrosekundy

Stałé pola magnetyczne wytwarzane są przez elektromagnesy bezrdzeniowe - bezrdzeniowe dlatego, że ferromagnetyki wchodzą w nasycenie i wymagają bardzo dużych prądów do dalszego magnesowania.

Istnieje kilka zastosowań silnych pól magnetycznych. Można wśród nich wymienić:

- **lewitację magnetyczną**: unoszenie materiału w polu magnetycznym
- **separatory magnetyczne**: analogicznie do elektrostatycznych, służą do rozdzielania materiałów o różnych właściwościach magnetycznych; wyróżnia się tu separatory gradientowe i bębnowe
- **akceleratory cząstek**: wykorzystanie siły Lorentza pozwala na znaczne przyspieszenia cząstek, można tu opisać np. **cyklotrony**

### Lewitacja magnetyczna

**Lewitacja magnetyczna** to zjawisko unoszenia się materiału wskutek działania pól magnetycznych przeciwwstawiających się siłom grawitacji. Obiekt unosi się w powietrzu. Lewitację magnetyczną zastosowano do opracowania poduszek magnetycznych.

Poduszki magnetyczne to technologia stosowana w pociągach o bardzo dużych prędkościach. W pociągu montuje się magnes, najczęściej nadprzewodzący, natomiast w torach wbudowane są specjalne, zwinięte cewki. Pole magnetyczne z pociągu wywołuje prądy wirowe i wzbudzenie pola magnetycznego w cewkach torów.

W dolnej części cewki powstaje pole innego znaku niż w górnej. Obydwie części cewki powodują pchanie całego pociągu w góre. Dzięki temu pociąg unosi się ponad szyną.

### **Separatory magnetyczne**

**Gradientowe separatory magnetyczne** wykorzystują silne niejednorodne pola magnetyczne do odseparowywania od siebie materiałów o różnych właściwościach magnetycznych.

Przykładem gradientowego separatora magnetycznego jest ten stosowany w procesie oczyszczania kaolinu. Wata z włókna stalowego jest stosowana jako wkład. W silnym niejednorodnym polu magnetycznym, cząstki ferromagnetyczne z kaolinu są przyciągane do waty, natomiast obojętne magnetycznie cząstki kaolinu opuszczają separator. Wkład z watą jest czyszczony w osobnym procesie. Dużą część takiego separatora stanowi jego układ chłodzenia

Innym przykładem jest oczyszczacz wody przemysłowej. Wewnątrz zbiornika umieszcza się kilka zwojów cewek o przeciwej bieguności, które wytwarzają niejednorodne pole magnetyczne. Cewki umieszcza się w naczyniu Dewara w celu zachowania odpowiedniej temperatury. Cząstki zanieczyszczeń kierują się w stronę wylotu zanieczyszczeń w pobliżu magnesu, natomiast oczyszczona woda - neutralna magnetycznie - opuszcza separator. Usuwa się w ten sposób głównie cząstki żelaza i tlenku.

Jeszcze innym procesem jest odseparowywanie siarki od węgla.

**Bębnowy separator magnetyczny** jest podobny do bębnowego separatora elektrostatycznego - z tym, że rozdziela cząstki o różnych przenikalnościach magnetycznych.

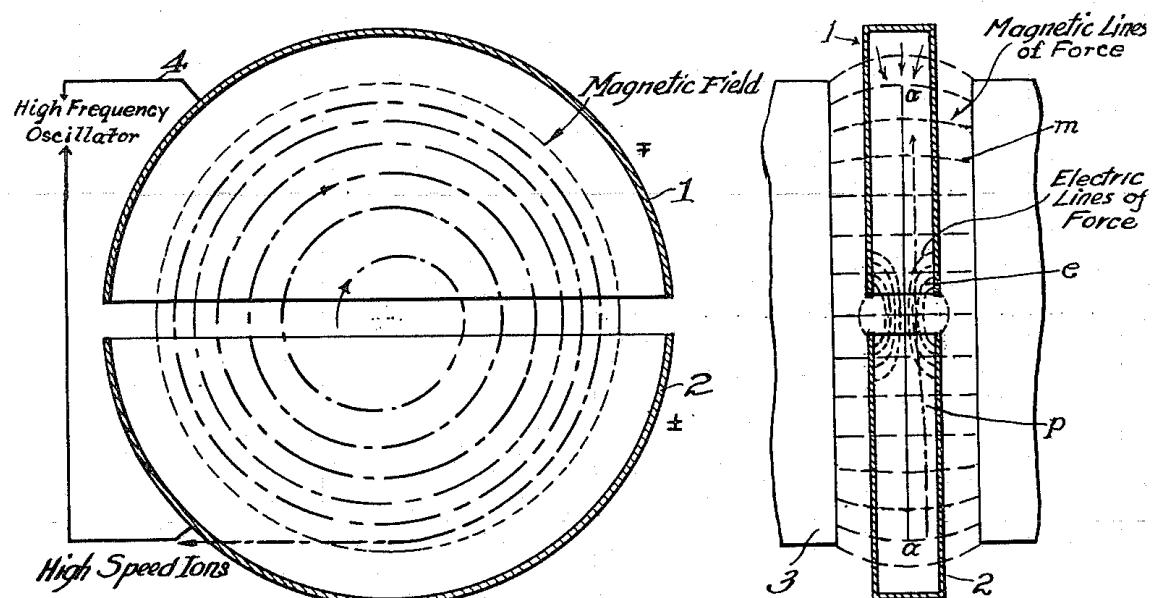
Separator jest zbudowany z bębna aluminiowego, na którym - na magnetowodzie - umieszczone są magnesy trwałe. Gdy separator się obraca, cząstki aktywne

magnetycznie zostają na nim, natomiast cząstki nieaktywne - odpadają.

Na koniec ruchu, magnesy są dezaktywowane i cząstki aktywne opadają grawitacyjnie do zbiornika.

## Cyklotrony

Cyklotron to akcelerator cząstek o działaniu cyklicznym, w którym cząstki poruszają się po torze kołowym. Dużą energię kinetyczną cząstkom nadaje się poprzez wykorzystanie silnych pól elektromagnetycznych.



Cyklotron składa się z dwóch elektrod: duantów, oraz z silnego magnesu. Duanty są półokrągłe. Cząstki są rozpędzane przez pole elektryczne między duantami, natomiast ich trajektoria jest wymuszana przez silne magnesy. Cząstki poruszają się po trajektorii kołowej, ponieważ duanty zasilane są naprzemiennie napięciami o przeciwnych polaryzacjach. Na cząstki działają zatem siła odśrodkowa oraz siła Lorentza.

Częstotliwość cyklotronowa to niejako prędkość obrotowa cząstek w cyklotronie i zależy od stosunku ładunku do masy cząstek. Cyklotron może przyspieszać cząstki tylko jednego rodzaju. Cząstki przyspieszane w cyklotronie mogą osiągać prędkości zbliżone do prędkości światła, przy czym pojawiają się wtedy problemy natury relatywistycznej.

## Źródła

- [1] Materiały z wykładu *Silne pola elektromagnetyczne w procesach technologicznych*

## ▼ b) pomiary natężeń stałych i wolnozmiennych pól elektrycznych

Pomiar natężenia pola elektrycznego można wykonać kilkoma przyrządami, z czego każdy ma inną zasadę działania:

1. **Indukcyjny miernik natężenia pola:** miernik ten opiera się o zasadę, że pole elektryczne jest związane z ładunkiem na powierzchni badanego materiału. Pole elektryczne na elektrodzie pomiarowej miernika indukuje pewien ładunek, który można pułapkować w mierniku, a następnie przy znanej pojemności kondensatora miernika oraz wartości zmierzonego napięcia, można obliczyć pole elektryczne, które oddziaływało na miernik w chwili pomiaru. Urządzenia te jednak są obarczone problemem z dryfem wskazań. Występuje tu analogia do pomiarów metodą podnoszonej elektrody czy klatki Faradaya.
2. **Indukcyjny miernik pola z układem próbkującym:** działa analogicznie do indukcyjnego miernika pola, z tym że potrafi próbować odczyt. Odczyt jest tym dokładniejszy, im szybciej zostanie wykonany - bo z czasem, ładunek przyciągnięty przez pole elektryczne zanika.
3. **Młynek polowy:** młynek polowy to przetwornik stałego lub przemiennego pola elektrycznego. W takim mierniku, elektroda pomiarowa jest przesłaniana okresowo przez ruchomą, uziemioną przeslonę. Wywołuje to okresowe zmiany ładunku indukowanego na elektrodzie pomiarowej. Amplituda takiej sinusoidy wyznacza wartość pola elektrycznego, przy czym zmiana pojemności kondensatora pomiarowego pozwala na zmianę zakresu urządzenia.
4. **Młynek polowy z detekcją fazową:** młynek polowy rozwinięty o detekcję fazową różni się przede wszystkim tym, że pokazuje również znak mierzonego pola elektrycznego.
5. **Radioizotopowy miernik pola:** w mierniku tego typu znajduje się pojemnik z materiałem promieniotwórczym, który jonizuje powietrze wokół. Pole elektryczne oddziałujące na miernik wyciąga z niego niejako jony określonego znaku. Jony przeciwe natomiast pozostają - powstaje nierównowaga ładunku. Nierównowaga ta odkłada się na pojemności między pojemnikiem a uziemioną elektrodą zewnętrzną. Zmierzenie ładunku odłożonego na pojemności układu pozwala na określenie natężenia pola elektrycznego. Dla różnych znaków przyjmuje się tu różne stałe miernika.

Wyniki pomiarów zależą od czynników zewnętrznych, takich jak:

- **efekt skupiania linii sił pola:** jeżeli obszar wytwarzający pole jest większy niż powierzchnia elektrody, to elektroda skupia linie sił pola z całego tego obszaru. Działa to analogicznie do układu ostrze-płyta. Wyniki pomiaru są zawyżone. Efekt ten kompensuje się, stosując elektrodę ochronną.
- **uśrednianie rozkładów powierzchniowych:** przy pomiarze pola, mierzymy jego wartość uśrednioną; w różnych odległościach od próbki otrzymujemy wartość uśrednioną dla innego obszaru - więc wskazania mogą się różnić, zwłaszcza gdy na próbce ładunek jest rozmiieszczony nierównomiernie
- **uśrednianie rozkładów objętościowych:** miernik mierzy pole elektryczne pochodzące od każdej strony obiektu - czyli jeśli mamy elektret naładowany z dwóch stron, to wynikowy pomiar będzie w przybliżeniu równy 0. Dlatego na czas pomiaru należy neutralizować jeden z tych ładunków, np. przez uziemienie.
- **wpływ przewodzącego i uziemionego otoczenia:** im bliżej obiekt znajduje się od uziemionego ekranu, tym bardziej jego pole elektryczne jest kompensowane przez napływający do ekranu ładunek - czyli wskazanie miernika spada.
- **wpływ pól od innych źródeł:** pole elektryczne jest addytywne, czyli jeżeli w pobliżu obiektu znajdują się inne obiekty wytwarzające pole elektryczne, to mierzymy sumę tych pól; jeśli chcemy znać pomiar tylko dla konkretnego obiektu, pola szybkozmienne można odfiltrowywać urządzeniem pomiarowym, natomiast pola stałe - ekranować.

## Źródła

[1] Materiały z wykładu *Silne pola elektromagnetyczne w procesach technologicznych*

[2] Materiały z laboratorium *Silne pola elektromagnetyczne w procesach technologicznych*

## ▼ c) elektrostatyczne metody pokrywania powierzchni

### Malowanie elektrostatyczne

Malowanie elektrostatyczne polega na elektrostatycznym rozpylaniu lakieru i kierowaniu go w stronę malowanego obiektu. Wyróżnia się malowanie elektrostatyczne i malowanie wspomagane elektrostatycznie, przy czym niniejsze opracowanie dotyczy tego pierwszego pojęcia.

W podstawowej wersji, malowanie elektrostatyczne polega na rozpraszaniu dużej ilości lakieru na krople poprzez dostarczenie mu odpowiednio dużej ilości energii, zależnej od napięcia powierzchniowego i gęstości cieczy.

W cieczy lakieru mieszą się ładunki, trzymane przy sobie **siłami wzajemnego oddziaływania**. Jeżeli w pobliżu cieczy (czyli na dyszy) przyłożone zostanie napięcie (pole elektryczne), indukcja elektryczna powoduje przemieszczanie się tych ładunków cieczy. Przy odpowiednio dużym natężeniu pola elektrycznego, następuje repulsja i powstanie kropel lakieru wywołanych indukcją. Rozpad cieczy na krople występuje po zgromadzeniu się na powierzchni cieczy ładunku określonego **litem Rayleigha**.

Malowanie elektrostatyczne można wykonywać pod warunkiem, że rezystywność cieczy jest w odpowiednim zakresie ( $5 * 10^4 \Omega m \leq \rho_v \leq 5 * 10^6 \Omega m$ ).

Naelektryzowane krople lakieru są rozpylane i przyciągane do malowanej powierzchni siłami zwierciadlanego odbicia. Obiekt malowany musi być uziemiony. Proces malowania elektrostatycznego pozwala na efektywne pokrywanie powierzchni lakierem, nawet od tyłu obiektu.

Oprócz indukcji, można stosować również wyładowania koronowe. Pozwalają one na stosowanie materiałów o szerszym zakresie rezystywności skrośnej.

### Malowanie proszkowe

Malowanie proszkowe polega na **tryboelektryzacji** cząstek lakieru przez specjalną dyszę, a następnie ich wysłaniu w stronę uziemionego, przewodzącego obiektu. Obiekt, np. grzejnik, przyciąga naładowany elektrostatycznie lakier proszkowy siłami zwierciadlanego odbicia. Po pokryciu proszkiem, malowany obiekt przepuszcza się przez suszarkę, która zespaja lakier.

Warunkiem tego procesu jest odpowiednio duża rezystywność skrośna lakieru proszkowego, większa niż  $\rho_v > 10^{13} \Omega m$ . Taka rezystywność zapewnia odpowiednio dużą stałą czasową materiału - wystarczającą dużą, by proszek doleciał do obiektu pokrywanego i się na nim zatrzymał.

### Oprysk elektrostatyczny

Proces oprysku elektrostatycznego jest analogiczny do malowania elektrostatycznego. Krople rozpyla się za pomocą indukcji lub ulotowo, przy czym zasięg oprysku musi być dużo większy niż zasięg malowania. Żeby móc sterować trajektorią cząstki, trzeba zapewnić odpowiednio duże siły elektrostatyczne, przewyższające działanie sił grawitacji.

Podstawowym parametrem w procesie oprysku jest masowa gęstość ładunku w materiale. Musi ona przekraczać wartość 2 mC/kg, żeby proces oprysku był efektywny.

Istotną różnicą między opryskiem a malowaniem jest to, że pestycydy służące do oprysku mają dużo mniejszą rezystywność.

Ulotowe ładowanie cząstek polega na przepuszczaniu ich przez obszar działania silnego pola elektrycznego. Indukcyjne - jak opisano przy malowaniu - przez przepuszczanie ich niejako przez obszar kondensatora.

### Flokowanie

Flokowanie to proces pokrywania powierzchni flokiem, czyli niewielkimi włókienkami o wielkości rzędu kilkuset mikrometrów oraz właściwościach półprzewodzących. Włókna foku są najpierw indukcyjnie ładowane, a następnie to samo pole, które je naładowało, odpycha je w kierunku materiału. Podczas tego przelotu, ustawiają się zgodnie z kierunkiem linii sił pola. Gdy fok dotknie powierzchni pokrywanej, pokrytej klejem, ustawia się pionowo. Po pierwsze dlatego, że ma trochę ładunku (relatywnie duży czas rozładowania), po drugie - jest odpychany od pozostałych naładowanych włókienek.

### Produkcja papierów ściernych

W procesie produkcji papieru ściernego, na półprzewodzącym pasie przemieszcza się materiał (węglik krzemu). Pod pasem umieszczona jest elektroda wytwarzająca pole elektryczne. Cząsteczki ustawiają się prostopadle do pasa długą osią. Gdy dociera do nich ładunek z taśmy, ładują się, a następnie lecą zgodnie z kierunkiem sił pola (np. do góry). Na górze jedzie druga taśma, tym razem z materiałem pokrytym klejem. Materiał ścierny w ten sposób pokrywa materiał pokryty klejem i powstaje papier ścierny.

### Źródła:

[1] Materiały z wykładu *Energooszczędne technologie w przemyśle*

## ▼ d) elektrofiltry i separatory elektrostatyczne

### Elektrofiltry

Elektrofiltry służą do odpylania spalin, zwłaszcza w elektrowniach. Wewnątrz elektrofiltru umieszczona jest elektroda ulotowa, natomiast obudowa elektrofiltru stanowi elektrodę uziemioną. Na cząstki zanieczyszczeń w polu wyładowania nanoszony jest ładunek, który następnie odpycha je od elektrody ulotowej i przylegają one do elektrody uziemionej.

Po dotknięciu elektrody uziemionej, cząstki pyłów rozładowują się i opadają do zbiornika.

W elektrofiltrach stosuje się napięcia rzędu 80-100 kV. Przy niewielkich prądach osiąga się sprawność większą od 90%. Ograniczeniem elektrofiltru jest rezystywność pyłów: przy zbyt dużej, cząstki nie odpadają od elektrody uziemionej i może wystąpić zjawisko wyładowania wstecznego, co znacznie obniża sprawność procesu odpylania.

### **Separatory elektrostatyczne**

Separatory elektrostatyczne oddzielają od siebie materiały o różnych parametrach elektrycznych, np. oddzielanie zmielonych kabli na miedź i izolację.

W **separatorach strumieniowych** cząstki zsypywane są na ruchomą powierzchnię, na której elektryzują się przez tryboelektryzację. Następnie wpadają w obszar pola elektrycznego, w którym cząstki naładowane w locie opadają w określonym kierunku.

W **separatorach bębnowych**, cząstki są ładowane przez elektrodę ulotową (koronowo). Naładowane cząstki - czyli te o dużej rezystywności skrośnej - przyczepiają się do obracającego się bębna, natomiast cząstki o małej rezystywności szybko rozładowują się i opadają. Na cząstki działa siła elektrostatyczna, siła grawitacji oraz siła odśrodkowa. Zależnie od proporcji tych sił i prędkości obracania się bębna, cząstki odpadają w różnych chwilach na różne odległości od bębna, do odpowiednich pojemników.

### **Źródła**

[1] Materiały z wykładu *Silne pola elektromagnetyczne w procesach technologicznych*

[2] Materiały z wykładu *Energooszczędne technologie w przemyśle*



# 10. Termokinetyka urządzeń elektrycznych i elektronicznych

<input checked="" type="radio"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

▼ a) mechanizmy przewodzenia ciepła w ciałach stałych, ciekłych i gazowych. Przewodzenie ciepła w układach jedno- i wielowarstwowych o różnej geometrii - prawo Fouriera

## Przewodzenie ciepła w płynach

Przewodzenie ciepła może występować w ciałach stałych, ciekłych i gazowych. W płynach (czyli gazach i cieczach), przewodzenie ciepła polega na zderzaniu się ze sobą cząstek poruszających się z różną prędkością. Mówimy, że cząstki o większej prędkości mają większą temperaturę i w trakcie zderzeń, przekazują ją (w postaci energii kinetycznej) do innych cząstek. Na ogół przewodzenie ciepła w płynach jest połączone z konwekcją. Jeżeli chodzi o płyny, przewodzenie ciepła jest bardziej złożone ze względu na oddziaływanie międzycząsteczkowe płynu o większej gęstości.

## Przewodzenie ciepła w ciałach stałych

W ciałach stałych, przewodzenie ciepła polega na przekazywaniu energii drgań siatki krystalicznej, ruchu swobodnych elektronów, wzbudzeniu magnetycznym lub promieniowaniu elektromagnetycznym. Drgania siatki dotyczą w zasadzie wszystkich ciał stałych.

Siatka krystaliczna materiału ma większe drgania przy wyższej temperaturze i są one przekazywane do przylegających cząstek o niższej temperaturze.

Ruch swobodnych elektronów (gazu elektronowego) powoduje ich zderzanie się z siatką krystaliczną i wzbudzanie jej drgań - logiczne jest zatem, że zjawisko to występuje tylko w materiałach dobrze przewodzących.

Wzbudzenie magnetyczne wynika z występowania dipoli magnetycznych i ich momentów, których oddziaływanie ma wpływ na przepływ ciepła w materiale. Natomiast oddziaływanie elektromagnetyczne dotyczy materiałów przezroczystych, w które może wniknąć.

## Prawo Fouriera

Prawo Fouriera to sformułowanie fizycznego spostrzeżenia, zgodnie z którym przewodzenie ciepła zachodzi zawsze w kierunku od wyższej do niższej temperatury, tym szybciej im wyższa powierzchnia styku dwóch materiałów i tym lepiej, im wyższa przewodność cieplna rozpatrywanego materiału. Można to zapisać wzorem:

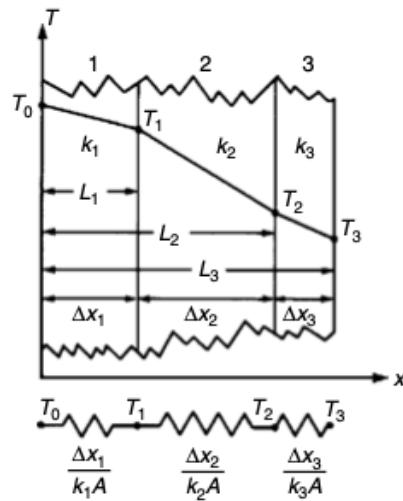
$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \rightarrow \frac{q_x}{A} L = -k \frac{T_1 - T_2}{L}$$

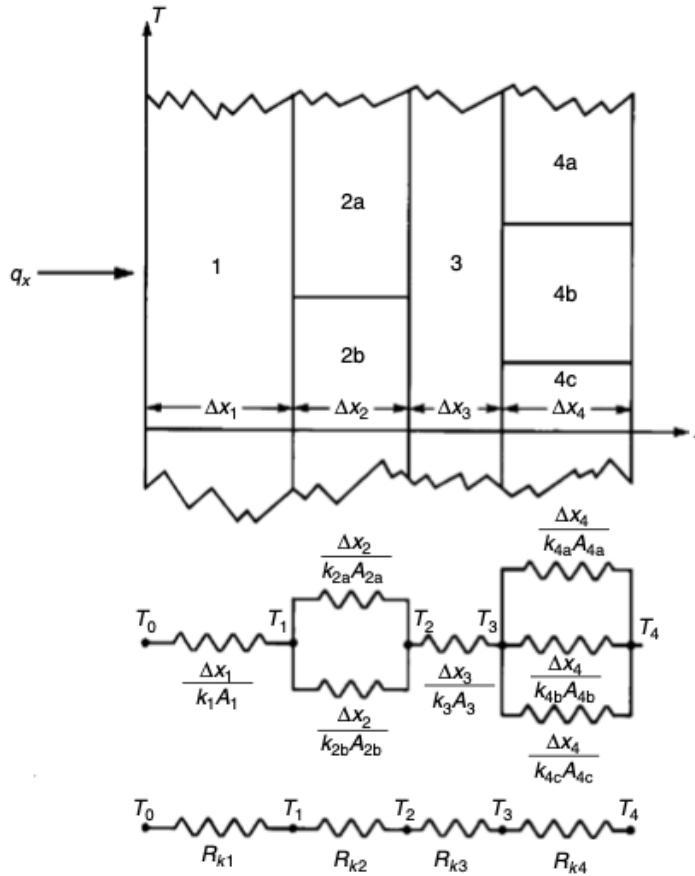
Gdzie  $q_x$  jest strumieniem ciepła w kierunku x wyrażonym W, A to powierzchnia styku materiałów, k - przewodność cieplna materiału [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ], natomiast  $dT/dx$  to gradient temperatury w kierunku x, L - miejsce w grubości materiału.

## Przewodzenie ciepła w układach jedno- i wielowarstwowych o różnej geometrii

Przewodzenie ciepła w **układach płaskich** jest zagadnieniem dosyć prostym. Strumień cieplny można tu potraktować tak, jak prąd w obwodach elektrycznych. Różnica temperatur to napięcie. Przewodność cieplna, powierzchnia styku i długość w materiale (długość jako określone miejsce w grubości ściany z materiału) tworzą opór cieplny.

Układy tego typu można rozpatrywać podobnie do obwodów elektrycznych. Jeżeli ściany ułożone są w szeregu, to można policzyć wypadkowy strumień cieplny (jak prąd) z różnicą temperatur na dwóch końcach układu i ich oporu cieplnego. Potem temperatury w poszczególnych miejscach (jak napięcie) wylicza się po prostu mnożąc strumień przez opór cieplny. W obwodach równoległych sprawa ma się analogicznie.

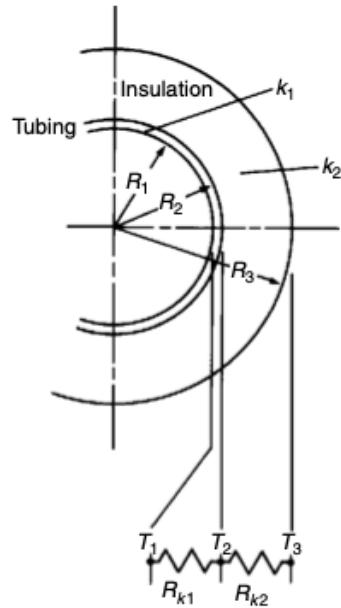




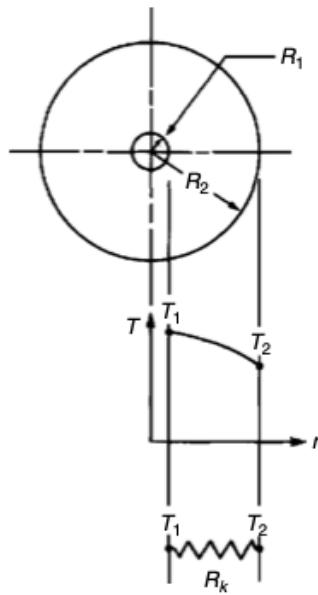
**Układy cylindryczne** są bardziej złożone, bo ciepło rozchodzi się jednocześnie w wielu kierunkach (od środka do zewnątrz układu), przy czym powierzchnie wewnętrzna i zewnętrzna materiału są różne. Uwzględnienie tych cech układów cylindrycznych sprowadza się w uproszczeniu do zastosowania logarytmów wiążących promień wewnętrzne i zewnętrzne cylindrów. Wyprowadzenie tych zależności zaczyna się od współrzędnych biegunkowych.

Ułożenie koncentrycznie cylindrów termoprzewodzących znowu sprowadza się do analizy układu podobnego do obwodu elektrycznego, przy czym sposób liczenia oporu cieplnego wynika tu z wspomnianych wyżej zależności logarytmicznych.

Ogólnie, opór cieplny w układzie cylindrycznym zależy od logarytmu naturalnego stosunku większego promienia do mniejszego i maleje wraz z długością materiału, bo to od długości cylindra zależy powierzchnia styku.



**Układy sferyczne**, podobnie jak cylindryczne, w celu wyprowadzenia uproszczonych zależności, należy rozpatrywać we współrzędnych biegunowych. Ostateczna zależność na opór cieplny wynika z proporcji promieni sfer do iloczynu tych promieni.



#### Źródła:

- [1] Wiśniewski, Wiśniewski - *Wymiana Ciepła*
- [2] William S. Janna - *Engineering Heat Transfer, Third Edition*

#### ▼ b) konwekcja swobodna i wymuszona - istota zjawiska, ogólne zasady dobrania kryteriów do obliczeń cieplnych w układach elektrycznych

**Konwekcja** to sposób przewodzenia ciepła związany z **ruchem płynów**. Jeżeli ruch płynów jest spowodowany **zewnętrznym czynnikiem**, takim jak działanie pompy lub wentylatora, mówimy o **konwekcji wymuszonej**. Jeżeli ciesz porusza się głównie ze względu na wynikającą z różnicą temperatur **różnicę gęstości** - czyli płyn gęstszy opada, rzadszy - unosi się - mówimy o **konwekcji naturalnej**.

**Przejmowanie ciepła** to wymiana ciepła między powierzchnią ciała stałego a opływającym ją płynem. Gęstość strumienia przejmowanego ciepła określana jest prawem Newtona (prawo stygnięcia), które wiąże różnice temperatur ciała stałego i płynu przy wykorzystaniu współczynnika przejmowania ciepła ( $\frac{W}{m^2 K}$ ).

Jeżeli mówimy o obliczeniach cieplnych w układach elektrycznych, chodzi nam tu głównie o sposób w jaki konwekcja wymuszona - czyli np. działanie wentylatora - przejmuje ciepło z obwodów urządzenia. Czyli interesuje nas strumień przejmowanego ciepła lub jego gęstość.

Liczenie strumienia cieplnego z prawa Newtona wymaga obliczenia współczynnika przejmowania ciepła. Współczynnik przejmowania ciepła zależy od prędkości cieczy i rodzaju przepływu warstwy przyściennej (laminarny - cząstki płyną równolegle do siebie; turbulentny - tory ruchu cząstek przecinają się), a także od lepkości, gęstości i przewodności cieplnej płynu.

Kryterium do obliczeń cieplnych dobiera się na podstawie kilku czynników, ale podstawowymi są rodzaj przepływu (turbulentny / laminarny), kształtu kanału (opływanie płaskiej ściany to co innego niż ruch w kanale cylindrycznym) i rodzaju płynu, przy czym rodzaj płynu zawiera w sobie wspomniane wyżej właściwości fizyczne - lepkość, gęstość, przewodność cieplną.

Wszystkie te wielkości są ze sobą związane przez różne współczynniki takie, jak liczba Nusselta, liczba Reynoldsa, liczba Prandtla czy liczba Eckerta.

### Źródła:

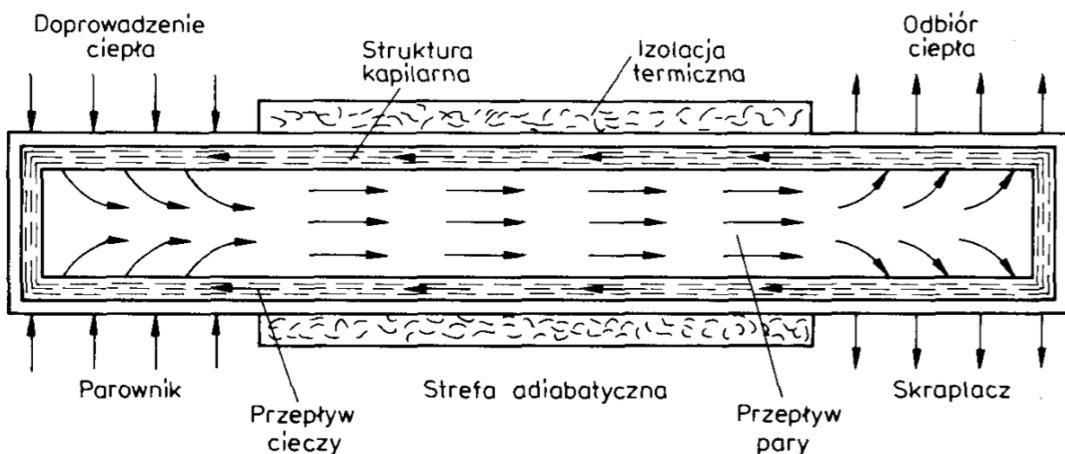
- [1] Wiśniewski, Wiśniewski - *Wymiana Ciepła*
- [2] William S. Janna - *Engineering Heat Transfer, Third Edition*
- [3] Materiały z wykładu *Termokinetyka urządzeń elektrycznych i elektronicznych*

## ▼ c) rury cieplne - budowa i zasada działania, zalety, typy. Zastosowanie rur cieplnych w układach chłodzących

### Budowa i zasada działania

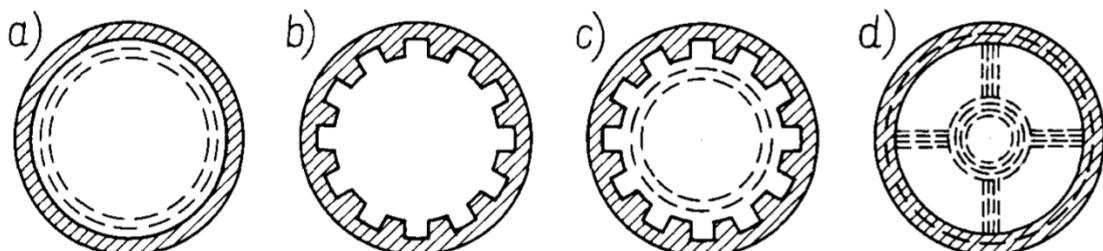
Rurka ciepła to szczerelnie zamknięta rurka lub pojemnik o innym kształcie, której przestrzeń jest częściowo wypełniona cieczą. Ciecz do rurki dobiera się zależnie od temperatury pracy rurki i oczekiwanej gęstości strumienia ciepła.

Rurka jest zbudowana z trzech stref: parownika, strefy adiabatycznej oraz skraplacza. DO parownika doprowadzane jest ciepło powodujące odparowanie cieczy. Strefa adiabatyczna służy do transportu ciepła bez wymiany z otoczeniem. Skrapacz natomiast służy do oddawania ciepła na zewnątrz, a swoją nazwę zawdzięcza temu, że to w nim para w rurce ulega skropleniu. Skropliny w takiej rurce przemieszczają się pod wpływem sił kapilarnych (sił między parą a cieczą) przeciwnie do kierunku pary. Proces parowania, transportu i skraplania zachodzi w sposób ciągły.



Wewnętrzna powierzchnia rurki jest pokryta na ogół strukturami kapilarnymi, natomiast jej zewnętrzna powierzchnia jest pokryta izolacją termiczną. Struktury kapilarne to po prostu odpowiednie ukształtowanie powierzchniewnętrznej rurki tak, by wytworzyć różnicę ciśnienia kapilarnego między skraplaczem a parownikiem. Są to na ogół tzw. knuty wykonane z metalowych siatek umieszczonych na obwodzie lub w środku rurki.

Struktury kapilarne mogą być po prostu podłużnymi rowkami, ale są też pewne konstrukcje, które tworzą tzw. diodę cieplną, czyli rurkę umożliwiającą przepływ ciepła w tylko jedną stronę.



Rys. 11.13. Przekroje poprzeczne rur cieplnych – różne rodzaje struktur kapilarnych

## Typy rur cieplnych

Rurki cieplne można rozróżnić ze względu na sposób działania. Wśród nich można wymienić:

- **grawitacyjne rury cieplne (termosyfony)** - kondensat przemieszcza się w nich pod wpływem siły ciężkości
- **klasyczne rury cieplne** - kondensat przemieszcza się w nich ze względu na różnicę ciśnień kapilarnych
- **wirujące rury cieplne** - transport kondensatu następuje dzięki działaniu siły odśrodkowej
- **termosyfony antygrawitacyjne** - skrapacz jest tu poniżej parownika, a kondensat przemieszcza się w postaci dwufazowej mieszaniny w osobnym (wewnętrznym) przewodzie posiadającym dodatkowy grzejnik

- **mikrorurki** - są to płaskie płytki lub zestawy cienkich rurek, stosowane głównie w laptopach i elektronice;
- **rurki ciepła o zmiennym przewodnictwie** - rurki w których jest możliwość regulacji wielkości powierzchni wymiany ciepła dzięki obecności "korka" z nieskraplającego się gazu.

## Zalety

Podstawową zaletą rurek cieplnych jest to, że wskutek procesów parowania i skraplania czynnika roboczego (czyli z wykorzystaniem ciepła utajonego), uzyskuje się bardzo duże gęstości przekazywanego strumienia ciepła przy niewielkich różnicach temperatur. Dzięki temu, współczynniki przewodzenia ciepła takich rurek są znacznie większe nawet niż w przypadku najlepiej przewodzących ciepło metali.

Kolejną zaletą są szerokie możliwości zastosowania ze względu na fakt, że to od czynnika cieplnego zależy docelowe temperatury pracy. Jasne, poszczególne czynniki mogą mieć relatywnie małą rozpiętość temperaturową, ale wypadkowo można spreparować rury cieplne do pracy tak w pobliżu zera kelwina, jak i w temperaturze rzędu 2000 stopni celsjusza.

Ze względu na różne rozmiary konstrukcyjne, rurki cieplne można stosować zarówno w niewielkiej elektronice pokroju laptopów, jak i do chłodzenia większych maszyn i urządzeń.

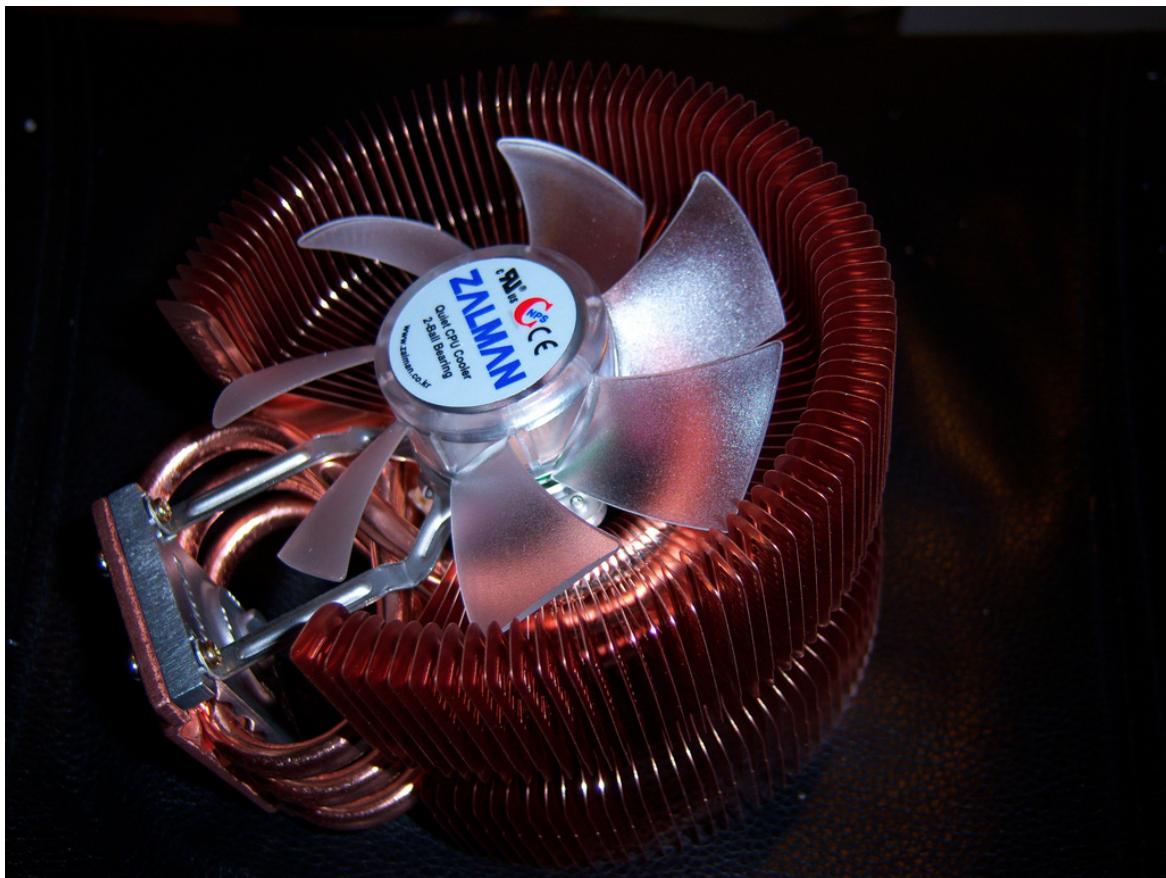
## Zastosowanie

Rurki ciepła sprawdzają się w wielu dziedzinach, wśród których można wymienić:

- technika kosmiczna - wyrównywanie temperatur, transport ciepła
- elektronika - chłodzenie części czynnych, zasilaczy, procesorów, wzmacniaczy, konsol, etc.
- budownictwo - stabilizacja temperatury gruntu wokół fundamentów i podpór w obszarach arktycznych, rozmrażanie oblodzonych dróg, etc.
- przemysłowe wymienniki ciepła - w tym zastosowanie wymienników z rurkami ciepła w systemach klimatyzacyjnych
- lotnictwo - termiczna regulacja w samolotach cywilnych i wojskowych;

Ciekawym zastosowaniem są wymienniki cieplne z rurkami ciepła w systemach klimatyzacyjnych. Pobierają one ciepło z nagrzanego powietrza w pomieszczeniu i oddają je do otoczenia, przy czym nie mają ruchomych części, oferują wysoką sprawność, niskie spadki ciśnienia przepływającego powietrza, brak zapotrzebowania na energię z zewnątrz, bezobsługowość i długi okres użytkowania.

Poniżej fotka - rurki ciepła zamontowane do chłodnicy procesora:



## Źródła

- [1] Wiśniewski, Wiśniewski - *Wymiana Ciepła*
- [2] Pabiś, Koszut - *Rurki ciepła - zasada działania, budowa, zastosowania* -  
[https://repozytorium.biblos.pk.edu.pl/repo/resources/31775/file/suwFiles/PabisA\\_RurkiCiepla.pdf](https://repozytorium.biblos.pk.edu.pl/repo/resources/31775/file/suwFiles/PabisA_RurkiCiepla.pdf)

## ▼ d) zjawiska termoelektryczne - rodzaje i sposób wykorzystania do chłodzenia urządzeń elektrycznych i elektronicznych

### Zjawiska termoelektryczne

Zjawiska termoelektryczne polegają na bezpośredniej transformacji różnicy temperatury na napięcie elektryczne lub napięcia elektrycznego na różnicę temperatur. Wśród zjawisk termoelektrycznych wyróżnia się trzy podstawowe: zjawisko Seebecka, zjawisko Peltiera oraz zjawisko Thomsona.

**Zjawisko Peltiera** polega na tym, że podczas przepływu prądu stałego przez styk dwóch różnych materiałów (metali) powoduje, że jeden z tych materiałów się nagrzewa, drugi chłodzi. Zjawisko to jest niezależne od ciepła Joule'a-Lenza (nagrzewaniu się rezystancji). Wynika to z przechodzenia elektronów między półprzewodnikiem a przewodnikiem. Przeskok elektronu z przewodnika na półprzewodnik mogą wykonać tylko elektrony o dużej energii, co powoduje wychładzanie się metalu. W drugą stronę, elektrony przeskakujące z półprzewodnika na metal oddają dużą porcję energii przeskakując z pasma przewodnictwa, nagrzewając tym samym metal.

**Zjawisko Seebecka** polega na tym, że na styku dwóch różnych materiałów przewodzących, w przypadku ich różnych temperatur, powstaje siła elektromotoryczna. W półprzewodnikach wynika to z faktu, że w materiale o różnej temperaturze na obu końcach zmienia się gęstość koncentracji nośników ładunku - wskutek czego zależnie od rodzaju przewodnictwa, nośniki ładunku przemieszczają się w określonym kierunku (elektrony w półprzewodniku typu "n" uciekają do zimniejszego końca próbki i nadają mu potencjał ujemny). W przewodnikach, wolne elektrony nabierają energii kinetycznej i przemieszczają się w kierunku zimnego końca próbki. Zjawisko to opisuje się współczynnikiem Seebecka.

**Zjawisko Thomsona** polega na tym, że przy przepływie prądu przez próbkę półprzewodnika na której występuje różnica temperatur, próbka wydziela (lub pobiera z otoczenia) pewną ilość ciepła, niezależną od ciepła Joule'a-Lenza. Wynika to z faktu różnorodnej koncentracji nośników ładunku w takiej próbce (co wynika znowu z różnicy temperatur) i występowania prądu dyfuzji. Zewnętrzne pole elektryczne może być zgodne lub przeciwe do prądu dyfuzji. Jeżeli zewnętrzne pole jest zgodne z polem wynikającym z prądu dyfuzji materiału, dochodzi do chłodzenia próbki. W przeciwnym razie, dodatkowa praca pola zewnętrznego wykonana na nośnikach ładunku powoduje dodatkowe nagrzewanie próbki.

## Wykorzystanie zjawisk termoelektrycznych

Zjawiska termoelektryczne wykorzystywane są w technice do systemów ogrzewania, chłodzenia i pomiarów temperatury.

**Zjawisko Peltiera** wykorzystuje się do budowania pomp ciepła, służących do chłodzenia i nagrzewania różnych obiektów. Gradient temperatury na półprzewodniku powoduje powstanie siły elektromotorycznej i odpowiedni obwód jest w stanie ją wyprowadzić na zewnątrz w postaci prądu elektrycznego.

**Zjawisko Seebecka** wykorzystuje się natomiast do produkcji termopar. Termopary reagują na różnicę temperatur w których umieszczono ich spoiny. To znaczy, że termopara działa z temperaturą odniesienia (termostatyzacją) - jedno złącze jest umieszczone w temperaturze badanej, drugie - w temperaturze odniesienia. Powstające napięcie pozwala na określenie różnicy temperatur.

## Źródła

[1] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Zjawisko\\_termoelektryczne](https://pl.wikipedia.org/wiki/Zjawisko_termoelektryczne)

[2] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Termopara>

[3] Materiały z wykładu *Materiały elektromagnetyczne*

## ▼ e) promieniowanie cieplne - opis zjawiska, podstawowych praw i parametrów. Ekrany cieplne

### Opis zjawiska i podstawowych praw

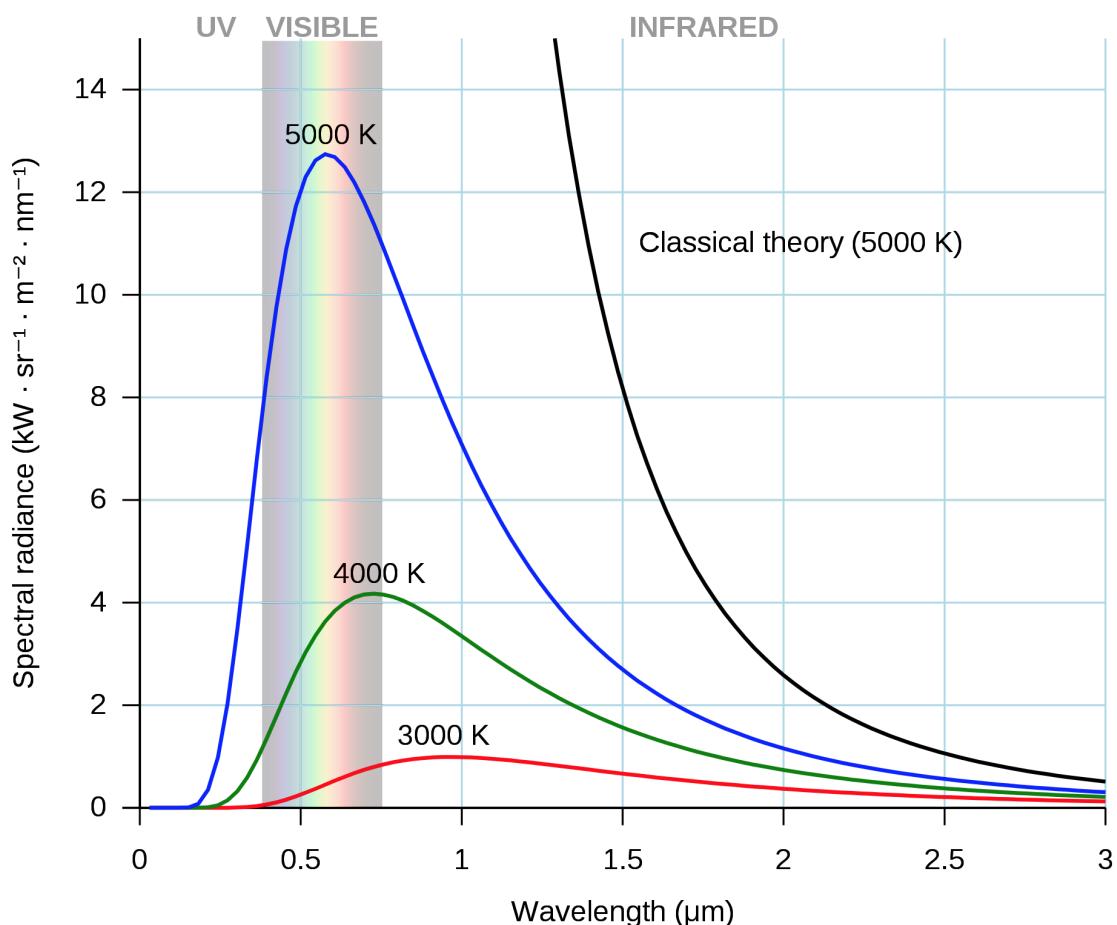
**Promieniowanie cieplne** to przekazywanie ciepła poprzez fale elektromagnetyczne. Konwencjonalnie, jako radiację cieplną określa się przede wszystkim tę część fal elektromagnetycznych, która klasyfikowana jest jako promieniowanie podczerwone.

Przewodzenie cieplne i konwekcja to mechanizmy przekazywania ciepła opierające się o fizyczne medium. **Promieniowanie cieplne** wyróżnia się na ich tle tym, że **może odbywać się również w próżni** i odbywa się poprzez fale elektromagnetyczne. Na dodatek, do przekazywania ciepła przez promieniowanie **nie wymaga różnicy temperatur**. Promieniowanie elektromagnetyczne jest emitowane.

To, jaki strumień ciepła (albo gęstość strumienia ciepła) emitem ciało, zależy od czwartej potęgi jego temperatury. W idealnym przypadku, nazywanym **ciałem doskonale czarnym**, strumień ciepła zależy tylko od temperatury ciała, jego powierzchni oraz stałej Boltzmanna, zgodnie ze wzorem, nazywanym **prawem Stefana-Boltzmanna**:

$$q_r = \sigma AT^4$$

**Widmo promieniowania** ciała doskonale czarnego - czyli wykres pokazujący, ile energii ciało wypromieniuje w postaci fal elektromagnetycznych o określonej częstotliwości - wygląda jak poniżej. Różnymi kolorami oznaczono widma promieniowania ciał o różnych temperaturach (5000K, 4000K itd.) Strumień ciepła ciała doskonale czarnego to po prostu pole pod takim wykresem. Obydwie te rzeczy są opisane **prawem Plancka**.



Na widmie promieniowania widać, że natężenie promieniowania jest różne dla różnych długości fal, a jego maksimum przypada gdzieś w zakresie światła widzialnego albo podczerwieni. Widać też, że im niższa temperatura, tym bardziej maksymalne natężenie - i całe widmo - przesuwa

się w stronę dłuższych fal, czyli w stronę fal podczerwonych. To zjawisko opisywane jest **prawem Wiena**.

W naturze rzadko zdarza się jednak, żeby ciała miały widmo promieniowania takie, jak na rysunku powyżej. Często poszczególne długości fal są "powycinane" - np. dwutlenek węgla emitemie bardzo mało energii w zakresie podczerwieni (m.in. dlatego nazywa się go gazem cieplarnianym - bo ogranicza ilość ciepła oddawanego przez Ziemię w przestrzeń kosmiczną). Ciało o takim ograniczonym spektrum promieniowania w różnych zakresach nazywa się **ciążem szarym**.

## Podstawowe parametry

Emitowane przez ciało szare ciepło jest mniejsze niż emitowane przez ciało doskonale czarne i stosunek tej emisji do emisji ciała doskonale czarnego nazywa się **emisyjnością**. Emisyjność przyjmuje wartości od 0 do 1.

Wyróżnia się przy tym różne rodzaje emisjności. Podstawowa to **emisyjność kierunkowa**, czyli opisany wyżej ułamek, ale w stosunku do promieniowania emitowanego w jednym kierunku. Inna to **półsferyczna**, czyli opisująca rzeczywistą powierzchnię ciała. W każdym przypadku mówi się też o emisjności **panchromatycznej** (czyli obejmującej całe spektrum) lub **monochromatycznej** (opisującej określona długość fali). Ot, nomenklatura.

Inne podstawowe parametry opisujące promieniowanie cieplne to **absorpcyjność**, **refleksyjność** oraz **przepuszczalność**. Każdy z nich to współczynnik o wartości od 0 do 1. Wszystkie z nich (włączając w to emisjność) zależą od powierzchni opisywanego ciała.

**Absorpcyjność** opisuje ilość energii pochłanianej przez ciało jako ułamek energii docierającej do niego. Przy tej samej temperaturze, absorpcyjność powierzchni może być równa jej emisjności w określonym kierunku. A tak na chłopski rozum, ciało czarne jednocześnie dobrze pochłania ciepło, a przy tym dobrze je emituje.

**Refleksyjność** to ułamek energii odbitej przez ciało. Energia odbita to po prostu odbite fale elektromagnetyczne, niepochłaniane przez ciało. Śnieg o białej powierzchni odbija sporą część promieniowania, czyli ma wysoką refleksyjność.

**Przepuszczalność** to ułamek promieniowania elektromagnetycznego, które przechodzi przez ciało, ale nie jest pochłaniane ani odbijane - po prostu przelatuje. W naturze w zasadzie każdy materiał ma bardzo niską przepuszczalność, bliską zera. Nawet szkło całkiem nieźle pochłania ciepło i nie ma aż tak dobrej przepuszczalności. Dla uzyskania wysokiej przepuszczalności robi się specjalne materiały, ale nawet w nich dotyczy to przede wszystkim określonej części widma.

Oprócz tego istnieją jeszcze **współczynniki konfiguracji**, które opisują właściwości promieniowania docierającego do różnych układów geometrycznych. Opisuję np. jaka część energii dociera do pokoju, gdy promieniowanie wpada przez okno - bo przecież inna ilość dociera do ściany naprzeciw okna, a inna do ściany z oknem. Ale raczej nikt o to nie będzie mączyć się na egzaminie.

Z wielkości dotyczących samego promieniowania, można natomiast wymienić dwie. Są nimi:

- **natężenie promieniowania** - jest to strumień promieniowania wysyłany w jednostkowy kąt bryłowy, wyrażony jako wat na steradian [W/sr];

- **strumień promieniowania** - energia niesiona przez promieniowanie przechodzące przez określoną płaszczyznę w jednostce czasu, wyrażona w watach [W];
- **irradiancja** - moc jaką przenosi promieniowanie przez płaszczyznę jednostkową, wyrażona w watach na metr kwadratowy [W/m<sup>2</sup>];

## Podstawowe prawa

W promieniowaniu cieplnym można wyróżnić cztery podstawowe prawa, z czego wszystkie z nich zostały już wyżej opisane. Są to:

- **Prawo Kirchhoffa** - zgodnie z nim, dana powierzchnia przy tej samej temperaturze ma taką samą emisjność co absorpcyjność.
- **Prawo Stefana-Boltzmannia** - zgodnie z nim, ilość energii wypromieniowanej przez ciało jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury tego ciała.
- **Prawo Plancka** - prawo to opisuje emisję promieniowania ciała doskonale czarnego - to z niego bierze się widmo promieniowania na obrazku opisanym wcześniej i to z niego wynika, że ilość wypromienowanej energii jest polem pod tym wykresem.
- **Prawo Wiena** - mówi, że wraz ze wzrostem temperatury ciała, jego widmo promieniowania przenosi się w stronę fal krótkich. Dlatego gorące słońce wali w nas dużą dawką ultrafioletu.

## Ekrany cieplne

Mając na uwadze wszystko co zostało wyżej opisane, łatwo jest wywnioskować, że **ekran cieplny** to prosty "izolator" ciepła, który nie tyle izoluje ciepło (bo nie ma tu termoprzewodnictwa), co po prostu **odbija promieniowanie elektromagnetyczne**, zwłaszcza w zakresie fal podczerwonych. Oznacza to, że ekran cieplny to po prostu **materiał o wysokim współczynniku refleksyjności**.

Ekrany cieplne stosuje się w szeroko pojętym budownictwie i chłodnictwie. Pozwalają one na dobre zachowanie temperatury ze względu na odbijanie z powrotem promieniowania podczerwonego. Przy zastosowaniu konstrukcji dwuwarstwowej, wypełnionej np. powietrzem, taki ekran cieplny może jednocześnie blokować przepływ ciepła przez przewodzenie.

### Źródła:

- [1] Wiśniewski, Wiśniewski - *Wymiana Ciepła*
- [2] William S. Janna - *Engineering Heat Transfer, Third Edition*
- [3] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Ciało\\_doskonale\\_czarne](https://pl.wikipedia.org/wiki/Ciało_doskonale_czarne)
- [4] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo\\_Wiena](https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Wiena)
- [5] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo\\_Plancka](https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Plancka)
- [6] Popkiewicz, Kardaś, Malinowski - *Nauka o klimacie*
- [7] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Refleksyjna\\_izolacja\\_termiczna](https://pl.wikipedia.org/wiki/Refleksyjna_izolacja_termiczna)
- [8] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Strumień\\_promieniowania](https://pl.wikipedia.org/wiki/Strumień_promieniowania)
- [9] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Irradiancja>

[10] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Nat%C4%99zenie\\_promieniowania](https://pl.wikipedia.org/wiki/Nat%C4%99zenie_promieniowania)



# 11. Przekształtniki statyczne w układach zasilania i sterowania

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

- ▼ a) przekształtniki AC – DC, prostowniki niesterowane i sterowane, praca w zakresie prądów ciągłych i impulsowych, korektory współczynnika mocy – PFC

## Przekształtniki AC-DC

Przekształtniki AC-DC to po prostu układy prostownicze, przekształcające przemienne napięcia na napięcia stałe o różnych parametrach (mniejsza lub większa wartość, mniej lub bardziej wygładzone). Przekształtniki AC-DC dzieli się na sterowane i niesterowane oraz zależnie od liczby pulsów (liczby elementów elektronicznych). Wyróżnia się też dwa stany pracy - w zakresie prądów ciągłych i impulsowych.

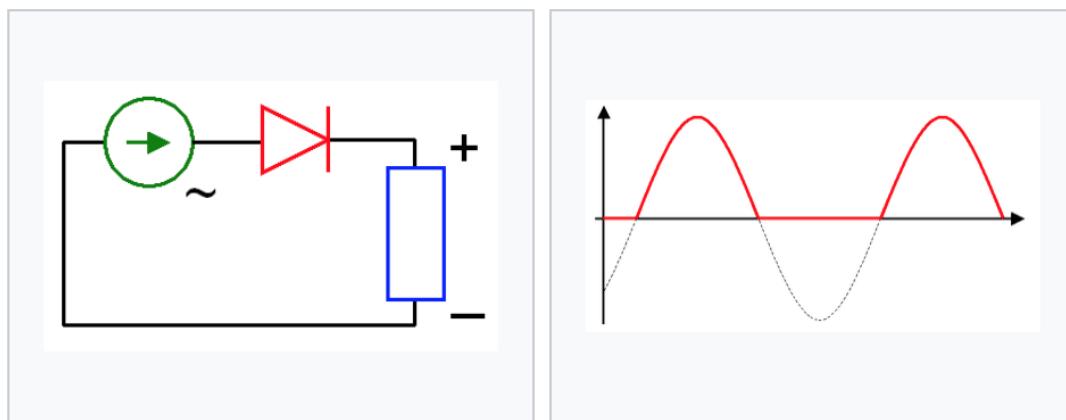
## Prostowniki niesterowane i sterowane

**Prostowniki niesterowane** to najprostsze możliwe układy, w których komutacja napięć i prądów zachodzi w sposób naturalny, bez żadnego sterowania z zewnątrz. Przekształtniki tego typu **oparte są o różne układy diod**.

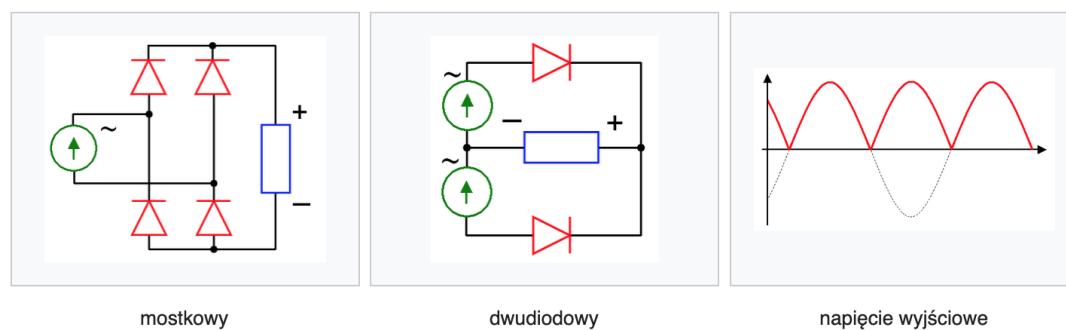
**Prostowniki sterowane** w przeciwieństwie do prostowników niesterowanych, umożliwiają kontrolę nad wyjściowymi wartościami napięć oraz prądów. W tego typu przekształtnikach, **zamiast diod stosuje się tyristory lub tranzystory z odpowiednimi układami sterowania**, najczęściej poprzez modulację szerokości impulsów.

Prostowniki sterowane i niesterowane występują w analogicznych topologiiach, różnią się natomiast typem urządzeń prostujących (diody albo tranzystory / tyristory). Ogólnie, można wśród nich wyróżnić:

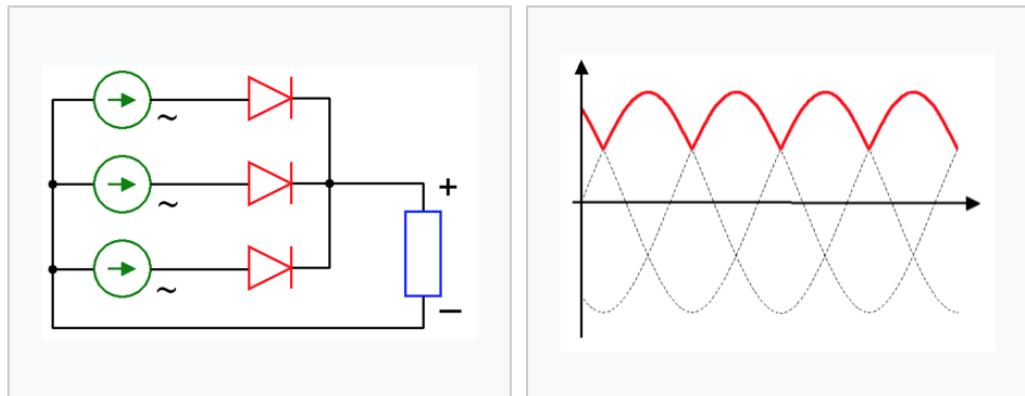
- **prostowniki jednofazowe jednopulsowe:** stosuje się w nich jedną diodę, przepuszczającą tylko jedną połówkę sinusoidy



- **prostowniki jednofazowe dwupulsowe:** układy te składają się z dwóch lub czterech diod, które umożliwiają przekształcanie obydwu połówek sinusoidy napięcia na jedną stronę, co zapewnia brak przerw w przebiegach



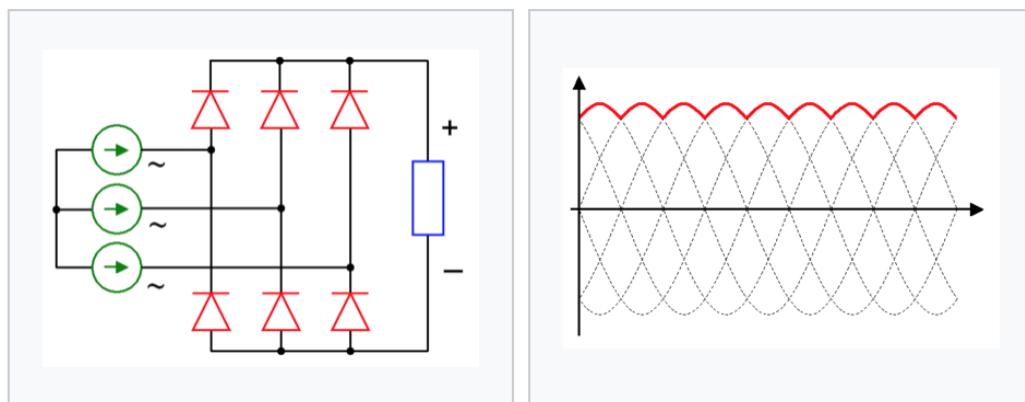
- **prostowniki trójfazowe jednopołówkowe:** układy tego typu posiadają jeden element prostujący w każdej fazie, co powoduje że na wyjściu pojawiają się nałożone napięcia tylko "górnego" połówka sinusoid wejściowych napięć



trójdiodowy

napięcie wyjściowe

- prostowniki trójfazowe dwupołówkowe:** układy te są najczęściej stosowane w przypadku sterowania silnikami, ponieważ charakteryzują się przetwarzaniem górnych i dolnych połówek sinusoid, co zapewnia najmniejsze pulsacje napięcia na wyjściu takiego układu.



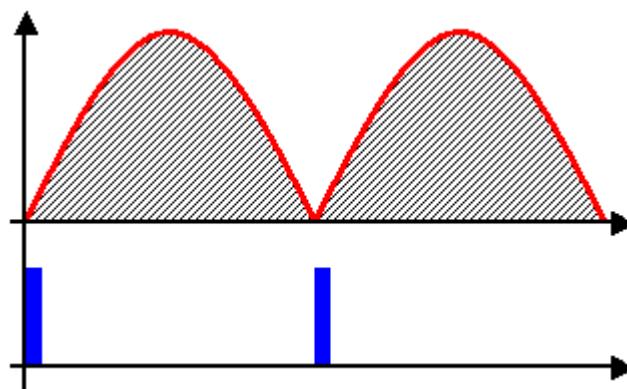
sześciiodiodowy

napięcie wyjściowe

Generalnie przyjmuje się, że im więcej pulsów ma napięcie wyjściowe, tym lepsza jest jakość zasilania odbiornika DC oraz tym lepszy jest współczynnik mocy prostownika - czyli wypadkowo jego wydajność.

Układy powyższych prostowników można budować również jako prostowniki sterowane. Wtedy układ sterowania powinien załączać w odpowiednich chwilach element sterowany (tyrystor lub tranzystor) tak, by na wyjściu pojawiło się napięcie o pożądanej wartości średniej. Poniżej przedstawiono animację pokazującą, jak działa tyrystor (niebieski sygnał to sygnał załączający przewodzenie tyrystora).

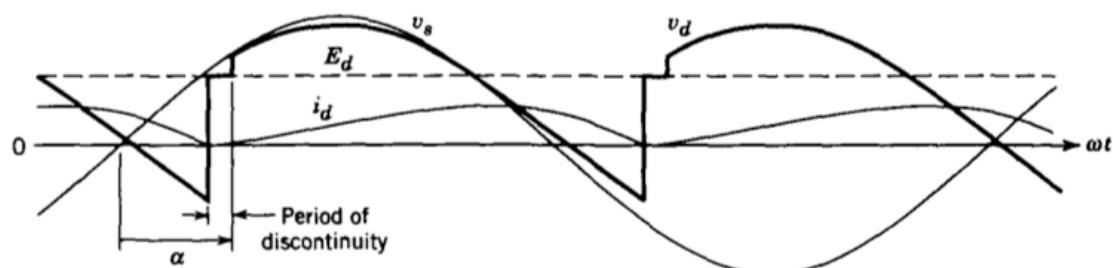
Zasadniczą zaletą prostowników sterowanych jest fakt, że umożliwiają dwukierunkowy przepływ energii - mogą więc działać również w stanie pracy falownikowej.



### Praca w zakresie prądów ciągłych i impulsowych

Pracujący w zakresie prądów ciągłych prostownik ma składową stałą prądu większą, niż składowa zmienna. Jeżeli składowa zmienna staje się większa niż składowa stała, to pulsujący prąd w pewnych odcinkach czasu jest równy (lub mniejszy) 0. Mówiąc wtedy o zakresie pracy prądów impulsowych.

Pracę prądów nieciągłych można osiągnąć przy dużym wysterowaniu prostownika, przy niewielkiej indukcyjności odbiornika lub w przypadku, gdy odbiornik jest odbiorem RE lub RLE, gdzie prąd płynie tylko w chwilach, gdy napięcie na wyjściu prostownika jest wyższe niż napięcie na odbiorniku.



**Figure 6-13** Waveforms in a discontinuous-current-conduction mode.

Podczas pracy w zakresie prądów nieciągłych, napięcie przestaje zmieniać się proporcjonalnie do współczynnika wypełnienia tyristora. Charakterystyka

sterowania staje się nieliniowa i *miękka*. Żeby utrzymać stały poziom napięcia, trzeba zmieniać kąt wysterowania.

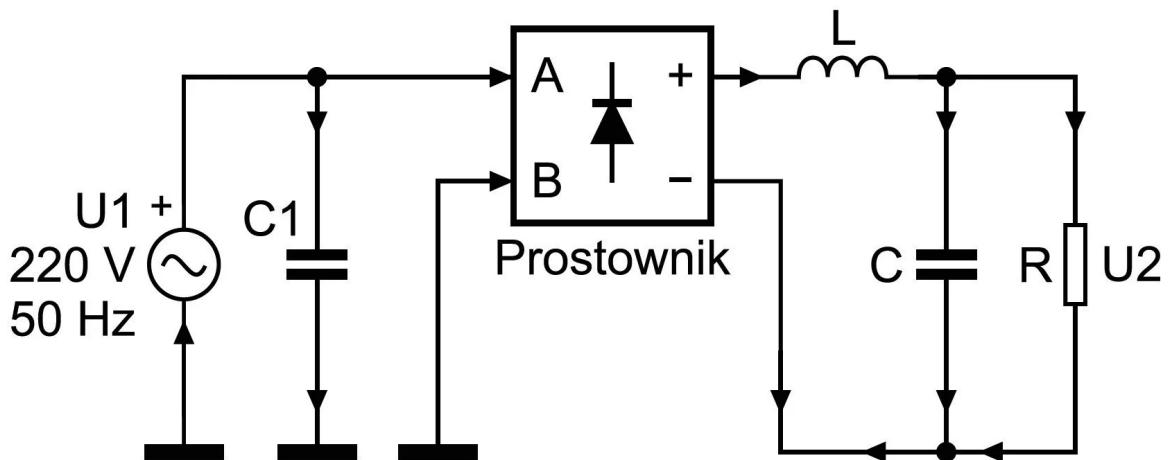
Innymi wadami pracy nieciągłej jest pozorny wzrost impedancji wyjścia przekształtnika, napięcie staje się silnie zależne od odbioru przekształtnika, można też stracić nad nim kontrolę w przypadku szybkich zmian odbioru.

### Korektory współczynnika mocy

Prąd pobierany z sieci przez prostowniki (oraz ogólnie, zasilacze), jest na ogół silnie odkształcony, zwłaszcza w przypadku prostowników jednopulsowych. Prąd w takich układach jest często impulsowy (np. do ładowania kondensatora), w związku z czym współczynnik mocy utrzymuje się na niskim poziomie - co jest niejako wyznaczniem jakości zasilania.

Korekcję współczynnika mocy PFC można wykonywać w sposób pasywny i aktywny.

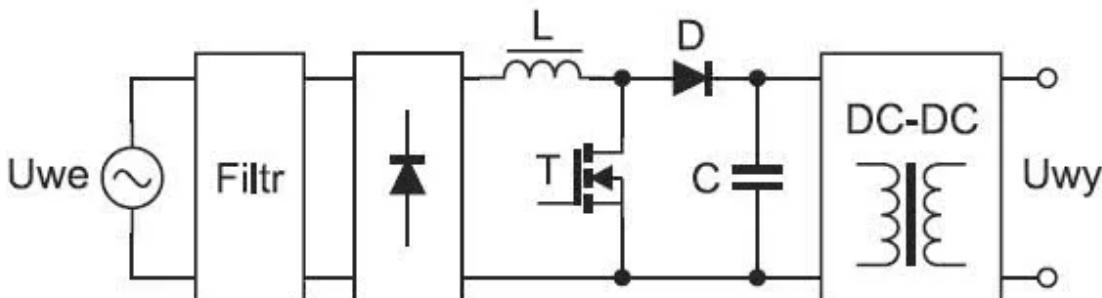
**Pasywna korekcja** polega na stosowaniu **filtrów pasywnych**, czyli **elementów LC wpiętych do obwodu prostownika**. Stosuje się tu filtry LC na wyjściu lub wejściu prostownika. Mogą to też być po prostu cewki lub kondensatory. Innym podejściem jest wstawienie układów filtrów pasmowo-przepustowych ograniczających wysokie harmoniczne prądu.



Korekcja tego typu pozwala na poprawę współczynnika mocy tylko do pewnego stopnia. Układy te są proste w konstrukcji, nie generują zakłóceń elektromagnetycznych i nie generują strat mocy na przełączenia. Są jednak często duże gabarytowo.

**Aktywna korekcja** współczynnika mocy polega na stosowaniu dodatkowego przekształtnika za obwodem prostownika, najczęściej przekształtnika typu Boost.

Jest to przekształtnik sterowany ze sprzężeniem zwrotnym od docelowej wartości napięcia wyjściowego.



Istnieje kilka różnych podejść do korekcji aktywnej współczynnika mocy. Można rozróżnić układy z ciągłym, nieciągłym lub granicznym prądem dławika (CICM vs. DCM vs. BCM). Korektory projektuje się na ogół do pracy z ciągłym lub granicznym prądem dławika (niespadającym do zera). Prąd cewki przekształtnika jest sterowany w określony sposób za pomocą PWM - kluczowanie następuje w przypadku wykrycia przejścia prądu przez zero.

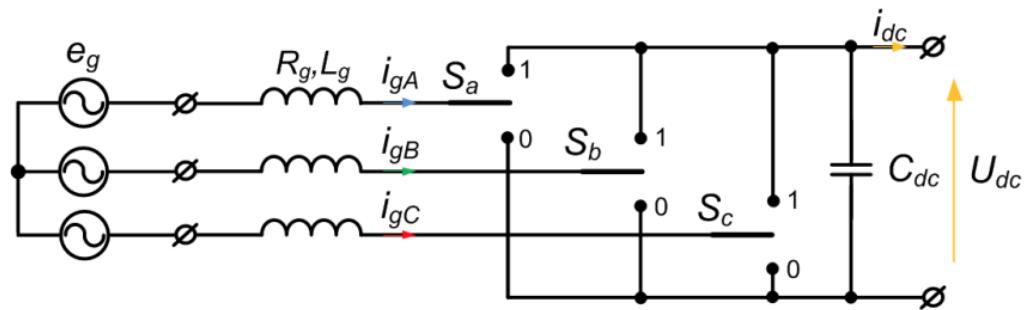
Dopasowanie napięcia wyjściowego za prostownikiem diodowym pozwala na ograniczanie prądów wyższych harmonicznych, zwiększenie współczynnika mocy oraz zmniejszenie kondensatora filtrującego, przy zapewnieniu lepszego sterowania napięciem na wyjściu.

## Źródła

- [1] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Prostownik>
- [2] [https://eia.pg.edu.pl/documents/184045/282792/prostownik\\_DML.pdf](https://eia.pg.edu.pl/documents/184045/282792/prostownik_DML.pdf)
- [3] Ned Mohan - *Power Electronics*
- [4] <https://elektronikab2b.pl/technika/15244-pasywne-i-aktywne-uklady-korekcji-wspolczynnika-mocy/strona/1>

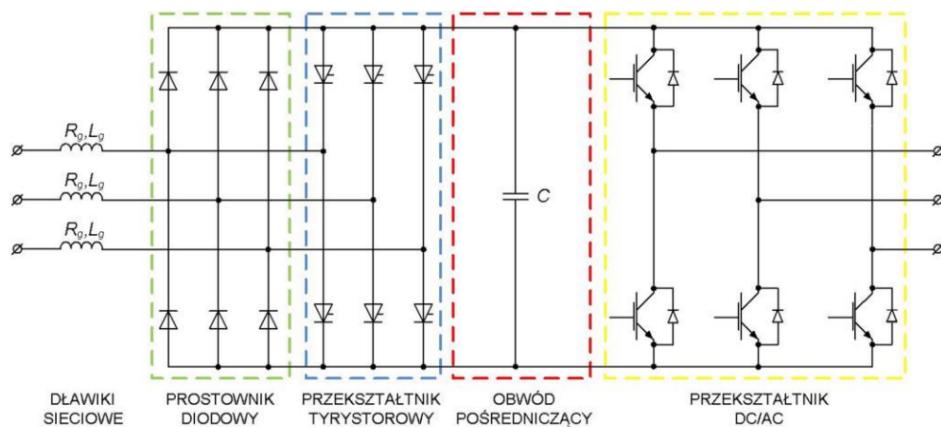
## ▼ b) prostowniki aktywne

**Prostowniki aktywne** to układy prostowników, w których **zamiast diod prostowniczych zastosowane są tranzystory** (najczęściej MOSFET lub JBT). Prostowniki aktywne w porównaniu do pozostałych typów prostowników, są **sterowane w układzie bardziej złożonym**, przy czym podstawową metodą sterowania jest tu PWM.

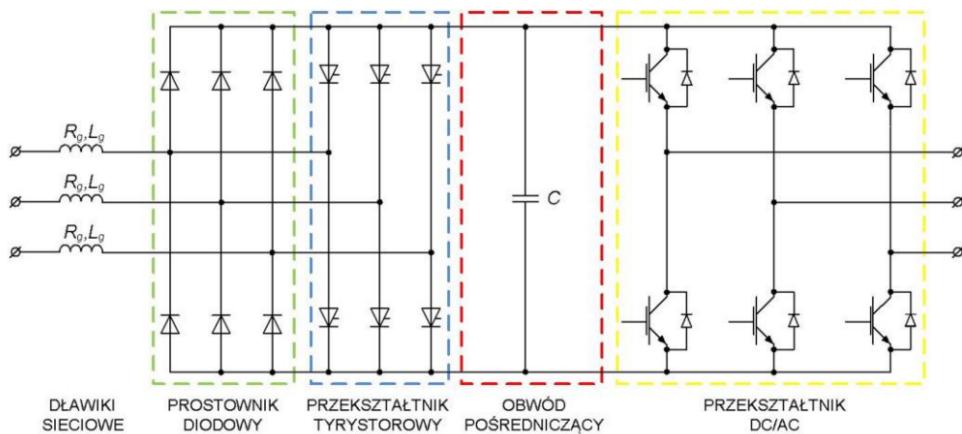


Rys.4. Model łącznikowy prostownika PWM

Jedną z cech prostowników aktywnych jest **możliwość ich łatwego przystosowania do pracy czterokwadrantowej**, tj. z możliwością nie tylko pobierania energii z sieci, lecz również zwrotu energii do sieci. W klasycznych strukturach, możliwość zwrotu energii do sieci wymagała zastosowania dodatkowego przekształtnika. Zastosowanie sterowanych przez PWM prostowników aktywnych pozwala więc ograniczyć liczbę elementów elektronicznych - i przy tym także awaryjność układu.



Rys.2. Klasyczna struktura przekształtnika AC/DC/AC z prostownikiem diodowym oraz przekształtnikiem tyristorowym umożliwiającym zwrot energii do sieci w trakcie hamowania napędu



Rys.2. Klasyczna struktura przekształtnika AC/DC/AC z prostownikiem diodowym oraz przekształtnikiem tyristorowym umożliwiającym zwrot energii do sieci w trakcie hamowania napędu

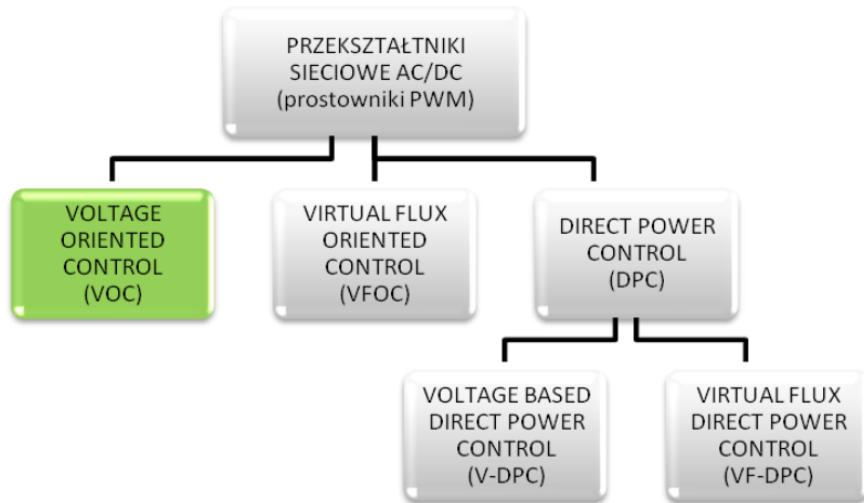
Innymi zaletami prostowników aktywnych są możliwość pracy przy **większej efektywności** niż w przypadku innych prostowników oraz **możliwość aktywnej kompensacji mocy biernej** (sterowanie prądem wejścia tak, by był kształtem dopasowany do sinusoidy napięcia na wejściu).

Metody sterowania prostownikami aktywnymi są często rozbudowane, ale istnieje tu **możliwość zastosowania metod opartych na sterowaniu PWM**, które umożliwiają wykorzystanie takich cech prostowników aktywnych, jak kompensacja współczynnika mocy.

Do powyższych metod należą **metody wektorowe**. Można wśród nich wymienić:

- **VOC**: napięciowo-zorientowana, polegająca na kontrolowaniu położenia i amplitudy wektora prądu sieci względem wektora napięcia sieci
- **VFOC**: strumieniowo-zorientowana, polegająca na kontrolowaniu położenia i amplitudy wektora prądu sieci względem wektora wirtualnego strumienia sieci
- **DPC**: *direct power control* - metoda bezpośredniego sterowania mocą, w której sterowane są wartości chwilowe mocy czynnej i biernej przenoszonej przez prostownik; istnieją dwa warianty tej metody:
  - **V-DPC**: zorientowane napięciowo DPC, gdzie kontrola przepływu mocy czynnej i biernej realizowana jest na podstawie wiedzy o module i położeniu wektora napięcia sieci
  - **VF-DPC**: zorientowane strumieniowo DPC, gdzie kontrola przepływu mocy czynnej i biernej realizowana jest na podstawie wiedzy o module i

położeniu wektora wirtualnego strumienia sieci.



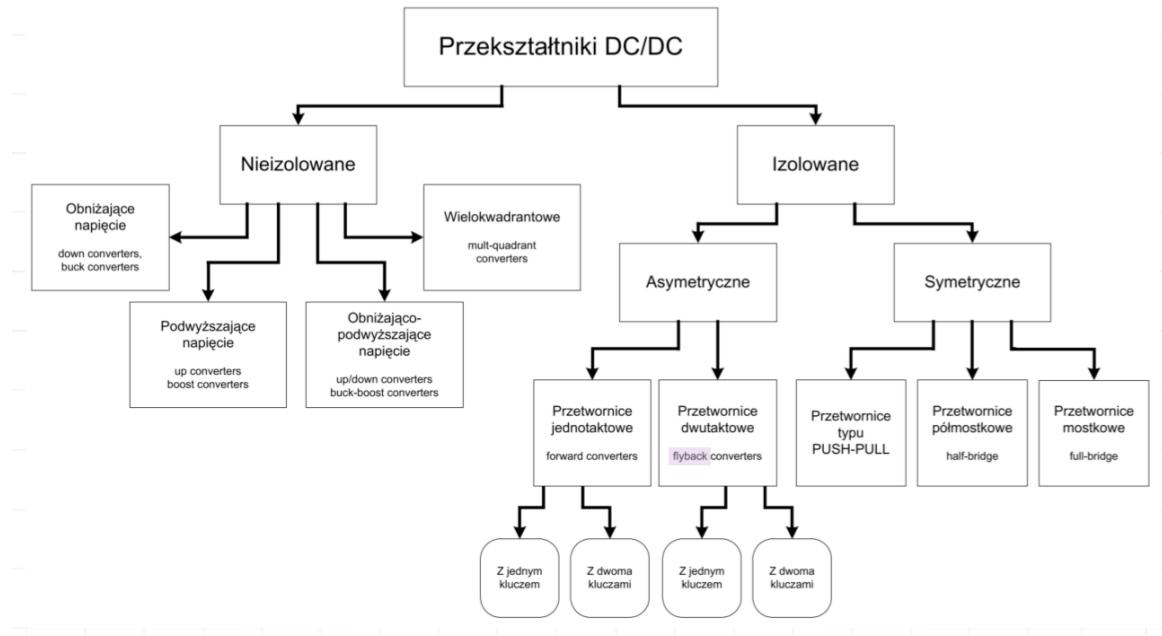
Rys.5. Klasyfikacja prostowników PWM ze względu na przyjętą metodę sterowania

## Źródła

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Active\\_rectification](https://en.wikipedia.org/wiki/Active_rectification)
- [2] <http://kmnipe.pwr.edu.pl/files/prv/id35/zn-lab/ane/ANEZW/Cwiczenie6.pdf>

## ▼ c) impulsowe przekształtniki DC – DC prądu stałego z nieizolowanym wejściem i wyjściem, przetwornice z izolowanym wejściem i wyjściem

Przekształtniki DC-DC prądu stałego służą do przekształcania napięć i prądów stałych z jednego poziomu na drugie. Można wyróżnić kilka głównych topologii tego typu przekształtników, zależnie od funkcji i zastosowanej izolacji wejścia lub wyjścia.

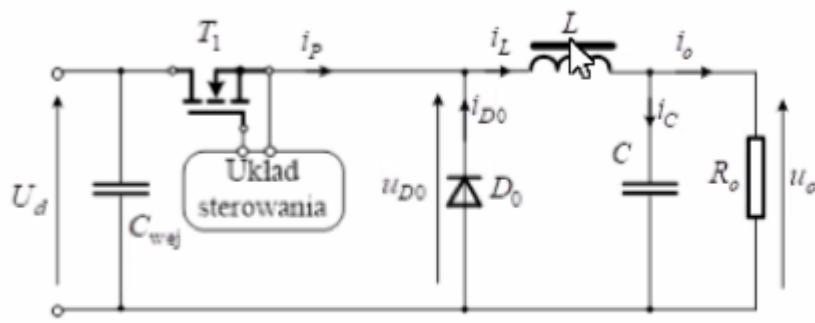


Nazwa *impulsowe* pochodzi od zasady ich działania - są to przekształtniki z łącznikiem w formie sterowanego tranzystora (lub kilku), przewodzącego tylko w odpowiednich chwilach w okresie sterowania. Poniżej omówiono podstawowe topologie przekształników impulsowych DC-DC.

### Przekształtnik Buck (obniżający napięcie)

Przekształtnik typu Buck służy do obniżania napięcia. Jego zasada działania polega na tym, że łącznik na wejściu jest załączany i wyłączany. Wyłączenie tranzystora sprawia, że ze źródła do odbiornika nie płynie prąd, natomiast prąd istniejący już w odbiorniku (nie znika, bo w obwodzie jest cewka lub filtr LC) zamyka się przez diodę zerową. Im dłużej jest zamknięty tranzystor, tym wyższe jest napięcie na odbiorniku - przy czym nie będzie ono wyższe niż na wejściu przekształtnika. Na odbiorniku naprzemiennie pojawia się więc napięcie zasilania i napięcie cewki przekształtnika.

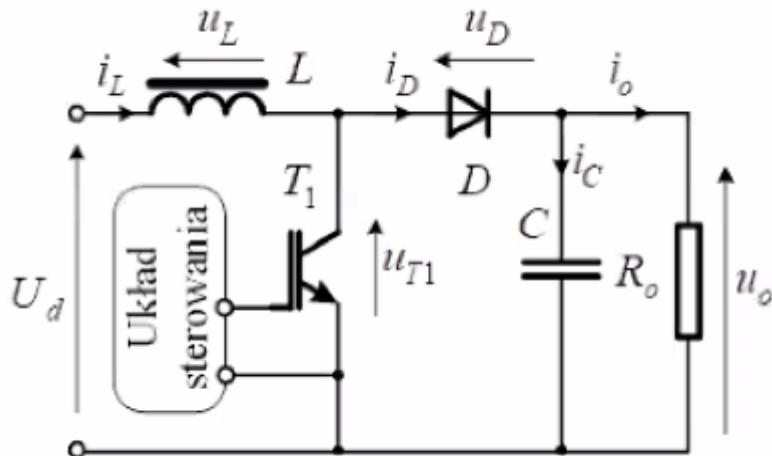
Na przekształtniku typu Buck, na wyjściu odbiornika prąd jest ciągły.



### Przekształtnik Boost (podwyższający napięcie)

W przekształtniku typu Boost, gdy tranzystor jest załączony, prąd płynie przez niego (zwarcie), ładując cewkę L. Gdy tranzystor jest wyłączony, zsumowane napięcie źródła oraz rozładowującej się cewki (energia pola magnetycznego cewki) podawane są na odbiornik. Wyłączenie tranzystora na stałe oznacza napięcie na wyjściu takie, jak na wejściu. Im wyższy współczynnik wypełnienia, tym wyższe napięcie na wyjściu przekształtnika.

Na przekształtniku typu boost, prąd wejściowy jest ciągły.

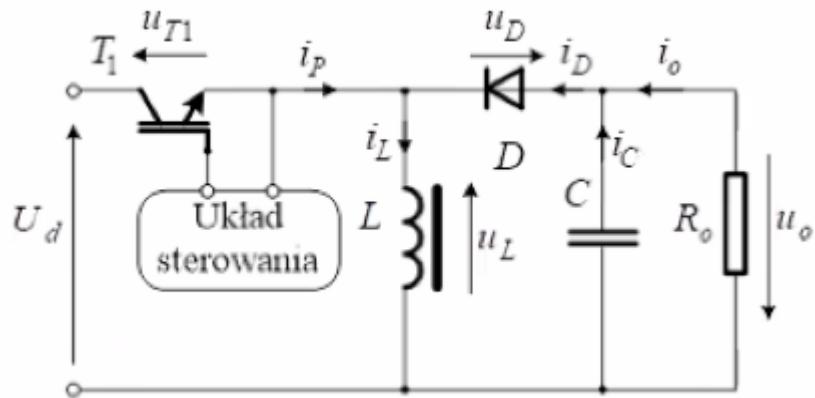


### Przekształtnik Buck-Boost (obniżająco-podwyższający napięcie)

Przekształtnik Buck-Boost łączy w sobie topologie Buck i Boost. Pozwala on zarówno na podwyższanie jak i obniżanie napięcia, przy czym na jego wyjściu napięcie ma polaryzację odwrotną niż na wejściu.

Gdy tranzystor jest załączony, cewka L jest ładowana i prąd płynie tylko przez nią (w kierunku odbiornika - blokuje go dioda). Wyłączenie tranzystora sprawia, że

na rozładowującej się cewce pojawia się napięcie, a prąd cewki rozładowuje się przez odbiornik. Stąd można zauważyć, że napięcie na odbiorniku można obniżyć praktycznie do 0 jak w przekształtniku Buck, można je też odpowiednią modulacją podwyższyć, modulując jak w przekształtniku Boost.



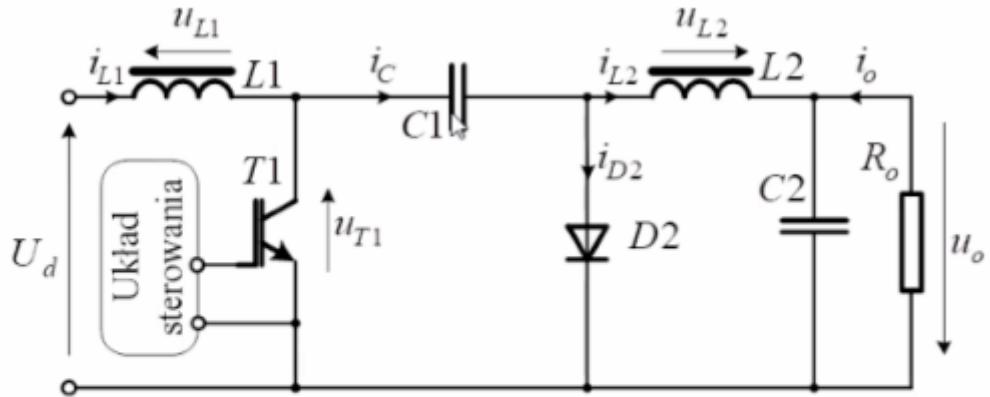
### Przekształtnik Ćuka

Przekształtnik Ćuka to alternatywna topologia złożonego przekształtnika podwyższająco-obniżającego napięcie. W tym przekształtniku, podobnie jak w buck-boost, napięcie na wyjściu ma polaryzację odwrotną od wejścia.

Gdy tranzystor jest wyłączony, prąd obydwu cewek zamyka się przez diodę. Kondensator C1 jest ładowany zarówno ze źródła, jak i z cewki L1. Energia magazynowana w L2 zasila natomiast odbiornik.

Gdy tranzystor jest złączony, napięcie naładowanego kondensatora C1 blokuje diodę D2, natomiast prądy cewek L1 i L2 płyną przez tranzystor. Kondensator oddaje przy tym energię do odbiornika i cewki L2. Cewka L1 jest ładowana.

Zaletą przekształtnika Ćuka jest możliwość zredukowania praktycznie do 0 pulsacji prądu. Wadą - to, że do tego wygładzenia prądu potrzebuje relatywnie dużego kondensatora.

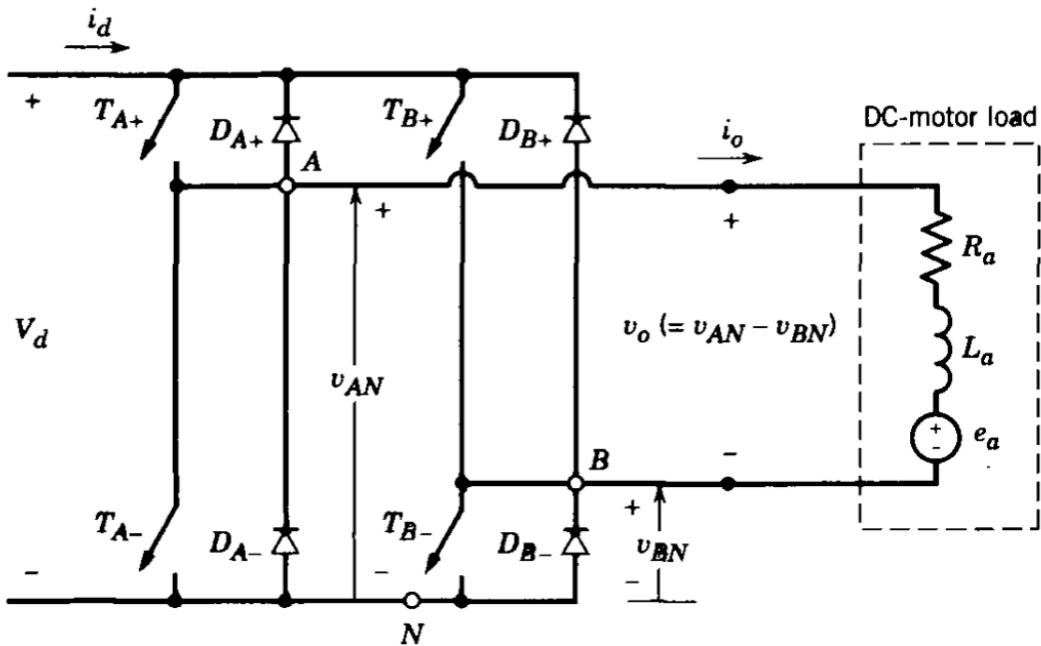


## Przekształtnik Cuka

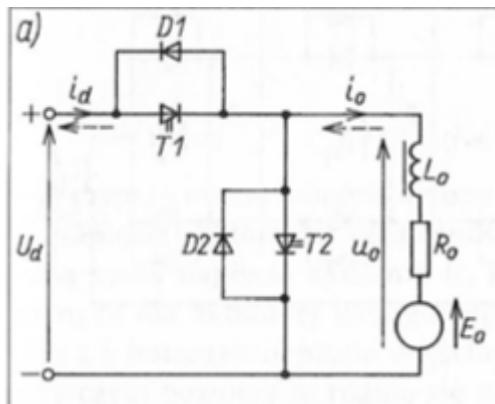
### Przekształtnik wielokwadrantowy (mostkowy lub półmostkowy)

Przekształtnik mostkowy ma tę zaletę, że może działać czterokwadrantowo, czyli umożliwia przepływ energii w dwie strony. Jego zasada działania jest podobna do falownika.

Sterowanie tego przekształtnika można realizować na dwa sposoby: PWM unipolarny lub bipolarny. W unipolarnym gałęzie mostka traktowane są jako dwie pary i sterowane jako pary. Napięcie na wyjściu przyjmuje tylko jedną bieguność. W bipolarnym - każdy tranzystor sterowany jest osobno, a napięcie przyjmuje trzy stany: 0, +1, -1 Ud.



W przypadku układu mostkowego, można zmieniać zarówno kierunek prądu, jak i napięcia. Podobną topologią jest układ półmostkowy, w którym można zmienić tylko kierunek prądu.



### Przekształtnik Flyback (dwutaktowy)

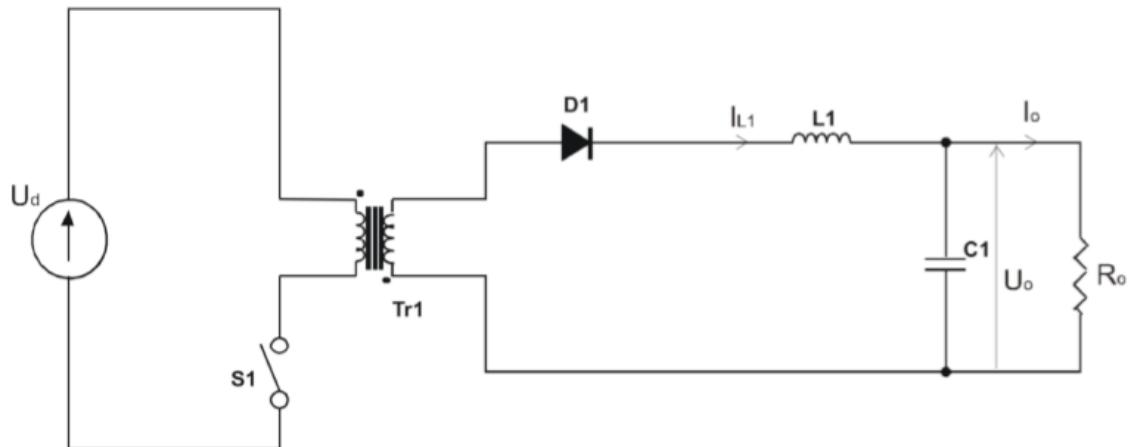
Przekształtnik Flyback oparty jest na topologii Buck-Boost. Ogólna koncepcja polega na tym, że do przekształtnika Buck-Boost, na jedną cewkę nawija się drugą, co wypadkowo tworzy transformator.

Gdy tranzystor S1 jest złączony, energia jest magazynowana w transformatorze L1, natomiast dioda D1 jest spolaryzowana zaporowo. Odbiornik pobiera energię z kondensatora C1.

Gdy tranzystor jest wyłączony, napięcie indukuje się w uzwojeniu wtórnym, dioda staje się spolaryzowana w kierunku przewodzenia, i wypadkowo energia z

transformatora jest przekazywana do kondensatora i odbiornika.

Układy Flyback służą do obniżania oraz podwyższania napięcia.

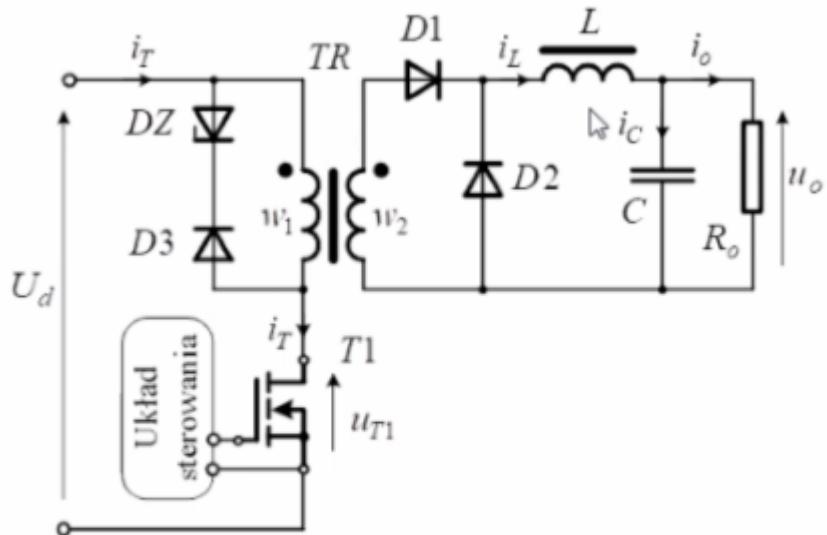


### Przekształtnik Forward (jednotaktowy)

Układ typu forward oparty jest o topologię Buck i posiada transformator zapewniający izolację galwaniczną, którego przekładnia może jednocześnie określać wypadkowe wzmacnienie całego układu. Układy tego typu pracują na wysokich częstotliwościach.

Gdy tranzystor  $T1$  jest załączony, dioda  $D1$  przewodzi - napięcie ze strony pierwotnej jest transformowane na stronę wtórną, zasilając odbiornik. Gdy tranzystor  $T1$  jest wyłączony, przewodzą diody  $D2$  i  $D3$ . Dioda  $D2$  zamyka prąd odbiornika (pływący wciąż, bo cewka  $L$  utrzymuje napięcie). Dioda  $D3$  przepuszcza prąd rozmagnesowujący.

Przetwornica tego typu służy do obniżania napięcia, przy czym współczynnik wypełnienia współpracuje z przekładnią transformatora. Transformator nie służy tu do magazynowania energii, służy jedynie do jej przekazywania. Należy jednak brać pod uwagę energię magazynowaną w transformatorze, bo niepilnowana może popsuć przekształtnik.



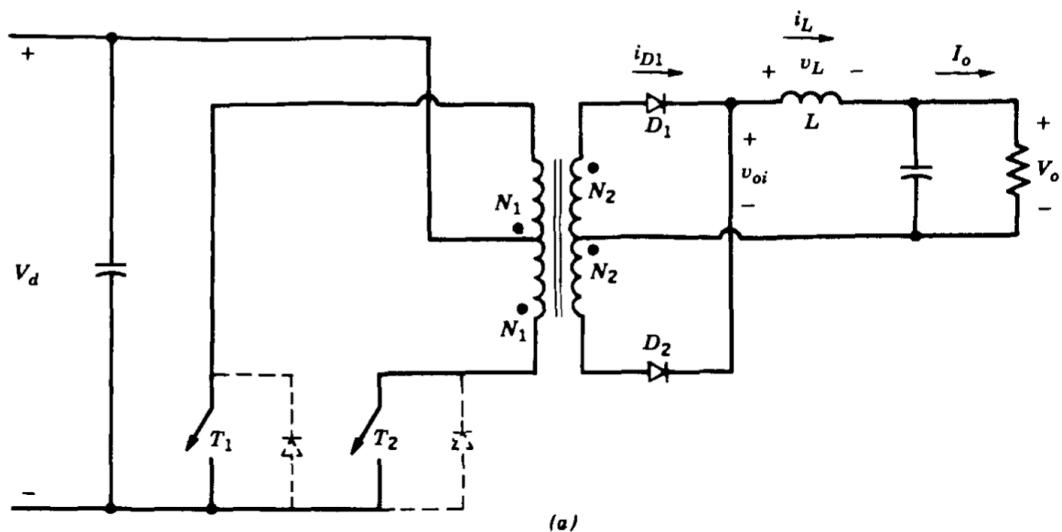
Schemat obwodu mocy

### Push-pull

Przekształtnik Push-Pull bazuje na układzie falownika push-pull. Na wejście transformatora wysokiej częstotliwości podawany jest prostokątny sygnał AC. Układy tego typu steruje się metodą PWM.

Gdy tranzystor T1 lub T2 jest złączony, energia jest podawana przez transformator na stronę wtórną. Prąd przez diody D1 lub D2 płynie do obciążenia poprzez cewkę. Gdy tranzystor jest wyłączony, energia do odbiornika płynie z cewki przez dwie połówki uzwojenia transformatora.

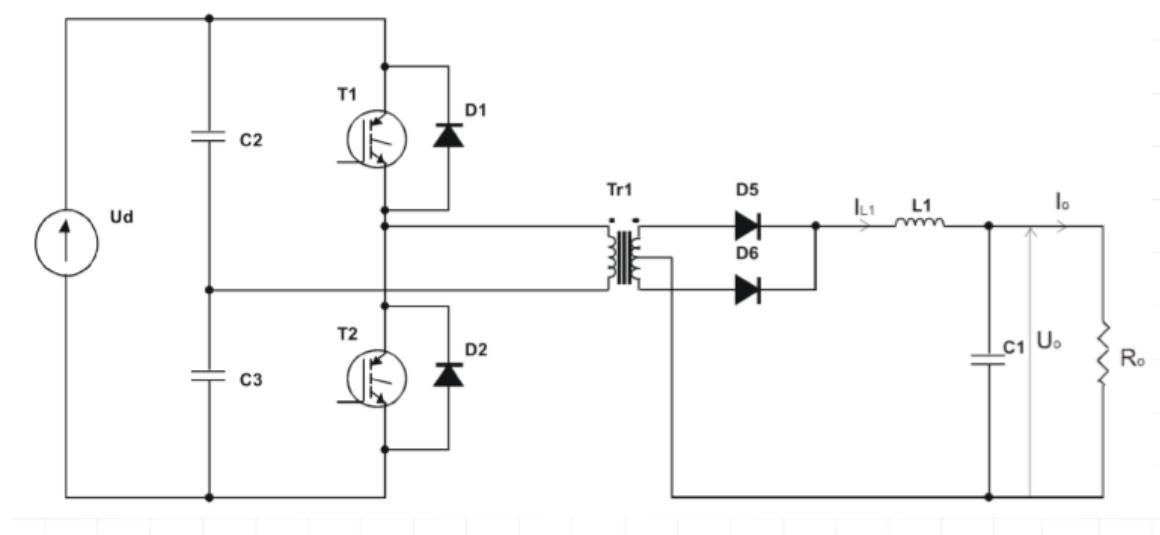
Napięcie na wyjściu zależy od przekładni transformatora oraz współczynnika wypełnienia. Działanie jest tu podobne do przekształtnika typu Buck, więc napięcie na stronie wtórnej, podwyższone przez transformator, jest obniżane przez współczynnik wypełnienia.



### Przekształtnik półmostkowy

Przekształtnik półmostkowy bazuje na topologii buck. Transformator ma końcówkę uzwojenia wpiętą między dwa kondensatory, co pozwala na magazynowanie większej ilości energii.

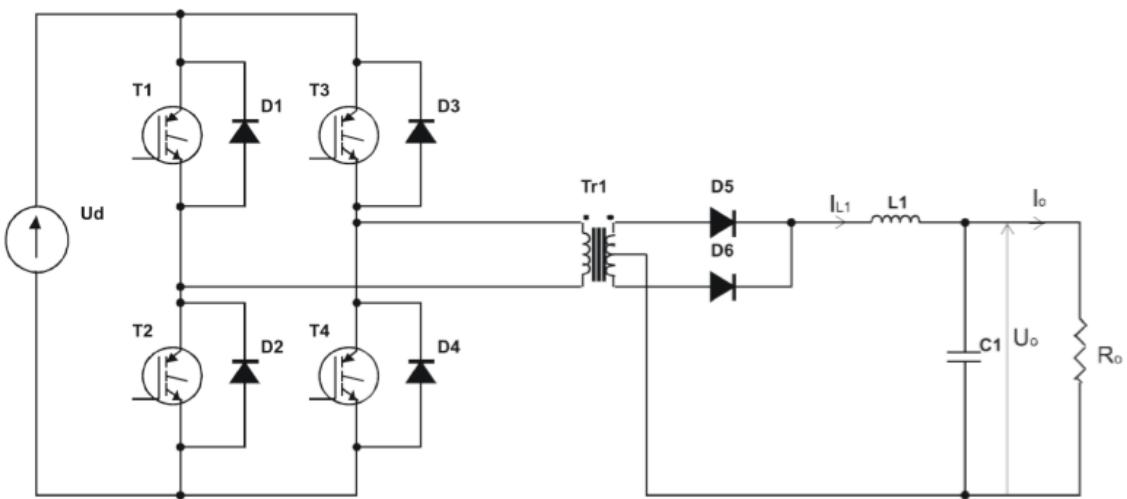
W układzie tego typu, tranzystory  $T_1$  i  $T_2$  załączane są naprzemiennie, jest też okres gdy obydwa są wyłączone. Załączenie tranzystorów przekazuje energię na stronę wtórną. Gdy tranzystory są wyłączone, prąd odbioru zamyka się przez diody  $D_5$  i  $D_6$ , cewkę oraz obciążenie. Czyli napięcie jest znowu podwyższane przez transformator, obniżane przez układ sterowania.



### Przekształtnik mostkowy

Przekształtnik mostkowy jest podobny do półmostkowego, ale zawiera dwukrotnie większą liczbę łączników. Oznacza to, że tranzystory są mniej obciążone, nie stosuje się tu też kondensatorów dzielących napięcie wejściowe transformatora na pół (można natomiast wrzucić kondensator przed układ mostkowy).

Układ sterowania jest tu nieco bardziej złożony, bo wymaga kluczowania czterech tranzystorów. Tranzystory kluczowane są parami.



### Stosowanie izolacji

Izolację w przekształtnikach stosuje się między innymi po to, by:

- zapewnić bezpieczeństwo w razie awarii - części o różnych poziomach napięcia są od siebie odizolowane;
- zapewnić większą odporność na zakłócenia sieciowe - obwody doziemne strony pierwotnej i wtórnej są od siebie oddzielone
- znaczne obniżenie napięć bez podawania ich bezpośrednio na układ przekształtnika

Izolacja jednak podwyższa koszty przeszkałtników, komplikuje ich układy i zwiększa gabaryty.

### Źródła

[1] Materiały oraz notatki z wykładu *Przeszkałtniki energoelektroniczne w układach zasilania i sterowania 1* (w tym skany książek od prowadzącego)

[2] Materiały z wykładu *Energoelektronika 1*

[3] Ned Mohan - *Power Electronics*

[4] <https://www.quora.com/Why-do-we-use-an-isolation-transformer-in-a-DC-DC-converter>

[5] <https://www.digikey.com/en/articles/use-isolated-dc-dc-converters-with-embedded-transformers-to-ease-assembly>

## ▼ d) oddziaływanie przekształników na sieć zasilającą, podstawowe sposoby ograniczenia tego oddziaływania

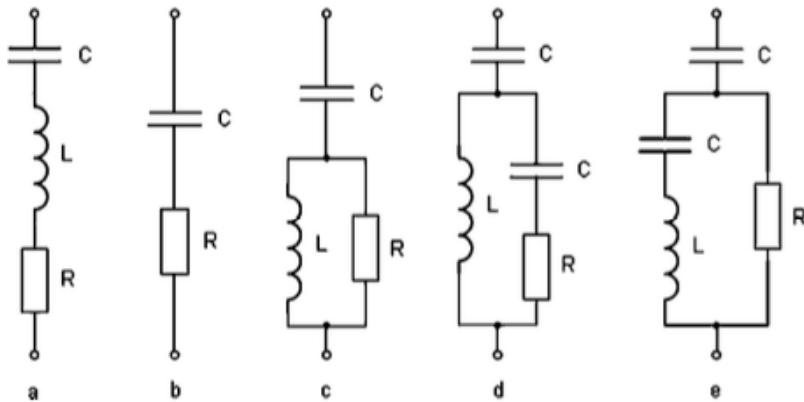
### Oddziaływanie przekształników na sieć zasilającą

- **pobieranie z sieci odkształconych prądów:** podstawowy problem, z którego powstają inne; prądy pobierane przez odbiorniki zasilane z przekształników są niesinusoidalne i jako takie mają zawartość wyższych harmonicznych, które reagują z innymi elementami sieci (reaktancje i pojemności linii, etc.)
- **harmoniczne:** działające układy prostowników diodowych (mostek Graetza) lub tyristorowych pobierają z sieci prąd odkształcony, który płynąc przez przewody zasilające powoduje wygenerowanie wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym; podobnie układy zasilania napędów elektrycznych mogą wprowadzać do sieci wyższe harmoniczne ze względu na rodzaj sterowania PWM
- **trzecia harmoniczna:** bardzo duża liczba odbiorników zasilanych z przekształników generuje bardzo duże prądy trzeciej harmonicznej, które zamknięte przez przewody neutralne instalacji trójfazowych - co w przypadku instalacji w starych budynkach grozi nawet pożarami
- **składowa przeciwna:** pojawienie się w sieci zasilającej składowej przeciwniej powoduje, że moment obrotowy silników może zostać obniżony - jest to spowodowane przepływem prądów harmonicznych wyższych rzędów
- **obniżenie współczynnika mocy:** pobieranie z sieci odkształconych prądów sprawia, że odbiorniki mają z punktu widzenia sieci niski współczynnik mocy - zatem wypadkowo sprawność urządzeń jest niższa ze względu na moc bierną deformacji; oprócz tego może dochodzić do przesunięcia fazowego prądów względem napięć
- **spadki napięć:** przekształtniki impulsowe działają praktycznie w stanach zwarć, co może powodować ucinanie przebiegu sinusoidy w sieci podczas działania takich urządzeń - zwłaszcza w stanach komutacji

- **zakłócenia wysokoczęstotliwościowe:** szybkie przełączenia napięć dużej wartości oznaczają bardzo duże stromości narostu fal napięciowych, co w efekcie oddziałując z pojemnościami sieci może generować znaczne przepięcia i uszkadzać izolację
- **zakłócenia elektromagnetyczne:** wyżej opisane przepięcia mogą też generować duże chwilowe prądy harmonicznych o wysokich częstotliwościach - przepływ tych prądów o dużych wartościach generuje fale elektromagnetyczne wysokich częstotliwości, które mogą oddziaływać z urządzeniami bezprzewodowymi, komputerami, etc. w pobliżu
- **indukowanie prądów w łożyskach silników:** przepływy wyższych harmonicznych przez uzwojenia silników mogą sprawiać, że strumienie magnetyczne indukowane dla tych harmonicznych zaczną indukować prądy w łożyskach silników
- **zjawiska rezonansowe:** pojawienie się wyższych harmonicznych może też powodować zjawiska rezonansowe, jak np. znaczne przepięcia na zaciskach silników prądu przemiennego, wiele razy w ciągu kilku sekund.

#### Sposoby ograniczania przekształtników na sieć zasilającą

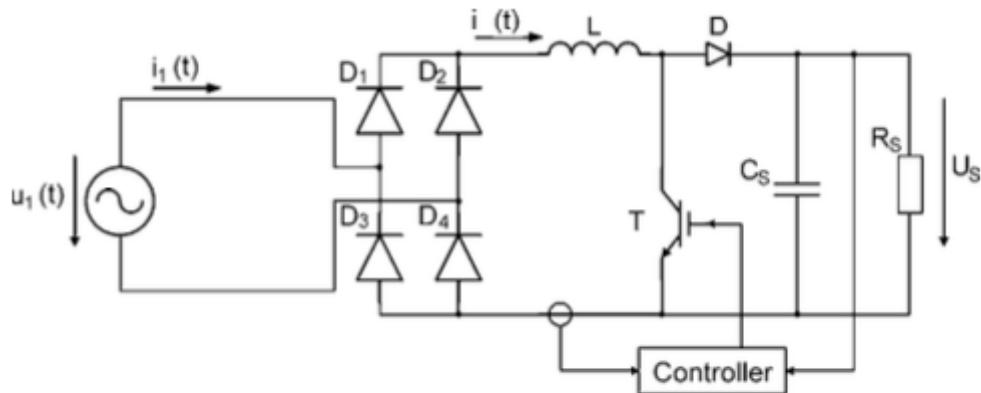
- **ograniczanie stosowania niesterowanych lub tyristorowych prostowników tylko do układów małej mocy**
- **stosowanie dławików:** dławiki wygładzają prąd, ograniczając tempo ładowania kondensatorów po stronie DC układów, co w efekcie zmniejsza zawartość prądów wyższych harmonicznych - co jest skuteczne zwłaszcza w układach PWM
- **izolacja harmonicznych:** poprzez zastosowanie transformatorów o połączeniach określonego typu, wyższe harmoniczne przestają być przenoszone do sieci (D/Y albo Y/Z układy połączeń)
- **metody wielopulsowe:** działające przekształtniki można synchronizować w taki sposób, by wzajemnie eliminowały generowane przez siebie harmoniczne - przydatne są tu transformatory o uzwojeniach generujących określone przesunięcia fazowe
- **filtry pasywne:** redukcję wyższych harmonicznych można osiągać przez stosowanie filtrów pasywnych szeregowych lub równoległych do odbiorników; filtry szeregowe w oparciu o rezonanse blokują określone harmoniczne, natomiast filtry równoległe je analogicznie zwierają ze sobą, przez co nie płyną one do odbiorników.



**Figure 14.7** Passive shunt filters: (a) single-tuned; (b) first-order high-pass; (c) second-order high-pass; (d) third-order high-pass; (e) C-type high-order

- **filtry aktywne**

- **układy korekcji współczynnika mocy:** specjalne przekształtniki dc-dc lub układy prostowników sterowanych w określony sposób pozwalają na sterowanie poborem mocy biernej oraz zawartością harmonicznych w pobieranych prądach; takie układy stosuje się przede wszystkim w prostownikach diodowych



**Figure 14.9** Single-phase boost PFC rectifier

- **prostowniki aktywne:** specjalnie sterowane układy prostowników, które pozwalają na kontrolę współczynnika mocy - stosowane przede wszystkim tam gdzie potrzebna jest możliwość dwukierunkowego przepływu energii
- **kompensacja mocy biernej:** stosuje się tu specjalne kompensatory nadążne lub przełączalne baterie kondensatorów ze sterownikiem prądu

indukcyjnego; bardziej optymalnym rozwiązaniem jest tu jednak stosowanie filtrów aktywnych

## Źródła

- [1] Angelo Baggini - *Handbook of power quality*
- [2] Ned Mohan - *Power Electronics*
- [3] <https://bezel.com.pl/2018/08/01/oddzialywanie-na-siec-zasilajaca/>



## 12. Komputerowe wspomaganie projektowania w energetyce

	Status
	Zrobione

### ▼ a) ogólna charakterystyka programów typu CAD do projektowania instalacji elektrycznych

**CAD** - *Computer Aided Design* - komputerowo wspomagane projektowanie;

**CAE** - *Computer Aided Engineering* - komputerowo wspomagana inżynieria.

Obydwie powyższe definicje dotyczą pakietów oprogramowania, przeznaczonych do **komputerowego wspomagania prac inżynierskich, rysowania i projektowania**. Wśród programów CAD można wyróżnić **programy uniwersalne**, opracowywane przez niezależnych producentów, oraz **programy dedykowane**, opracowywane przez poszczególne firmy z branży - w tym wypadku elektroenergetycznej.

Programy **uniwersalne** posiadają **otwarte bazy różnego rodzaju rozwiązań**, natomiast **oprogramowanie dedykowane** na ogół zawiera **bazy rozwiązań** (elementów instalacji, etc.) **konkretnego producenta**.

Wśród programów CAD do projektowania instalacji elektrycznych, można wymienić:

- **programy obliczeniowe** - służą do **wykonywania obliczeń** instalacji elektrycznych, znacząco przyspieszając **proces doboru przekroju przewodów oraz aparatów elektrycznych** i zabezpieczeń w różnych typach instalacji, w tym instalacji oświetleniowych; przykłady: *Relux, Dialux, Pajak, Simaris*;
- **programy do tworzenia planów instalacji** - programy te służą do planowania położenia instalacji elektrycznych w rzeczywistych obiektach - czyli de facto do przygotowywania projektów wykonawczych instalacji; przykłady: *Revit, AutoCAD Electrical, WSCAD*;
- **konfiguratory** - ich głównym zadaniem jest konfiguracja szaf elektrycznych, porównywanie charakterystyk czasowo-prądowych urządzeń, dobór układów rozruchowych, wyłączników, etc. Konfiguratory występują na ogół w postaci funkcji w programach innego typu.
- **programy do projektowania rozdzielnic** - służą do doboru aparatów elektrycznych oraz ich umiejscowienia, a często także wymiarowania oraz kosztorysowania rozdzielnic; przykłady: *XL PRO2, ETI-pro, XPD*;

Podstawowymi typami programów do projektowania instalacji są zatem programy obliczeniowe oraz programy do tworzenia planów instalacji.

Programy **obliczeniowe** pozwalają na projektowanie rozbudowanych sieci elektrycznych. **Na podstawie zadanych parametrów układu**, takich jak napięcie górne i dolne transformatora, układ, częstotliwość czy rezerwy - **wprowadzonych przy użyciu środowiska graficznego - programy obliczeniowe obliczają wymagane parametry komponentów elektrycznych**, w tym przekrój przewodów, prądy i napięcia aparatury, etc.

Na ogół, **programy tego typu** (przykład: *Simaris, Pajak*) umożliwiają także **prostą edycję ręczną** poszczególnych komponentów instalacji, a także szybkie **wykonywanie dokumentacji graficznej** (schematy jednokreskowe) i **tekstowej** (spis aparatury i wyników obliczeń) rozpatrywanej instalacji.

Programy **do tworzenia planów instalacji** pozwalają natomiast na **wykonywanie przestrzennych projektów instalacji**, obejmujących **umiejscowienie poszczególnych elementów układu** takich jak rozdzielnice, gniazdka, położenie przewodów i rodzaj ich poprowadzenia. W takich przypadkach stosuje się programy typu Revit czy AutoCAD, coraz częściej także Solidworks. Programy te służą również często do wykonywania **wizualizacji projektów**.

#### Źródła

[1] Robert Leśniak - *Opracowanie do wykładu Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce*

[2] Materiały z wykładu *Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce*

### ▼ b) zasady projektowania oświetlenia wnętrz i oświetlenia terenów zewnętrznych.

#### Wykorzystanie oprogramowania typu CAD do projektowania oświetlenia

## Zasady projektowania oświetlenia wewnętrz

Projektując oświetlenie wewnętrz, należy zadbać o to, by spełnione zostały określone normami parametry oświetlenia. Wartości tych parametrów zależą głównie od typu budynku i charakteru oświetlenia. Ponadto, źródła światła powinny spełniać wymogi otoczenia, czyli mieć odpowiednią klasę IK oraz IP.

Projektowanie sprowadza się do doboru rodzajów źródeł światła oraz umiejscowienia ich na terenie budynku lub pomieszczenia w taki sposób, by spełnione zostały warunki co do następujących parametrów:

- **natężenie oświetlenia** - gęstość powierzchniowa strumienia świetlnego, padającego na daną powierzchnię, wyrażona w [lx] - przynajmniej 200 lx w płaszczyźnie roboczej;
- **równomierność oświetlenia** - iloraz z najmniejszej zmierzonej wartości natężenia oświetlenia na danej płaszczyźnie do średniego oświetlenia na tej płaszczyźnie; na ogół wartość ta powinna być większa niż 0,7;
- **rozkład luminancji** - luminancja to miara natężenia oświetlenia padającego w danym kierunku, wyrażona jako [cd/m<sup>2</sup>]; rozkład luminancji podaje się w formie współczynników odbicia ścian, sufitu i podłogi i im jest większy, tym lepiej światło odbija się od tych miejsc
- **współczynnik olśnienia przykrego - *UGR*** - współczynnik ten wyznacza się na etapie projektowania instalacji i powinien mieć odpowiednio niską wartość, by zjawisko olśnienia nie występuowało; zjawisko to jest dyskomfortem wywoalanym dużymi kontrastami oświetlenia w otoczeniu lub poprzez bezpośrednie spojrzenie na źródło światła lub odbitego światła
- **barwa światła** - de facto temperatura barwowa; jej wartość na ogół powinna rosnąć wraz ze wzrostem średniej wartości wymaganego natężenia oświetlenia
- **wskaźnik oddawania barw** - parametr ten wskazuje na właściwości oddawania barw przez źródła światła i powinien być możliwie wysoki, minimum 80; w pobliżu 100 jeżeli praca jest wrażliwa na kolory.
- **migotanie i efekt stroboskopowy** - powinno się unikać układów zasilania 50 Hz dla opraw oświetleniowych pracujących w otoczeniu maszyn wirujących - mogą one prowadzić do zjawiska stroboskopowego.

## Zasady projektowania oświetlenia terenów zewnętrznych

Projektowanie oświetlenia terenów zewnętrznych również wymaga spełnienia pewnych parametrów oświetleniowych, z tym że określają to inne normy.

Projektowanie oświetlenia terenów zewnętrznych można podzielić na 3 etapy:

1. **Określenie założień projektowych** takich, jak rodzaj oświetlenia drogi, jej wymiary, przeznaczenie, rodzaj nawierzchni, otoczenie, użytkownicy drogi i prędkość ruchu, etc.
2. **Wybór określonej sytuacji oświetleniowej oraz klasy oświetlenia i określenie wymagań oświetleniowych**, zgodnie z normami.
3. **Wybór źródeł światła i opraw oświetleniowych** w taki sposób, by cały czas były zachowane wszystkie wymagane parametry oświetleniowe.
4. **Dobór sposobu rozmieszczenia punktów świetlnych i geometrii systemu świetlnego**.
5. **Wykonanie obliczeń parametrów oświetleniowych i sprawdzenie pod kątem spełnienia norm**.

Wśród parametrów wybieranych na potrzeby oświetlenia zewnętrznego, zwłaszcza drogowego, znajdują się:

- **luminancja**: jaskrawość powierzchni, widziana przez obserwatora poruszającego się w określonym kierunku - zależy od poziomu natężenia oświetlenia, rodzaju opraw, jasności drogi, odbić od powierzchni
- **poziom luminancji drogi** - utrzymanie odpowiedniego poziomu luminancji na drodze gwarantuje dobrą widoczność
- **równomierność luminancji drogi** - im większa, tym lepsze warunki jazdy - brak stref jasnych i ciemnych; minimum to 0,4
- **ograniczanie olśnienia** - wskaźnik progu kontrastu TI powinien być mniejszy niż 10; oprawy powinny dobrze rozprowadzać światło, nie kierować go w oczy kierowców;
- **prowadzenie wzrokowe** - odpowiednie instalacje dają dodatkowe informacje - np. przy zjazdach, zakrętach itp. powinien być stosowany inny rodzaj oświetlenia niż na drogach prostych (inna wysokość, inna barwa światła, etc.)

## Wykorzystanie oprogramowania typu CAD do projektowania oświetlenia

Do projektowania oświetlenia można wykorzystać oprogramowanie typu DIALUX lub RELUX, które pozwala na wygodny dobór opraw ulicznych, planowanie ich rozmieszczenia w rzutach trójwymiarowych lub dwuwymiarowych.

Dobrane w ten sposób oprawy i ich rozmieszczenie można wprowadzić do modułu obliczeniowego, by przeliczyć parametry świetlne w różnych punktach i ich zgodność z normami.

Nowoczesne programy pozwalają na obliczenia wartości światła dziennego, mają zawarte modele 3D do planowania otoczenia, umożliwiają współpracę z innym oprogramowaniem CAD oraz zawierają pakiety norm dla różnych obszarów.

Programy CAD projektowania oświetlenia pozwalają również na wykonanie dokumentacji rysunkowej i tekstuowej.

## Źródła

- [1] Robert Leśniak - Opracowanie do wykładu Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce
- [2] Materiały z wykładu Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce
- [3] Opracowanie do wykładu Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce z poprzedniego rocznika studiów
- [4] [https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?nfpb=true&pageLabel=P3000183135539182278&html\\_tresc\\_root\\_id=23200&html\\_tresc\\_id=23217&html\\_klucz=19558&l](https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?nfpb=true&pageLabel=P3000183135539182278&html_tresc_root_id=23200&html_tresc_id=23217&html_klucz=19558&l)
- [5] [http://nop.ciop.pl/m6-7/m6-7\\_3.htm](http://nop.ciop.pl/m6-7/m6-7_3.htm)
- [6] <https://ledline.pl/strony/olsnienie-przykre-oramocena-ugr>

## ▼ c) zasady projektowania rozdzielnic elektrycznych niskiego napięcia. Charakterystyka programów CAD do projektowania rozdzielnic

### Zasady projektowania rozdzielnic elektrycznych niskiego napięcia

Projektując rozdzielnice elektryczne niskiego napięcia, należy mieć na uwadze takie czynniki jak bezpieczeństwo obsługi, wygodę eksploatacji (łatwe wykonywanie wszelkiego rodzaju łączyń), łatwy montaż i eksploatację, dużą niezawodność, możliwość rozbudowy oraz niewielki koszt i małe gabaryty.

Projektując rozdzielnice trzeba mieć już gotowy zestaw danych aparatów potrzebnych do rozdziału energii w miejscu jej zastosowania. Stąd, projektowanie rozdzielnic niskiego napięcia nie zawsze może być wykonywane w oderwaniu od projektowania instalacji elektrycznych.

### Charakterystyka programów CAD do projektowania rozdzielnic

Programami do projektowania rozdzielnic są m.in. XL PRO 2 lub SBC.

Korzystanie z programu XL PRO 2 sprowadza się do trzech etapów:

#### 1. Konfiguracja rozdzielnicy.

Służą do tego moduły Zestawienie, Układ i Schemat. Zestawienie pozwala na dobór aparatów bez rozmieszczenia ich w rozdzielnicy. Moduł Układ pozwala na umiejscowienie aparatów. Moduł Schemat pozwala natomiast na wizualizację schematu elektrycznego rozdzielnicy.

W skrócie, wybiera się aparaty, ich rozmieszczenie oraz układy połączeń.

#### 2. Dobór rozdzielnicy

Na podstawie dobranych aparatów, wybiera się obudowę rozdzielnicy spośród opcji proponowanych przez oprogramowanie. Można także wybierać niektóre akcesoria, takie jak drzwiczki, osłony itp. Moduł ten dobiera także akcesoria montażowe i uzupełnia o nie listę materiałów.

#### 3. Wizualizacja

Moduł Widok umożliwia sprawdzenie końcowego wyglądu rozdzielnicy w formie wizualizacji. Na tym etapie można także dodać różnego rodzaju akcesoria takie jak zamek do drzwi, etc. Można tu również modyfikować rozmieszczenie i sposób montażu aparatów.

#### 4. Kosztorysowanie

Na tym etapie, korzystając z listy urządzeń i cennika Legrand, można wykonać kosztorys zaprojektowanej rozdzielnicy.

#### 5. Wydruki

Na ostatnim etapie projektowania rozdzielnicy można wykonać listę dokumentów takich jak widoki, schemat elektryczny, kosztorys czy lista materiałów - i łatwo te dokumenty wyeksportować.

## **Źródła**

- [1] Robert Leśniak - *Opracowanie do wykładu Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce*
- [2] Opracowanie do wykładu Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce z poprzedniego rocznika studiów

## **▼ d) zasady tworzenia dokumentacji projektowej. Charakterystyka programów typu CAD do tworzenia dokumentacji projektowej**

### **Zasady tworzenia dokumentacji projektowej**

Podstawową koncepcją tworzenia dokumentacji projektowej jest wieloetapowe podejście, przy czym poszczególne etapy różnią się od siebie celem i poziomem szczegółowości. Etapami opracowywania dokumentacji projektowej są:

#### **1. Koncepcja projektowa**

Etap ten nie zawsze jest konieczny. Rozpoznaje się tu stan sieci i urządzeń elektroenergetycznych na terenie projektowanej inwestycji, przygotowuje wstępne zestawienie odbiorników energii i bilansu mocy i energii zapotrzebowanej, a przy tym opracowuje koncepcję rozwiązania podstawowych instalacji wewnętrz i na zewnątrz obiektu, sposobu zasilania budynku oraz plany zewnętrznych linii i ich powiązania z istniejącymi. Określa się też lokalizację stacji elektroenergetycznych.

#### **2. Program funkcjonalno-użytkowy**

Na tym etapie ustala się koszty prac projektowych i robót budowlanych i przygotowuje oferty. Przyjmuje się tu zakładane funkcjonalności w obiekcie. Etap ten to wstęp do opracowania projektu budowlanego, nie jest więc etapem wiążącym i może zajść potrzeba korekcji ustaleń.

#### **3. Projekt budowlany**

Projekt budowlany to opracowanie planów inwestycji budowlanej, wymagane aby uzyskać pozwolenie na budowę. Układ i zawartość projektów budowlanych są regulowane przez prawo budowlane.

Projekt budowlany musi uwzględniać wytyczne miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego, obowiązujących warunków zabudowy oraz wymogi urzędowe. Dokumentacja na tym etapie powinna dzielić się na projekt zagospodarowania terenu oraz projekt architektoniczno-budowlany.

**Projekt architektoniczno-budowlany** powinien zawierać rozwiązania instalacji elektrycznych, teletechnicznych oraz odgromowych, a także sposób ich powiązania z istniejącymi sieciami. Powinny się także znaleźć przyjęte założenia wstępne oraz wyniki obliczeń i uzasadnienie doboru urządzeń.

Oprócz tego, w projekcie architektoniczno-budowlanym powinna znaleźć się charakterystyka energetyczna obiektu (bilans mocy, etc.), charakterystyka ekologiczna instalacji i urządzeń (wszelkiego rodzaju emisje) oraz warunki ochrony przeciwpożarowej.

#### **4. Projekt wykonawczy**

Projekt wykonawczy zawiera szczegółowe rozwiązania projektowe z podziałem na branże. musi zawierać wszystkie opisowe i rysunkowe elementy niezbędne do realizacji inwestycji, takie jak schematy instalacji elektrycznych, rzuty i przekroje obiektu, schematy i rysunki montażowe, dane techniczne urządzeń, wykaz materiałów, aparatów i urządzeń, wskazówki dot. eksploatacji, koniecznych zabiegów konserwacyjnych i ich terminów oraz kryteria badań tych elementów.

Projekt wykonawczy jest niezbędny dla oceny prawidłowości wykonania robót w zakresie zgodności z projektem wykonawczym oraz osiągniętych parametrów i wyników pomiarów na etapie rozruchu. Jest on również częścią dokumentacji która powinna zawierać wielkość zużycia materiałów i ogólnie kosztorysy.

#### **5. Rysunki warsztatowe**

Rysunki warsztatowe obejmują wszelkiego rodzaju rysunki, wykazy i zestawienia, wraz ze szczegółami połączeń między elementami. Są niezbędne do prefabrykacji elementów wykorzystywanych na inwestycji. Rysunki warsztatowe zawierają nie tylko wymiary i listę materiałów, lecz również technologię wykonania poszczególnych elementów konstrukcji.

Rysunki warsztatowe są wykonywane przez Wykonawcę, Podwykonawcę, Producenta lub Dystrybutora.

## **Charakterystyka programów typu CAD do tworzenia dokumentacji projektowej**

De facto każdy branżowy program CAD typu Simaris, Dialux, Relux, etc. jest również programem do tworzenia dokumentacji projektowej. Na podstawie zadanych parametrów i dobranych aparatów, urządzeń itp. sporządzane są projekty poszczególnych instalacji wraz z kosztorysami. Mogą to być dokumenty tworzone zasadniczo na każdym etapie projektu.

Wspomniane programy projektowania instalacji elektrycznych, oświetleniowych i rozdzielnic mają możliwości eksportowania dokumentacji tekstuowej i rysunkowej oraz listy materiałów.

## Źródła

- [1] Robert Leśniak - *Opracowanie do wykładu Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce*
- [2] Materiały z wykładu *Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce*
- [3] Opracowanie do wykładu Komputerowe systemy CAD projektowania w elektroenergetyce z poprzedniego rocznika studiów



# 13. Automatyka napędu elektrycznego

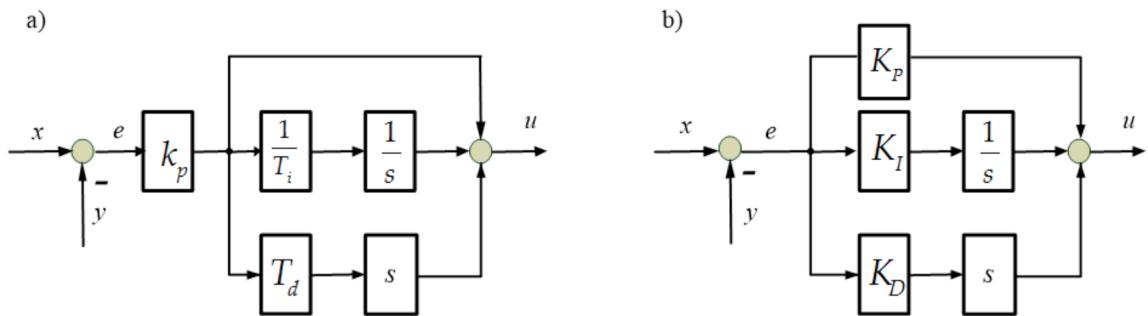
<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

## ▼ a) rodzaje regulatorów w układach napędowych na przykładzie napędu prądu stałego, zjawisko windup w regulatorach PI/PID

W układach napędowych można wyróżnić regulatory:

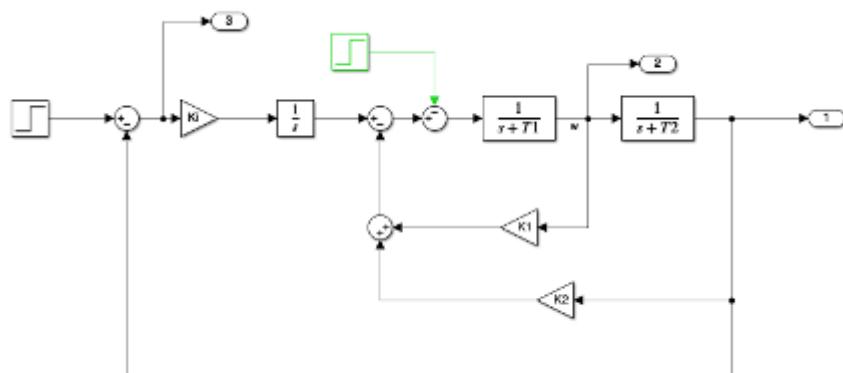
- liniowe P, PI, PID, etc.
- stanu
- ślizgowe
- predykcyjne
- rozmyte
- neuronowe

**Regulatory liniowe PID** opierają się na przetwarzaniu sygnału wejściowego w sposób liniowy, wykonując na nim podstawowe operacje różniczkowe: całkowanie, różniczkowanie, wzmacnianie. Tego typu regulatory mogą składać się ze wszystkich trzech członów lub tylko z wybranych.

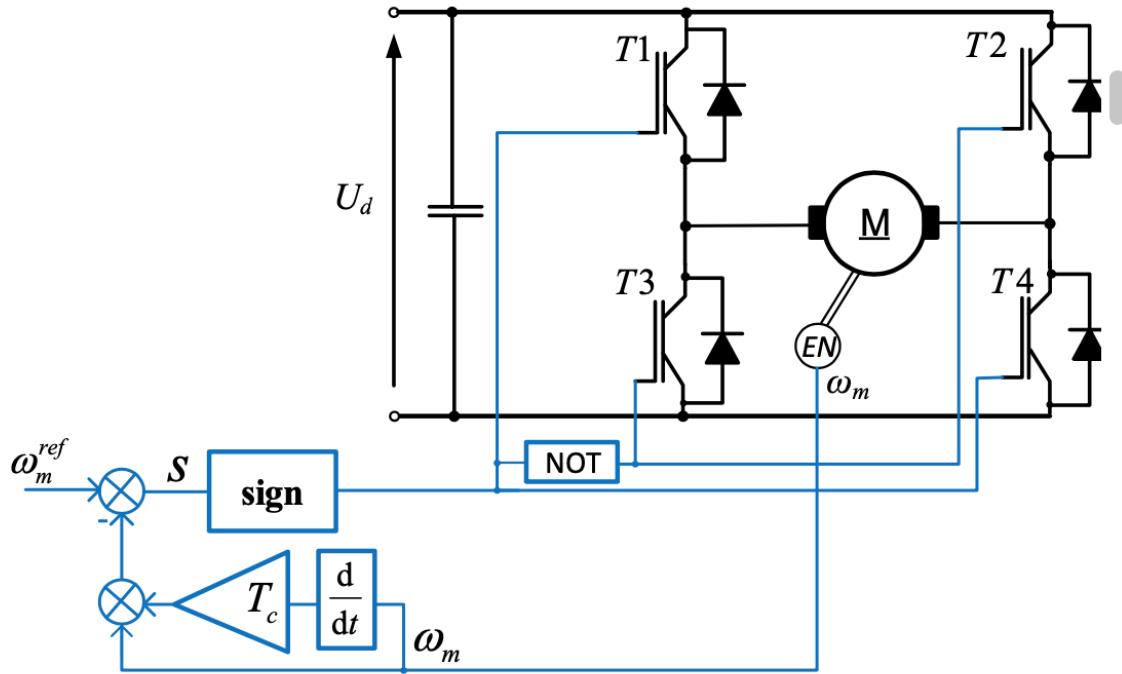


Rys. 1. Schemat regulatora PID w postaci (2a) – (a) i (2b) – (b):  $x$  – wielkość zadana,  $y$  – wielkość reguleowanej,  $u$  – wielkość wyjściowa regulatora (sygnał sterujący)

**Regulatory stanu** opierają się o sterowanie silnikiem w oparciu o znane lub estymowane zmienne stanu. Struktura regulatora stanu pozwala na jednoczesną kontrolę dużej liczby sygnałów - regulator składa się z zestawu wzmacnień w pętlach sprzężeń zwrotnych zmiennych sterowanych. Sygnały sprzężeń zwrotnych są sumowane i wszystkie naraz tworzą uchyb sygnału sterującego.

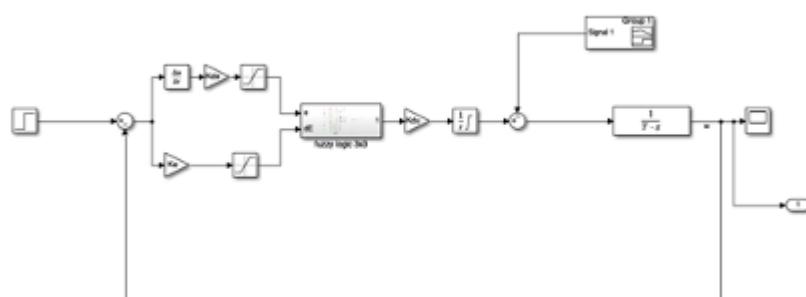


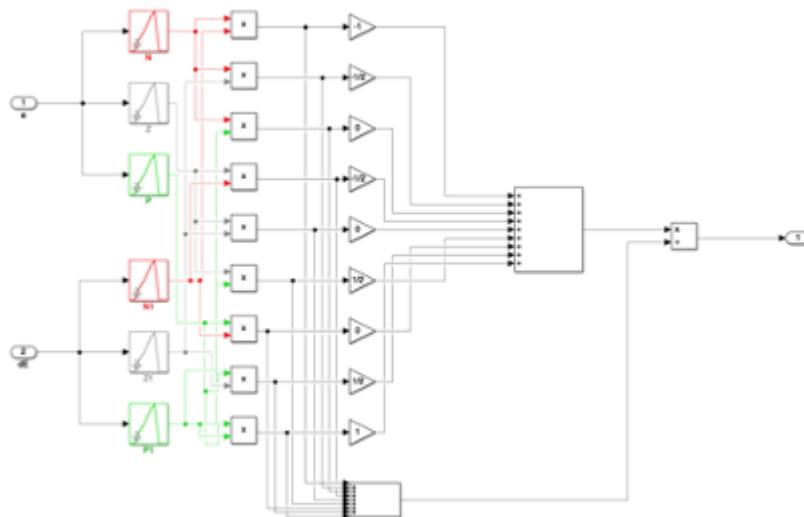
**Regulatory ślizgowe** są regulatorami dwustanowymi, których sposobem przełączania np. napięcia steruje funkcja sterowania. W układach tego typu występuje regulacja oparta o naprzemienne załączanie dwóch stanów wartości sterowanej, np. napięcia, zależnie od trajektorii **funkcji przełączeń** na płaszczyźnie fazowej.



**Regulatory predykcyjne** wykorzystują przewidywane przyszłe stany obiektu sterowanego, obliczone na podstawie modelu matematycznego. Definiuje się **funkcję celu** jako **wskaźnik jakości sterowania** oparty o model matematyczny. Operując na obliczeniach możliwych przyszłych stanów obiektu wybiera się takie sterowanie, by zapewnić minimalizację wybranego wskaźnika jakości sterowania.

W **regulatorach rozmytych** stosowana jest **logika rozmyta**, oparta o przesłanki i konkluzje. Regulator rozmyte często są regulatorami nieliniowymi. Definiuje się w nich pewne reguły, w oparciu o które na podstawie sygnałów wejść dobierane są sygnały wyjścia. Bazuje się tu na przedziałach wielkości i to na ich podstawie wykonywana jest cała logika.





**Regulatory neuronowe** natomiast są oparte o sieci neuronowe, których na studiach nie było. Wyższa informatyka.

### Zjawisko windup

W typowych układach regulacji napędów, stosuje się ograniczenia wartości wyjściowej sygnału regulatora - wynika to z ograniczeń silników, np. przeciążalności prądowej. Ograniczenie można zrealizować np. przez wprowadzenie nasycenia sygnału wyjściowego.

W stanach dynamicznych, np. przy rozruchu, regulator PI początkowo działa w obszarze nasycenia. Im bliżej zadanej wartości, np. odpowiedniej prędkości obrotowej, tym sygnał regulatora jest niższy i regulator zaczyna wychodzić ze stanu nasycenia.

Regulator PI ma tę wadę, że człon całkujący, po wyjściu przez regulator ze stanu nasycenia, nadal generuje duży sygnał wyjściowy. Dzieje się tak, ponieważ przez cały czas sumował on sygnał uchybu. Takie zjawisko nazywa się zjawiskiem windup.

Aby zapobiec zjawisku windup, stosuje się kilka strategii, których ideą główną jest ograniczenie maksymalnego sygnału członu całkującego. Sprowadzają się one do mniejszych lub większych modyfikacji struktury regulatora PI. Modyfikacje te nazywa się układami anti-windup

Przykładowymi realizacjami układu anti-windup są:

- ustawienie takiego samego ograniczenia dla członu całkującego i sygnału wyjściowego całego regulatora

- zastosowanie dodatkowego sprzężenia zwrotnego od różnicy sygnałów sprzed i zza ograniczenia regulatora; otrzymany w ten sposób uchyb osłabia sygnał członu całkującego
- Zastosowanie regulatora przyrostowego PI z ograniczeniem całki na wyjściu. Budowa tego regulatora wynika z prostych przekształceń różniczkowych przesuwających całkę na koniec układu
- zastosowanie regulatora przyrostowego IP z ograniczeniem całki na wyjściu. Zasadniczą cechą tego układu jest przesunięcie członu proporcjonalnego do pętli sprzężenia zwrotnego, co eliminuje konieczność stosowania filtra wejściowego.

**Źródła:**

- [1] Materiały i notatki z wykładu *Automatyka napędu elektrycznego - zagadnienia wybrane*
- [2] Materiały i notatki z wykładu *Komputerowo sterowane modelowanie i projektowanie układów regulacji*

## ▼ b) podobieństwo metod sterowania wektorowego dla układu z falownikiem napięcia i silnikiem indukcyjnym oraz dla przekształtnika sieciowego AC/DC

W układach z **silnikiem indukcyjnym i falownikiem napięcia sterowanych wektorowo**, korzystamy z **transformaty Clarke** w celu przekształcenia układu trzech prądów fazowych do jednego zapisu wektorowego, a następnie z **transformaty Parka**, żeby **zmienić układ współrzędnych ze stacjonarnego na wirujący**.

Podobnie, w metodach sterowania **przekształtnikami sieciowymi AC/DC** stosuje się te same transformaty, żeby **trójfazową sieć elektroenergetyczną z punktu widzenia przekształtnika zamienić na pojedynczy wektor wirujący**.

Kolejne podobieństwo polega na tym, że sterowanie odbywa się poprzez **regulację składowych wirującego wektora prądu**. W przypadku silników indukcyjnych, składowe prądu odpowiadają za strumień elektromagnetyczny oraz moment elektromagnetyczny silnika. Gdy mowa o przekształtnikach, to zależnie od metody sterowania, poszczególne składowe wirującego wektora prądu odpowiadają za wartość napięcia oraz pobieraną przez przekształtnik moc bierną.

Zarówno w przypadku wektorowych metod sterowania przekształtnikiem, jak i silnikiem, **jedną ze składowych staramy się minimalizować i stabilizować**,

**natomast zasadnicze sterowanie polega na kontrolowaniu drugiej z nich.**

Idąc dalej, można wykazać **podobieństwa metod zorientowanych napięciowo dla przekształtnika AC/DC do metod zorientowanych polowo dla silnika AC**. Za poszczególne wartości odpowiadają poszczególne składowe.

Natomiast **metody DPC dla przekształników AC/DC są analogiczne do metod DTC dla silników prądu przemiennego**. W obu przypadkach operuje się poprzez odpowiednie kluczowanie tak, by osiągnąć bezpośrednią kontrolę nad wielkością sterowaną. Dla silników jest to moment elektromagnetyczny; dla przekształników - moc czynna i bierna.

**Źródła:**

[1] Materiały i notatki z wykładu *Automatyka napędu elektrycznego - zagadnienia wybrane*

### **▼ c) metody odtwarzania zmiennych stanu i parametrów dla silników prądu przemiennego**

W silnikach prądu przemiennego, w celu odtwarzania trudno mierzalnych zmiennych stanu i parametrów, stosuje się kilka różnorodnych podejść do estymacji. Wyróżnia się tu metody fizyczne, algorytmiczne oraz neuronowe.

#### **Metody fizyczne**

Metody fizyczne bazują na **asymetrii magnetycznej maszyny** i na podstawie pomiaru pewnych wartości i znajomości pewnych zjawisk fizycznych pozwalają na określenie innych wartości fizycznych. Metody te wymagają rzeczywistych układów pomiarowych - dawniej do pomiaru strumienia poosiowego, współcześnie - do pomiaru prądów silnika.

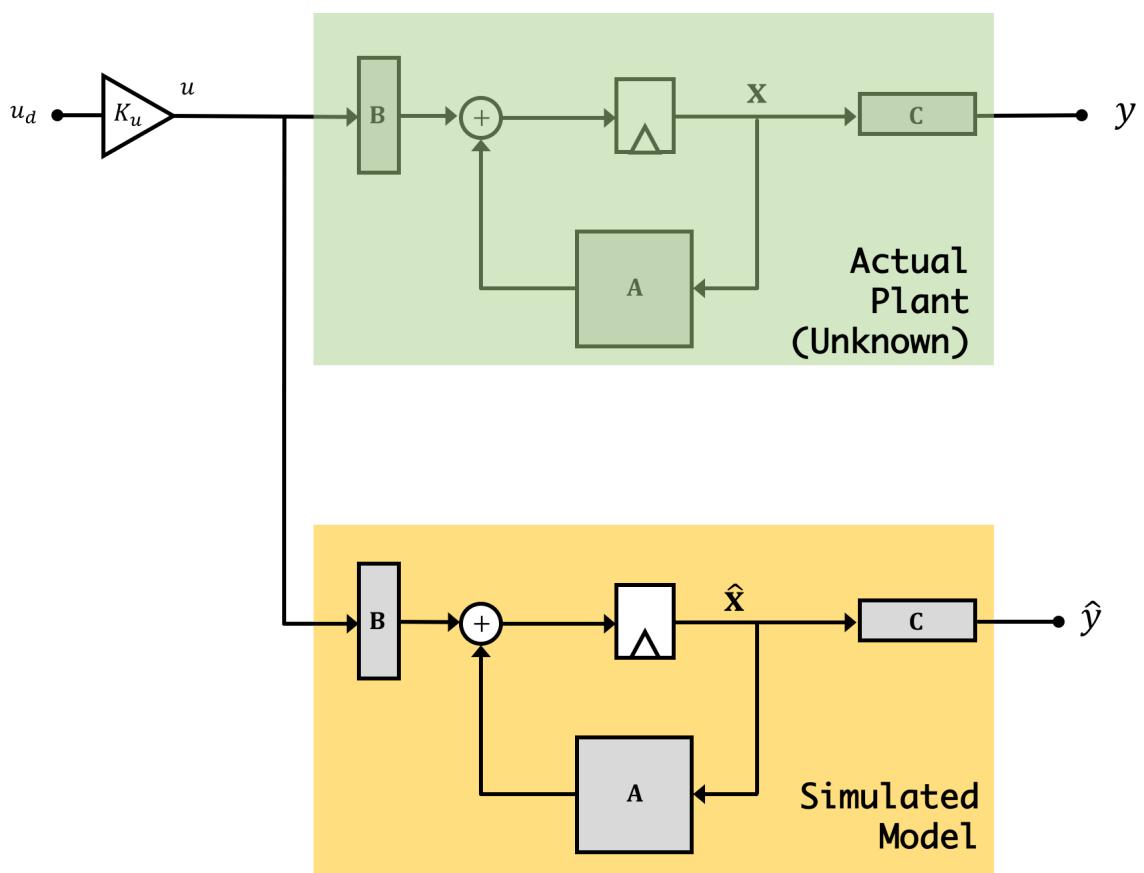
Fizyczne metody estymacji opierają się o **analizę spektralną harmonicznych prądu lub strumienia**. Przy estymacji wielkości, zakłada się w nich stacjonarność sygnału, wskutek czego **stany dynamiczne wprowadzają pewien błąd estymacji**.

Zaletą metod fizycznych jest **dokładne obliczanie wielkości estymowanych** oraz **niezależność od parametrów silnika**. Wadą tych metod jest to, że nie radzą sobie ze stanami dynamicznymi układów napędowych, a oprócz tego tracą dokładność przy niewielkich prędkościach obrotowych silnika.

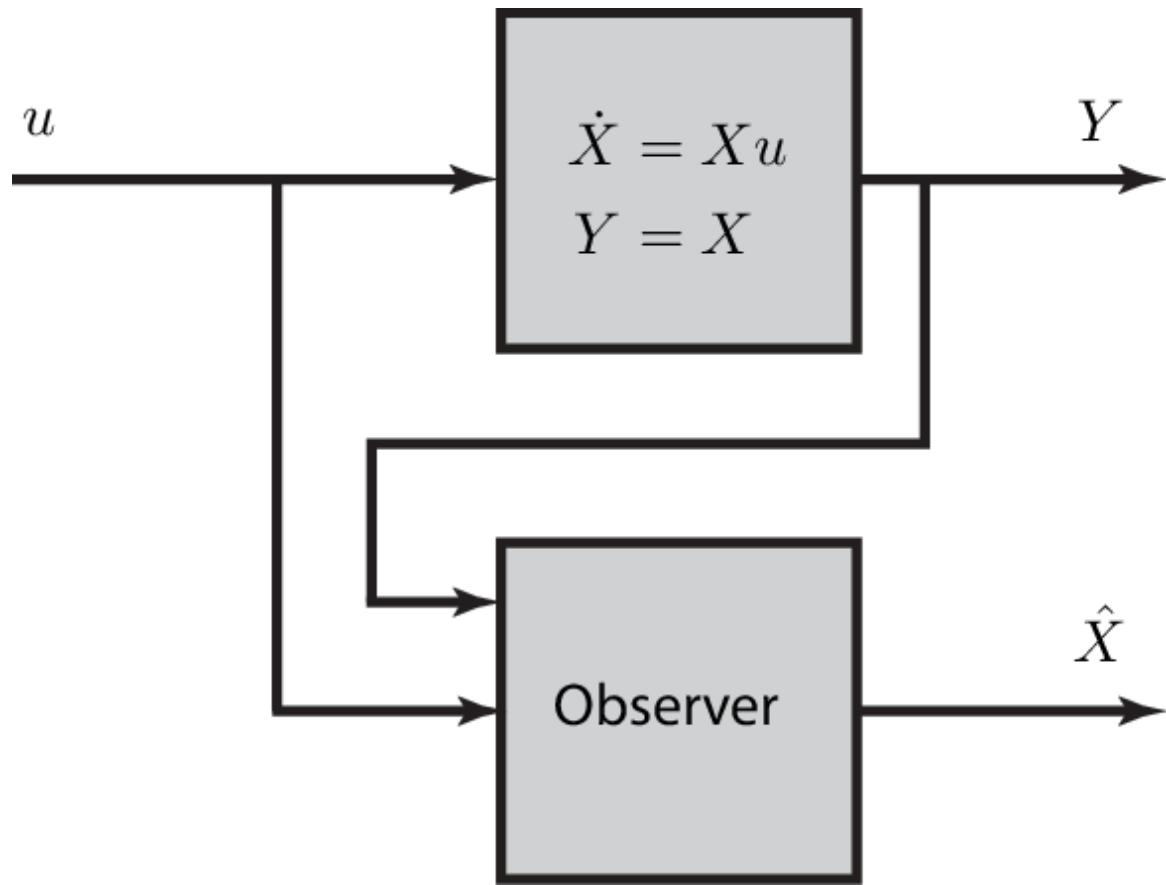
#### **Metody algorytmiczne**

Metody algorytmiczne opierają się o model matematyczny silnika indukcyjnego (lub innego, zależnie od układu napędowego). Wśród nich można wyróżnić symulatory zmiennych stanu, obserwatory zmiennych stanu oraz filtry Kalmana.

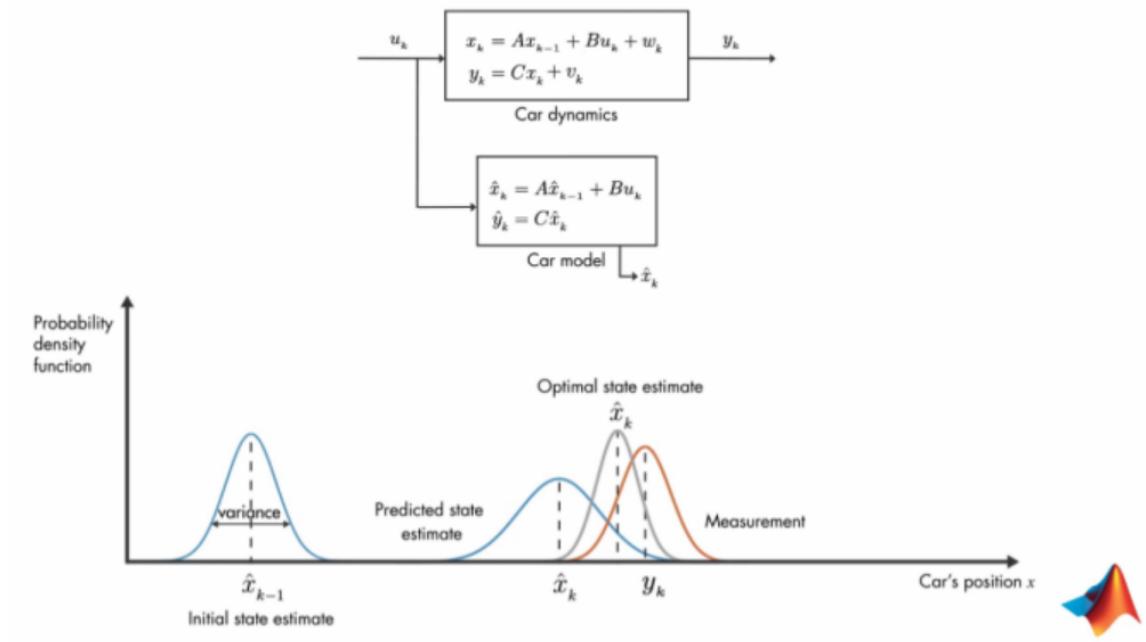
**Symulatory zmiennych stanu** w oparciu o część modelu matematycznego silnika i pewne mierzone wielkości pozwalają na obliczenie innych potrzebnych wielkości, np. na podstawie równań obwodu wirnika i pomiaru prądu można określić strumień wirnika. W układach tych nie uwzględnia się zmian parametrów silnika, więc każda taka zmiana wprowadza błąd estymacji. Oprócz tego, sama niedokładność określenia parametrów silnika uwzględnionych w symulatorze wprowadza błąd estymacji.



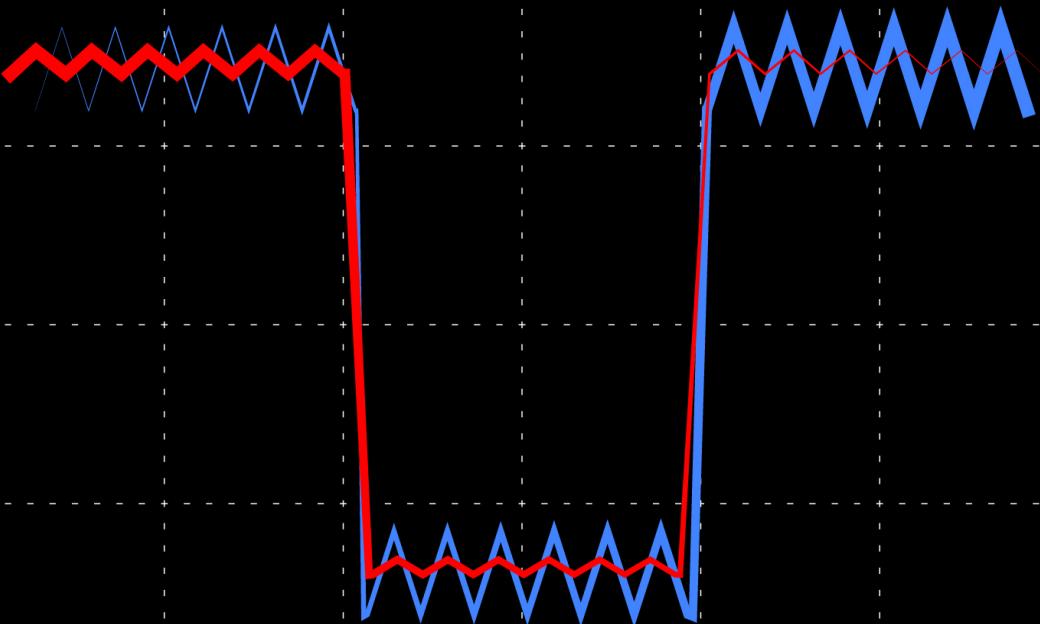
**Obserwatory zmiennych stanu** działają podobnie do symulatorów zmiennych stanu, ale z uwzględnieniem sprzężenia zwrotnego od rzeczywistych wartości silnika - np. estymowaną na podstawie zastosowanego modelu wartość prądu porównuje się z jego rzeczywistą, mierzoną wartością. Dzięki wykorzystaniu informacji o błędzie estymacji, uzyskuje się mniejszą wrażliwość estymatora na niedokładność określenia lub zmienność parametrów silnika. Istnieje kilka typów obserwatorów zmiennych stanu, różniących się stopniem złożoności - obserwatory nieliniowe, liniowe niestacjonarne, rozszerzone i tzw. "sliding-mode".



**Filtры Kalmana** nazywa się optymalnymi estymatorami. W estymacji zmiennych stanu silnika uwzględniają fakt, że sygnały są zakłócone - zarówno sygnały pomiarowe, jak i parametry obiektów. Filtry Kalmana działają w oparciu o algorytmy rekurencyjne, nie analityczne. W przypadku zakłóceń sygnałów pomiarowych o rozkładzie gaussowskim, można mówić o optymalnej estymacji - filtr Kalmana minimalizuje błąd średniokwadratowy estymowanych zmiennych stanu. Wadą filtrów Kalmana jest duża złożoność obliczeniowa - mikroprocesor musi wykonywać dużą liczbę operacji macierzowych w krótkim czasie.



# Filtr Kalmana



## Metody neuronowe

Metody neuronowe estymacji zmiennych stanu opierają się o sieci neuronowe. Rozróżnia się metody neuronowe off-line oraz on-line, zależnie od sposobu trenowania sieci neuronowych.

**Metoda off-line (bazująca na neuronowej identyfikacji)**, w której trenuje się sieć neuronową przed umieszczeniem estymatora w rzeczywistym obiekcie. Estymator przygotowany w ten sposób powinien odzwierciedlać prędkość na podstawie mierzalnych wejść. Lepsze parametry estymacji można osiągnąć stosując także wejścia od próbek spóźnionych, np. dwóch do tyłu - czyli de facto "wartości historycznych".

**Metoda on-line (bazująca na neuronowym modelowaniu)** jest uczona na bieżąco, podczas stosowania na obiekcie sterowanym, gdzie algorytm uczący

wykorzystuje jako sprzężenie zwrotne wartość błędu między wielkością estymowaną i mierzoną określonego sygnału. Jest to metoda działająca w oparciu o ideę podobną do estymatorów typu MRAS.

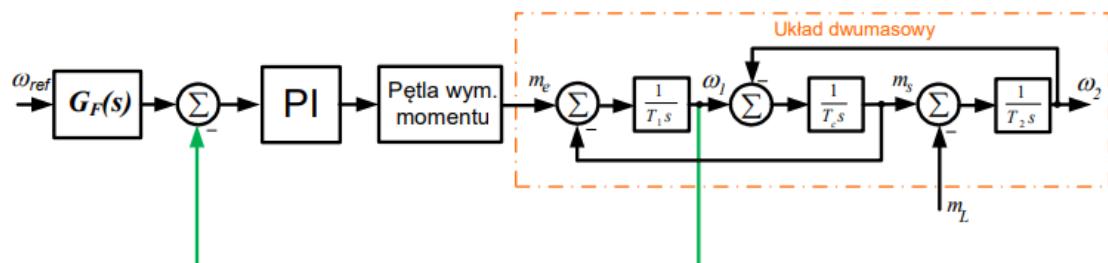
### Źródła:

[1] Materiały i notatki z wykładu *Automatyka napędu elektrycznego - zagadnienia wybrane*

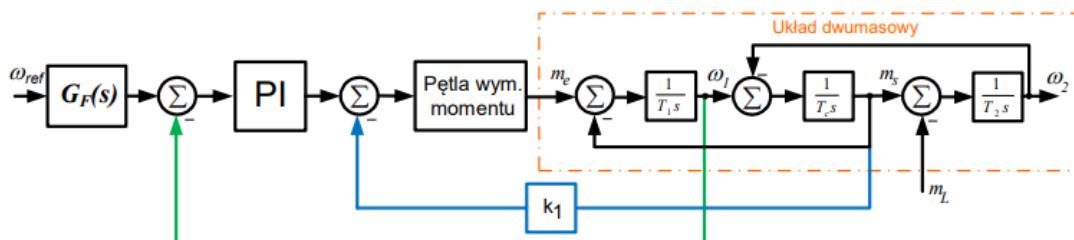
## ▼ d) podstawowe struktury sterowania napędem z połączeniem sprężystym

W układach napędowych z połączeniem sprężystym można wykorzystać kilka różnych struktur sterowania. Można tu wymienić struktury kaskadowe z dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi, regulatory stanu oraz regulatory rozmyte, ślizgowe czy adaptacyjne.

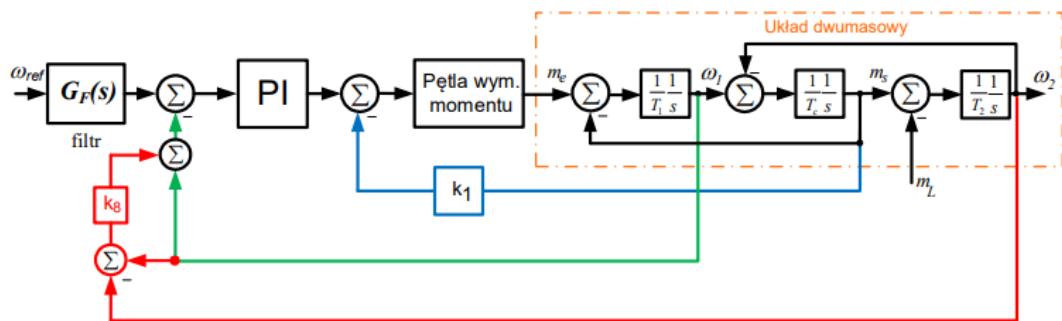
W **strukturze kaskadowej**, stosuje się **dodatkowe sprzężenia zwrotne** od pewnych zmiennych stanu. Wyróżnia się trzy grupy dodatkowych sprzężeń zwrotnych i zastosowanie każdej z nich pozwala na osiągnięcie różnych parametrów sterowania. Można zastosować **dwa dodatkowe sprzężenia zwrotne**, co pozwala na **pełne sterowanie dynamiką układu** - zarówno rozłożeniem biegunów, jak i współczynnikiem tłumienia.



Rys. 5.1. Struktura sterowania z regulatorem PI

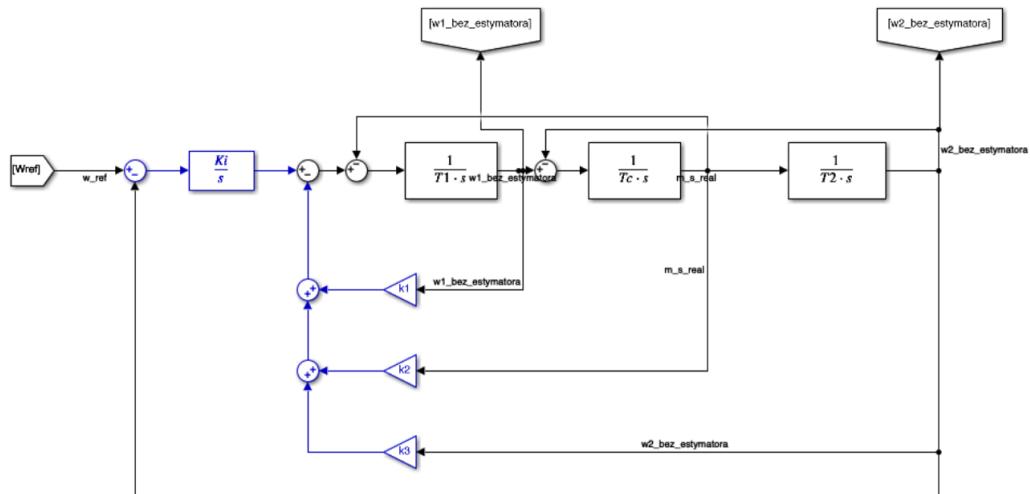


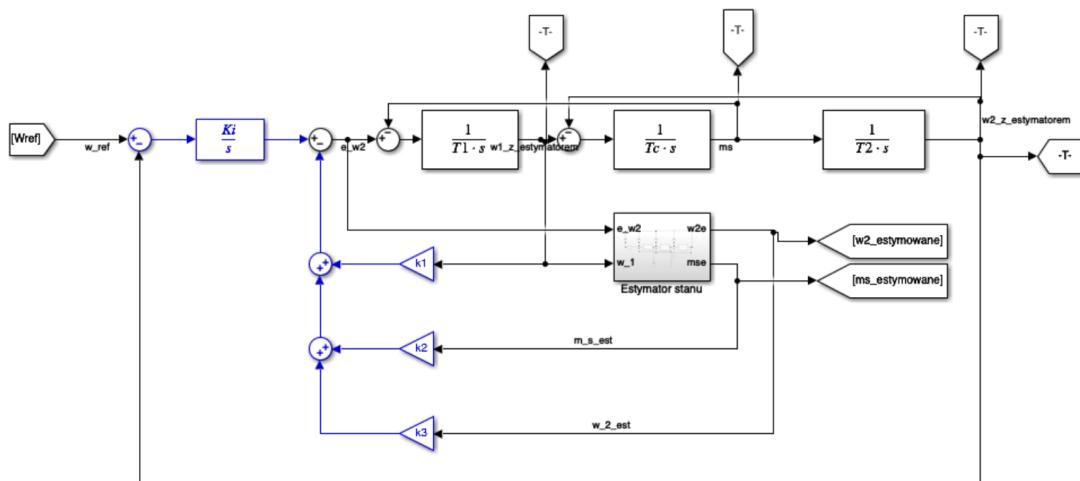
Rys. 5.3. Struktura sterowania prędkością napędu dwumasowego z regulatorem PI i jednym dodatkowym sprzężeniem zwrotnym



Rys. 5.4. Struktura sterowania z regulatorem PI

Do sterowania układami dwumasowymi można wykorzystywać również **regulatory stanu**, które uwzględniają zmienne stanu połączenia sprężystego, takie jak moment skrętny i prędkość obrotowa po stronie maszyny roboczej. Należy jednak mieć na uwadze, że **stosowanie regulatorów stanu wymaga wykorzystania estymatora tych zmiennych** - np. obserwatora Luenbergera.





Układy dwumasowe można sterować również korzystając z rozmytych i ślizgowych układów regulacji automatycznej, a także przy wykorzystaniu różnego rodzaju układów adaptacyjnych. Każda z tych metod ma pewne unikalne właściwości - np. sterowanie adaptacyjne typu MRAS pozwala na uodpornienie układu na zmiany parametrów napędu.

### Źródła:

- [1] Materiały i notatki z wykładu *Automatyka napędu elektrycznego - zagadnienia wybrane*
- [2] Materiały i notatki z wykładu *Komputerowo wspomagane projektowanie układów regulacji*



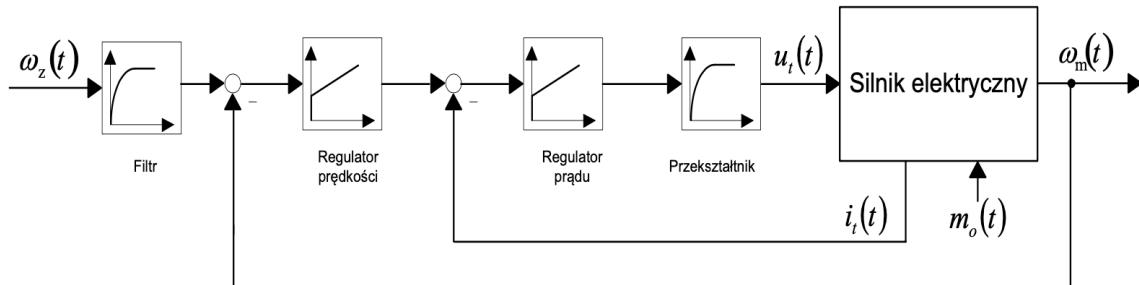
## 14. Komputerowo wspomagane projektowanie układów regulacji

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

### ▼ a) kaskadowa struktura regulacji a struktura sterowania z regulatorem stanu - schemat blokowy, zasada działania, dobór parametrów, właściwości

#### Struktura kaskadowa

W strukturze kaskadowej pojawiają się **dwie pętle sterowania**: nadrzędna oraz podrzędna. Każda z pętli ma swój regulator, który kompensuje określoną stałą czasową układu. W przypadku silnika prądu stałego, **regulator prądu niweluje stałą czasową elektromagnetyczną silnika**, natomiast **regulator prędkości - stałą czasową mechaniczną**.



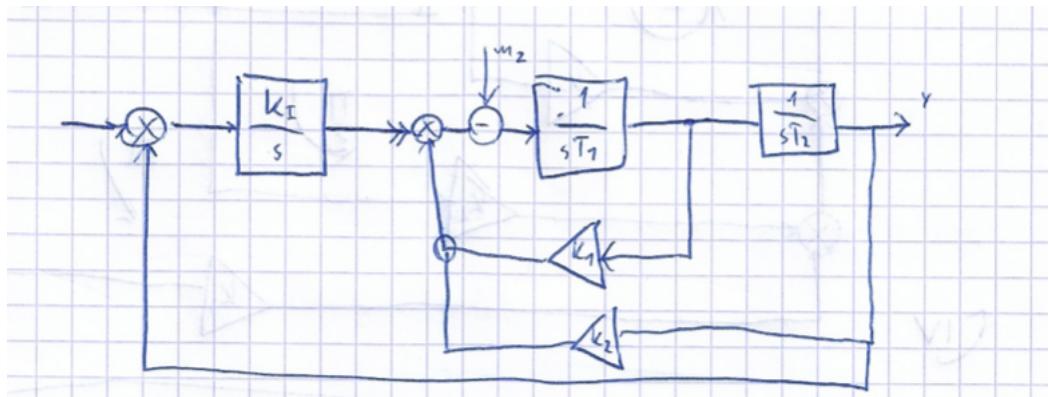
Działanie układu polega na tym, że nadrzędny regulator prędkości, na podstawie uchybu prędkości, zadaje wartość prądu. Podrzędny regulator na podstawie uchybu prądu zadaje wartość napięcia przekształtnika. Pętla wewnętrzna jest zależna od sygnału pętli zewnętrznej.

W strukturze kaskadowej stosuje się **regulatory liniowe**, najczęściej PI. Ich parametry można dobierać za pomocą uproszczonych **kryteriów modułu i symetrii** lub przy wykorzystaniu **metody rozłożenia biegunków** na podstawie równania charakterystycznego.

Układ kaskadowy cechuje się tym, że **dynamika pętli nadrzędnej jest zależna od dynamiki pętli podrzędnej**. Jeżeli różnica czasów reakcji obu pętli jest niewielka, w układzie mogą pojawiać się oscylacje. Zasadniczą cechą jest natomiast to, że **dwie pętle - prędkościowa i prądowa - sterowane są osobno** przez dwa regulatory.

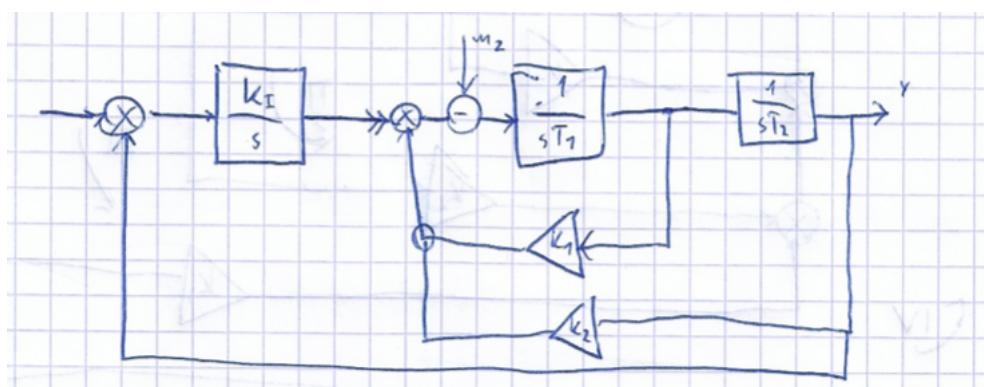
#### Struktura sterowania z regulatorem stanu

W przypadku struktury z regulatorem stanu, wszystkie sterowane zmienne są uwzględnione w pętli sprzężenia zwrotnego przy wejściu układu. Regulator stanu można stosować dla obiektów każdego rzędu. **Struktura regulatora stanu bazuje na równaniach stanu obiektu**.



Działanie regulatora stanu opiera się o **jednoczesne sterowanie wszystkimi zmiennymi**. Regulator uwzględnia każdą z nich w sprzężeniu zwrotnym na wejściu układu. Zmiana sygnałów wyjściowych powoduje zmianę uchybu. Uchyb jest tu sygnałem sterującym.

**Projektowanie układu z regulatorem stanu polega na wyznaczeniu wzmacnień w pętlach sprzężeń zwrotnych poszczególnych zmiennych.** Wzmocnienia dobiera się **metodą rozłożenia biegunków**. Ponadto, na wejście układu można wprowadzić człon całkujący, który niweluje uchyb ustalony mogący pojawić się przy wystąpieniu zakłócenia. Oprócz tego, nie wszystkie zmienne można zawsze mierzyć, więc w przypadku sterowania przy użyciu regulatora stanu **na ogół stosuje się estymatory** zmiennych stanu.



Jak już wspomniano, regulator stanu **steruje wszystkimi zmiennymi jednocześnie**. Jest to najprostsza możliwa struktura regulacji. Regulator ten sprawdza się bardzo dobrze w systemach, w których zachodzi potrzeba **kontrolowania dużej liczby zmiennych** (stąd jego stosowanie w układach dwumasowych). Do wad regulatora stanu należy jego **podatność na zmiany w układzie, trudność w nakładaniu ograniczeń** na zmienne stanu (trzeba stosować zaawansowane techniki) oraz częsta konieczność **stosowania estymatorów** zmiennych stanu.

#### Podsumowując...

Podsumowując, struktura kaskadowa dobrze sprawdza się tam, gdzie chcemy wprowadzać ograniczenia zmiennych sterowanych, najlepiej w prostych, nieskomplikowanych układach.

Układ z regulatorem stanu natomiast najlepiej sprawdza się tam, gdzie potrzebna jest kontrola wielu sygnałów jednocześnie. Ze względu na prostotę (po prostu system wzmacnień), regulator stanu dobrze sprawdza się jako regulator w układach rozmytych lub adaptacyjnych.

#### Źródła

- [1] Notatki z wykładu *Komputerowo wspomagane projektowanie układów regulacji*
- [2] Materiały z wykładu *Automatyka napędu elektrycznego - zagadnienia wybrane*
- [3] Roland Buchi, Markus Kottmann - *State regulator with observer -*  
[https://www.researchgate.net/profile/Mohamed\\_Mourad\\_Lafifi/post/initial\\_condition\\_for\\_observer/attachment/5dd92817cfe4e](https://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Mourad_Lafifi/post/initial_condition_for_observer/attachment/5dd92817cfe4e)
- [4] [https://digitalcollection.zhaw.ch/bitstream/11475/3792/2/2010\\_Buechi\\_State-Space-Control-LQR-and-Observer.pdf](https://digitalcollection.zhaw.ch/bitstream/11475/3792/2/2010_Buechi_State-Space-Control-LQR-and-Observer.pdf)
- [5] <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-6c0892fc-8aa0-48eb-929f-1c3a42c5a357>

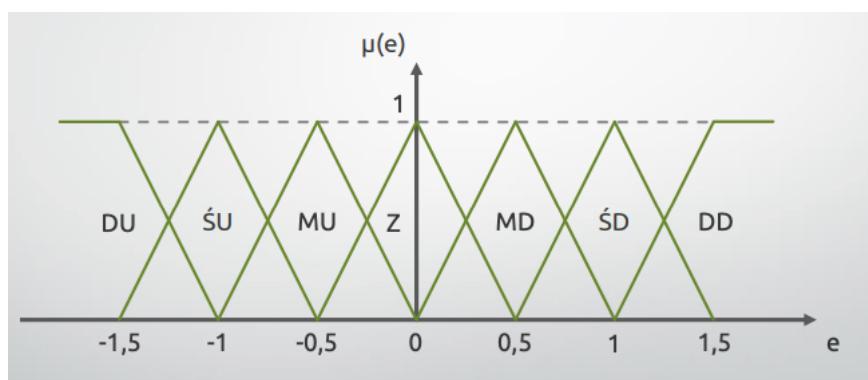
## ▼ b) układ regulacji z regulatorami rozmytymi - struktury, metody projektowania

Układy regulacji z regulatorami rozmytymi bazują na regulatorach rozmytych. Regulatorami rozmyte to regulatorzy, których prawo sterowania jest opisane regułami lingwistycznymi. Prawo sterowania to relacja między wejściem a wyjściem regulatora - np. w regulatorze PI jest to suma transmitancji członów P oraz I.

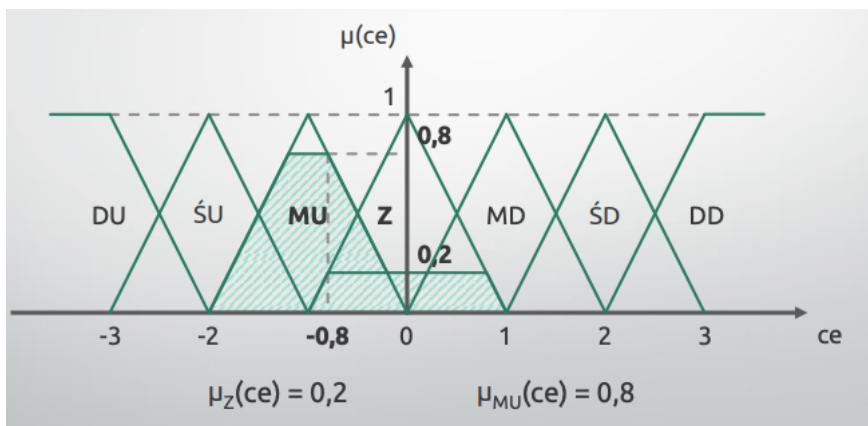
Prawo sterowania regulatorów rozmytych operuje na zmiennych lingwistycznych, które można opisać za pomocą przesłanek i konkluzji. Przesłanki są to sygnały wejściowe, natomiast konkluzje - sygnały wejściowe. Bazowy "wzór" na funkcję sterowania to:

 JEŻELI <przesłanka> TO <konkluzja>

W regulatorach rozmytych, wartości wejść są określone za pomocą funkcji przynależności. Funkcja przynależności przyjmuje wartości od 0 do 1. Sygnały wejściowe regulatora mają więc przypisane wartości funkcji przynależności. Im bardziej sygnał mieści się w zakresie opisanym funkcją przynależności, tym większą wartość przyjmuje ona dla tego sygnału. Na podstawie funkcji przynależności budowane są konkluzje.

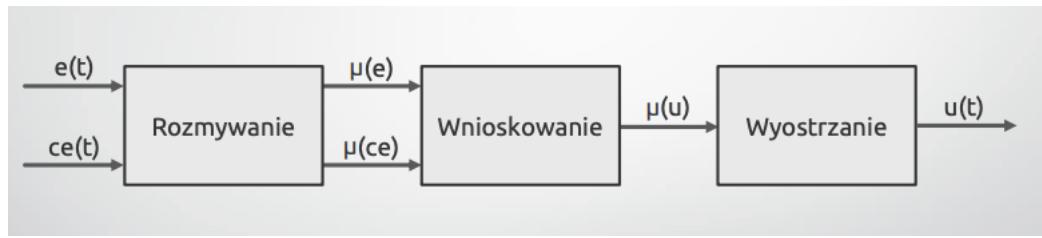


Działanie regulatora rozmytego polega na tym, że rozmywa on sygnały wejściowe, przypisując im określone wartości różnych funkcji przynależności - czyli tworzy przesłanki.



W kolejnym kroku, na podstawie przynależności sygnałów, dokonywane jest wnioskowanie. Wnioskowanie przypisuje przesłanki do konkluzji, czyli na podstawie wartości funkcji przynależności sygnałów wejściowych, określa funkcję przynależności sygnału wyjściowego.

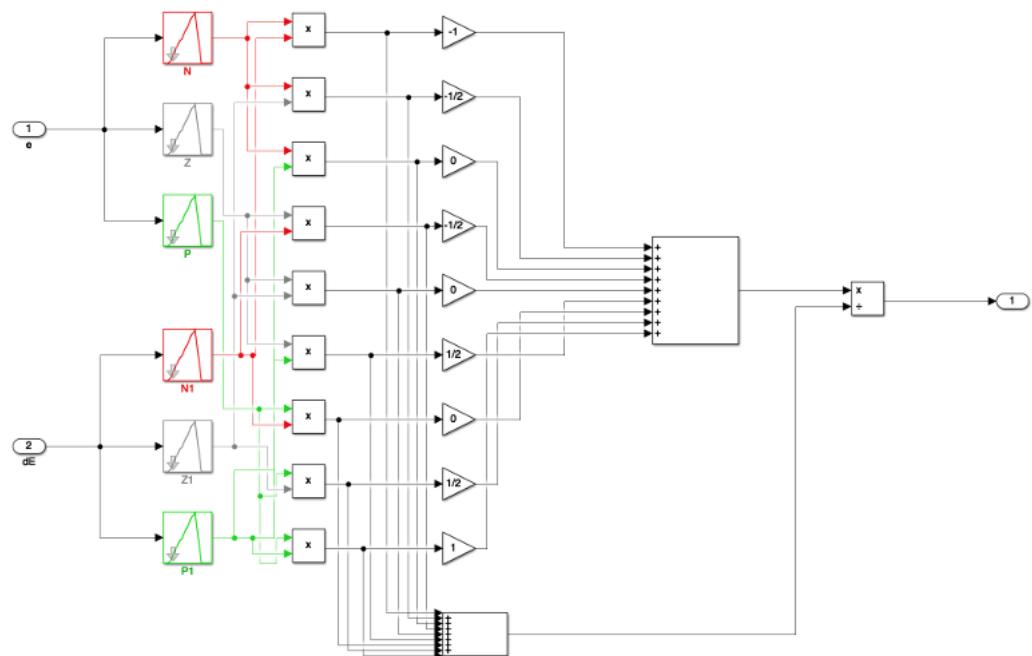
Po wnioskowaniu następuje wyostrzanie, czyli przypisanie konkretnej wartości wyjścia regulatora.



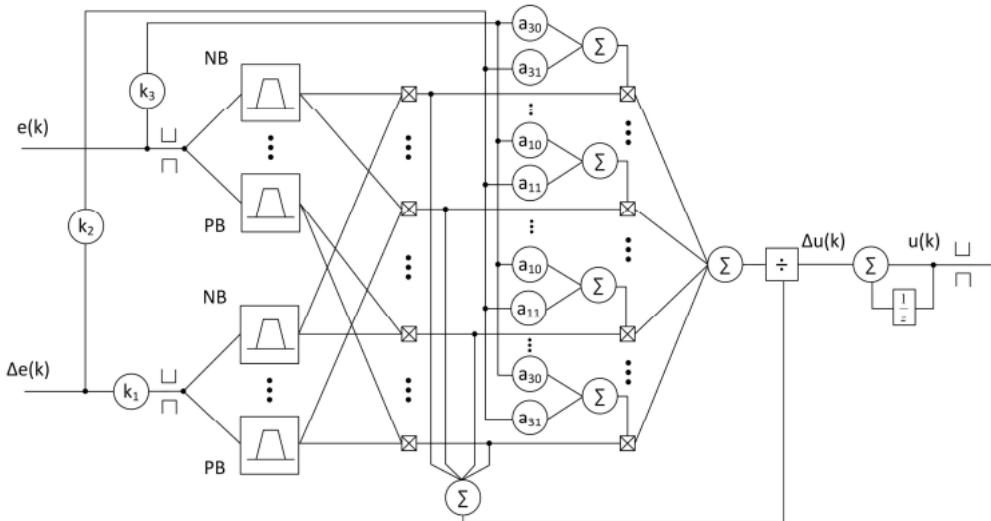
### Rodzaje regulatorów rozmytych

Wyróżnia się dwa rodzaje regulatorów rozmytych: regulatory Mamdaniego oraz regulatory TSK.

**Regulatory Mamdaniego** mają funkcje przynależności dla wejść oraz funkcję przynależności dla wyjść (wyjścia). Wskutek defuzyfikacji (wyostrzania) uzyskuje się tu jednoznaczną wartość. Regulatory Mamdaniego są przystosowane do stosowania reguł lingwistycznych.



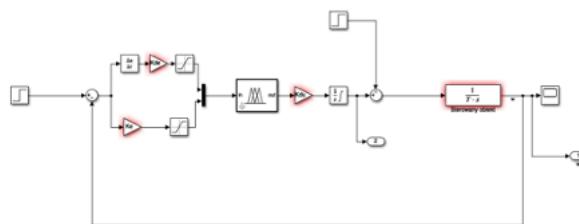
**Regulatory TSK** (Takagi-Sugeno-Kanga) zawierają natomiast konkluzję funkcyjną, czyli konkluzja nie ma określonej wartości, lecz wartość określoną poprzez funkcję wartości zmiennych wejściowych. Wyjście nie jest defuzyfikowane. Regulatory TSK są przystosowane do analizy matematycznej.



Regulatory Mamdaniego wykorzystuje się na ogół przy niewielkiej liczbie wejść. Regulatory TSK wykorzystuje się tam, gdzie liczba wejść jest znacząca - regulatory te są bardziej skomplikowane.

#### Struktury układów sterowania z regulatorami rozmytymi

Regulatory rozmyte w układach sterowania napędami stosuje się jako zastępstwo regulatorów PI. Sygnałami wejściowymi są tu uchyb oraz zmiana (pochodna) uchybu.



#### Metody projektowania układów sterowania z regulatorami rozmytymi

Projektowanie regulatorów rozmytych typu Mamdaniego polega na zdefiniowaniu funkcji przynależności wejść i wyjścia. Oznacza to zdefiniowanie bazy reguł. Funkcje te mogą być oparte na doświadczeniu operatorów i nie muszą być liniowe. Należy pamiętać, że reguły nie powinny być ze sobą sprzeczne, ale powinny przy tym zapewniać pokrycie całego zbioru wartości sygnałów.

W regulatorach typu TSK należy natomiast zdefiniować funkcje przynależności sygnałów wejściowych oraz na ich podstawie bazę reguł, która określa wzmacniania dla funkcji wyjścia regulatora.

Powyższe regulatory można projektować m.in. w środowisku Matlab przy wykorzystaniu odpowiednich wtyczek, ułatwiających opisywanie reguł (funkcji przynależności).

#### Źródła

- [1] [http://www.cs.put.poznan.pl/pzakrzewski/iss/iss\\_wyklad\\_3.pdf](http://www.cs.put.poznan.pl/pzakrzewski/iss/iss_wyklad_3.pdf)
- [2] [https://www.researchgate.net/post/What\\_is\\_the\\_difference\\_between\\_Mamdani\\_Method\\_and\\_Takagi-Sugeno-kang\\_Method\\_TSK](https://www.researchgate.net/post/What_is_the_difference_between_Mamdani_Method_and_Takagi-Sugeno-kang_Method_TSK)
- [3] <https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-d8413fca-a7a6-4e26-92bb-d22d9636876c/c/Drozdz.pdf>
- [4] <https://eti.pg.edu.pl/documents/176593/26523587/ProsteRegRozmyte.pdf>
- [5] <https://we.pb.edu.pl/kair/wp-content/uploads/sites/4/2020/10/rozmyte.pdf>
- [6] Notatki z wykładu Komputerowo wspomagane projektowanie układów regulacji

#### ▼ c) sterowanie predykcyjne układów dynamicznych - idea sterowania, metoda projektowania, właściwości

Sterowanie predykcyjne polega na przewidywaniu przyszłych stanów obiektu sterowanego na podstawie jego modelu matematycznego. W sterowaniu tym porównuje się obecny stan obiektu z jego przewidywanym przyszłym stanem i stara się zminimalizować uchyb sterowanej wielkości.

Liczba przewidywanych przedziałów czasowych (kroków) w przypadku sterowań nazywana jest horyzontem sterowań, natomiast w przypadku wyjść - czyli zachowań obiektu - horyzontem predykcji. Horyzont predykcji jest zawsze większy niż horyzont sterowań.

Obliczenia stanów obiektów w horyzoncie sterowań i horyzoncie predykcji opiera się o model matematyczny, który musi zostać sformułowany. Po każdej zmianie sterowania, obliczenia są wykonywane ponownie dla nowego stanu początkowego.



Idea sterowania predykcyjnego polega na tym, że minimalizuje się błąd, który jeszcze nie powstał.

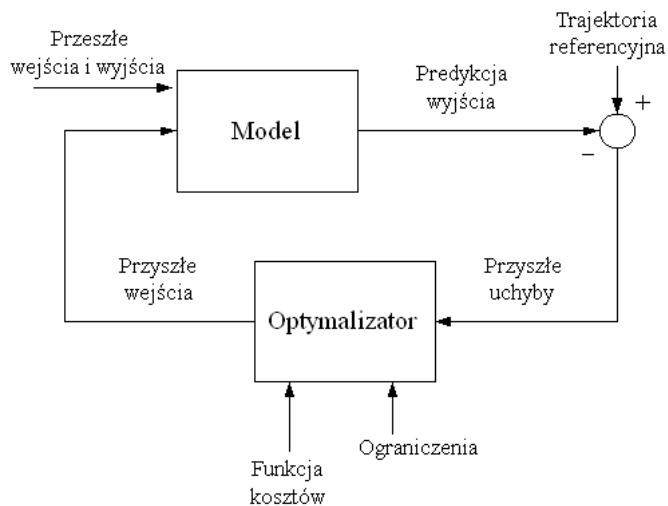
### Idea algorytmu sterowania i sformułowanie funkcji celu

Przy stosowaniu sterowania predykcyjnego, należy zdefiniować funkcję celu, czyli wskaźnik jakości sterowania, oparty o model matematyczny obiektu. Przy predykcji dąży się do takiego doboru sterowań, aby wartość zdefiniowanego wskaźnika jakości minimalizować - wykonuje się zatem obliczenia różnych wariantów sterowań układem, a następnie wybiera to, przy którym wskaźnik jakości przyjmuje najmniejszą wartość.

Oprócz wskaźników jakości sterowania, w algorytmie sterowania predykcyjnego należy uwzględnić również ograniczenia wielkości sterowanych - i dopiero po ich uwzględnieniu, dokonywać procesu minimalizacji funkcji celu.

Idea algorytmu sterowania polega na tym, że w pierwszej chwili wyznacza się wartość wektora stanu (poprzez pomiar lub estymację). Jest to określenie warunków początkowych.

Następnie rozwiązuje się problem optymalizacyjny, minimalizując określony wskaźnik jakości sterowania w celu wyznaczenia sekwencji sterowań. Następnie wprowadza się określone sterowanie na obiekt. Proces ten jest iteracyjny - powtarza się z każdym krokiem.



Sterowanie predykcyjne można dzielić na sterowanie online i offline. To pierwsze polega na przeprowadzaniu predykcji w czasie działania układu - co wymaga bardzo szybkich obliczeń, skraca więc horyzont predykcji i sterowania. Natomiast sterowanie offline pozwala na przeprowadzanie predykcji poza obiektem, a następnie wprowadzeniu wartości optymalnych sterowania na obiekt, w postaci np. lookup-tables,

### Metoda projektowania

- Zdefiniowanie modelu obiektu.** To na modelu opierają się wszystkie predykcje i obliczenia w układzie predykcyjnym, więc im lepsze odzworowanie rzeczywistego obiektu, tym lepsze działanie układu.
- Określenie kryterium jakości regulacji.** Kryteria jakości regulacji są pewnymi działańami na uchybach wielkości sterowanych i generalnie dąży się do ich minimalizacji. Na potrzeby układów predykcyjnych, kryteria jakości regulacji są tym, wobec czego optymalizowane jest sterowanie - np. efektywność energetyczna.

3. **Zdefiniowanie horyzontów predykcji i sterowania.** Horyzont predykcji mówi, na ile próbek do przodu obliczane są wartości sygnału wyjściowego przy określonym sterowaniu. Horyzont sterowania definiuje natomiast liczbę próbek, po których sygnał sterujący powinien dojść do zera, czyli układ powinien osiągnąć wartość zadaną.
4. **Zdefiniowanie trajektorii odniesienia. Opcjonalnie.** Trajektorię odniesienia definiuje się jako pożądaną zmianę wielkości sterowanej. Dąży się do takiego sterowania, by rzeczywista trajektoria była jak najbliżej trajektorii odniesienia.

#### Właściwości układu

Sterowanie predykcyjne pozwala na uwzględnianie ograniczeń nałożonych na wielkości regulowane i sterujące już na etapie projektowania regulatora. Sterowanie to sprawdza się dobrze w układach nieliniowych.

Ponadto, możliwość predykcji stanów obiektów złożonych pozwala na sterowanie układami trudnymi (oscyuracyjnymi, niestabilnymi, nieliniowymi, niestacjonarnymi). Sterowanie to jest również mało wrażliwe na zmiany parametrów obiektu.

Do wad należy duża wrażliwość na zmiany struktury obiektu, złożoność obliczeniowa oraz trudność w modelowaniu sterowanego obiektu. Ponadto, sterowanie online wymaga bardzo szybkiego procesora obliczeniowego co sprawia, że częściej stosuje się rozwiązań offline.

#### Źródła

[1] Notatki i materiały z wykładu *Automatyka napędu elektrycznego - zagadnienia wybrane*

[2] Wikipedia [https://pl.wikipedia.org/wiki/Sterowanie\\_predykcyjne#Zalety\\_i\\_wady\\_Regulacji\\_predykcyjnej](https://pl.wikipedia.org/wiki/Sterowanie_predykcyjne#Zalety_i_wady_Regulacji_predykcyjnej)

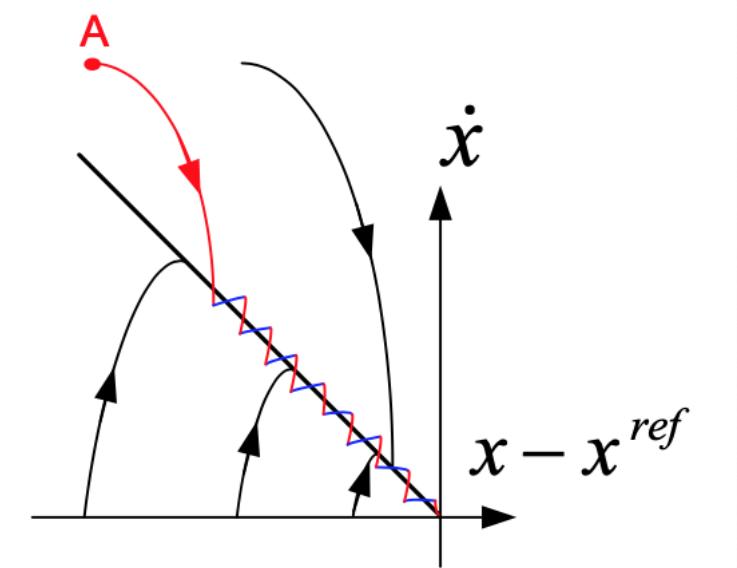
#### ▼ d) sterowanie ślizgowe układów dynamicznych - idea sterowania, metoda projektowania, właściwości

##### Idea sterowania

W sterowaniu ślizgowym mamy do czynienia z regulacją określonych wielkości poprzez **załączanie naprzemiennie dwóch stanów przekształtnika, zależnie od aktualnego położenia trajektorii fazowej układu względem funkcji (prostej) przełączeń na płaszczyźnie fazowej.**

Nazwa sterowania pochodzi od ruchu ślizgowego, w którym przełączanie dwustanowe powoduje zmianę kierunku trajektorii wielkości sterowanej. Podążanie po za prostą przełączeń polega na jej wielokrotnym przecinaniu, przy możliwie jak najbliższym położeniu względem niej.

**Ruch ślizgowy na płaszczyźnie fazowej  
(w osiach: błąd – pochodna błędu (przy  
 $x^{ref}=\text{const}$ ):**

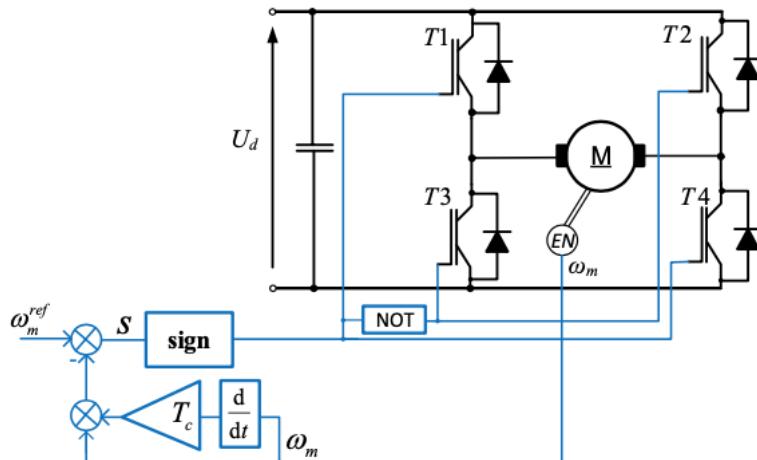


#### Projektowanie

Idea sterowania ślizgowego opiera się właśnie o **zdefiniowanie prostej przełączeń na płaszczyźnie fazowej**, na której **osią x jest uchyb wielkości**, natomiast **osią y jest dynamika (pochodna) tego uchybu**, czyli de facto dynamika sterowanej wielkości. Chcemy, żeby trajektoria uchybu dążyła do 0 - czyli do punktu zadanego - po linii prostej, ponieważ to oznacza możliwie najlepszą dynamikę, czyli dynamikę członu inercyjnego.

Podstawowy układ ślizgowy działa w oparciu o funkcję signum. Stan załączeń zależy od aktualnego znaku funkcji przełączającej definiowanej dla danego obiektu. Stąd właśnie idea cecha sterowania ślizgowego, czyli przełączanie dwustanowe. Istnieją jednak również inne możliwości wykonania sterowania ślizgowego, niż funkcja signum.

Zaprojektowanie układu ze sterowaniem ślizgowym polega zatem na **określeniu funkcji przełączeń** oraz **wybraniu funkcji przełączającej**.



Na przykładzie sterowania silnikiem prądu stałego, sterowanie ślizgowe polega na wymuszeniu zadanej prędkości obrotowej poprzez naprzemienne załączanie napięcia  $+U_{dc}$  i  $-U_{dc}$ , przy czym napięcie twornika staje się napięciem uśrednionym, zależnie od czasu załączeń poszczególnych poziomów napięć.

#### Zalety sterowania ślizgowego:

- **Prostota sterowania:** dwustanowe przełączanie jest sterowaniem naturalnym dla każdego przekształtnika. Takie przełączanie sprawdza się do przełączania par tranzystorów naprzemiennie, ze stałą czasową  $T_c$ .
- Gdy funkcja przełączająca osiąga 0, układ znajduje się w stanie ustalonym. Następuje to po czasie  $3T_c$ , czyli po trzykrotności stałej czasowej regulatora. Jest to **sterowanie łatwe do "ustawienia"**, bo jego dynamika sprawdza się tylko do tego parametru (przy zdefiniowanej funkcji przełączającej).
- **Algorytm sterowania jest bardzo prosty:** nie trzeba dobierać nastaw, ustalamy **tylko czas do ustalenia wartości zadanej**. Nie ma tu również regulatorów liniowych, w strukturze sterowania ślizgowego pojawiają się tylko proste operacje arytmetyczne i algebraiczne
- **Redukcja rzędu układu:** silnik to układ 2 rzędu. Przez zaprojektowanie regulatora ślizgowego z założoną dynamiką 1 rzędu, otrzymujemy wypadkowo dynamikę 1 rzędu - układ staje się układem inercyjnym.
- Sterowanie ślizgowe jest **sterowaniem odpornym. Niewrażliwość na zakłócenia i zmiany parametrów:** w przypadku regulatorów PI, mamy do czynienia ze stałymi czasowymi, w oparciu o które nastraja się regulator. Przy zmianie parametrów układów, stałe czasowe ulegają zmianie, co musi być kompensowane, żeby zachować pożdaną dynamikę układu. **W regulatorach ślizgowych nie ma nastaw** - są to regulatorzy sztywne - więc **dynamika nie zależy od parametrów obiektu sterowanego**.

#### Wady sterowania ślizgowego:

- Algorytm sterowania wymaga **różniczkowania sygnału wielkości sterowanej**, co powoduje wzmacnianie wszelkich szumów w układzie
- Sterowanie ślizgowe to **bezpośrednie sterowanie prędkością obrotową**. W najprostszym przypadku oznacza to, że **nie mamy kontroli nad prądem i momentem silnika**.
- **Chattering:** w związku z dwustanowym przełączaniem, w układzie występują **tętnienia prądu i momentu silnika**.
- **Brak członu całkującego** w układzie stwarza **ryzyko powstania uchybu ustalonego** odpowiedzi układu

- Przebieg trajektorii sterowania względem funkcji przełączającej powoduje, że w układach ze sterowaniem ślizgowym  
**częstotliwość przełączeń przekształtnika jest zmienna.**

#### Źródła

[1] Materiały i notatki z wykładu *Automatyka napędu elektrycznego - zagadnienia wybrane*



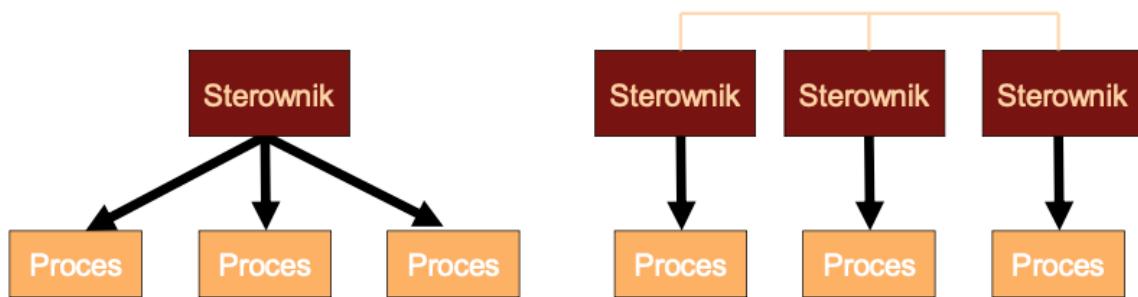
# 15. Automatyzacja procesów produkcyjnych

<input checked="" type="checkbox"/> Status	Zrobione
<input type="checkbox"/> Assign	

## ▼ a) struktury przemysłowych systemów sterowania

Wśród struktur przemysłowych systemów sterowania można wymienić:

- **sterowanie lokalne** - jest to indywidualne sterowanie procesem, w którym wykorzystuje się sterownik PLC na miejscu wykonywania procesu. Do wizualizacji można wykorzystać lokalne panele HMI.
- **sterowanie zintegrowane (rozproszone)** - sterowanie z jednego miejsca wielu urządzeń procesu przemysłowego, czyli jeden system obsługuje całą linię produkcyjną
- **sterowanie zdalne** - sterowanie stosowane w przypadku istnienia większych odległości między urządzeniem sterującym i sterowanym



Systemy sterowania lokalnego realizuje się w oparciu o pojedyncze sterowniki PLC.

Sterowanie rozproszone opiera się już na systemach typu SCADA i DCS:

- **SCADA** - *Supervisory Control And Data Acquisition* - system sterowania nadrzędnego i zbierania danych, który dopełnia i rozszerza możliwości sterowników, realizując w warstwie sterowania nadrzędnego takie funkcje jak komunikacja z urządzeniami obiektowymi (sterowniki, regulatory), zbieranie i przetwarzanie zmiennych procesowych i ich archiwizacji, tworzenie interfejsu operatora wraz z wizualizacją wartości mierzonych czy generowanie raportów, sygnałów alarmowych czy diagnostyki zasobów, komunikacji i redundancji
- **DCS** - *Distributed Control System* - system tego typu odpowiada za sterowanie i wizualizację procesu przemysłowego w oparciu o wspólną bazę danych (tagów) do sterowania i wizualizacji (w PLC i SCADA bazy te są rozdzielone); DCS jest przy tym bardzo skalowalny

Systemy typu DCS są dedykowane dla określonych obiektów sterowania (obiektów przemysłowych), opiera się o zaawansowane algorytmy takie jak sieci neuronowe, a przy tym ma wspólną bazę danych wizualizacji i sterowania, komponenty jednego producenta, dużą niezawodność i wymaganie co do nadzoru procesu.

SCADA dla odmiany to system elastyczny, uniwersalny i optymalizowany przede wszystkim dla algorytmów sterowania dyskretnego. Dopuszcza stosowanie urządzeń różnych producentów, przy czym PLC i SCADA mogą działać niezależnie od siebie.

## Źródła

- [1] Materiały z wykładu *Automatyka procesów produkcyjnych*
- [2] Materiały z wykładu *Automatyka procesów produkcyjnych - zagadnienia wybrane*

## ▼ b) sterowniki PLC - budowa, zasada działania i języki programowania

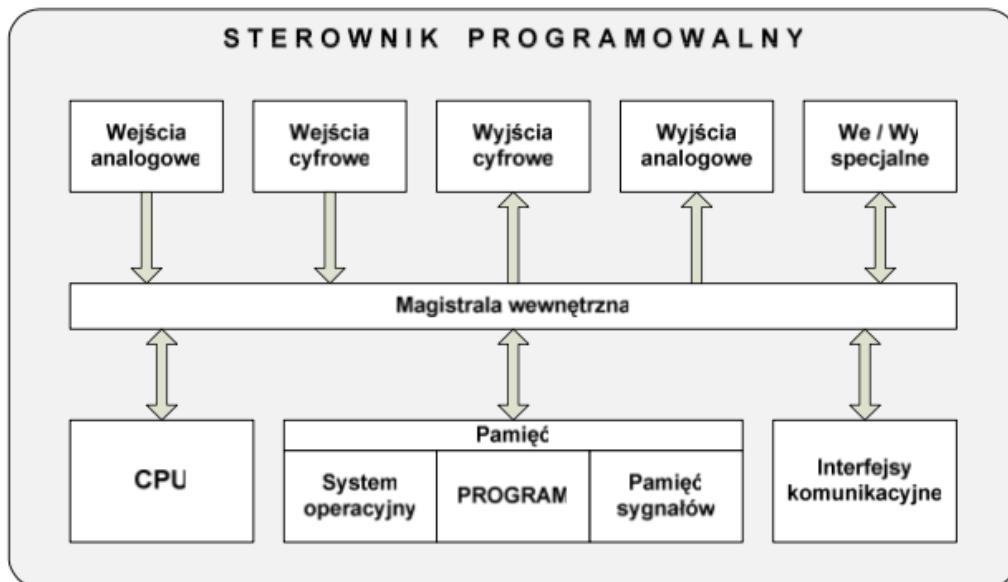
### Budowa sterowników PLC

Generalnie, wyróżnia się sterowniki **kompaktowe** oraz **modułowe**. Kompaktowe mają wszystkie elementy wymagane do pracy w jednej obudowie. Modułowe mają funkcjonalność taką, jaką moduły do nich dobrane.

Ogólnie, w podstawowej wersji sterownik PLC składa się z:

- **zasilacza** na ogólny 24 V lub 110VAC / 230 VAC o dużej sprawności

- **jednostki centralnej CPU:** mikroprocesor z systemem operacyjnym, pamięcią, programem, etc., co łącznie służy do wykonywania rozkazów. Mikroprocesory na ogół 8-, 16- i 32-bitowe. Pamięci RAM i EEPROM lub FLASH EPROM.
- **modułu wejść cyfrowych** - przetworniki C/C do obsługi sygnałów dyskretnych
- **modułu wyjść cyfrowych** - przetworniki C/C do zadawania sygnałów dyskretnych
- **modułu wejść analogowych** - przetworniki A/C do obsługi sygnałów ciągłych
- **modułu wyjść analogowych** - przetworniki C/A do zadawania sygnałów ciągłych
- **modułów komunikacyjnych:** interfejsy służące do komunikacji z innymi urządzeniami systemu sterowania w sieci przemysłowej, np. czujniki, urządzenia HMI, inne sterowniki, komputery, etc.
- **modułów specjalnych** do rozszerzenia możliwości urządzenia - np. moduły do pomiaru temperatury, szybkich liczników (np. 1MHz), generatorów PWM, pozycjonowania osi, precyzyjnych wejść analogowych, etc.



Rys.2.2. Schemat budowy typowego kompaktowego sterownika PLC.

## Zasada działania

Sterownik PLC działa zgodnie z programem zapisanym w pamięci. Taki program to ciąg rozkazów logicznych wykonywanych sekwencyjnie, jeden po drugim. Pojedynczy rozkaz to najmniejsza część programu sterującego i składa się z operacji określającej rodzaj wykonywanej funkcji oraz argumentów określających sygnały wejściowe i wyjściowe sterownika. Można tu wykonywać operacje logiczne i arytmetyczne, odczyt i zapis danych do i z pamięci.

Sterownik pracuje w cyklach, przy czym każdy z nich wygląda tak jak poprzedni:

- **inicjalizacja:** sprawdzenie poprawności obwodów i konfiguracji sprzętowej
- **odczyt sygnałów wejściowych:** sprawdzenie specjalnego obszaru pamięci pod kątem nowych danych
- **wykonanie programu użytkownika:** przetwarzanie instrukcji programu sterującego i zapisanie nowych stanów wyjść do specjalnej części pamięci
- **zapis sygnałów wyjściowych sterownika:** pobranie z pamięci stanów wyjść i ich aktualizacja
- **obsługa komunikacji:** jeżeli sterownik komunikuje się sieciowo z czymś z zewnątrz, to właśnie w tym etapie pracy
- **autodiagnostyka:** sprawdzenie poprawności działania sterownika, np. poprzez sprawdzenie wartości napięcia zasilania, stanu baterii pamięci itp.



Rys.2.1. Cykl pracy sterownika PLC.

## Języki programowania

Języki programowania sterowników PLC dzieli się na graficzne i tekstowe.

Wśród języków tekstowych można wymienić:

- **IL:** *Instruction List* - język niskopoziomowy składający się z zestawu instrukcji takich jak operacje logiczne i arytmetyczne, funkcje czasowe i licznikowe,

operacje poróΣnania i transferu danych. Jest to język podobny do asemblera, bardzo wydajny.

- **ST:** *Structured Text* - język wysokopoziomowy, podobny do Basica czy Pascala. Pozwala na używanie wyrażeń i instrukcji takich jak IF ELSE, zamiast operatorów zorientowanych maszynowo jak OR XOR.

Wśród języków graficznych można wymienić:

- **FBD:** *Functional Block Diagram* - język graficzny wzorowany na schematach ideowych stosowanych w elektronice, gdzie pokazany jest przepływ sygnałów i topologia połączeń układów scalonych. Charakterystyczne elementy języka to bloki i elementy sterujące (łączniki), oparte o przepływ sygnałów.
- **LD:** *Ladder Diagram* - język graficzny, który opiera się na symbolach elektrycznych układów sterowania w technice stykowo-przekaźnikowej. Podstawowymi elementami są styki, przedstawiające wartości logiczne sygnałów wejściowych i zmiennych boolowskich oraz dwustanowe wyjścia, odzwierciedlające cewki przekaźnika. Wykorzystuje się tu też bloki funkcyjne takie jak liczniki, komparatory, etc.

## Źródła

[1] M. Pawlak - *Sterowniki Programowalne*

## ▼ c) systemy komunikacyjne w automatyce przemysłowej

### Ogólny podział

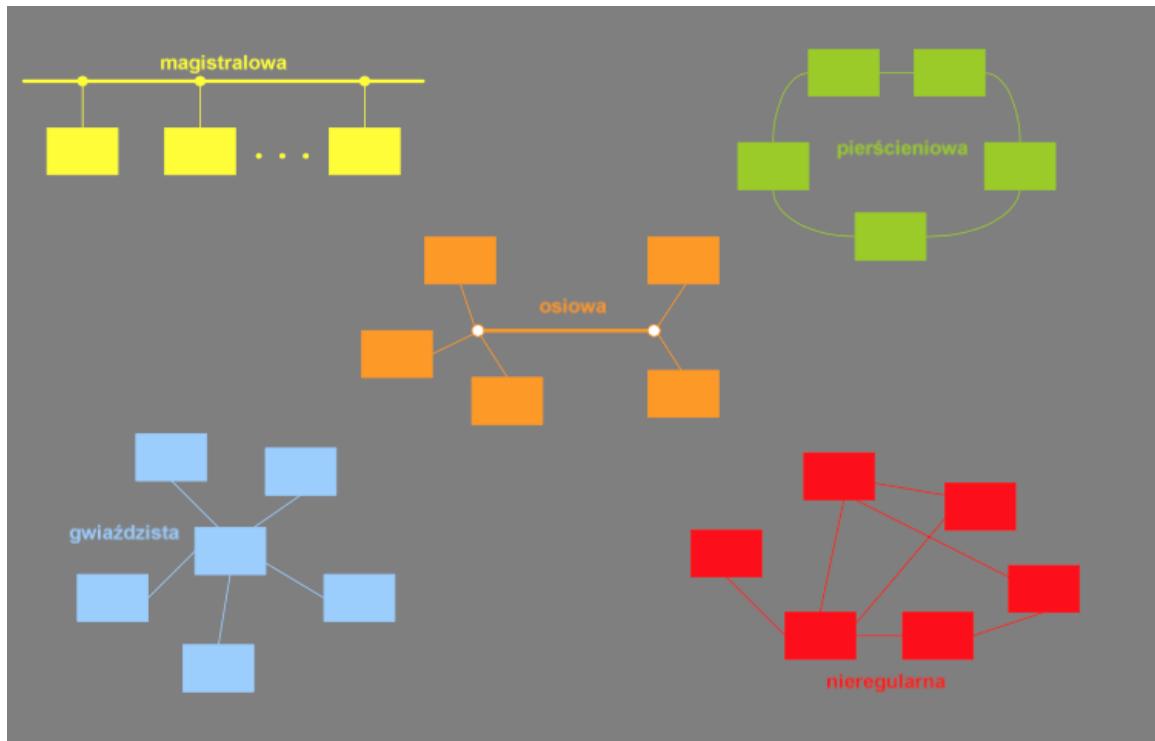
Sieci komunikacyjne można podzielić **ze względu na rozmiar** na:

- **sieci lokalne (LAN)**, o zasięgu kilku kilometrów
- **sieci metropolitalne (MAN)**, obejmujące obszar od kilkunastu do kilkudziesięciu kilometrów, na ogólny zespół miejski
- **sieci rozległe (WAN)**, obejmujące swym zasięgiem region, kraj lub cały świat.

Wśród **topologii sieci** można wyróżnić:

- magistralowe
- pierścieniowe
- osiowe

- gwiazdiste
- nieregularne



**Sieci przemysłowe** to specyficzna grupa sieci lokalnych, w których postawiony jest nacisk na wysoką **niezawodność i przewidywalność** przebiegu komunikacji. W takich sieciach nacisk nie jest stawiany na przepustowość łącz, lecz na terminowość przekazu informacji - ze względu na konieczność szybkiego reagowania układów sterowania na zmiany odczytów czujników itp.

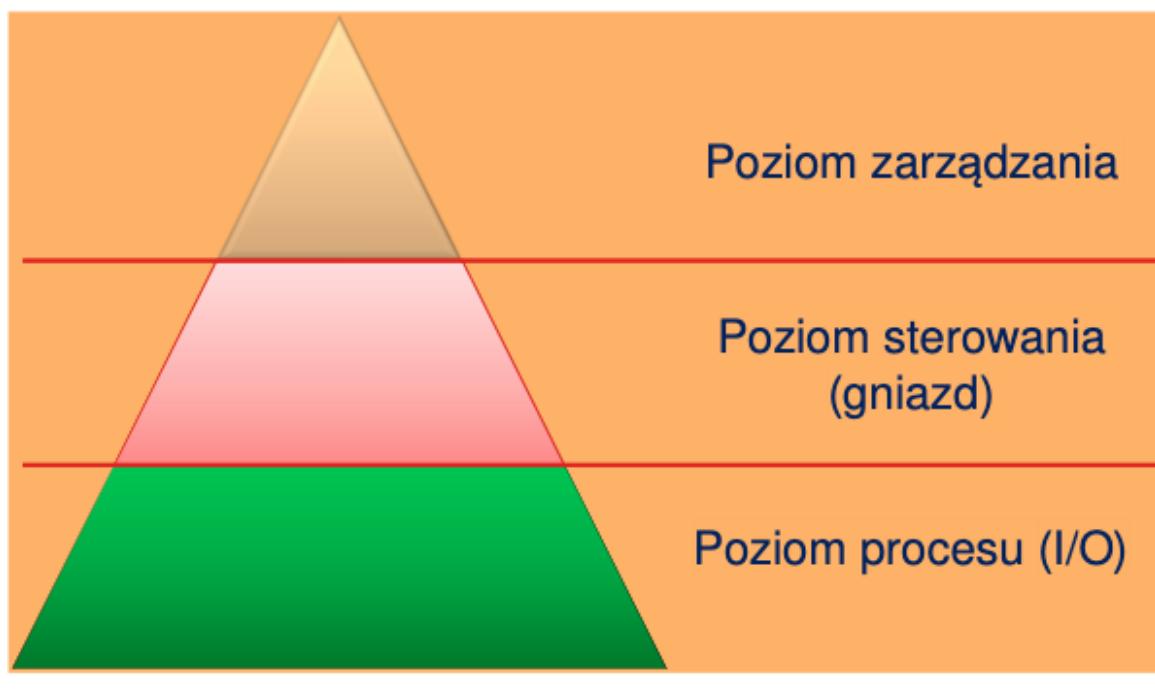
Połączenie ze sobą kilku standardowych sieci przemysłowych może doprowadzić do powstania sieci rozległej o nieregularnej strukturze.

## Warstwy sieci

Sieci komunikacyjne można dzielić na warstwy zgodnie z modelem warstwowym Fieldbus. W przypadku sieci przemysłowych, wygodnym podziałem jest podział analogiczny do sieci TCP/IP lub ISO/OSI, w którym wyróżnia się trzy warstwy:

- **poziom czujników i elementów wykonawczych [Sensor / Actuator Level]**
  - należą do niego wszelkiego rodzaju czujniki (przyciski, przełączniki, czujniki indukcyjne, pojemnościowe, enkodery, etc.) oraz elementy wykonawcze (zawory, lampki, generatory akustyczne, proste napędy). Komunikację optymalizuje się pod kątem bitowego przesyłu informacji (zera i jedynki).

- **poziom sterowania [Device Level]** - należą do niego bardziej skomplikowane czujniki i elementy wykonawcze oraz moduły o 8 lub więcej modułach I/O, np. skanery i czytniki kodów, przetworniki ciśnienia, temperatury, przepływu, napędy z reg. prędkości stacje operatorskie. Przepływ informacji zachodzi tu domyślnie w bajtach (1 bajt = 8 bitów).
- **poziom zarządzania [Field Level]** - urządzenia na tym poziomie to wyspy urządzeń automatyki, na tym poziomie też łączy się je między sobą i podłącza do większych jednostek. Wymiana danych idzie w sposób blokowy, czyli całych pakietach (32- lub 64- bajty); na tym poziomie często zachodzi przesył danych między poziomem sterowania a poziomami nadzrodnymi, jak np. ERP, MIS czy sieciami biurowymi.



## Protokoły

Każdy poziom sieci charakteryzuje się swoimi własnymi protokołami, podobnie jak w sieciach internetowych. Jako przykłady można wymienić tu kolejno:

- **poziom czujników i elementów wykonawczych:** Seriplex, AS-Interface
- **poziom sterowania:** CANOpen, DeviceNet, Device WorldFIP, InterBus, PRoFiBus, SDS, Modbus
- **poziom zarządzania:** ControlNet, FF (Fieldbus), P-Net, ProfiNet Profibus FMS, WorldFIP.

Protokoły komunikacyjne są określone normą IEC61158 i przypisane dla konkretnych warstw sieci w modelu OSI.

## Źródła

- [1] Materiały z wykładu *Automatyka procesów produkcyjnych*
- [2] Materiały z wykładu *Automatyka procesów produkcyjnych - zagadnienia wybrane*

## ▼ d) analogowe i cyfrowe interfejsy w przemysłowych systemach pomiarowo-sterujących

### Podstawowe definicje

**Interfejs** - urządzenie pozwalające na połączenie ze sobą dwóch lub więcej urządzeń, które bez niego nie mogłyby ze sobą współpracować. Interfejsem może być gniazdo lub kabel, może być też inne urządzenie.

Gniazdo na płycie głównej komputera jest interfejsem, w który wkłada się np. kartę graficzną, ale i sama karta jest również interfejsem umożliwiającym współpracę monitora z resztą systemu komputerowego. Idąc dalej, monitor jako całe urządzenie to także interfejs, bo posiada swój własny interfejs w postaci ekranu, który połączony jest bezprzewodowo z patrzącym na niego użytkownikiem posiadającym interfejs w postaci narządu wzroku. Potencjometry sterujące monitorem, a obecnie coraz częściej panel sterujący z przyciskami, to drugi, obok ekranu, interfejs monitora.

**System pomiarowo-sterujący** - zestaw współpracujących urządzeń pomiarowych i sterujących współpracujących ze sobą w celu zbierania, porównywania, rejestracji i przetwarzania sygnałów o mierzonych wielkościach fizycznych w celu określenia stanu obiektu i zmiany sterowanych wielkości.

W celu standaryzacji parametrów wejściowych i wyjściowych aparatury, stosuje się standardowe sygnały pomiarowe i kontrolne - analogowe lub cyfrowe. Wśród sygnałów analogowych można wymienić **sygnały napięciowe** (0-10 V, +- 15V, +- 5V) oraz **sygnały prądowe** (0-20 mA, 4-20 mA). Na ogół sygnały prądowe stosowane są częściej, ze względu na mniejsze zakłócenia.

### Interfejsy szeregowe

Wśród interfejsów szeregowych można wymienić takie interfejsy jak RS-232C, RS-449, RS-422A, RS-423A, RS-530, RS-485, HART, IEC 1158-2, PROFIBUS, MicroLAN, CAN.

## **Interfejsy równoległe**

Interfejsy równoległe oferują większą prędkość transmisji niż interfejsy szeregowe. Dane są przesyłane w wielobitowych słowach, bez konieczności stosowania podziału strumienia bitów na słowa z dodatkowymi funkcjami kontrolnymi i korekcyjnymi.

Wśród interfejsów równoległych można wymienić: Centronics (IEEE 1284), IEC-625.

## **Interfejsy analogowe**

Wśród interfejsów analogowych trudno wymienić jakieś rozsądne opcje. Na ogół analogowe sygnały są przetwarzane przez odpowiednie przetworniki na sygnały cyfrowe i poddawane obróbce w takiej formie, stąd interfejsy analogowe są często raczej czujnikami i fizycznymi elementami układu.

Do interfejsów analogowych systemów przemysłowych można zaliczyć również te elementy, które odpowiadają za interakcje na linii użytkownik-urządzenie, czyli klawiatury, ekrany, przyciski, pokrętła itp.

## **Interfejsy cyfrowe**

Interfejsy cyfrowe służą najczęściej do komunikacji i przesyłania danych między urządzeniami.

Interfejsy te można dzielić na **synchroniczne** oraz **asynchroniczne**. W przypadku **synchronicznej komunikacji**, poszczególne bity czy słowa wysyłane są w **równych przedziałach czasu**, co może sprawić że informacje zostaną utracone przy desynchronizacji. W **transmisji asynchronicznej**, dane są wysyłane w **nierównych odstępach czasu**, przy czym pojawiają się **bloki początku i końca transmisji**. Jest to częściej stosowana metoda transmisji.

Interfejsy cyfrowe można też dzielić na **szeregowe i równoległe**. Transmisja szeregową to przesyłanie danych bit po bicie zgodnie z taktami zegara synchronizującego. Transmisja równoległa to przesyłanie ciągu słów (długość słowa zależy od standardu) kolejno słowo po słowie synchronicznie - bity są wysyłane równolegle.

Interfejsy cyfrowe w systemach przemysłowych wykorzystuje się głównie do przesyłu informacji między urządzeniami w ramach różnych sieci przemysłowych.

## **Transmisja bezprzewodowa**

Do transmisji na małe odległości można stosować również inne interfejsy, takie jak Bluetooth, IRDA czy ZigBee. Na większe odległości dane przesyła się z zastosowaniem interfejsów takich jak WLAN (systemy radiowe), GSM/GPRS czy inne sieci komórkowe takie jak EDGE, HSDPA, LTE i 5G.

## **Wybrane interfejsy i protokoły**

### **RS-232C**

Interfejs szeregowy RS-232C to zdefiniowany sposób połączenia dwóch urządzeń końcowych. Urządzenia są połączone z linią telefoniczną poprzez modem.

### **MicroLAN**

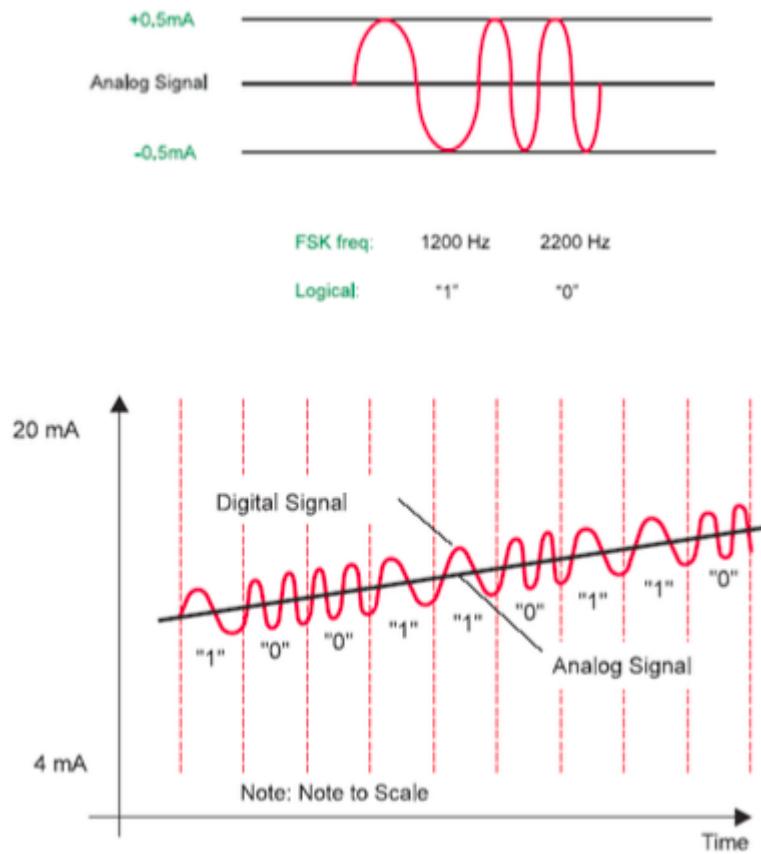
W tym systemie możliwa jest komunikacja między jednym układem master (komputer, mikrokontroler) i wieloma elementami slave (czujniki itp.). System MicroLAN składa się z układu nadzawanego, oprogramowania, połączeń i zespołu elementów typu slave (w tym przetworniki, czujniki, układy pamięci). Linia MicroLAN jest sterowana przez interfejs RS-232C.

### **PROFIBUS**

PROFIBUS (Process Field Bus) to rodzina lokalnych sieci przemysłowych w trzech wersjach, zależnie od warstwy sterowania. W standardzie PROFIBUS DP lub FMS jako warstwę fizyczną stosuje się sieć RS-485. Długość kabla (100-1200m) zależy od szybkości transmisji (9,6 - 1500 kbit/s).

### **HART**

Hart to protokół komunikacyjny oparty o standard 4-20 mA. Służy głównie do zmiany nastaw i diagnostyki. W protokole tym jeden cykl 1200 Hz oznacza binarne 1, dwa cykle 2200 Hz - binarne 0. Na sygnał analogowy prądu nakładany jest sygnał cyfrowy komunikacyjny i tak złożona informacja jest przesyłana dalej. Sygnały są tu analogowe.



## AS-Interface

Actuator Sensor Interface to otwarty standard łączący punkty binarne. Służy głównie do kontroli czujników, elementów wykonawczych i urządzeń wejściowo-wyjściowych. Dystans działania takiej sieci ASI to ok. 300 m. Jednym kablem 2-żyłowym dostarczane jest zasilanie oraz transmisja danych.

## CAN

*Controlled Area Network* to sieć o różnych zastosowaniach, zależnie od standardu. Sieci CAN występują w różnych strukturach (linearna, gwiazdzista, pierścieniowa) i służą do transmisji sygnałów między urządzeniami. Sterowniki muszą posiadać blok przetwarzający przesyłane informacje (kontroler CAN) oraz układ nadawczo-odbiorczy. Odpowiadają one za nadawanie danym konkretnej postaci i komunikacji z magistralą. Magistrala to dwa przewody (high i low) złączone w skrętkę. Bity są przesyłane tak, by były symetryczne względem siebie.

Elementy podłączone do magistrali CAN nazywa się modułami lub węzłami. Cechą CAN są duża szybkość transmisji danych uzależniona od długości magistrali, duża odporność na zakłócenia oraz elastyczność systemu co do

liczby podłączonych elementów. CAN wymaga użycia czujników wyposażonych w wyjścia cyfrowe.

### **EtherCAT**

W tym interfejsie sieci komunikacyjnej węzeł master wysyła ramkę ethernetową do wszystkich slave'ów. Ramka jest interpretowana przez każdy odbiornik pod kątem tego, czy jakieś dane zostały wysłane do niego. Jeżeli tak, fragment ramki jest odczytywany i przesyłana jest informacja zwrotna potwierdzająca odbiór.

Sieci EtherCAT pracują w logicznej topologii pierścienia

### **Centronics (IEEE-1284)**

Interfejs Centronics służy na ogół do połączenia drukarek z komputerami i przesyłania danych w obydwu kierunkach. Jest on jednak używany też w urządzeniach pomiarowych (oscyloskopy, analizatory widma) i pozwala na wysyłanie danych do drukarki bez komputera.

### **DeviceNet**

Ten protokół jest oparty o technologię CAN. Komunikuje on ze sobą urządzenia przemysłowe takie jak wyłączniki krańcowe, czujniki fotoelektryczne, zawory wielodrożne, rozruszniki silników, przyciski sterujące, czytniki kodów kreskowych, przemienniki częstotliwości, panele operatorskie itp.

DeviceNET wymaga niskiej szerokości pasma, bo ma mały format ramki, co jest zaletą. Wymaga dzięki temu mniejszego procesora.

### **Ethernet/IP**

Protokół ten opiera się o dwa rodzaje wiadomości: diagnostyczne i konfiguracyjne przesyłane protokołem TCP, oraz dane przesyłane w czasie rzeczywistym, UDP. Ethernet/IP pozwala na priorytetyzację przesyłanych pakietów i synchronizację zegarów czasu rzeczywistego w rozproszonych systemach. Do synchronizacji wykorzystywany jest protokół PTP, precyzyjnie synchronizujący czas do najważniejszego zegara w sieci.

## **Źródła**

- [1] Materiały z wykładu *Automatyka procesów produkcyjnych*
- [2] Materiały z wykładu *Automatyka procesów produkcyjnych - zagadnienia wybrane*
- [3] Robert Czabanowski - *Sensory i systemy pomiarowe*
- [4] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Interfejs\\_\(urz%C4%99dzenie\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Interfejs_(urz%C4%99dzenie))

[5] M. Pawlak - *Sterowniki Programowalne*