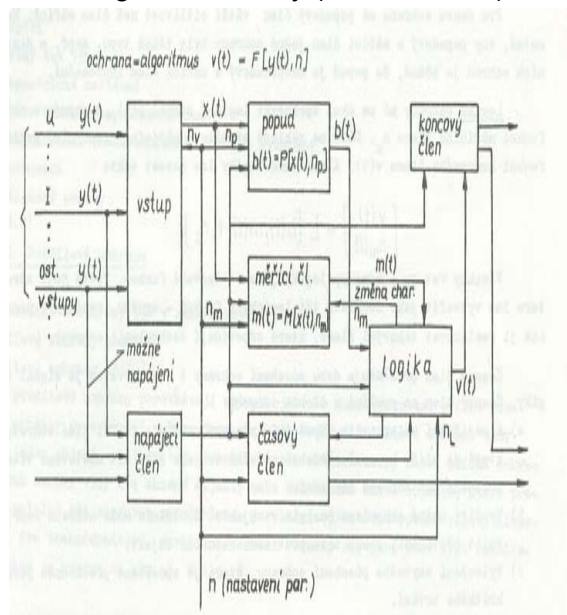


## ELEKTRICKÉ OCHRANY

| Rozdělení ochran      |                         |                     |
|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| podle druhu poruchy:  | Podle principu činnosti | Podle času působení |
| - zkratové,           | - proudové,             | okamžité            |
| - při přetížení,      | - distanční,            | - časové nezávislé, |
| - nadpětíové,         | - napětíové,            | - časové závislé.   |
| - podpětíové,         | - porovnávací,          |                     |
| - při zem. spojení,   | - wattové,              |                     |
| - při zpětném výkonu, | - reaktanční,           |                     |
| - při ztrátě buzení,  | - frekvenční,           |                     |
| - při nesymetrii      | - při nesymetrii        |                     |
| - frekvenční          |                         |                     |

## Etapy vývoje:

- klasické elektromechanické ochrany (1921 -1960),
- elektronické ochrany ( 1970 - 1980),
- digitální ochrany ( 1974 -dosud).



### Základní členy klasických analogových ochran

## POŽADAVKY NA OCHRANY

|              |                   |          |
|--------------|-------------------|----------|
| Spolehlivost | Selektivita       | Rychlost |
| Citlivost    | Rychlost působení | Přesnost |

▪ **Spolehlivost** – schopnost vykonávat operace podle daného algoritmu ochrany v stanoveném čase s požadovanými parametry a splnit všechny technické podmínky z pohledu chráněného objektu.

▪ **Selektivita** - schopnost vypnout jen poškozenou oblast

**metody:**

-časovým odstupňovaní

(ochrana nejbližší k místu poruchy působí nejrychleji a ostatní ochrany působí postupně s nastaveným časovým zpožděním. ( pevně daný, čas je závislý na inverzi poruchového. proudu.

-amplitudové nebo fázové porovnání proudů na koncích chráněného úseku (aplikované v rozdílových a porovnávacích ochranách),

- určení směru toku výkonu na stranách chráněného úseku

▪ **Rychlost působení ochrany** – doba působení ochrany od identifikace poruchy až po vyslání vypínacího povelu .

Časy působení elektrických ochran:

elektromechanické ochrany časy > 20 ms,

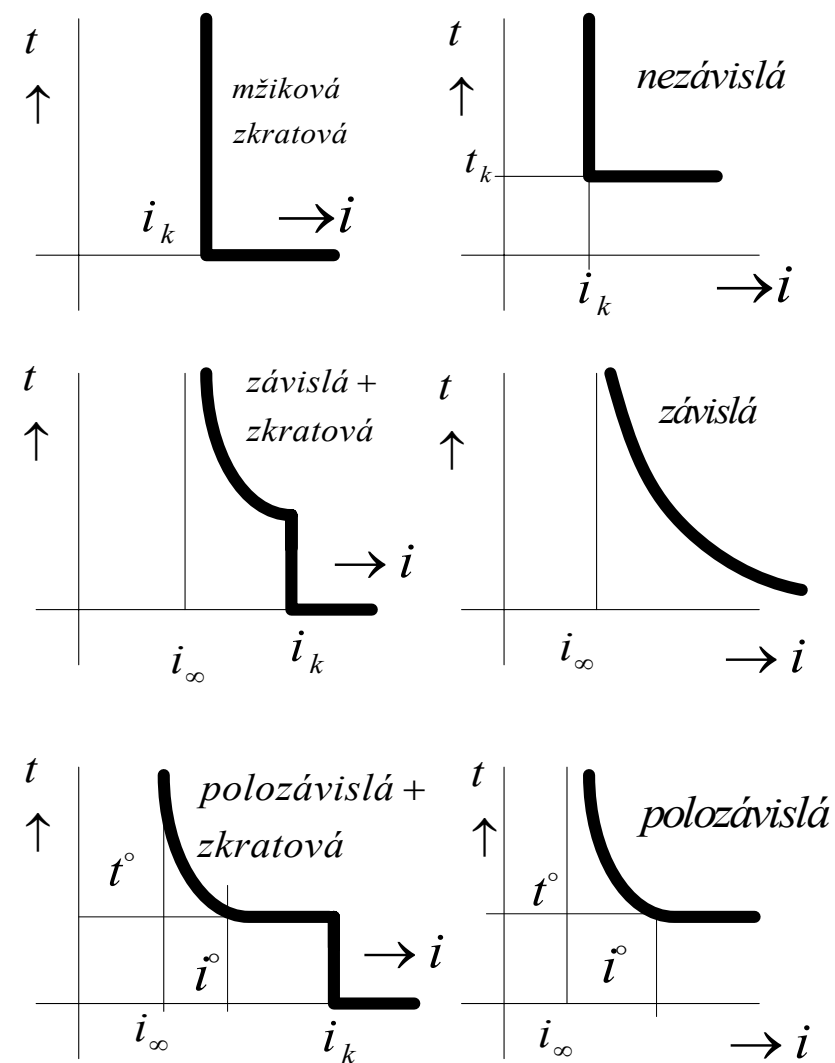
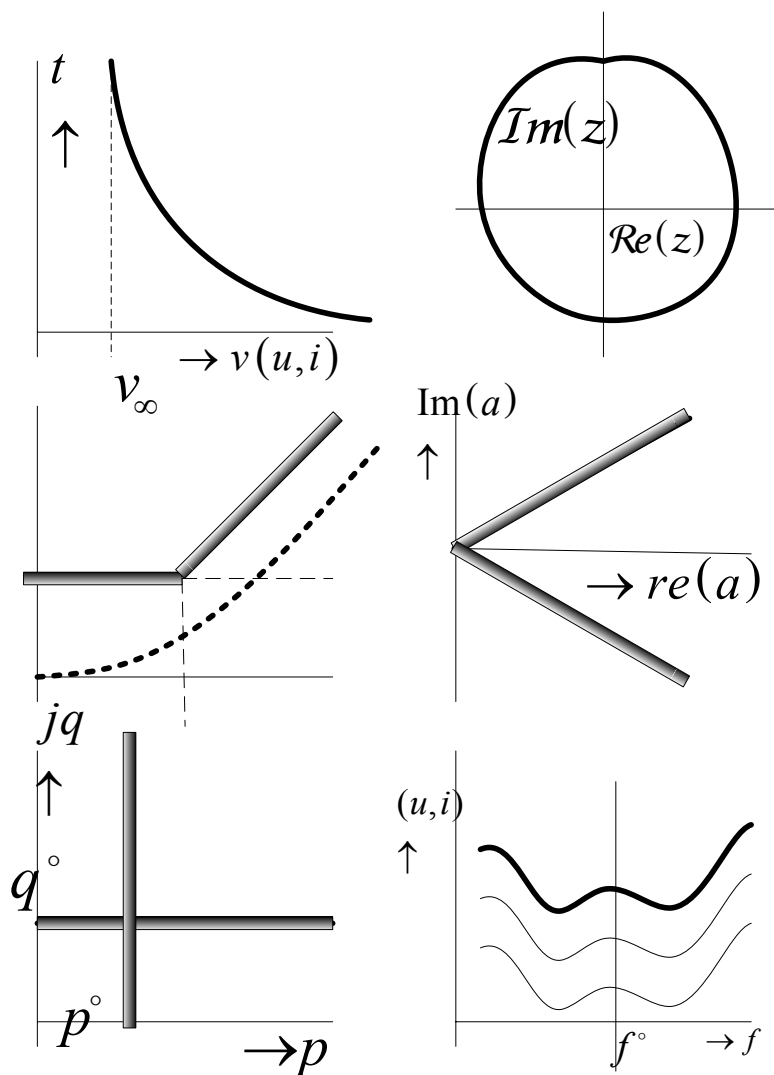
elektronické ochrany 10 - 15 ms,

digitální ochrany je krátký a závisí na SW a HW.

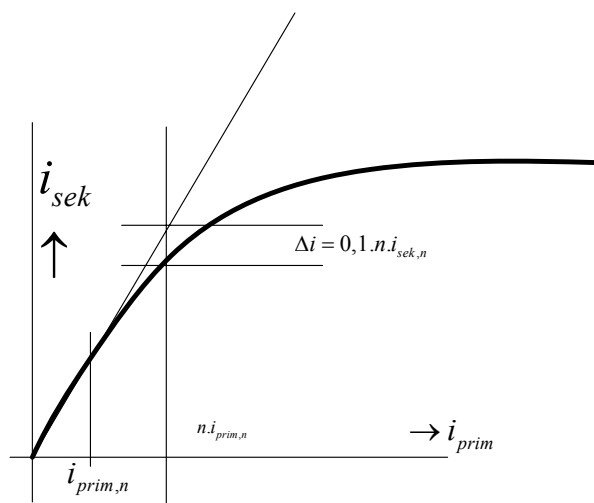
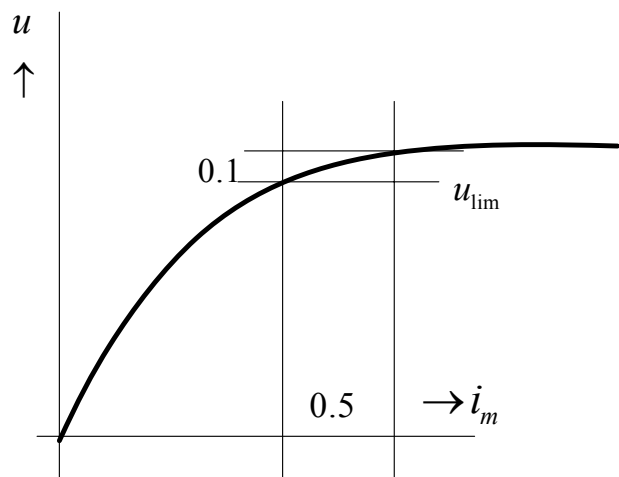
vlínové ochrany < 5 ms.



## Charakteristiky a kriteria chránění



## Měřicí transformátory proudu

*Použité  $\mathcal{L}$  obrazy:*

*konvoluce:*  $G(s)U(s) = \mathcal{L}\{g(t) \otimes u(t)\} =$   
 $= \mathcal{L}\left\{\int_0^t u(t-\lambda)g(\lambda)d\lambda\right\} = \mathcal{L}\left\{\int_0^t u(\lambda)g(t-\lambda)d\lambda\right\}$

*harmonická funkce:*

$$\mathcal{L}\{U \cdot \cos(\omega t + \beta)\} = \frac{U \cdot \cos\langle\beta\rangle \cdot s + U \cdot \sin\langle\beta\rangle \omega}{s^2 + \omega^2} =$$

$$= \mathcal{L}\{M \cdot e^{\alpha t} \cos\langle\omega t\rangle + N \cdot e^{\alpha t} \sin\langle\omega t\rangle\} = \frac{M \cdot (s + \alpha) + N \cdot \omega}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} =$$

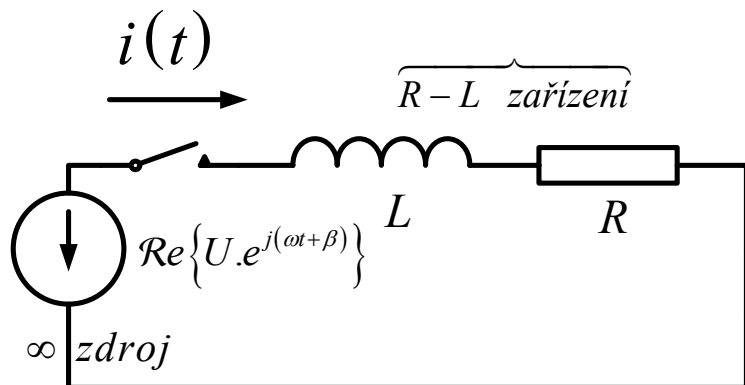
$$= \mathcal{L}\{e^{\alpha t} A \cdot (\cos\langle\omega t\rangle + \sin\langle\omega t\rangle)\} = \mathcal{L}\{e^{\alpha t} A \cdot \cos\langle\omega t + \beta\rangle\}$$

$$A \cdot \sin\langle\beta\rangle = N, \quad A \cdot \cos\beta = M$$

*věta o derivaci:*  $\mathcal{L}\{f'(t)\} = s \cdot \mathcal{L}\{f(t)\} - f(0_+)$

## Přechodné jevy v R-L obvodech

## 1.Lineární L



$$U \cdot \cos(\omega t + \beta) = u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot i'(t),$$

$$u(s) = L \cdot i(s) \cdot (s + 1/\tau) - L \cdot i(0_+), \quad \tau = L/R$$

$$i(s) = \frac{(1/L) \cdot u(s) + i(0_+)}{(s + 1/\tau)} = \frac{(U/L) \cdot (\cos\langle\beta\rangle \cdot s + \sin\langle\beta\rangle \cdot \omega) + i(0_+)}{(s + 1/\tau) \cdot (s^2 + \omega^2)}$$

$$i(s) = \frac{(U/L) \cdot (-\cos\langle\beta\rangle \cdot (1/\tau) + \sin\langle\beta\rangle \cdot \omega) + i(0_+)}{(s + 1/\tau)(1/\tau^2 + \omega^2)} +$$

$$+ \frac{(U/L) \cdot (-\cos\langle\beta\rangle \cdot j\omega + \sin\langle\beta\rangle \cdot \omega) + i(0_+)}{(s + j\omega) \cdot (-j\omega + 1/\tau)} +$$

$$+ \frac{(U/L) \cdot (\cos\langle\beta\rangle \cdot j\omega + \sin\langle\beta\rangle \cdot \omega) + i(0_+)}{(s - j\omega) \cdot (j\omega + 1/\tau)} =$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad \zeta = \arg(Z) = \arccos(R/Z) = \arcsin(\omega L/Z)$$

úprava :

$$\frac{(U/L) \cdot (-\cos\langle\beta\rangle \cdot (1/\tau) + \sin\langle\beta\rangle \cdot \omega)}{(s + 1/\tau)(1/\tau^2 + \omega^2)} = \frac{-U \cdot R \cos\langle\beta\rangle + \omega L U \sin\langle\beta\rangle}{\{R^2 + (\omega L)^2\}(s + 1/\tau)} =$$

$$\frac{U}{Z} \left[ \frac{-\cos\langle\zeta\rangle \cos\langle\beta\rangle + \sin\langle\zeta\rangle \sin\langle\beta\rangle}{s + 1/\tau} \right] = -\frac{U}{Z} \frac{\cos(\beta + \zeta)}{s + 1/\tau}$$

$$\frac{i(0_+)}{(s + 1/\tau)(1/\tau^2 + \omega^2)} = \frac{L^2 i(0_+)}{(s + 1/\tau)(R^2 + \omega^2 L^2)} = \frac{i(0_+) \cdot \sin^2\langle\zeta\rangle / \omega^2}{(s + 1/\tau)}$$

$$\frac{(U/L) \cdot (-\cos\langle\beta\rangle \cdot j\omega + \sin\langle\beta\rangle \cdot \omega)}{(s + j\omega) \cdot (-j\omega + 1/\tau)} = \frac{-j\omega e^{j\beta} U}{(s + j\omega)(R - j\omega L)}$$

$$\frac{(U/L) \cdot (\cos\langle\beta\rangle \cdot j\omega + \sin\langle\beta\rangle \cdot \omega)}{(s - j\omega) \cdot (j\omega + 1/\tau)} = \frac{j\omega e^{j\beta} U}{(s - j\omega)(R + j\omega L)}$$

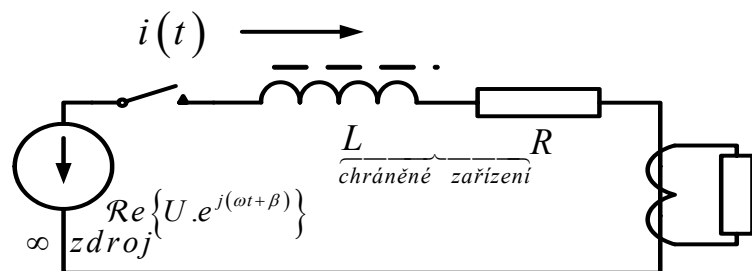
$$\frac{j\omega e^{j\beta} U \{-(s - j\omega)(R + j\omega L) + (s + j\omega)(R - j\omega L)\}}{(s^2 + \omega^2)(R^2 + \omega^2 L^2)} =$$

$$= \frac{j\omega e^{j\beta} U}{Z^2} \{-(s - j\omega)(R + j\omega L) + (s + j\omega)(R - j\omega L)\}$$

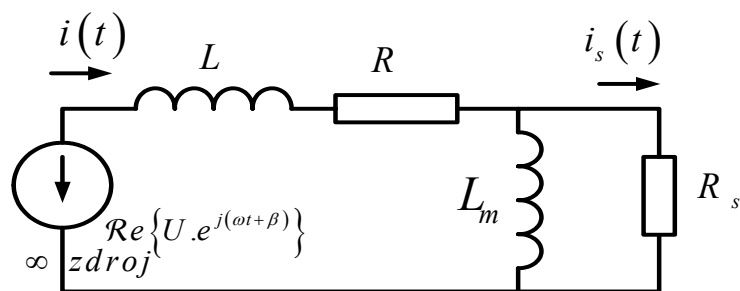
$$= \frac{-\omega^2 \cdot e^{j\beta} \cdot U}{Z} 2 \cos\langle\zeta\rangle \frac{\{1 - \tau \cdot s\}}{s^2 + \omega^2}$$

## Požadavky na měřicí obvody.

$$\tau_{p\dot{u}s} \begin{cases} < L/R \dots \text{rychlé chrany (měřit kvalitně přech.stavy)} \\ > L/R \dots \text{pomalé chrany (měřit kvazi-ustálené stavy)} \end{cases}$$



režim : zkrat

měření  $I$ trafo  $I$  $R_s$ ...zátěž měření (ochrany + spoje)

## Přenos v přechodných stavech.

$$u(t) = R.i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = \mathcal{Re}\{U.e^{j(\omega t + \beta)}\}, \quad \tau = L/R$$

$$\mathcal{L}\{U.e^{j(\omega t + \beta)}\} = i(s).(sL + R) = L.i(s)(s + 1/\tau),$$

$$i(s) = \frac{\mathcal{L}\{U.e^{j(\omega t + \beta)}\}}{L(s + 1/\tau)} = \frac{1}{L} \mathcal{L}\{U.e^{j(\omega t + \beta)}\} \mathcal{L}\{e^{-1/\tau}\}$$

$$i(t) = \frac{Ue^{j\beta}}{L} \int_0^t e^{j(\omega t - \lambda)} e^{-1/\tau} d\lambda = \frac{Ue^{j(\omega t + \beta)}}{L} \int_0^t e^{-(j\omega + 1/\tau)\lambda} d\lambda$$

$$\hat{Z} = R + j\omega L, \hat{I}^\circ = \frac{U.e^{j\beta}}{\hat{Z}} = \frac{U.e^{j(\beta - \zeta)}}{Z}$$

$$i(t) = \mathcal{Re}\{\hat{I}^\circ (e^{j\omega t} - e^{-1/\tau})\}$$

volná složka proudu :

$$i_{ss}(t) = -\frac{U}{Z} \cos(\beta - \zeta) e^{-t/\tau}, \zeta = \arg\{\widehat{Z}\} = \arctg\left(\frac{L}{R}\right)$$

$$L \gg R \Rightarrow \zeta \doteq \frac{\pi}{2} \Rightarrow \beta \text{ pro } i_{ss,\max} = (\beta - \zeta = 0), \beta = \frac{\pi}{2}$$

řešení transportu volné složky proudu I  $\rightarrow$  II :

$$L_m \dot{i}_m - R_T i_T = 0, \tau_T = \frac{L_m}{R_T}$$

$$sL_m i_m(s) - R_T i_T(s) = 0 \Rightarrow i_m(s) = \frac{R_T}{sL_m} i_T(s)$$

$$i(s) = i_m(s) + i_T(s) = i_T(s) \left(1 + 1/\langle s \cdot \tau_T \rangle\right) = i_T(s) \frac{1 + s \cdot \tau_T}{s \cdot \tau_T}$$

$$i_T(s) = \left( \frac{s}{s + (1/\tau_T)} \right) i(s)$$

$$f(t) = i(t) \otimes e^{-\frac{t}{\tau_T}}$$

$\Uparrow$  příznak konvoluce

$$f(t) = I^\circ \int_0^t \left( e^{j\omega(t-\lambda)} - e^{-\frac{(t-\lambda)}{\tau}} \right) e^{-\frac{\lambda}{\tau_T}} d\lambda$$

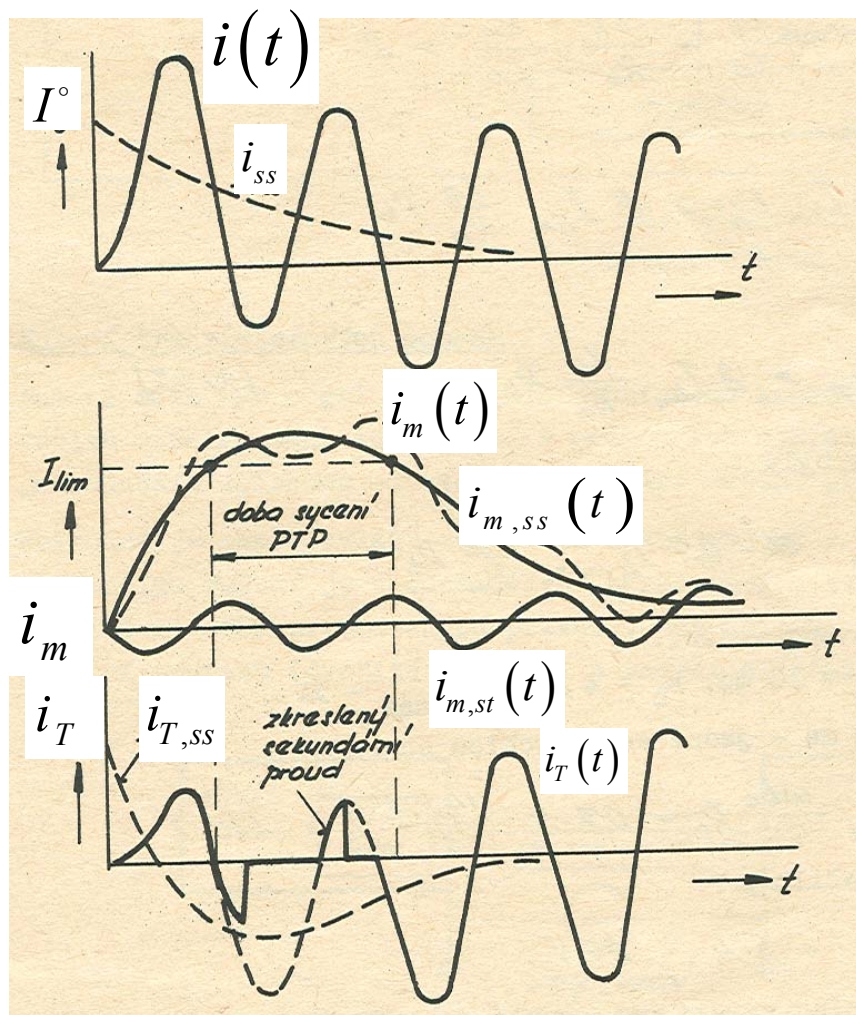
$$f(t) = I^\circ \left\{ \int_0^t e^{-j\omega\left(t+\frac{1}{\tau_T}\right)\lambda} - e^{-\frac{t}{\tau}} e^{-\left(\frac{1}{\tau_T}-\frac{1}{\tau}\right)\lambda} \right\} d\lambda$$

$$f(t) = I^\circ \left\{ \tau_T \frac{e^{j\omega t} (1 - e^{-\left(j\omega + \frac{1}{\tau_T}\right)t})}{1 + j\omega\tau_T} + \tau \cdot \tau_T \frac{-e^{-\frac{t}{\tau}} \left[ e^{-\left(\frac{1}{\tau_T}-\frac{1}{\tau}\right)t} - 1 \right]}{\tau - \tau_T} \right\}$$

$$f(t) = I^\circ \left\{ \tau_T \frac{e^{j\omega t} - e^{-\frac{t}{\tau_T}}}{1 + j\omega\tau_T} + \tau \cdot \tau_T \frac{e^{-\frac{t}{\tau_T}} - e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau - \tau_T} \right\}$$

$$i_T(t) = f^\bullet(t) = I^\circ \left\{ \frac{j\omega\tau_T e^{j\omega t} - e^{-\frac{t}{\tau_T}}}{1 + j\omega\tau_T} + \frac{\tau_T e^{-\frac{t}{\tau_T}} - \tau e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau - \tau_T} \right\}$$

$$i_m(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^t i_T(\lambda) d\lambda = I^\circ \underbrace{\frac{e^{j\omega t} - e^{-\frac{t}{\tau_T}}}{1 + j\omega\tau_T}}_{\approx i_{m,st}} + I^\circ \underbrace{\frac{\tau \left( e^{-\frac{t}{\tau_T}} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)}{\tau - \tau_T}}_{\approx i_{m,ss}}.$$

**Požadavky na parametry:**

$$\frac{1}{\omega\tau_T} \ll \frac{\tau}{\tau - \tau_T} \Rightarrow i_{m,st} < i_{m,ss}$$

maximum  $i_{m,ss}$ 

$$i_{m,st} \cdot = 0, \left( -\frac{t_{ss}}{\tau_T} e^{-\frac{t_{ss}}{\tau_T}} + \frac{t_{ss}}{\tau} e^{-\frac{t_{ss}}{\tau}} \right) = 0 \Rightarrow t_{ss} = \frac{\tau\tau_T}{\tau - \tau_T} \ln \frac{\tau}{\tau_T}$$

$$\text{pro } \frac{\tau_T}{\tau} > 2 \Rightarrow I_{\lim} > I_{m,\max} = 0.7 I^\circ \frac{\tau}{\tau_T}$$

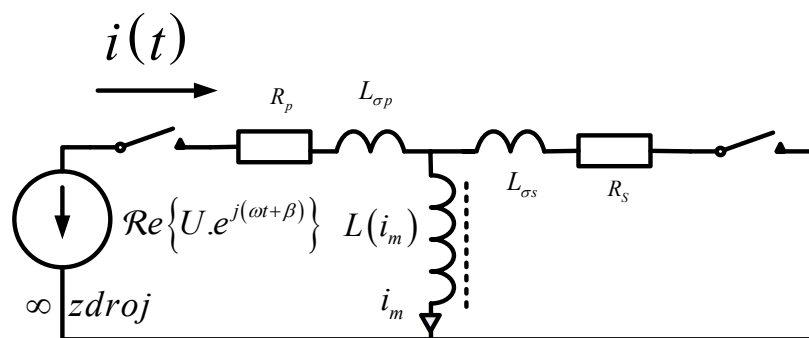
$$\omega L_m I_{\lim} = U_{\lim} > 0.7 I^\circ \frac{L}{R} \frac{R_T}{L_m} \omega L_m = 0.7 I^\circ \frac{X}{R} R_T$$

 $I^\circ$  = obraz maximálního poruchového proudu $R_T$  = výsledná rezistance obvodů II

$$\frac{\tau_T}{\tau} > 2 \Rightarrow U_{\lim} = \omega I_{\lim} L_m > 2 I_{\lim} X \frac{R_T}{R}$$



## 2.Nelineární L- Ráz magnetizačního proudu.



připojení naprázdno  $i_m = i$ ,  $L.i = \phi \Rightarrow i = \frac{\phi}{L}$

$$u = R.i + L \frac{di}{dt} = \frac{\phi}{(L/R)} + \frac{d\phi}{dt} = \text{Re}\{U.e^{j(\omega t + \varphi)}\}$$

$$\mathcal{L}\{U.e^{j(\omega t + \varphi)}\} = \phi(s) \cdot (s + 1/\tau)$$

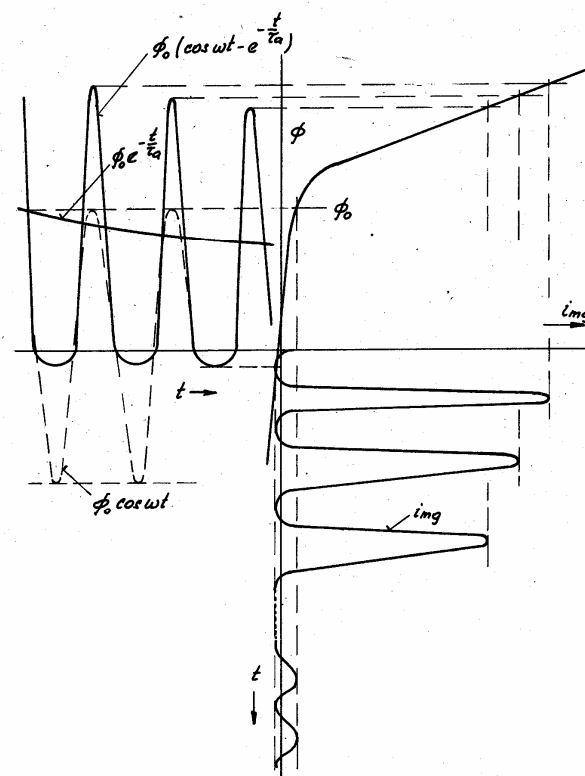
$$\phi(s) = \frac{\mathcal{L}\{U.e^{j(\omega t + \varphi)}\}}{(s + 1/\tau)} \Rightarrow \phi(t) = \int_0^t U e^{j\varphi} \cdot e^{j(\omega t - \lambda)} \cdot e^{-\frac{\lambda}{\tau}} d\lambda =$$

$$= U e^{j(\omega t + \varphi)} \int_0^t e^{-j\left(\omega + \frac{1}{\tau}\right)\lambda} d\lambda = \frac{UL}{R + j\omega L} \left( e^{j(\omega t + \varphi)} - e^{j\varphi} \cdot e^{-1/\tau} \right)$$

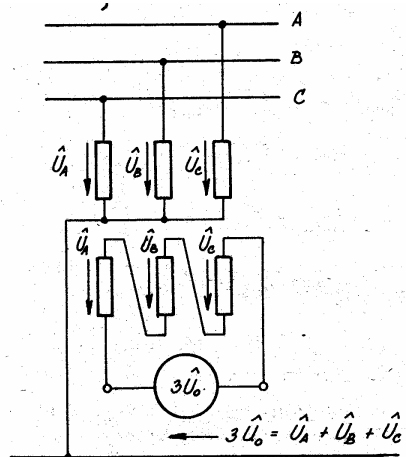
## reálná část:

$$\phi^0 = \frac{U.L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \zeta = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

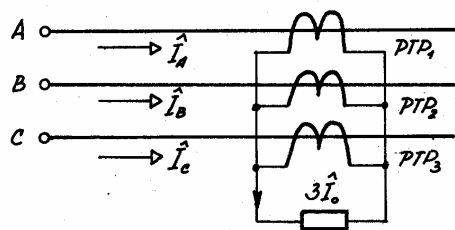
$$\phi(t) = \phi^0 \left\{ \cos(\omega t + \beta - \zeta) - \cos(\beta - \zeta) e^{-\frac{t}{\tau}} \right\}$$



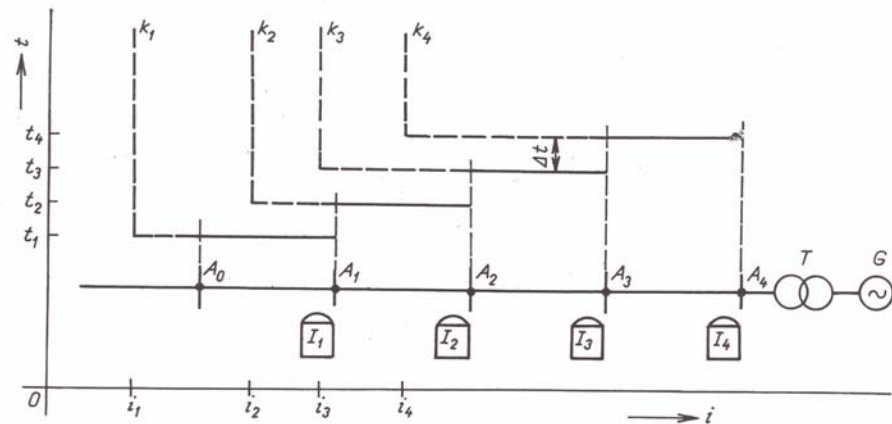
## Měření nulové složky napětí a proudu



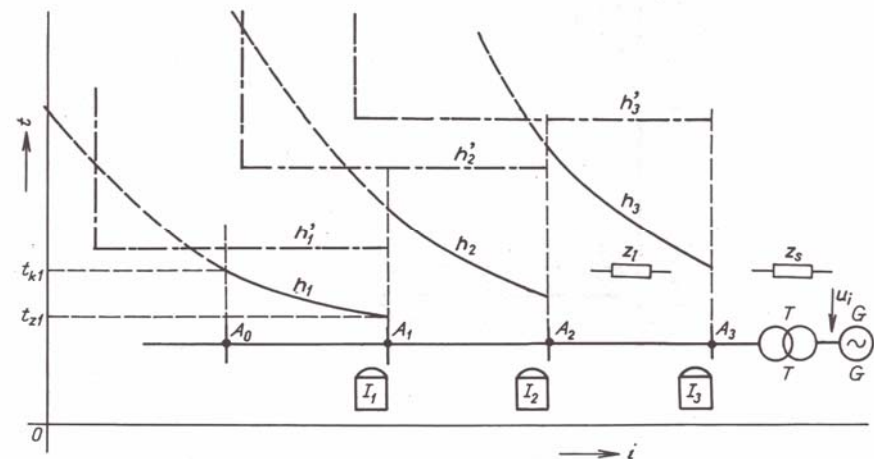
## Holmgreenova skupina PTP



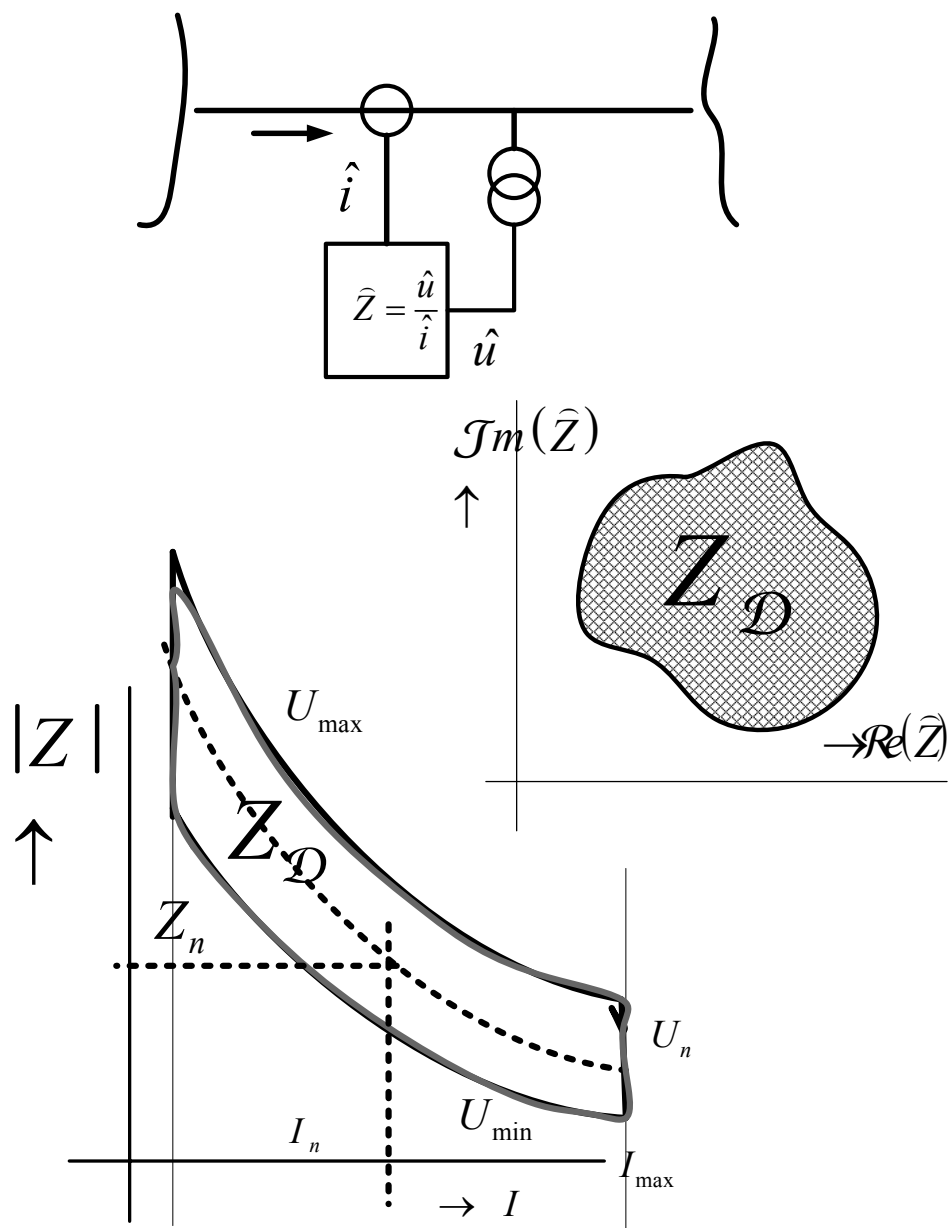
## nezávislé zpožd. nadproudové ochrany v radiální síti



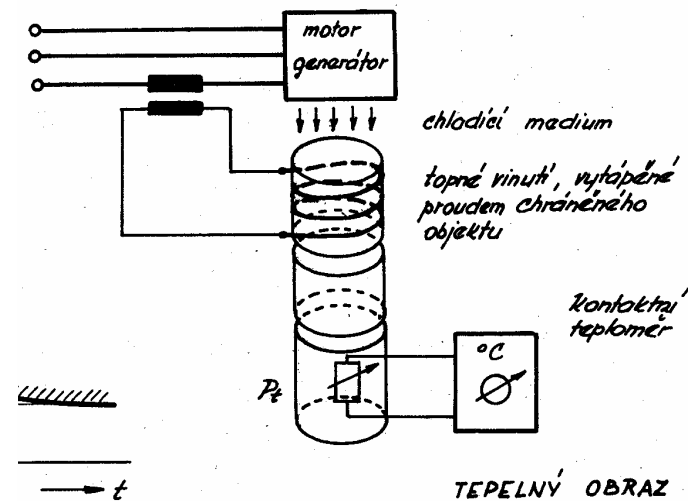
## Závislé zpožděné nadproudové ochrany v radiální síti



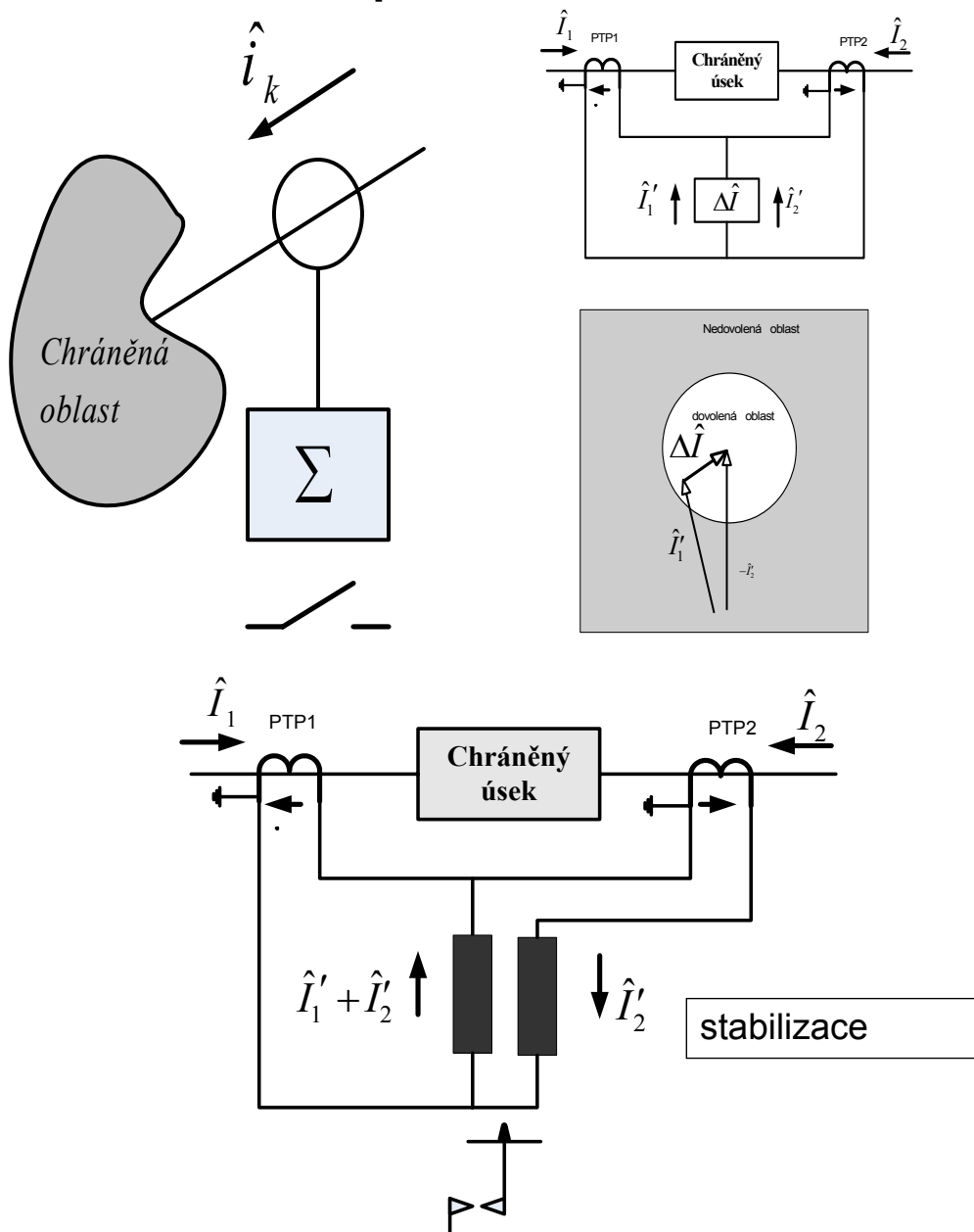
## • Viděná impedance



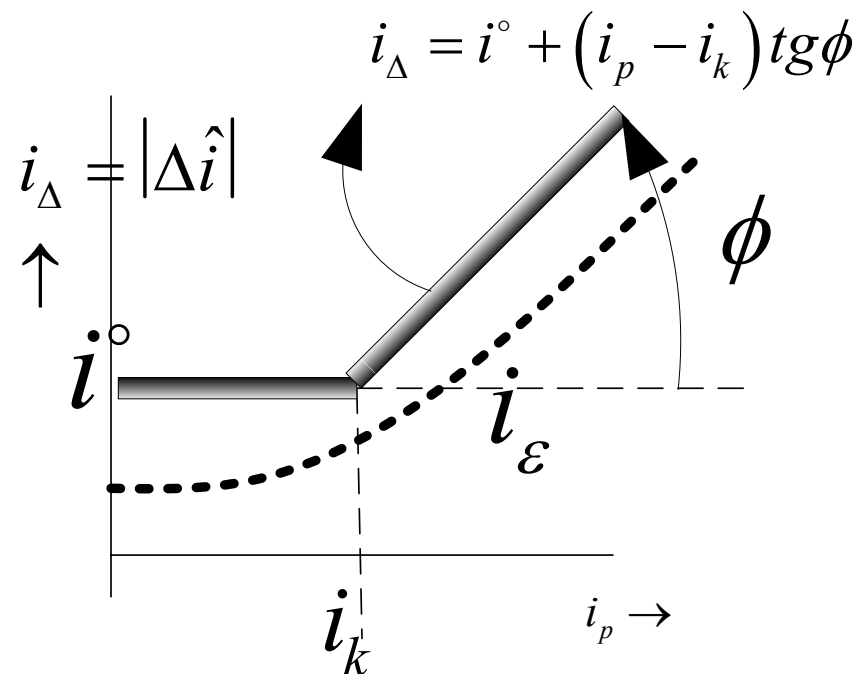
## • Teplota $\theta$ / Tepelný obraz



## • Rozdíl proudů



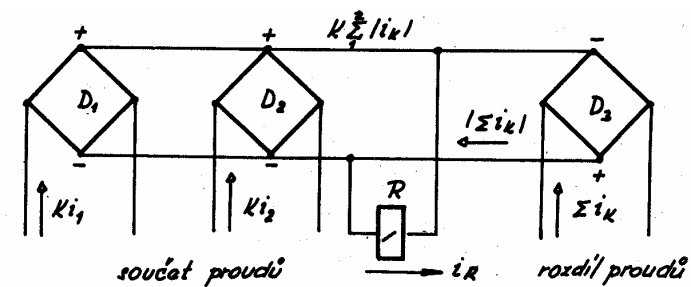
## Charakteristika rozdílové ochrany



$i_k$  = proud kolena charakteristiky

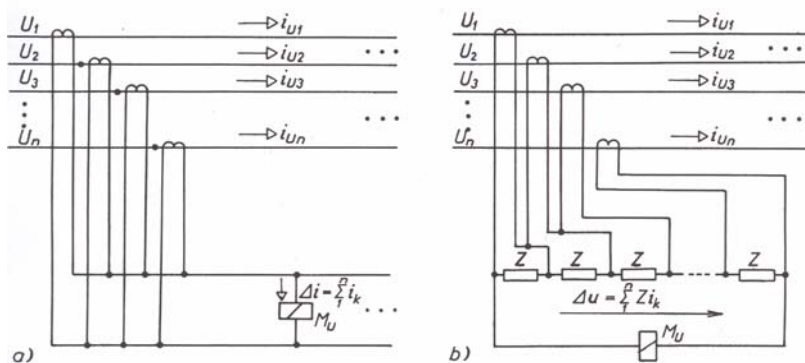
$i_\epsilon$  = chybový proud vstupních obvodů

$i_p = \sum_{\forall k} |\hat{i}_k|$  - průchozí proud       $i^\circ$  = dovolená tolerance proudu



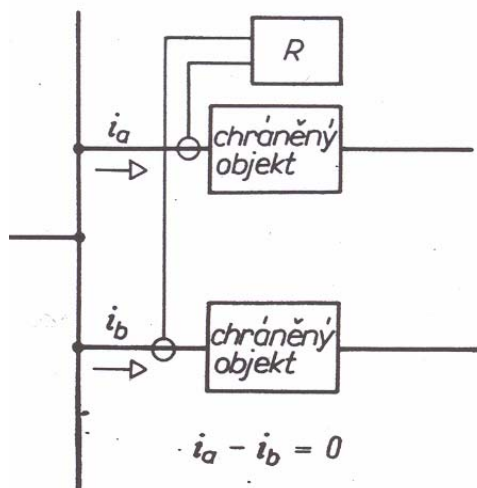
## Objekt s několika vývody

### Proudové porovnání

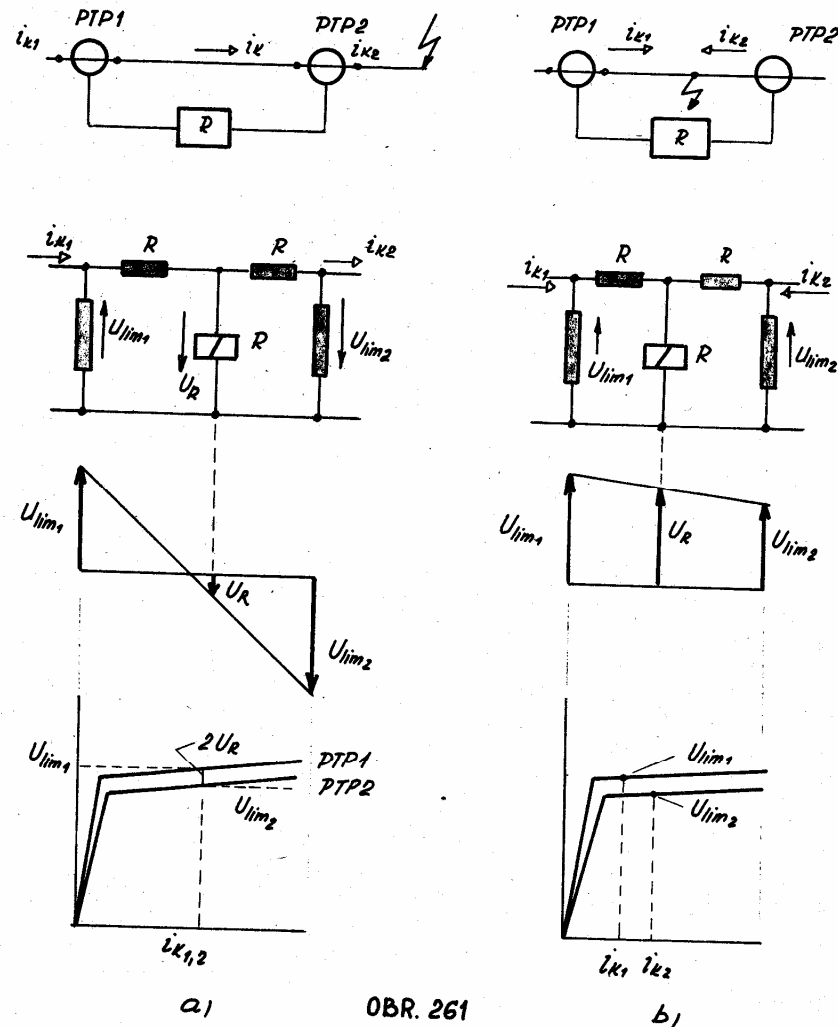


### napětové porovnání

## Příčná rozdílová ochrana



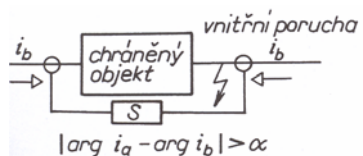
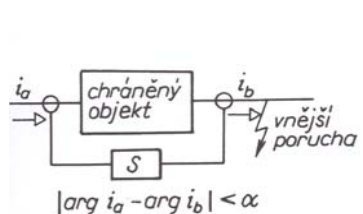
## Vysokoimpedanční ochrana



## Rozdíl úhlů vstupní a výstupní brány.

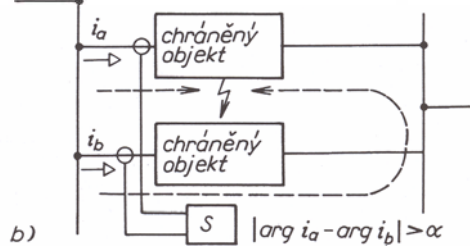
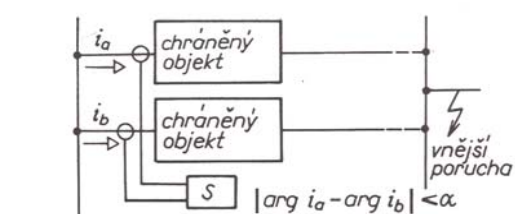
### Srovnávací ochrana

podélná

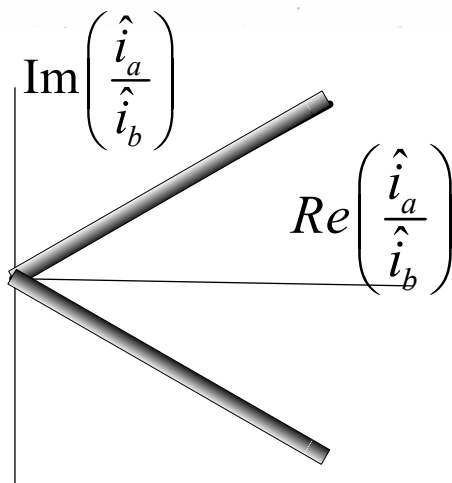


a)

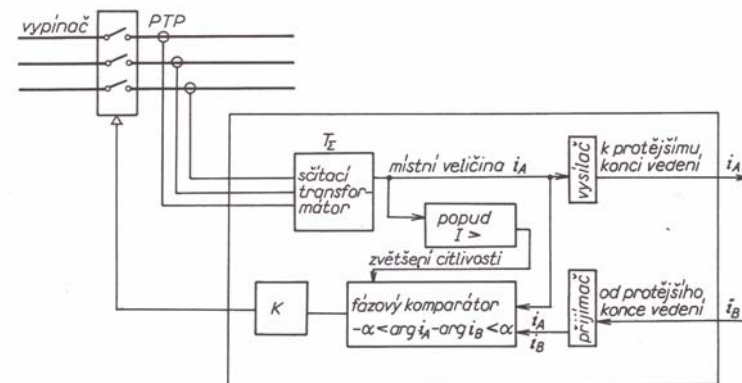
příčná



b)

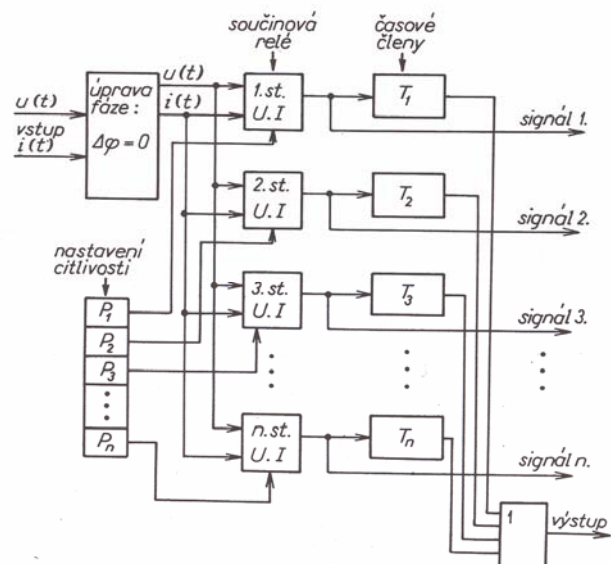
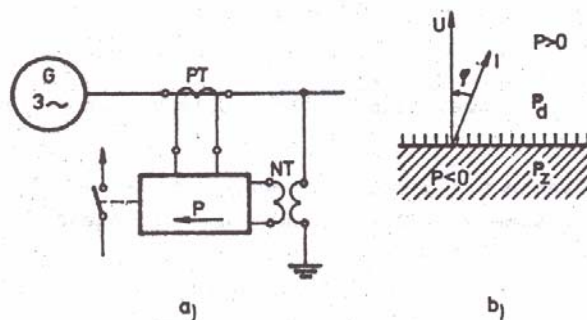


### Blokové schéma srovnávací ochrany



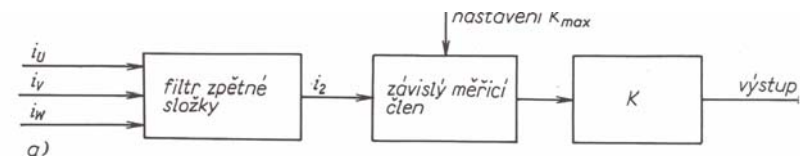
## • Směr toku P,Q

### Zpětná wattová ochrana

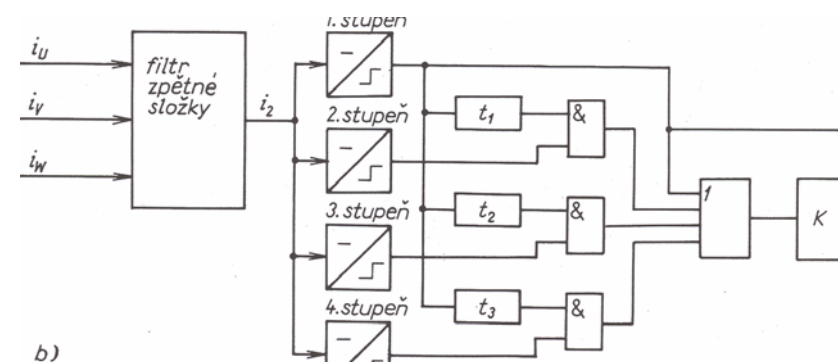


## Ochrana při nesymetrii

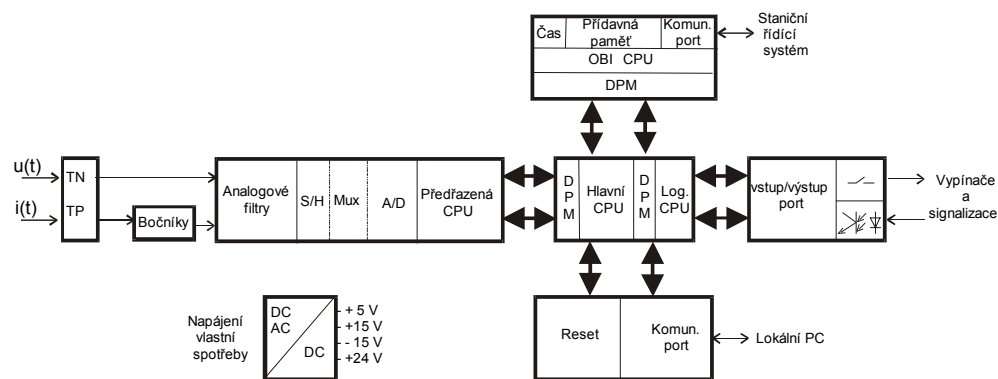
### závislá



### nezávislá stupňová



## DIGITÁLNÍ OCHRANY.



$$T_{vz} = \frac{1}{f_{vz}}, \quad X_m \geq A_{\max}, \quad \varepsilon \geq \frac{\Delta X}{2A_{\min}}, \quad N \geq \frac{A_{\max}}{2\varepsilon A_{\min}}$$

kde

$A_{\min}$  je minimální hodnota analogového signálu,  
 $A_{\max}$  - maximální hodnota analogového signálu,  
 $\varepsilon$  - dovolená relativní chyba minimální hodnoty analogového signálu.

## A/D konverze a verifikace

$$a(t) = A_1 \cos(\omega_1 t - \alpha_1) + A_0 e^{-t/T_a} + \sum_{k=2}^n A_k \cos(k\omega_1 t - \alpha_k)$$

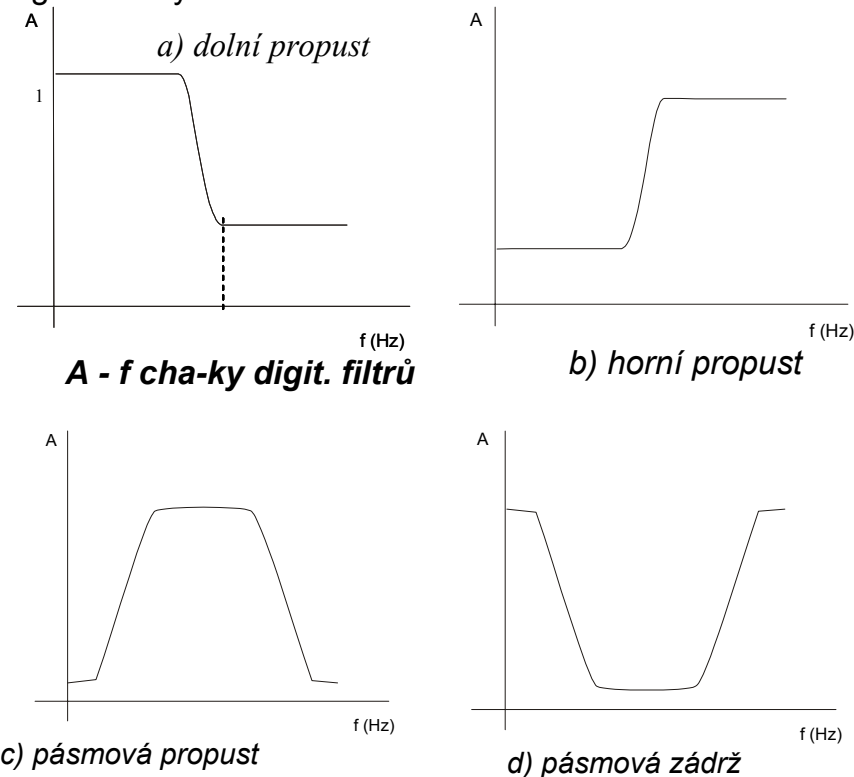
$A_1$  je amplituda první harmonické,  
 $A_2$  - amplitudy vyšších harmonických,  
 $A_k$   
 $A_0 T_a$  - počáteční hodnota a časová konstanta stejnosměrné složky,

-

## FILTRY

Analogové - pásmový filtr potlačující  $f > 0,5 f_{vz}$ 

Digitální filtry



## Impulzní charakteristiky filtrů:

| filtr | FIR (konečná odezva)<br>nerekursivní | IIR (neohraničená odezva)<br>rekursivní                    |
|-------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| popis | $y(n) = \sum_{k=0}^p a_k x(n-k)$     | $y(n) = \sum_{k=0}^p a_k x(n-k) - \sum_{k=1}^r b_k y(n-k)$ |



## MATEMATICKÝ APARÁT PRO ALGORITMY DIGITÁLNÍCH OCHRAN

- aproximace funkcí,
- metoda nejmenších čtverců
- interpolace
- Fourierova analýza,
- Walshovy funkce.

### Aproximace funkcí

$$d(f, P) = \int_I [f(t) - g(t)]^2 dt = \sum_{i=0}^n [f(t) - g(t)]^2 \quad \text{vzdálenost fci}$$

$$P(t_i) = f(t_i) \quad i = 1, \dots, n$$

### Metoda nejmenších čtverců

$(u_1, t_1), (u_2, t_2), \dots, (u_n, t_n)$  měřené dvojice dat

$$f(t_i) = u_i$$

$$P = \sum_{i=0}^m a_i t^i \quad ; \quad (m < N) \dots \text{polynomiální aproximační funkce}$$

$$S = \sum_{i=1}^N w_i [f - P]^2 = \sum_{i=1}^N w_i \left[ u_i - \sum_{i=0}^m a_i t^i \right]^2, \quad w_i \dots \text{váhový faktor}$$

systém normálových rovnic:  $(\partial S / \partial a_i = 0; i = \{0 \dots m\})$

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^N w_i \left[ u_i - (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + \dots + a_m t_i^m) \right] = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^N w_i t_i \left[ u_i - (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + \dots + a_m t_i^m) \right] = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_m} = -2 \sum_{i=1}^N w_i t_i^m \left[ u_i - (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + \dots + a_m t_i^m) \right] = 0$$

Interpolace při ekvidistančním dělení

$y = f(x)$ , originální funkce

$$P(x_i) = y_i, \text{ interpolující funkce, } x_0 < x_1 < \dots < x_n; x_i - x_{i-1} = h$$

$$x_1 = x_0 + h, \quad x_2 = x_1 + h, \dots, \quad x_k = x_0 + k \cdot h$$

$$f(x_k) = f(x_0 + k \cdot h) = f_k$$

| diference  | první                                | n-tá                                                             |
|------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| zpětná     | $\nabla y_k = y_k - y_{k-1}$         | $\nabla^n y_k = \nabla^{n-1} y_k - \nabla^{n-1} y_{k-1}$         |
| dopředná   | $\Delta y_k = y_{k+1} - y_k$         | $\Delta^n y_k = \Delta^{n-1} y_{k+1} - \Delta^{n-1} y_k$         |
| centrovaná | $\delta y_k = y_{k+1/2} - y_{k-1/2}$ | $\delta^n y_k = \delta^{n-1} y_{k+1/2} - \delta^{n-1} y_{k-1/2}$ |

### Interpolační vzorce.

Gregory – Newtonův vzorec postupné interpolace

$$f_{k+r} = f(x_k + rh) = f_k + r \Delta f_k + \frac{r(r-1)}{2!} \Delta^2 f_k + \frac{r(r-1)(r-2)}{3!} \Delta^3 f_k + \dots$$

$$+ \frac{r(r-1)(r-2) \dots (r-n+1)}{n!} \Delta^n f_k$$

**Gregoryho – Newtonov vzorec zpětné interpolace**

$$f_{N+s} = f(x_N + sh) = f_N + s\nabla f_N + \frac{s(s+1)}{2!} \nabla^2 f_N + \frac{s(s+1)(s+2)}{3!} \nabla^3 f_N + \dots$$

$$+ \frac{s(s+1)(s+2)\dots(s+n-1)}{n!} \nabla^n f_N$$

**Newtonov – Gaussov vzorec postupnej interpolácie**

$$f(x_k + rh) = f_k + r\delta f_{k+1/2} + \frac{r(r-1)}{2!} \delta^2 f_k + \frac{(r+1)(r-1)}{3!} \delta^3 f_{k+1/2} +$$

$$+ \frac{(r+1)r(r-1)(r-2)}{4!} \delta^4 f_{k+1/2} + \dots$$

**Laplace – Everettův interpolační vzorec**

$$f(x_k + rh) = rf_k + \frac{r(r^2-1)}{3!} \delta^2 f_k + \frac{r(r^2-1)(r^2-4)}{5!} \delta^4 f_k +$$

$$+ rf_{k+1} + \frac{r(r^2-1)}{3!} \delta^2 f_{k+1} + \frac{r(r^2-1)(r^2-4)}{5!} \delta^4 f_{k+1} + \dots$$

**Numerická derivace.** Derivováním interpolačních vzorců  
⇒ vztahy pro derivace s využitím diferencí.

| diference  | $f_k^\bullet$                                                                                                   | $f_k^{\bullet\bullet}$                                                                  |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| dopředná   | $\frac{1}{h} \left( \Delta - \frac{1}{2} \Delta^2 + \frac{1}{3} \Delta^3 - \dots \right) f_k$                   | $\frac{1}{h^2} \left( \Delta^2 - \Delta^3 + \frac{11}{12} \Delta^4 - \dots \right) f_k$ |
| zpětná     | $\frac{1}{h} \left( \nabla + \frac{1}{2} \nabla^2 + \frac{1}{3} \nabla^3 + \dots \right) f_k$                   | $\frac{1}{h^2} \left( \nabla^2 + \nabla^3 + \frac{11}{12} \nabla^4 + \dots \right) f_k$ |
| centrovaná | $f'_k = \left( \mu \delta - \frac{1}{6} \mu \delta^2 + \frac{1}{30} \mu \delta^3 - \dots \right) \frac{f_k}{h}$ |                                                                                         |

**ALGORITMY PRO DIGITÁLNÍ OCHRANY**

Algoritmy využívající metodu nejmenších čtverců, předpoklad vstupního signálu:

$$g(t) = K_1 e^{-t/\tau} + \sum_{m=1}^M (K_{2m} \cos m\omega_0 t + K_{2m+1} \sin m\omega_0 t)$$

$K_1, K_2, \dots, K_{2m+1}$  – neznáme parametry,  
 $M$  – stupeň harmonických,  
 $\tau$  – časová konstanta ss složky,  
 $\omega_0$  – úhlová frekvence první harmonické.  
**Odhad parametrů:** minimalizuje součet kvadrát odchylek:

$$S = \int [u(t) - g(t)]^2 dt = \int \left[ u(t) - K_1 e^{-t/\tau} - \sum_{m=1}^M (K_{2m} \cos[m\omega_0 t] + K_{2m+1} \sin[m\omega_0 t]) \right]^2 dt$$

$$\frac{\partial S}{\partial K_i} = 0; (i = 1, 2, \dots, 2m+1); \Rightarrow K_1 \int_{t_1}^{t_1+T} e^{-2t/\tau} dt = \int_{t_1}^{t_1+T} u(t) e^{-t/\tau} dt$$

$$K_{2m} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} u(t) \cos(m\omega_0 t) dt; \quad K_{2m+1} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} u(t) \sin(m\omega_0 t) dt$$

**Odvození koeficientů.**

$\tau$ ...časová konstanta ss složky,  $N$ ...počet vzorků,  $t_N = (N-1)\Delta t$

$$\frac{1}{2} K_1 I \Delta t = \frac{1}{2} \left[ u(t_1) e^{-t_1/\tau} + 2 \sum_{t=t_2}^{t=t_{N-1}} u(t) e^{-t/\tau} + u(t_N) e^{-t_N/\tau} \right] \Delta t$$

$$K_1 = W_{1,1} S_1 + W_{1,N} S_N + \sum_{n=2}^{N-1} 2W_{1,n} S_n$$

$$I = e^{-2t_1/\tau} + 2e^{-2t_2/\tau} + \dots + 2e^{-2t_{N-1}/\tau} + e^{-2t_N/\tau}$$

$$W_{1,n} = \frac{e^{-t_n/\tau}}{I}, \quad \text{váhový faktor}$$

$$K_{2m} = \frac{2}{N\Delta t} \left[ \frac{1}{2} u(t_1) \cos \left\{ m \left( \frac{2\pi}{T} \right) t_1 \right\} + \dots \right. \\ \left. + \frac{1}{2} u(t_N) \cos \left\{ m \left( \frac{2\pi}{T} \right) t_N \right\} + \sum_{t=t_2}^{t=t_{N-1}} u(t_2) \cos \left\{ m \left( \frac{2\pi}{T} \right) t_2 \right\} \right] \Delta t$$

$$K_{2m} = \frac{1}{N} \left[ W_{2m,1} S_1 + W_{2m,N} S_N + \sum_{n=2}^{N-1} 2W_{2m,n} S_n \right]$$

$$W_{2m,n} = \cos m \left( \frac{2\pi}{T} \right) t_n = \cos m \left( \frac{2\pi(n-1)}{N} \right) \dots \text{W}_{2m,n} \text{ je váhový faktor } n\text{-tého vzorku.}$$

použitý pro výpočet konstanty K<sub>2m</sub>

$$K_{2m+1} = \frac{1}{N} \left[ W_{2m+1,1} S_1 + W_{2m+1,N} S_N + \sum_{n=2}^{N-1} 2W_{2m+1,n} S_n \right]$$

$$W_{2m+1,n} = \sin m \left( \frac{2\pi}{T} \right) t_n = \sin m \left( \frac{2\pi(n-1)}{N} \right)$$

### Algoritmy předpokládající harmonický průběh

#### Metoda jednoho vzorku a první derivace

$$u(t) = U \cdot \sin \omega_0 t, \quad i(t) = I \cdot \sin(\omega_0 t + \phi)$$

$$u^\bullet(t) = \omega_0 U \cdot \cos \omega_0 t, \quad i^\bullet(t) = \omega_0 I \cdot \cos(\omega_0 t + \phi)$$

$$U^2 = u(t)^2 + \left( \frac{u^\bullet(t)}{\omega_0} \right)^2, \quad I^2 = i(t)^2 + \left( \frac{i^\bullet(t)}{\omega_0} \right)^2,$$

modul a argument viděné impedance.

$$|Z| = \frac{|U|}{|I|} = \sqrt{\frac{u^2 + (u^\bullet/\omega_0)^2}{i^2 + (i^\bullet/\omega_0)^2}}; \phi_z = \underbrace{\omega_0 t}_{\phi_u} - \underbrace{(\omega_0 t + \phi)}_{\phi_i}$$

$$u = U \sin \phi_u, \quad u^\bullet = \omega_0 U \cos \phi_u$$

$$i = I \sin \phi_i, \quad i^\bullet = \omega_0 I \cos \phi_i$$

$$\phi_u = \operatorname{tg}^{-1}(u\omega_0/u^\bullet), \quad \phi_i = \operatorname{tg}^{-1}(i\omega_0/i^\bullet)$$

$$\phi_z = \operatorname{tg}^{-1}(u\omega_0/u^\bullet) - \operatorname{tg}^{-1}(i\omega_0/i^\bullet)$$

:

$$u_k^\bullet \approx \frac{1}{h} \left( \nabla + \frac{1}{2} \nabla^2 + \dots \right) u_k; \quad h =$$

$$\nabla u_k = u_k - u_{k-1}$$

$$\nabla^2 u_k = \nabla u_k - \nabla u_{k-1} = u_k - 2u_{k-1} + u_{k-2}$$

$$u_k^\bullet \approx \frac{1}{h} (u_k - u_{k-1}) \approx \frac{1}{2h} (3u_k - 4u_{k-1} + u_{k-2})$$

**Metoda první a druhé derivace**

$$u^{\bullet} = \omega_0 U \cdot \cos \phi_u; \quad u^{\bullet\bullet} = -\omega_0^2 U \cdot \sin \phi_u$$

$$U^2 = \frac{1}{\omega_0} \left[ (u^{\bullet})^2 + \left( \frac{u^{\bullet\bullet}}{\omega_0} \right)^2 \right]; \quad I^2 = \frac{1}{\omega_0} \left[ (i^{\bullet})^2 + \left( \frac{i^{\bullet\bullet}}{\omega_0} \right)^2 \right]$$

$$|Z| = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{u^{\bullet 2} + \left( \frac{u^{\bullet\bullet}}{\omega_0} \right)^2}{i^{\bullet 2} + \left( \frac{i^{\bullet\bullet}}{\omega_0} \right)^2}}, \quad \phi = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{i^{\bullet\bullet}}{\omega_0 i^{\bullet}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{u^{\bullet\bullet}}{\omega_0 u^{\bullet}} \right)$$

**Metoda – dvou vzorků**

$$u_k = U \sin(\omega_0 t_k)$$

$$u_{k+1} = U \sin \omega_0 (t_k + \Delta t) =$$

$$= U \cdot \sin(\omega_0 t_k) \cos(\omega_0 \Delta t) + U \cdot \cos(\omega_0 t_k) \sin(\omega_0 \Delta t)$$

$$U \cdot \cos(\omega_0 t_k) = \frac{u_{k+1} - u_k \cos(\omega_0 \Delta t)}{\sin(\omega_0 \Delta t)};$$

$$U^2 = \frac{u_k^2 + u_{k+1}^2 - 2u_k u_{k+1} \cos(\omega_0 \Delta t)}{\sin^2(\omega_0 \Delta t)};$$

$$I^2 = \frac{i_k^2 + i_{k+1}^2 - 2i_k i_{k+1} \cos(\omega_0 \Delta t)}{\sin^2(\omega_0 \Delta t)};$$

**Určení fázového posunu**

$$i_k = I \sin(\omega_0 t_k + \phi) = I \sin(\omega_0 t_k) \cos \phi + I \cos(\omega_0 t_k) \sin \phi$$

$$i_{k+1} = I [\sin \omega_0 t_k \cos \omega_0 \Delta t + \cos \omega_0 t_k \sin \omega_0 \Delta t] \cos \phi + \\ + I [\cos \omega_0 t_k \cos \omega_0 \Delta t - \sin \omega_0 t_k \sin \omega_0 \Delta t] \sin \phi$$

$$\sin(\omega_0 t_k) = \frac{u_k}{U}; \quad \cos(\omega_0 t_k) = \frac{u_{k+1} - u_k \cos(\omega_0 \Delta t)}{U \sin(\omega_0 \Delta t)}$$

**Metoda – tří vzorků**

$$u_{k+i} = U \sin \omega_0 (t_k + i \Delta t), \quad i = \{0, 1, 2\}$$

$$i_{k+i} = I \sin(\omega_0 t_k + i \omega_0 \Delta t + \phi)$$

$$i_{k+1}^2 - i_k i_{k+2} = I^2 \sin^2(\omega_0 \Delta t)$$

$$u_{k+1} i_{k+2} - u_{k+2} i_{k+1} = -U I \sin \phi \sin \omega_0 \Delta t$$

$$2u_{k+1} i_{k+1} - u_{k+2} i_k - u_k i_{k+2} = 2UI \cos \phi \sin^2 \omega_0 \Delta t$$

$$R = \left( \frac{U}{I} \right) \cos \phi = \frac{2u_{k+1} i_{k+1} - u_{k+2} i_k - u_k i_{k+2}}{2(i_{k+1}^2 - i_k i_{k+2})}$$

$$X = \left( -\frac{U}{I} \right) \sin \phi = \frac{u_{k+1} i_{k+2} - u_{k+2} i_{k+1}}{i_{k+1}^2 - i_k i_{k+2}} \sin \omega_0 \Delta t$$

## Vybrané ANSI /IEEE kódy funkce ochran

| kód | upřesnění                          | popis                                                                                                                                                                 |
|-----|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 14  |                                    | kontrola snížení otáček                                                                                                                                               |
| 21  | -,N,PI                             | distanční fázová, zemní, lokátor poruch                                                                                                                               |
| 24  |                                    | kontrola přesycení U/f                                                                                                                                                |
| 25  |                                    | kontrola synchronního stavu                                                                                                                                           |
| 26  |                                    | tepelná ochrana stroje                                                                                                                                                |
| 27  | -,D                                | U< , směrová U<                                                                                                                                                       |
| 27  | 50<br>59                           | ochrana odstaveného stroje                                                                                                                                            |
| 32  | -,F,R,L,P,Q                        | směrová výkonová ochrana, dopředná, zpětná,měří P,Q                                                                                                                   |
| 37  |                                    | I<,P<                                                                                                                                                                 |
| 38  |                                    | 9 vinutí                                                                                                                                                              |
| 40  |                                    | kontrola $X_{min}$ , podbuzení                                                                                                                                        |
| 46  |                                    | kontrola $I_2$ (proudová nesymetrie)                                                                                                                                  |
| 47  |                                    | kontrola $U_2$ (napět'ová nesymetrie)                                                                                                                                 |
| 48  |                                    | kontrola neukončené sekvence                                                                                                                                          |
| 49  | -,E,G,F,<br>M,R,S,T                | tepelné přetížení celku,rotoru budiče,generátoru, vývodu,<br>motoru,rotoru,statoru,transformátoru                                                                     |
| 50  | -,N, 27G                           | I> nesměrová mžiková ochrana, zemní, blokováná podpětím                                                                                                               |
| 51  | -, DT ,<br>C,E ,B, MS<br>N,NC,V,27 | nadproudá nesměrová zpožděná,<br>nezávisle zpožděná kondens.baterie,<br>stator budiče,přípojníc, start motoru,<br>zemní mžiková,nevyváženost $I_c$ ,I> nesměrová s U< |
| 55  |                                    | kontrola $\cos \varphi$                                                                                                                                               |
| 59  | -,E,F,N,GN,<br>59/81               | U>,stator budiče,nadfrekvenci,U <sub>0</sub> ,statorová zemní,<br>přesycení                                                                                           |
| 60  |                                    | napět'ová nesymetrie                                                                                                                                                  |
| 62  | BF                                 | selhání vypínače                                                                                                                                                      |
| 63  |                                    | plynové relé                                                                                                                                                          |
| 64  | -,R,RE,RG                          | zemní-100%statoru,rotor,rotor budiče, rotor generátoru                                                                                                                |
| 66  |                                    | kontrola počtu startů                                                                                                                                                 |
| 67  | -,N                                | směrová I>,zemní                                                                                                                                                      |
| 68  |                                    | detekce zapínacího rázu                                                                                                                                               |
| 74  |                                    | výstraha                                                                                                                                                              |
| 78  |                                    | ztráta synchronizmu, prokluz pólů                                                                                                                                     |
| 79  |                                    | funkce OZ                                                                                                                                                             |
| 81  | -,H,L,U                            | ochrana f, f>,f<,odepinání zátěže                                                                                                                                     |
| 85  |                                    | funkce blokování                                                                                                                                                      |
| 86  |                                    | diferenciální ochrana obecně                                                                                                                                          |
| 87  | E,G,T,                             | diferenciální ochrana budiče, generátoru, transformátoru                                                                                                              |
| 87  | BB,M,L,N                           | přípojníc,vedení,impedanční zemní ochrana                                                                                                                             |