Diagnostika izolačních systémů elektrických strojů

Technická diagnostika

- Technická diagnostika je obor, který se zabývá metodami zjišťování stavu technických zařízení
- Izolační systém elektrického stroje je z hlediska spolehlivosti nejslabším místem
- Spolehlivostí rozumíme pravděpodobnost, že v daném časovém úseku a za daných podmínek zařízení pracuje stanoveným způsobem

Volba diagnostické metody

- Nároky na přerušení dodávky elektrické energie
  - Za provozu stroje „On-line“ (monitoring)
  - Při odstávce stroje „Off-line“
- Bezpečnost metody s ohledem na izolační systém elektrického stroje
  - Destruktivní metody
  - Nedestruktivní metody
- Výpovědischopnost a metody
  - Co nám daná metoda může o diagnostikovaném systému říci (nejčastěji je snaha stanovení zbytkové doby života)

Dielektrická odezva

- Ve vakuu pro střídavé el. pole platí:

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_0 \vec{E}(t)$$

- Nahradíme-li vakuum izotropickým dielektrickým materiálem pak:

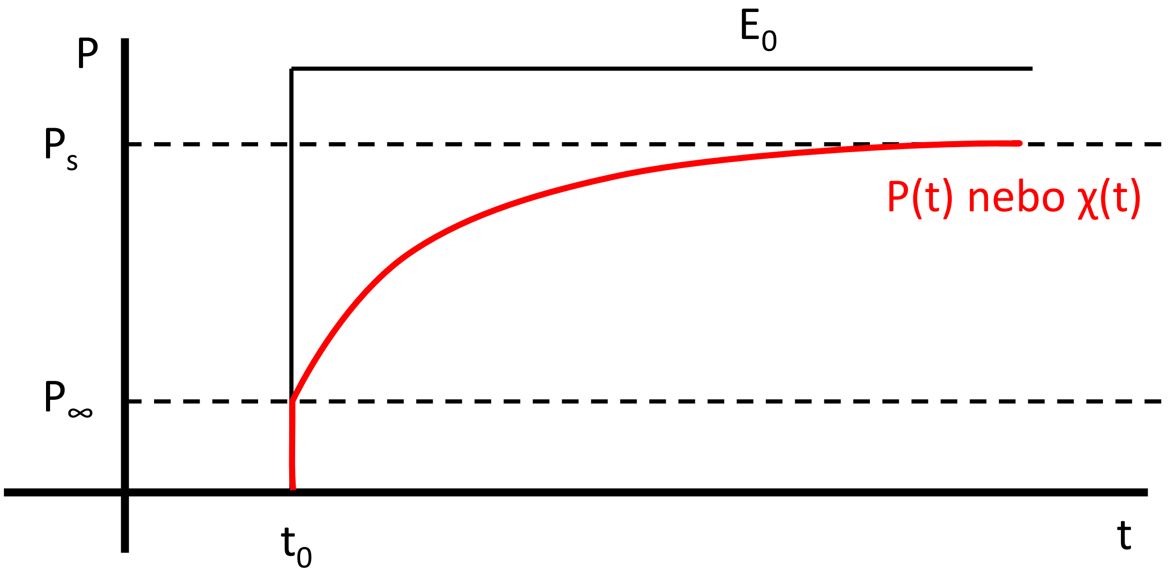
$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}(t) + \vec{P}(t) = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E}(t)$$

- Dále předpokládejme homogenní prostředí, kdy $\vec{P}$ a $\vec{E}$ jsou paralelní s $\vec{D}$
- Polarizační procesy nejsou okamžité -> časové zpoždění -> časová závislost susceptibility

$$\chi = \chi(t)$$

Dielektrická odezva

- Dále uvažujme aplikaci skokového el. pole v čase t_0, kdy se uplatní různé druhy polarizace:
  - Extrémně rychlé děje (elektronová polarizace)
  - Pomalé děje (např. dipólová a migrační polarizace)



Okamžitá polarizace $P(t=t_0)=P_s$

Konečná polarizace (statická) $P(t\rightarrow\infty)=P_\infty$

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi(t) 1(t) E_0$$

Dielektrická odezva

- Časový průběh polarizace lze pak zapsat ve tvaru:

$$P(t) = P_\infty + (P_s - P_\infty) g(t - t_0)$$
$$P(t) = \varepsilon_0 [\chi_\infty + (\chi_s - \chi_\infty) g(t - t_0)] E_0$$

- Pro libovolný časový průběh el. pole E(t) lze stanovit časový průběh polarizace P(t), známe-li odezvu na jednotkový skok, pomocí Duhamelova vzorce (integrálu)

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi_\infty E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{t} f(t - \tau) E(\tau) d\tau$$

Dielektrická odezva

- Funkce f(t) je pak dána předpisem:

$$\mathrm{f}(t) = (\chi_s - \chi_\infty)\frac{dg(t)}{dt} = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\frac{dg(t)}{dt}$$

- Celkovou proudovou hustotu lz vyjádřit ze známého vztahu:

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{dD(t)}{dt}$$

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \frac{dP(t)}{dt}$$

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 (1 + \chi_\infty)\frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\int_{-\infty}^{t} f(t-\tau)E(\tau)d\tau$$

Dielektrická odezva

- Je-li aplikován skok el. intenzity na hodnotu E_c na izolační materiál, lze pak detekovat polarizační proud s proudovou hustotou:

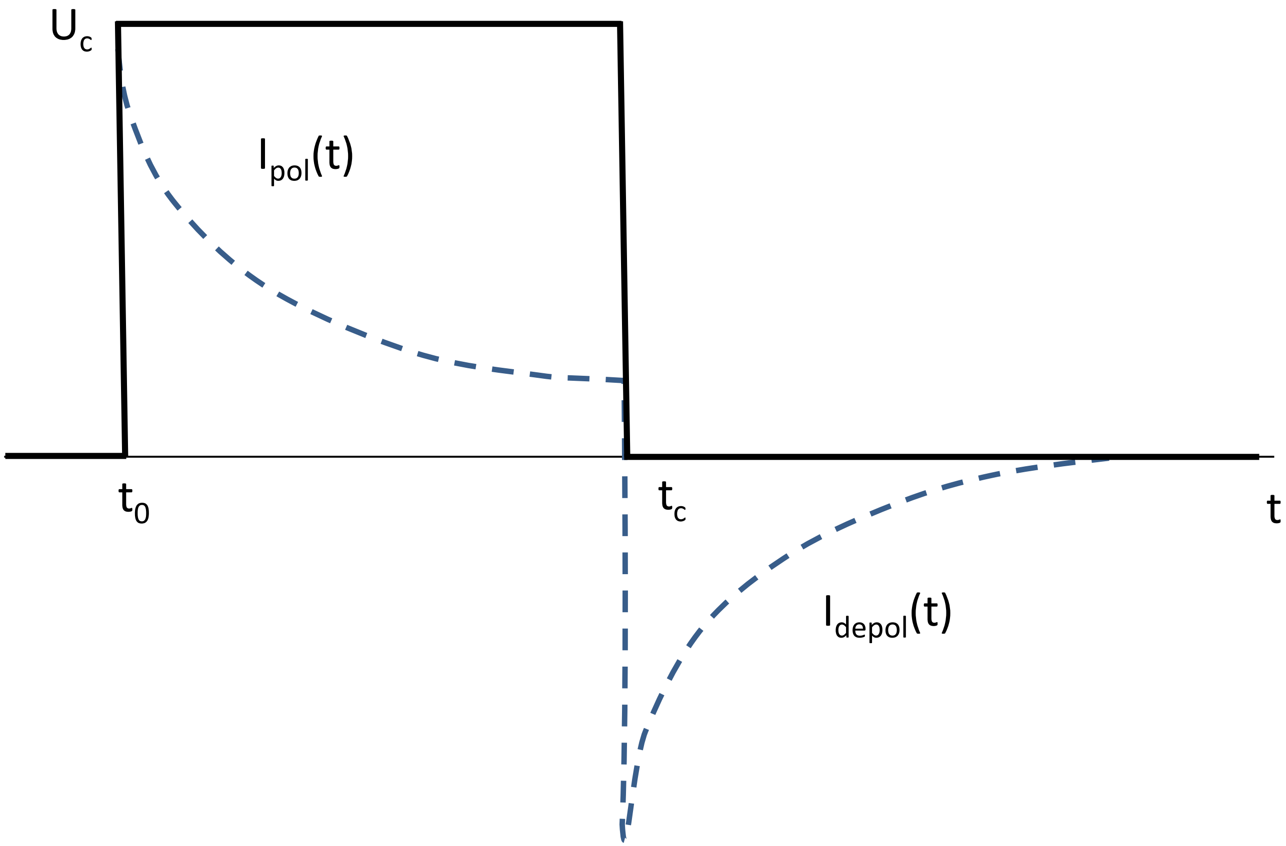
$$j_{pol}(t) = \sigma_0 E_c + \varepsilon_0 (1 + \chi_\infty) E_c \delta(t) + \varepsilon_0 E_c \mathrm{f(t)},$$

kde δ(t) je Diracova δ funkce

- Uvažujeme-li aplikované napětí U_c a geometrickou kapacitu C_0, lze pak polarizační proud vyjádřit jako:

$$i_{pol}(t) = C_0 U_c \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right]$$

Proudové charakteristiky



Dielektrická odezva ve frekvenční oblasti

- Přechod do frekvenční oblasti můžeme provést pomocí Laplaceovy nebo Fourierovy transformace, pak:

$$j(p) = \sigma_0 E(p) + \varepsilon_0 p E(p) + \varepsilon_0 p F(p) E(p)$$

Nebo

$$\hat{j}(\omega) = \hat{E}(\omega)\left[\sigma_0 + i\omega\varepsilon_0\left(1 + \hat{F}(\omega)\right)\right],$$

kde $\hat{F}(\omega)$ je Fourierův obraz dielektrické odezvy f(t) nebo komplexní susceptibility:

$$\hat{\chi}(\omega) = \hat{F}(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)$$

Dielektrická odezva ve frekvenční oblasti

- Zavedením komplexní susceptibility pak můžeme zapsat celkovou proudovou hustotu
$\hat{j}(\omega) = \left[\sigma_0 + \varepsilon_0 \omega \chi''(\omega) + i\omega\varepsilon_0\big(1 + \chi'(\omega)\big)\right]\hat{E}(\omega)$
- Zde je významný především posuvný proud, jenž je dán komplexní elektrickou indukcí:
$$\widehat{D}(\omega) = \varepsilon_0 \hat{\varepsilon}(\omega)\hat{E}(\omega)$$
- Komplexní permitivita $\hat{\varepsilon}$ je závislá na úhlové rychlosti elektrického pole a je definována jako:
$\hat{\varepsilon}(\omega) \ = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \big(1 + \chi'(\omega)\big) - i\chi''(\omega)$

Dielektrická odezva ve frekvenční oblasti

- Předchozí rovnice popisují vztah mezi permitivitou a proudem protékajícím izolantem
- Lze takto stanovit permitivitu materiálu při znalosti přiloženého napětí (resp. intenzity pole) a protékajícího proudu. Reálná část permitivity bude odpovídat kapacitnímu proudu a imaginární část ztrátám.
- Takovéto měření ovšem nedokáže oddělit dielektrické ztráty od svodových, jak vyplývá z definičního vztahu

$$j(\omega) = i\omega\varepsilon_0\tilde{\varepsilon}_r(\omega)E(\omega),$$

kde $\tilde{\varepsilon}_r$ je skutečná naměřená permitivita dána jako

$$\tilde{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon'_r(\omega) - i\varepsilon''_r(\omega)$$

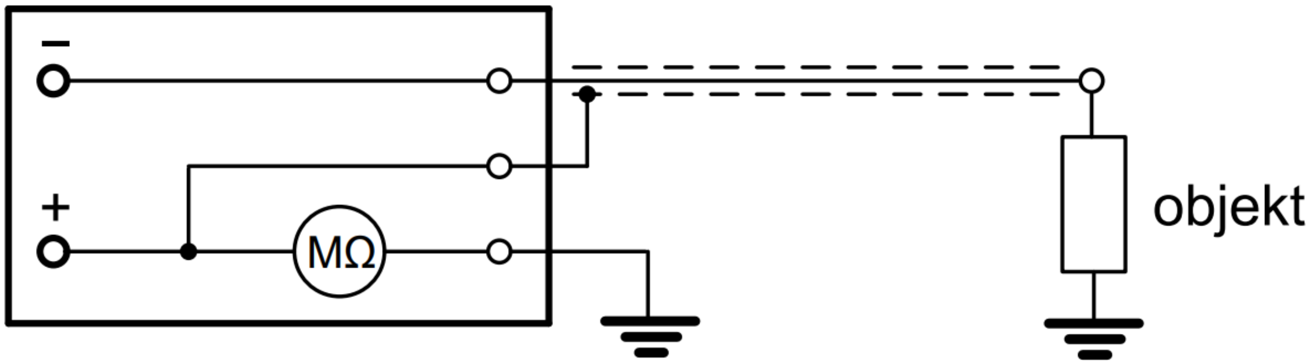
Dielektrická odezva ve frekvenční oblasti

- Z předchozí rovnice lze rovněž vyjádřit ztrátový činitel tan(δ) udávající poměr mezi ztrátami a kapacitním proudem:

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\varepsilon''_r(\omega)}{\varepsilon'_r(\omega)} = \frac{\varepsilon''_r(\omega) \; + \dfrac{\sigma_0}{\varepsilon_0\omega}}{\varepsilon'_r(\omega)}$$

Měření izolačního odporu

- Izolační odpor je základním ukazatelem stavu izolačního systému
- Měření se provádí Ohmovou metodou, kdy je k měřenému objektu přiloženo vysoké ss napětí (řádově jednotky kV) a měřen proud (řádově µA).



Měření izolačního odporu

- Zdánlivý izolační odpor je pak nejčastěji definován jako odpor v 1 min:

$$R_{iz60} = \frac{U_a}{I_{iz60}},$$

kde U_a je aplikované napětí a I_{iz60} je proud protékající izolačním systémem po 1 minutě

- V některých případech může být obdobně stanoven i R_{iz15} nebo R_{iz600}, případně tzv. skutečný izolační odpor, odpovídající svodovému proudu bez polarizační složky

Polarizační index

- Zdánlivý izolační odpor je silně závislý na teplotě, polarizační index tuto závislost částečně snižuje
- Polarizační index je podílem izolačního odporu po deseti minutách a po jedné minutě po aplikaci napětí:

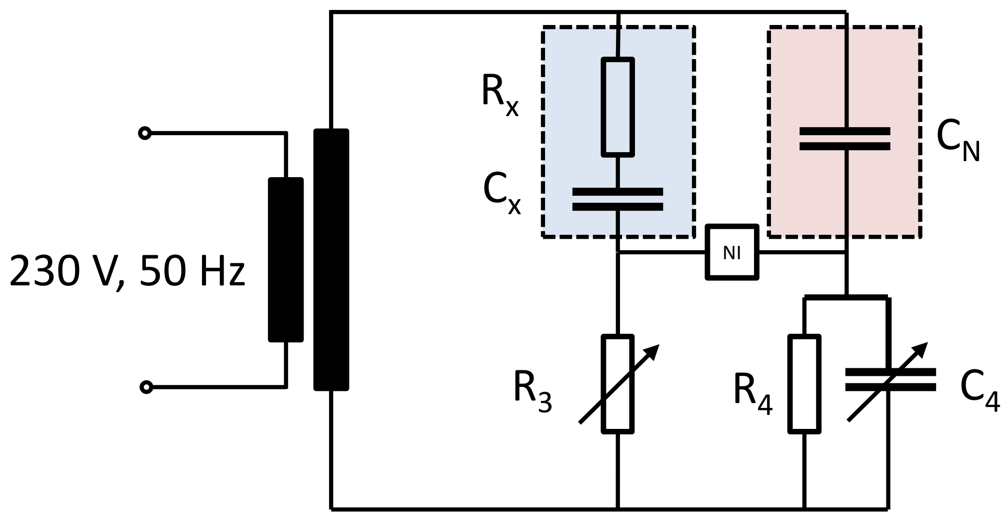
$$p_{i10} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}}$$

- Předpokládá se, že za 10 min se teplota měřené izolace moc nezmění a korekční teplotní faktor je u obou měření stejný (tj. vyruší se při výpočtu PI)
- PI ukazuje zda jsou svodové složky proudu zvýšené vzhledem k polarizačním složkám:

$p_{i10} = 1 + \frac{I_P}{I_S}$, kde I_p je svodová a I_p polarizační složka proudu

Měření ztrátového činitele a kapacity

- Ztrátový činitel je měřítkem kvality izolačního systému
- Přesné měření ztrátového činitele je obvykle prováděno při 50 Hz pomocí Scheringova můstku



Měření ztrátového činitele a kapacity

- Při vyváženém stavu platí rovnice pro obecný můstek:

$$\hat{Z}_1\hat{I}_1 = \hat{Z}_2\hat{I}_2 \text{ a } \hat{Z}_3\hat{I}_1 = \hat{Z}_4\hat{I}_2.$$

Pak

$$\frac{\hat{Z}_1}{\hat{Z}_3} = \frac{\hat{Z}_2}{\hat{Z}_4}$$

Pro Scheringův můstek platí:

$$\hat{Z}_1 = R_x + \frac{1}{i\omega C_x}, \hat{Z}_2 = \frac{1}{i\omega C_N}, \hat{Z}_3 = R_3,$$

$$\hat{Z}_4 = \frac{R_4}{1 + i\omega R_4 C_4}$$

Měření ztrátového činitele a kapacity

- Po úpravách a separaci reálné a imaginární části můžeme pro měřenou hodnotu Cx a tan δ psát:

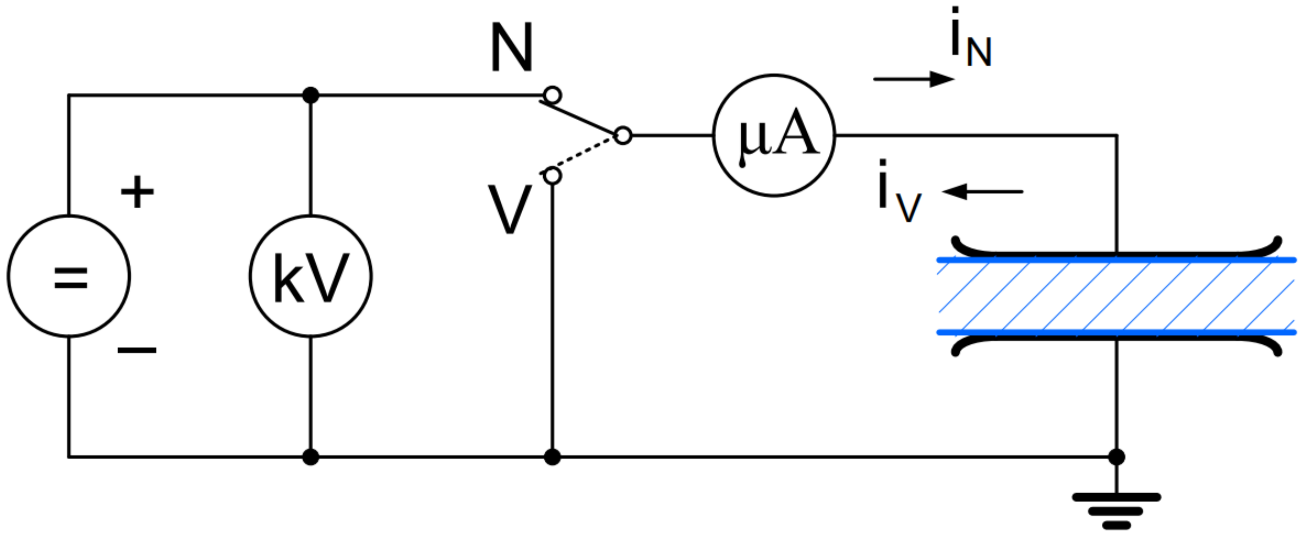
$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3}$$

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_N}$$

$$\tan\delta = \omega C_x R_x = \omega R_4 C_4$$

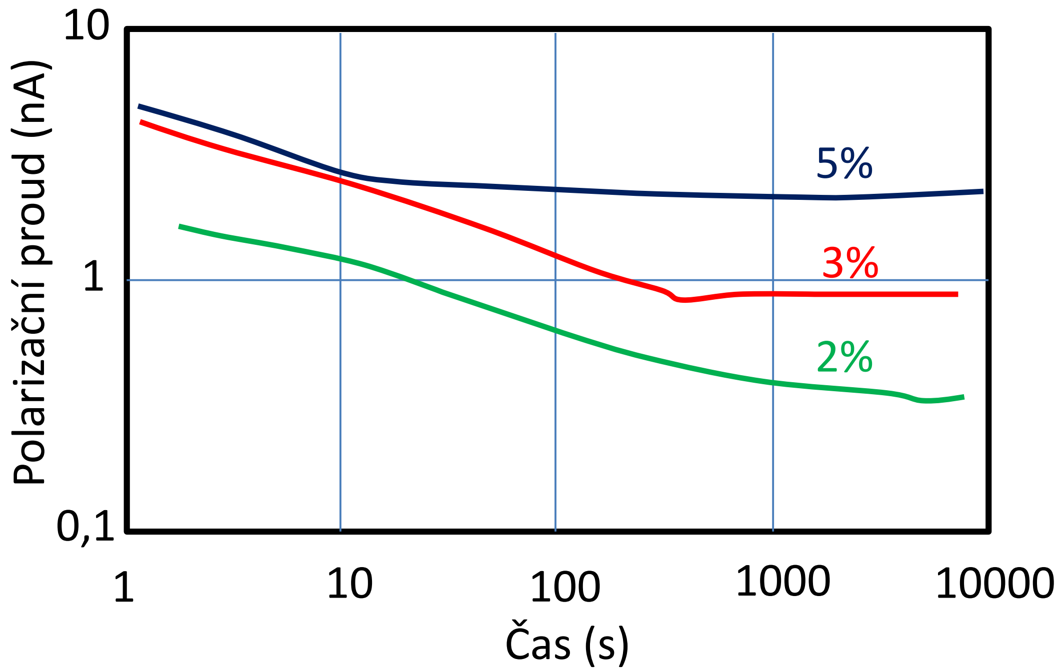
Měření polarizačních/depolarizačních proudů

- V časové oblasti (PDC)



Měření polarizačních/depolarizačních proudů

- Polarizační proud pro různý obsah vody v iz. materiálu

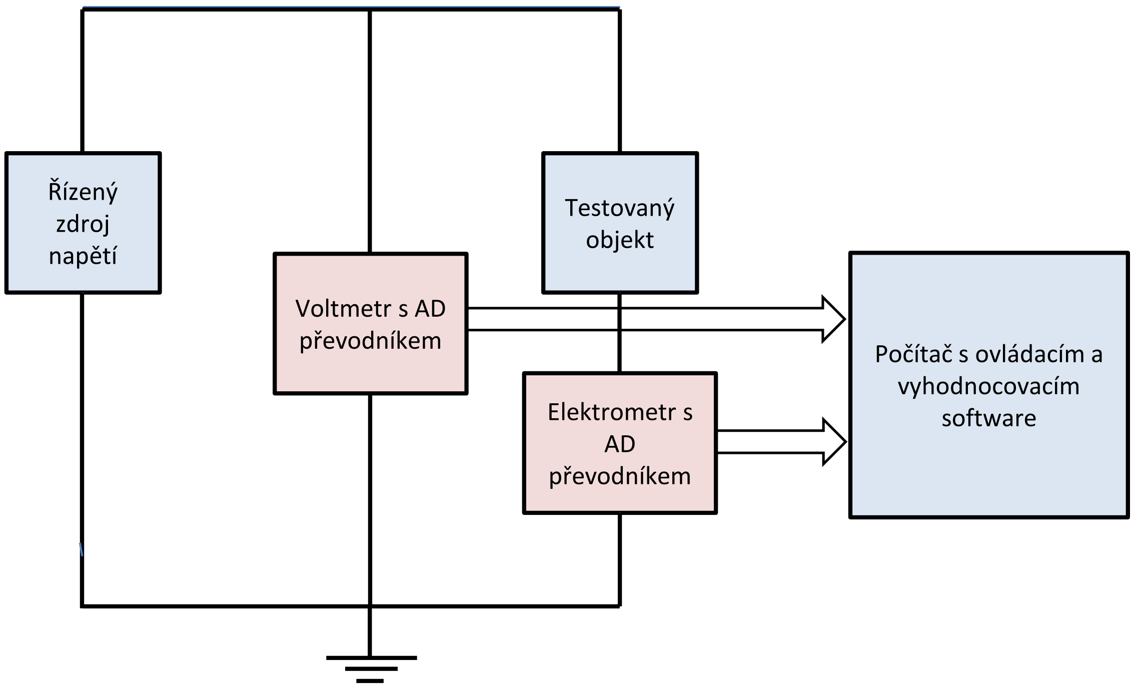


- Čím vyšší vodivostní složka proudu tím větší je obsah vlhkosti v pevné izolaci

Měření polarizačních/depolarizačních proudů

- Ve frekvenční oblasti (FDC)

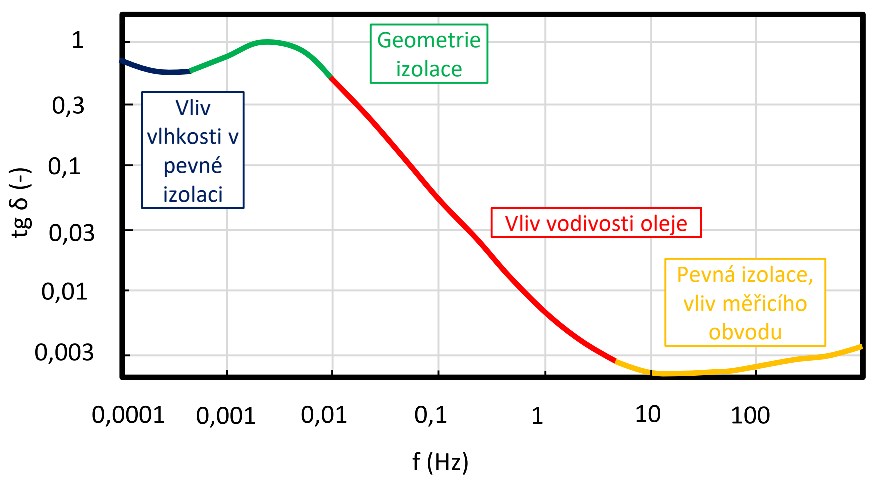
Frekvenční rozsah zdroje 1 mHz – 1 kHz, amplituda do 200 V



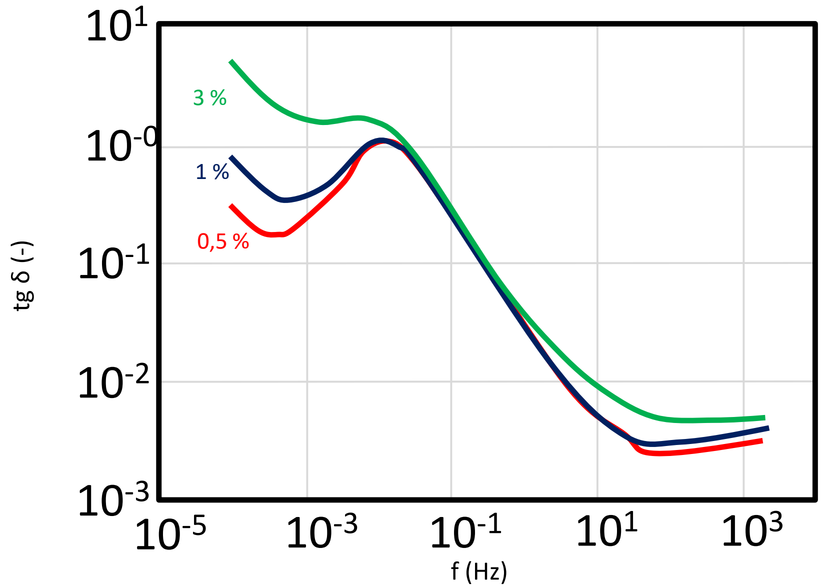
Měření polarizačních/depolarizačních proudů

- Ve frekvenční oblasti (FDC)

Příklad polarizačního spektra pro izolační systém papír-olej



Vliv vlkosti v papírové izolaci



Měření částečných výbojů

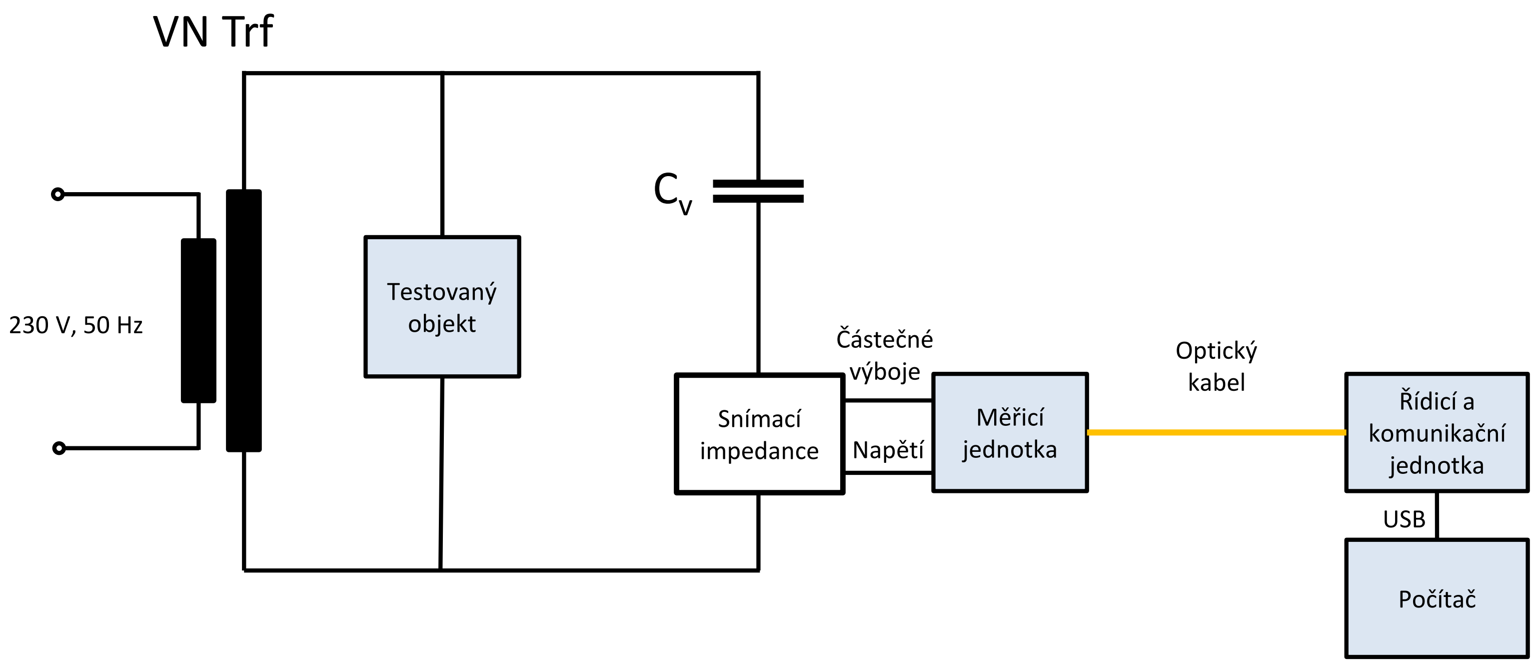
- Částečné výboje vznikají nejčastěji v dutinkách izolačních materiálů, které mohou vznikat při výrobě nebo jako důsledek nepřiměřeného napěťového namáhání či procesu stárnutí
- Přítomnost elektrického výboje v dutinkách způsobuje erozi materiálu a postupnou degradaci izolace
- Při měření částečných výbojů sledujeme následující parametry: zdánlivý náboj, součtový náboj za časový interval, počáteční a zhášecí napětí, četnost výbojů a výkon výbojů

Měření částečných výbojů

- Existuje mnoho metod pro detekci a lokalizaci částečných výbojů, obecně je lze rozdělit na elektrické a neelektrické
- Neelektrické – akustické, optické, chemické
- Elektrické – galvanická, měření elektrických polí, drážkové sondy, metoda induktivně vázané sondy
- Nejčastěji užívané metody jsou elektrické, optické a akustické metody se využívají zejména u vnějších částečných výbojů

Měření částečných výbojů

- Galvanická metoda měření částečných výbojů

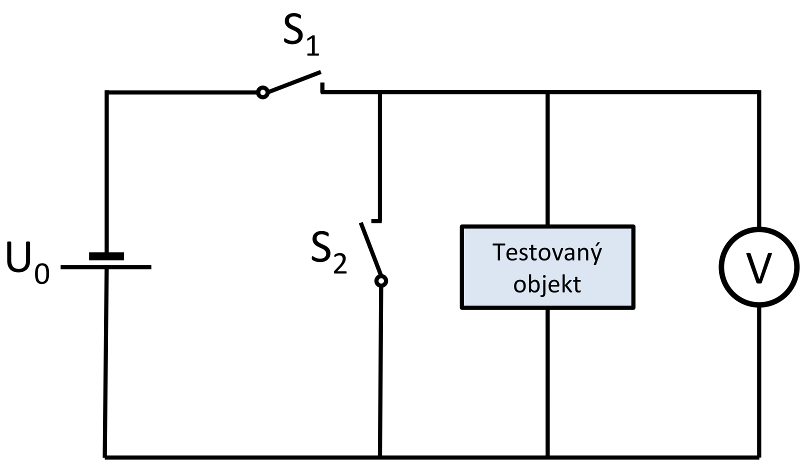


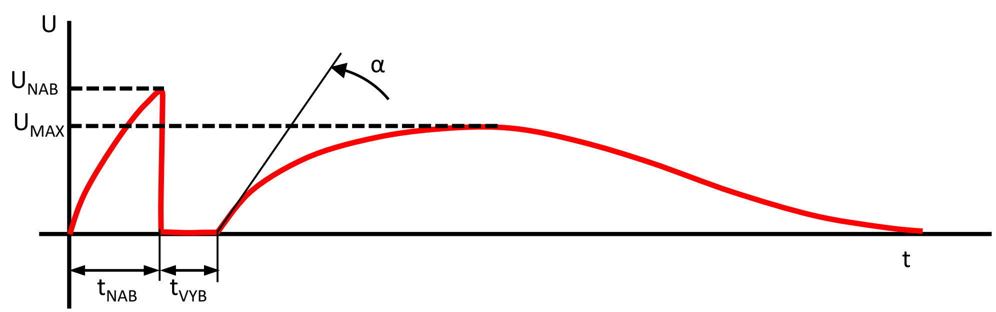
Zobrazení částečných výbojů

- ϕ-q-n zobrazení (ϕ fáze, q velikost náboje, n četnost)

Metoda zotaveného napětí (RVM – Recovery Voltage Method)

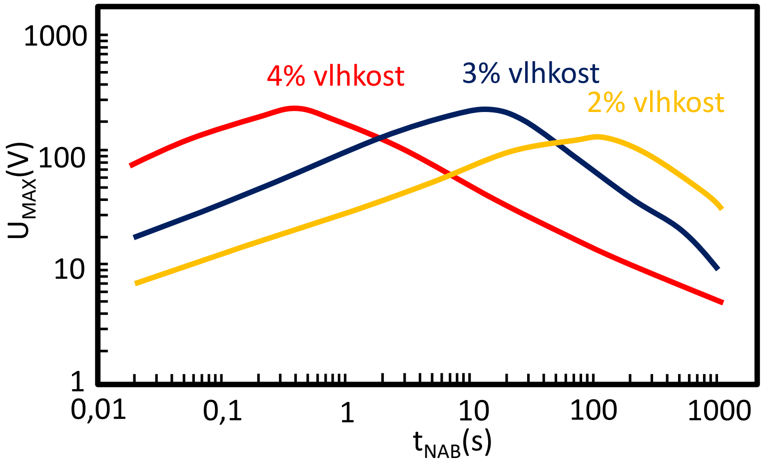
- Metodu lze využít pro detekci vlhkosti v izolačních systémech olej-papír
- Princip spočívá v analýze dosažených maxim zotaveného napětí pro různé nabíjecí a vybíecí časy
- Měření probíhá v následujících fázích: 1. Nabíjení (spínač S_1 sepnutý, S_2 otevřený) 2. Vybíjení (S_1 otevřený, S_2 sepnutý) 3. Měření (S_1 otevřený, S_2 otevřený)
- Při měření se na svorkách testovaného objektu objeví zotavené napětí způsobené zbytkovým nábojem v izolaci

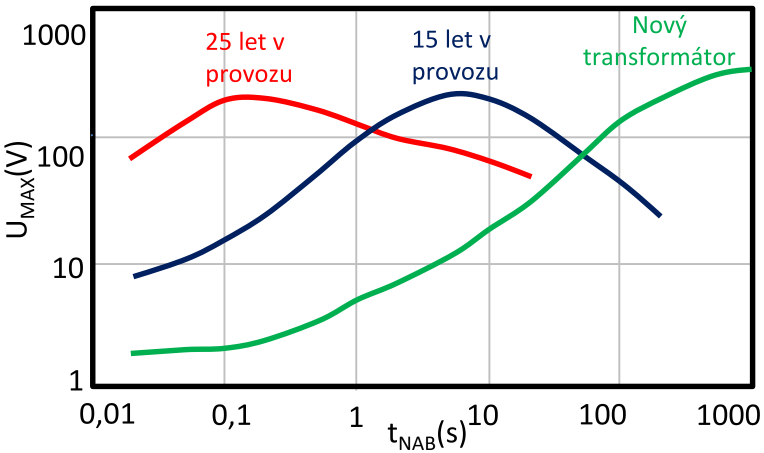




Metoda zotaveného napětí (RVM – Recovery Voltage Method)

- Výstupem metody je závislost maximální hodnoty (případně počáteční strmosti) zotaveného napětí na nabíjecím čase tzv. polarizační spectrum
- Vrcholová hodnota polarizačního spektra se posouvá s obsahem vlhkosti a stářím testované izolace



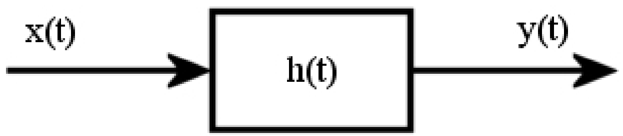


Metody pro detekci mechanických poruch vinutí

- Využití jednoznačného vztahu mezi konstrukčním uspořádáním transformátoru a průběhem odezvy na napětí přiložené na vinutí
- Při změně konstrukčního uspořádání (např. deformací vinutí nebo mezizávitovým zkratem) se změní i odezva transformátoru
- Odezvy transformátorů se zjišťují v časové nebo frekvenční oblasti, přičemž odezva v časové oblasti znamená zjištění časového průběhu odezvy na určitý impuls napětí přivedený na vstup vinutí a odezva ve frekvenční oblasti spočívá ve zjištění amplitudy (popř. i fáze) odezvy na harmonické napětí proměnné frekvence přiváděné na vstup vinutí

Metody pro detekci mechanických poruch vinutí

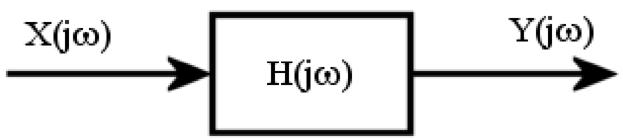
- Za podmínky, že transformát představuje lineární časově stálý systém pasivních prvků lze tento systém jednoznačně charakterizovat v časové oblasti impulzní odezvou h(t):



- Vztah mezi vstupní a výstupní veličinou je pak:

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

- Ve frekvenční oblasti lze systém jednoznačně popsat frekvenčním přenosem $\widehat{H}(j\omega)$

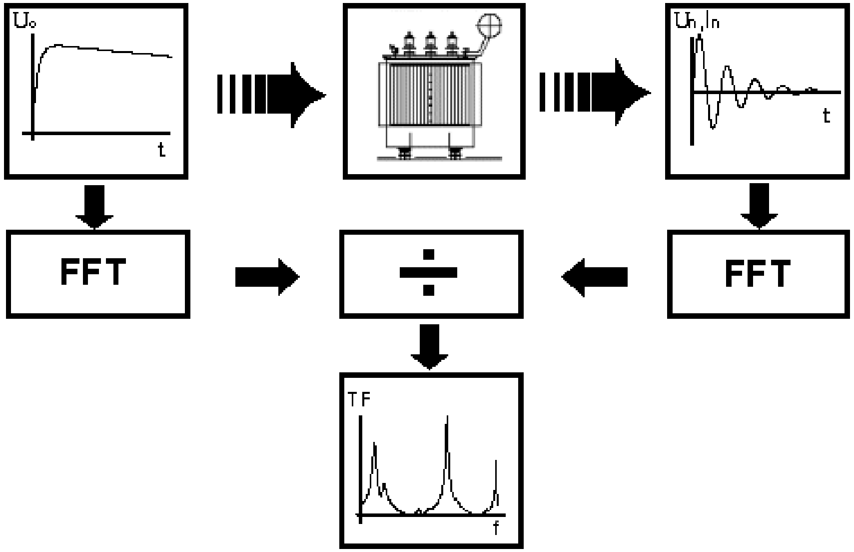


- Vztah mezi vstupní a výstupní veličinou je pak:

$$\widehat{Y}(j\omega) = \widehat{H}(j\omega) \cdot \widehat{Y}(j\omega)$$

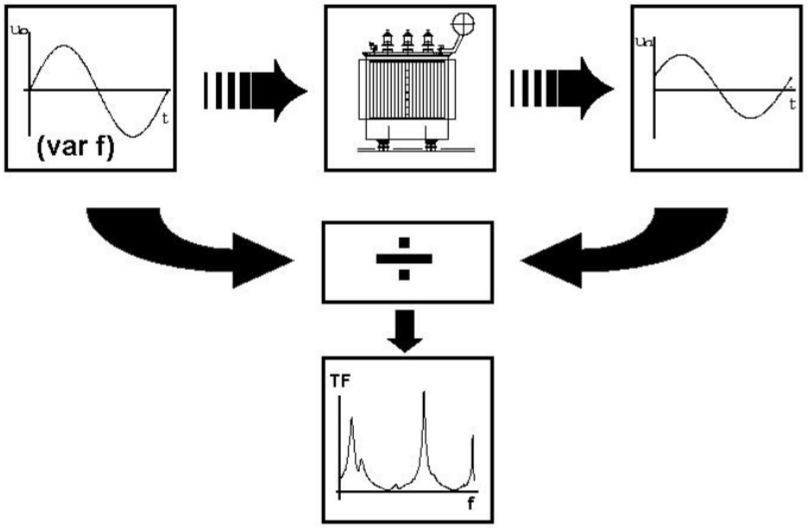
Metody pro detekci mechanických poruch vinutí

- U výkonového transformátoru se za účelem diagnostiky stavu vinutí zjišťuje napěťový přenos
- Napěťový přenos se v časové oblasti zjišťuje pomocí strmého impulzu napětí, kdy se vstupní impulz a příslušná odezva převedou do frekvenční oblasti pomocí rychlé Fourierovy transformace



Metody pro detekci mechanických poruch vinutí

- Nejčastěji se napěťový přenos stanovuje přímo ve frekvenční oblasti, aplikací harmonického napětí s proměnnou frekvencí, kdy se očekává odezva ve tvaru harmonického signálu se stejnou frekvencí, různou amplitudou a s fázovým posunem vzhledem ke vstupnímu signálu



Metody pro detekci mechanických poruch vinutí

- Výstupem metody je zjištěná amplitudová frekvenční charakteristika, která se porovnává s charakteristikou zjišťenou při výchozím nebo opakovaném měření