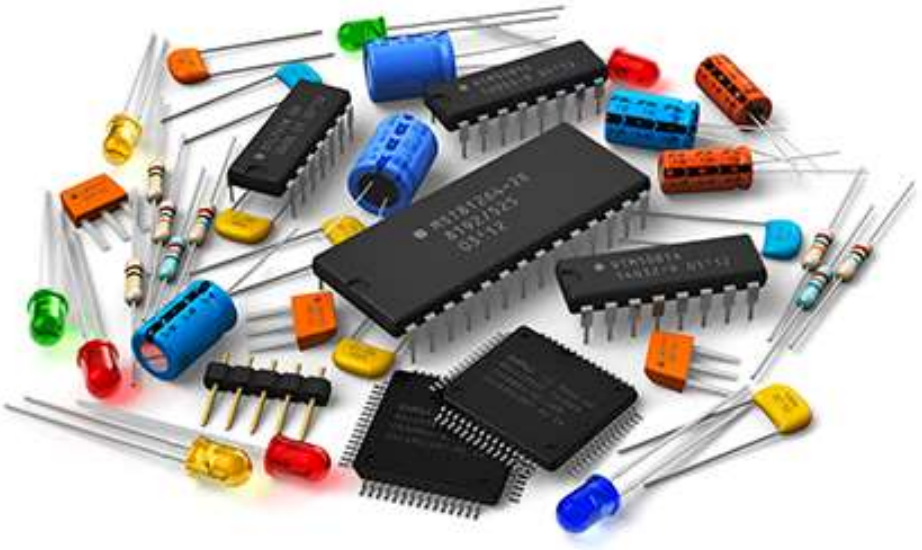
ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Fyzikální elektronika
KET/FYE



Pasivní součástky

Přednáška 1

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- Dozvíte se o fyzikálních principech základních pasivních elektronických součástek, jako jsou rezistory, kondenzátory, cívky, transformátory a krystaly.
- Dozvíte se, jaká je konstrukce a materiálové složení základních pasivních součástek.
- Zjistíte, jaké jsou základní elektrické parametry pasivních součástek.
- Zjistíte, jak se pasivní součástky chovají v elektrických obvodech.

Pasivní součástky

Co jsou pasivní součástky

- **jednoduché stavební prvky** – jednobrany, vícebrany
- elektrické vlastnosti vyjádřitelné prvky se soustředěnými parametry
- **rezistory, kondenzátory, cívky, transformátory, piezoelektrické rezonátory, filtry, ...**
- typický průběh V-A charakteristiky I=f(U)
- **statická charakteristika – lichá funkce, 1. a 3. kvadrant, symetrická podle počátku**

- součástky se soustředěnými parametry $l < \lambda$

L – rozměr součástky

- součástky s rozloženými parametry $l \cong \lambda$

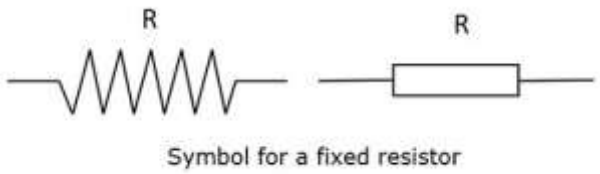
λ – vlnová délka zpracovávaného signálu

Rezistory

Konstrukce rezistorů

- **součástka realizující elektrický odpor**
- platí Ohmův zákon
- jednotka – Ω, kΩ, MΩ
- praktická realizace – **těleso z odporového materiálu mezi přívody**
- používají **se materiály s definovanou hodnotou měrného elektrického odporu** – rezistivita ρ

$$R = \frac{U}{I} \qquad [\Omega, V, A]$$



Symbol for a fixed resistor

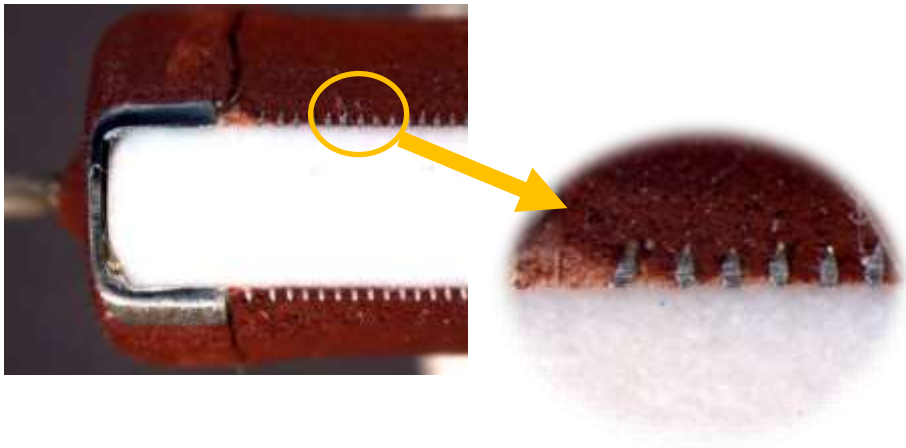


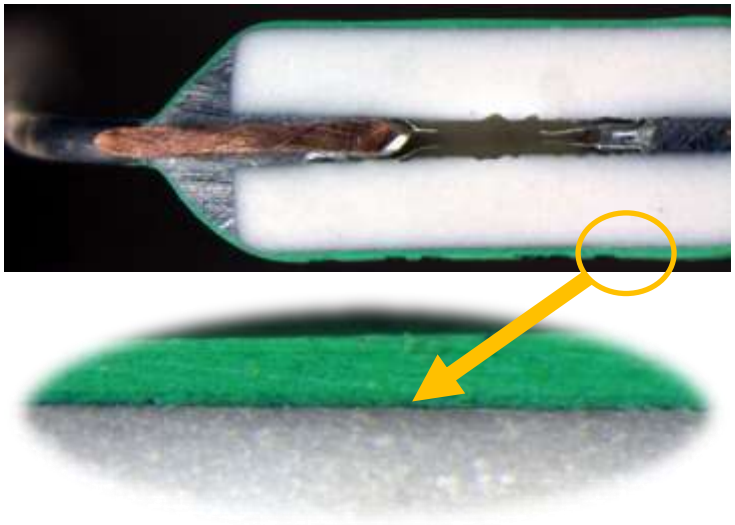


$$R = \rho \frac{l}{S} \qquad [\Omega, \Omega \cdot m, m, m^2]$$

Klasifikace rezistorů

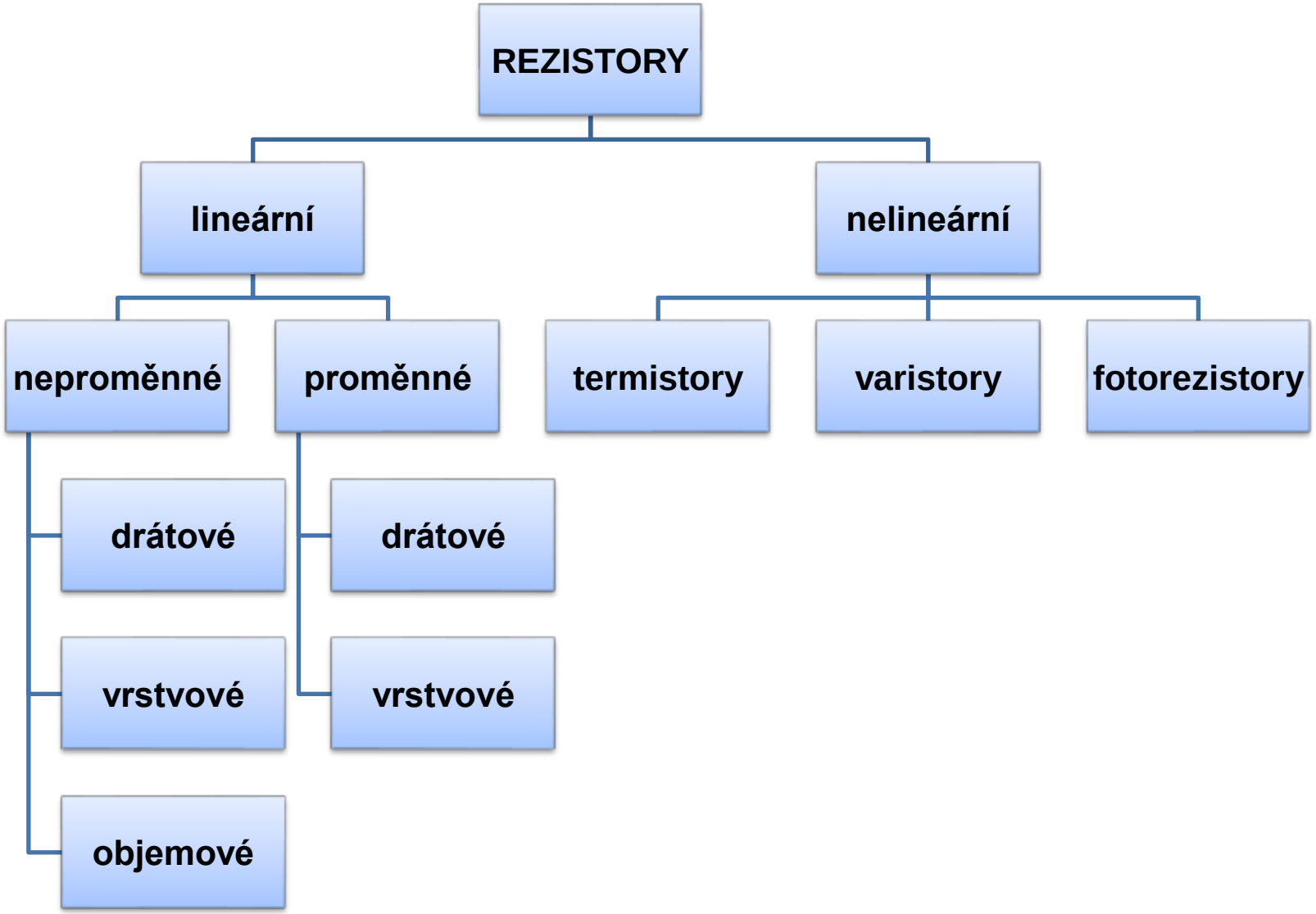
- **podle hodnoty elektrického odporu** – definována výrobcem, neproměnné, proměnné
- **podle průběhu V-A charakteristiky** – lineární, nelineární
- **podle provedení odporové dráhy** – drátové, vrstvové, objemové
- **podle odporového materiálu** – drát z konstantanu a nikelinu, uhlíková, borouhlíková a borosilikátová vrstva, kovové slitiny, polovodiče pro objemové rezistory





Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=G3H5lKoWPpY

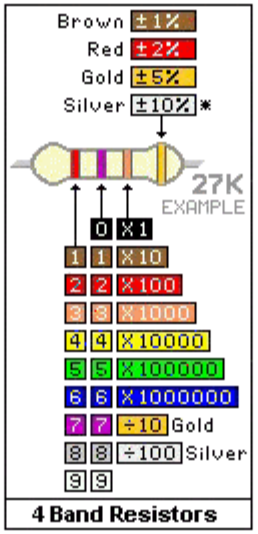
Klasifikace rezistorů

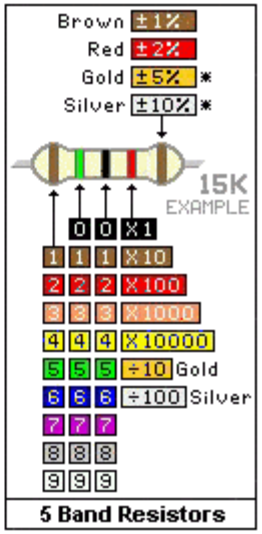


Lineární neproměnné rezistory

- **jmenovitá hodnota odporu** [Ω] – číselný barevný kód, číselné řady Exx (E6, E12, ... E192)
- **dovolená odchylka** [%] – tolerance jmenovité hodnoty (±20%, ±5%, ±0,5%)
- **jmenovité zatížení** [W] – hodnota dlouhodobého zatížení P=UI









Lineární neproměnné rezistory

- **teplotní součinitel odporu TKR** (α_R) [%/°C] – vratná změna odporu v závislosti na teplotě definované na 1°C

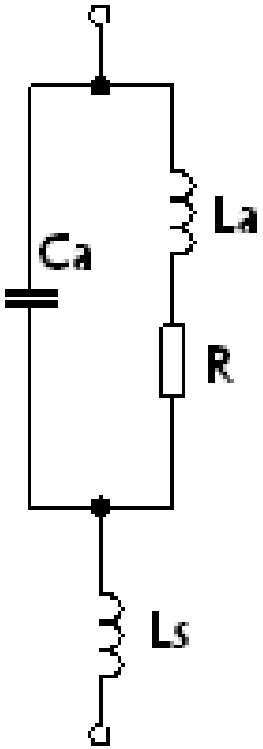
$$TKR = \frac{1}{R}\frac{\Delta R}{\Delta \vartheta}\cdot 100$$

- **napěťový součinitel odporu k_U** [%/V] – změna odporu při změně napětí o 1 V

$$k_U = \frac{1}{R}\frac{\Delta R}{\Delta U}\cdot 100$$

Lineární neproměnné rezistory – náhradní schéma

- **náhradní schéma** – chování rezistoru ve vysokofrekvenční oblasti

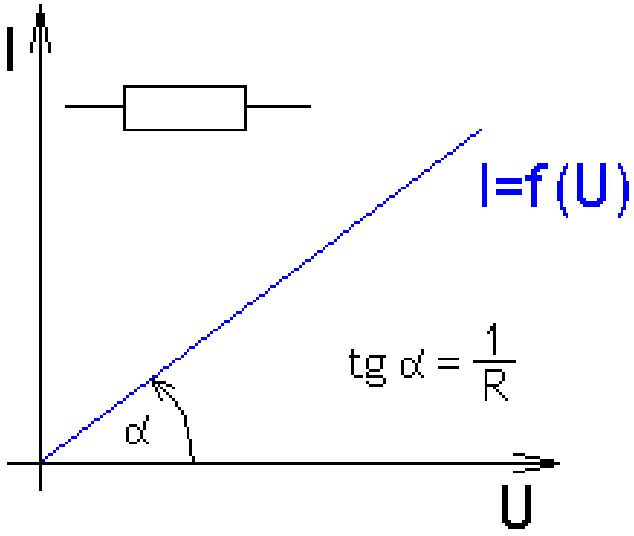


R – rezistance odporové dráhy

L_s – indukčnost přívodů (0,1 nH)

L_a – indukčnost odporové dráhy (0,1 nH – 100 μH)

C_a – kapacita odporové dráhy (10 pF)



VA charakteristika lineárního neproměnného rezistoru

Lineární neproměnné rezistory

- **šum rezistoru** – vznik rušivých střídavých napětí v odporové dráze
  - *tepelný (Johnsonův) šum*
  - *proudový šum* – změna koncentrace nosičů náboje v objemu odporové dráhy, úměrný 1/f, udává se na 1 V přiloženého napětí (1-5 µV/V)

$$U_n = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R_N \cdot \Delta f}$$

k – Boltzmannova konstanta

T - absolutní teplota

RN – jmenovitá hodnota odporu

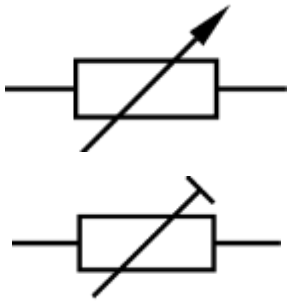
Δf – frekvenční pásmo

Lineární neproměnné rezistory

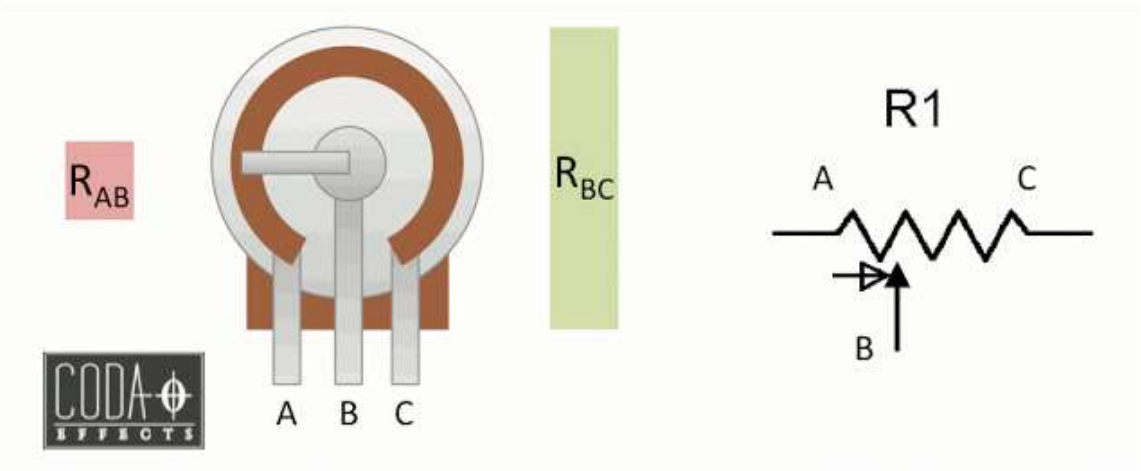
- **všeobecné použití** – zesilovače, filtry, dělič napětí, 1 Ω - 10 MΩ (0,25 – 2 W)
- **stabilní rezistory** – malé TKR, měřící zařízení, odporové dekády, 1 Ω - 10 MΩ (max. 1 W)
- **miniaturní rezistory** - 1 Ω - 10 MΩ (0,125 – 0,5 W)
- **vysokoohmové rezistory** – pro měření malých napětí a proudů, 10 MΩ - 100 TΩ
- **vysokonapěťové rezistory** – speciální vn obvody
- **vysokofrekvenční rezistory s potlačenou indukčností** – bifilární vinutí, vf obvody vysílačů, přijímačů, měření



Lineární proměnné rezistory



- **nastavitelné rezistory** – potenciometry, trimry
- **posuvné, otočné**
- **jednoduché proměnné rezistory**
- **vícenásobné proměnné rezistory** - dvojité se samostatným nastavením, tandemové se společným nastavením
- **víceotáčkové potenciometry** – přesné nastavení

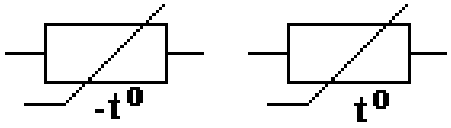




Nelineární rezistory

- **závislost odporu na některé fyzikální veličině**
- objemové jevy v polovodičových polykrystalických materiálech
- **termistory** – závislost na teplotě
- **varistory** – závislost na napětí
- **magnetorezistory** – závislost na magnetickém poli
- **tenzometry** – závislost na mechanickém napětí
- **fotorezistory** – závislost na osvětlení

Nelineární rezistory - termistory



- THERMal rezISTOR
- **polovodičová součástka** – odpor závislý na teplotě
- **NTC** - záporný teplotní součinitel el. odporu
- **PTC** – kladný teplotní součinitel el. odporu
- provedení – tyčinkový, destičkový, perličkový





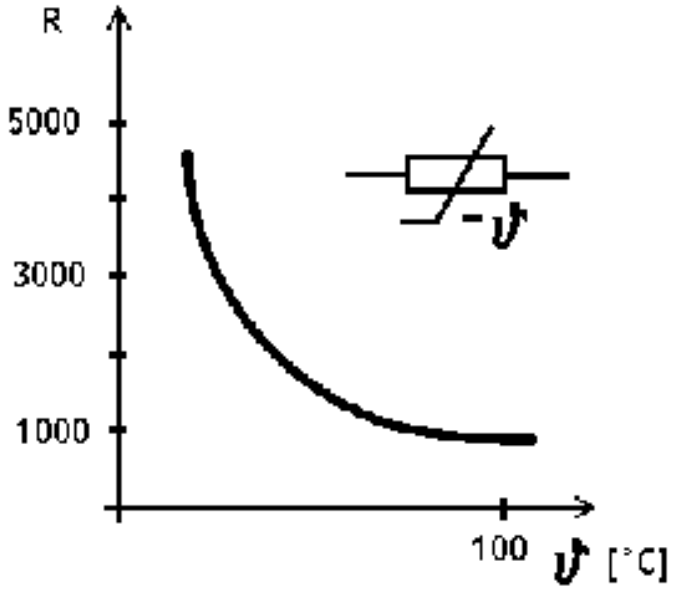


Nelineární rezistory – NTC termistory

- **Negative Thermal Coefficient**
- polykrystalické oxidy kovů – Mn, Ni, Co, Fe, Ti
- **teplotní vybuzení volných nosičů – odpor s teplotou klesá**

$$R_{T_2} = R_{T_1}\left[B\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right]$$

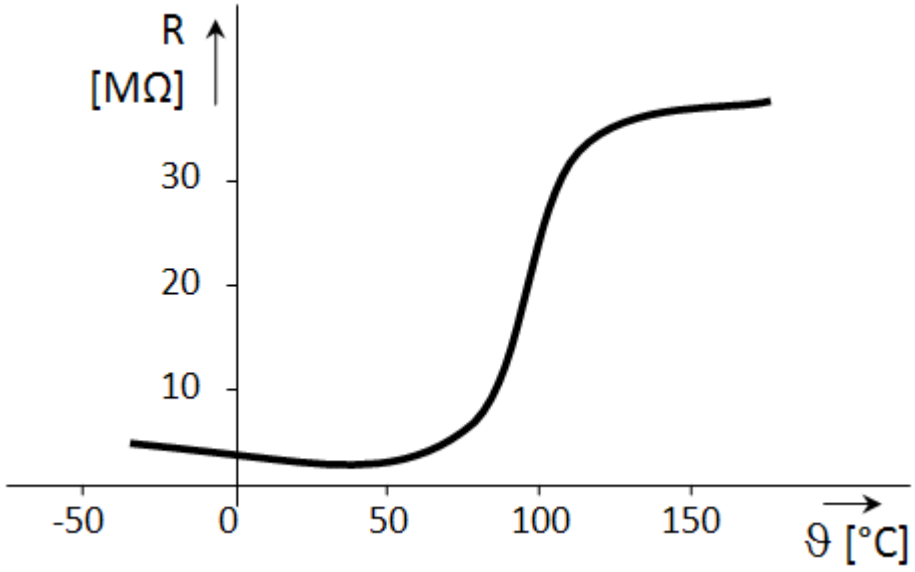
B – tepelná citlivost termistoru daná materiálem



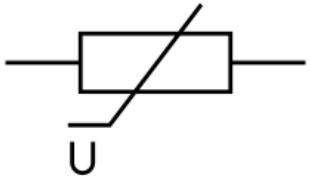
Nelineární rezistory – PTC termistory

- **Positive Thermal Coefficient**
- polovodičové feroelektrické materiály – $BaTiO_3$, BaO, TiO_3
- **ionizace příměsí, změna pohyblivosti nosičů vlivem rozptylu na krystalové mřížce**
- křemíkové krystalové snímače
- někdy nazývané jako pozistory





Nelineární rezistory - varistory



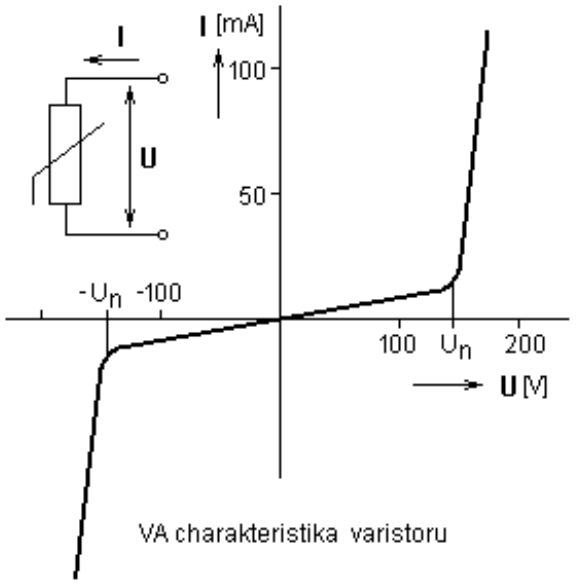
- **napěťově závislé odpory** (VARIable reziSTOR)
- odpory VDR (Voltage Dependent Resistor), MOV (Metal Oxide Varistor)
- polovodiče na bázi polykrystalického SiC nebo ZnO
- **změna odporu s přiloženým napětím**
- zrnitá struktura – emise elektronů z ostrých hrotů, tepelná emise, napěťové průrazy oxidových vrstev
- **přepěťové ochrany**

$$U = CI^{\beta}$$

C – materiálová konstanta

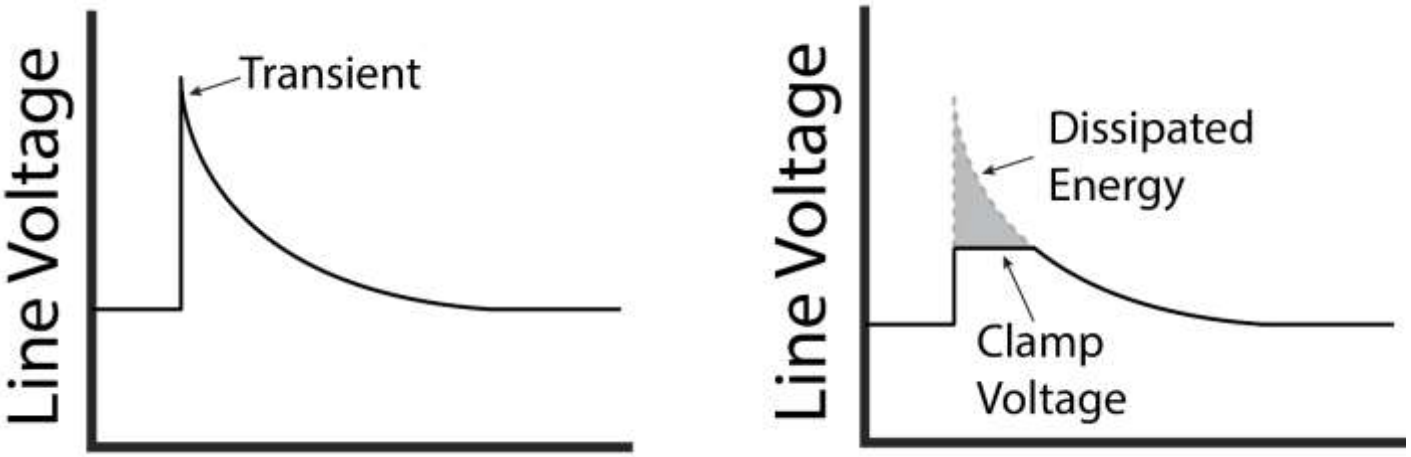
β - činitel nelinearity (0,15 – 0,5)

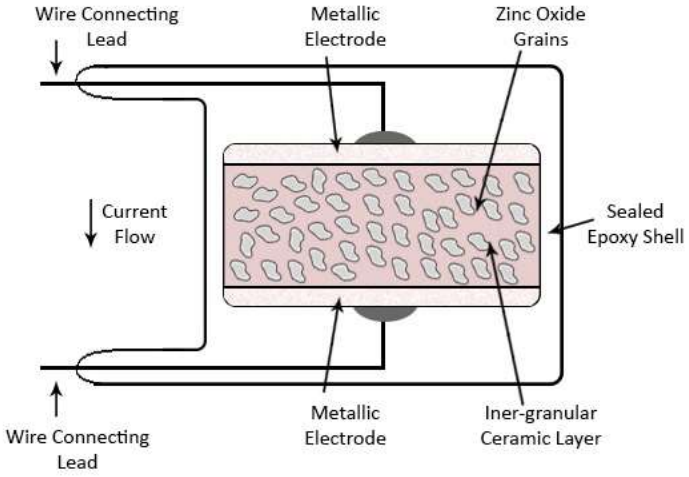




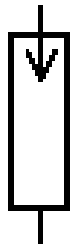
VA charakteristika varistoru

Nelineární rezistory - varistory





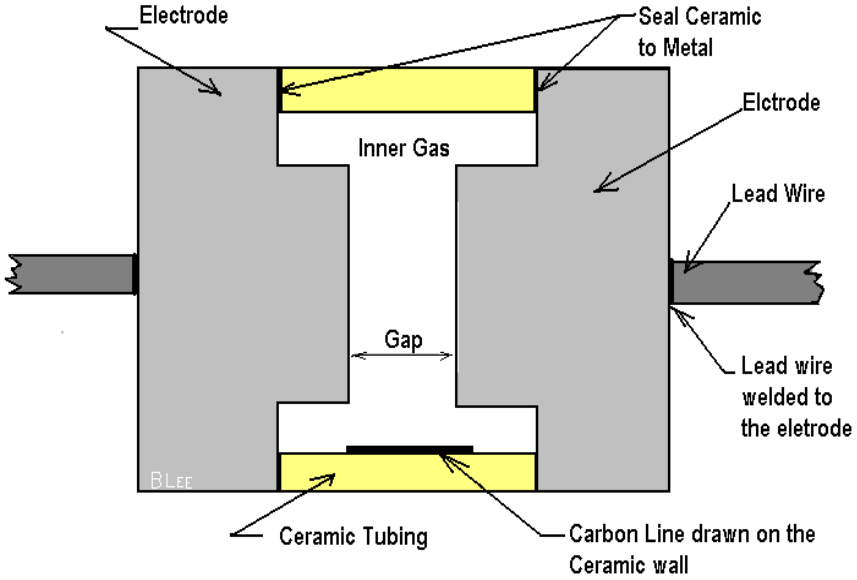
Nelineární rezistory - bleskojistky



- **součástka pro opakované svedení velkých proudů**
- velký klidový odpor – 10^{10} Ω
- zanedbatelný odpor při dosažení průrazného napětí
- **pomalá reakce**







Gas Discharge Tube Construction

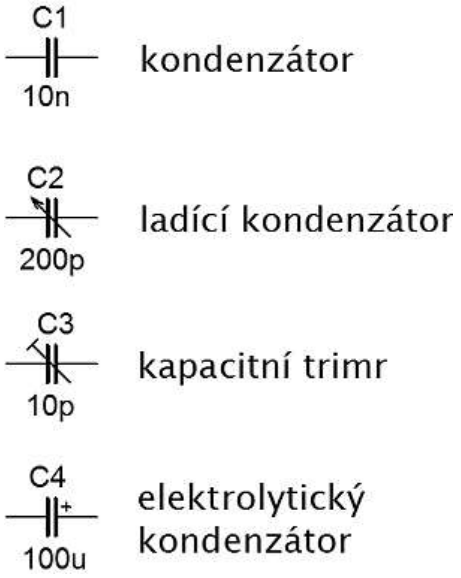
Nelineární rezistory - bleskojistky

- **elektrody** - wolfram nebo slitiny wolframu, stříbra a mědi
- **plynová náplň** - inertní plyn, argon, helium, vodík, dusík
- **elektrody jsou odděleny keramickým tělem bleskojistky**
- **parametry** – pracovní napětí, průrazné napětí, impulzní průrazné napětí, max. proudový impulz, AC proud, typ vývodů, plynová náplň, životnost, kapacita

Kondenzátory

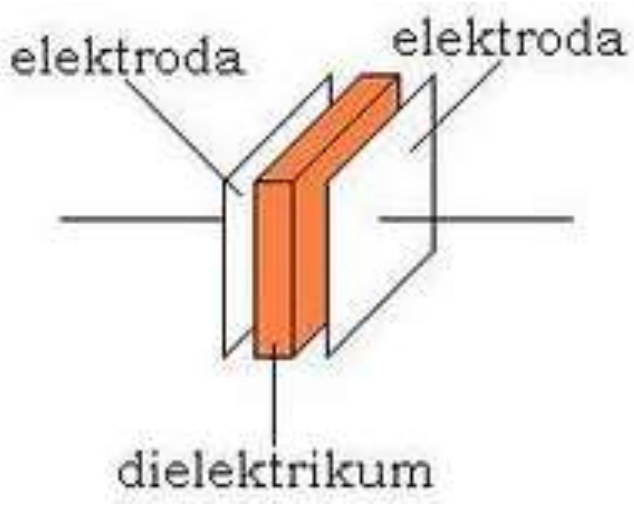
Konstrukce kondenzátorů

- **dvě vodivé elektrody oddělené nevodivým dielektrikem**
- **kapacita** – schopnost akumulovat elektrický náboj
- **jednotka** – F (Farad), mF, µF, nF, pF
- dielektrikum – materiál s definovanou relativní permitivitou ε_r
- permitivita vakua $\varepsilon_0 = 8{,}85.10^{-12}$ F/m



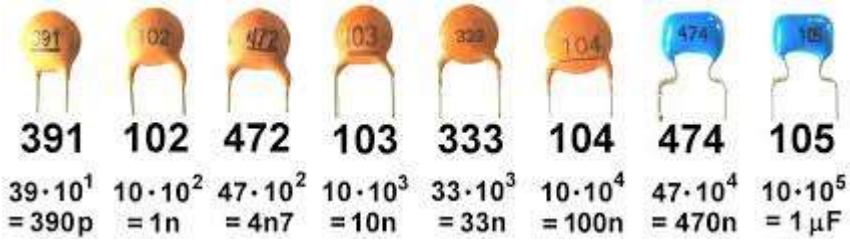
$$C = \frac{Q}{U} \qquad [F, C, V]$$

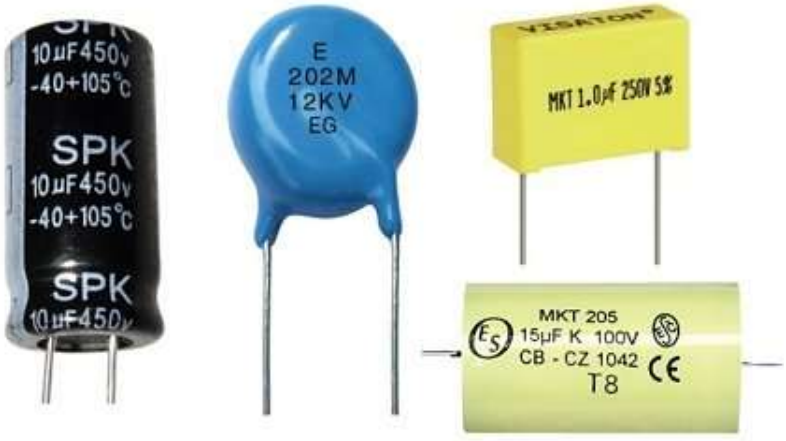
$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \qquad [F, F/m, m^2, m]$$



Parametry kondenzátorů

- **jmenovitá hodnota kapacity** – udána výrobcem, číselný kód, barevné značení, hodnoty v geometrické řadě Exx (E6, E12,...)
- **dovolená odchylka** [%] – 20 %, 5 %, 0,5 %
- **elektrická pevnost** – určena jmenovitým napětím
- **izolační odpor** [MΩ] - parametr pro elektrolytické kondenzátory
- **provozní a mechanické vlastnosti** – pracovní teplota, relativní vlhkost, tlak, odolnost proti otřesům





Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=f_MZNsEqyQw

Náhradní schéma

- **náhradní schéma** – frekvenční vlastnosti a ztráty kondenzátoru
- sériové nebo paralelní náhradní schéma
- ztráty v reálném kondenzátoru – **ztrátový úhel δ, ztrátový činitel tgδ** (10^{-4} – 10^{-2})
- ztrátový činitel – závislý na teplotě, frekvenci, napětí
- činitel jakosti (kvality) Q

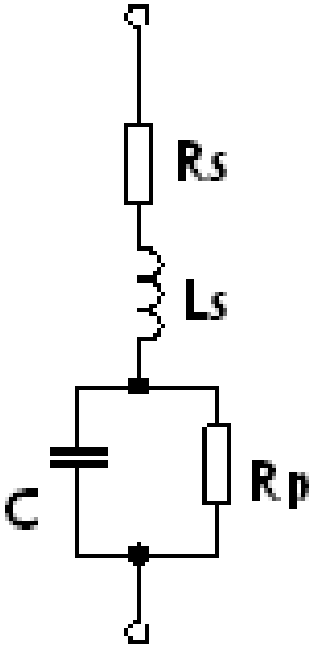
$$Q = \frac{1}{tg\delta}$$

C – kapacita kondenzátoru

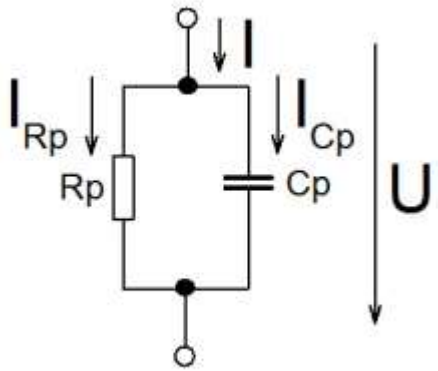
R_p – parazitní paralelní odpor, určen materiálem dielektrika

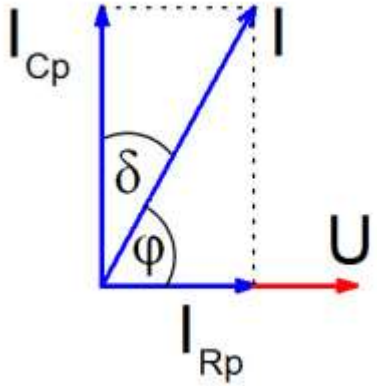
R_s – parazitní sériový odpor přívodů

L_s – parazitní sériová indukčnost přívodů

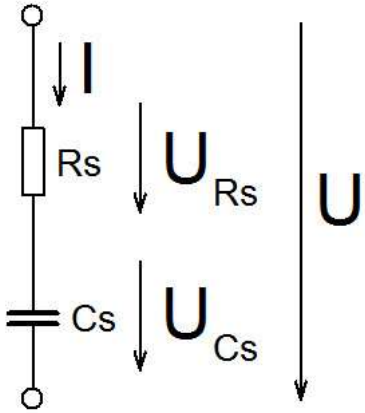


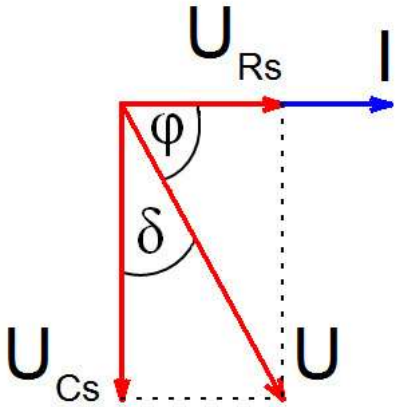
Náhradní schéma





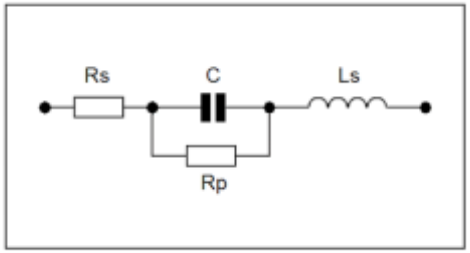
$$tg\delta = \frac{I_{Rp}}{I_{Cp}} = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$





$$tg\delta = \frac{U_{Rs}}{U_{Cs}} = \omega C_s R_s$$

Frekvenční vlastnosti

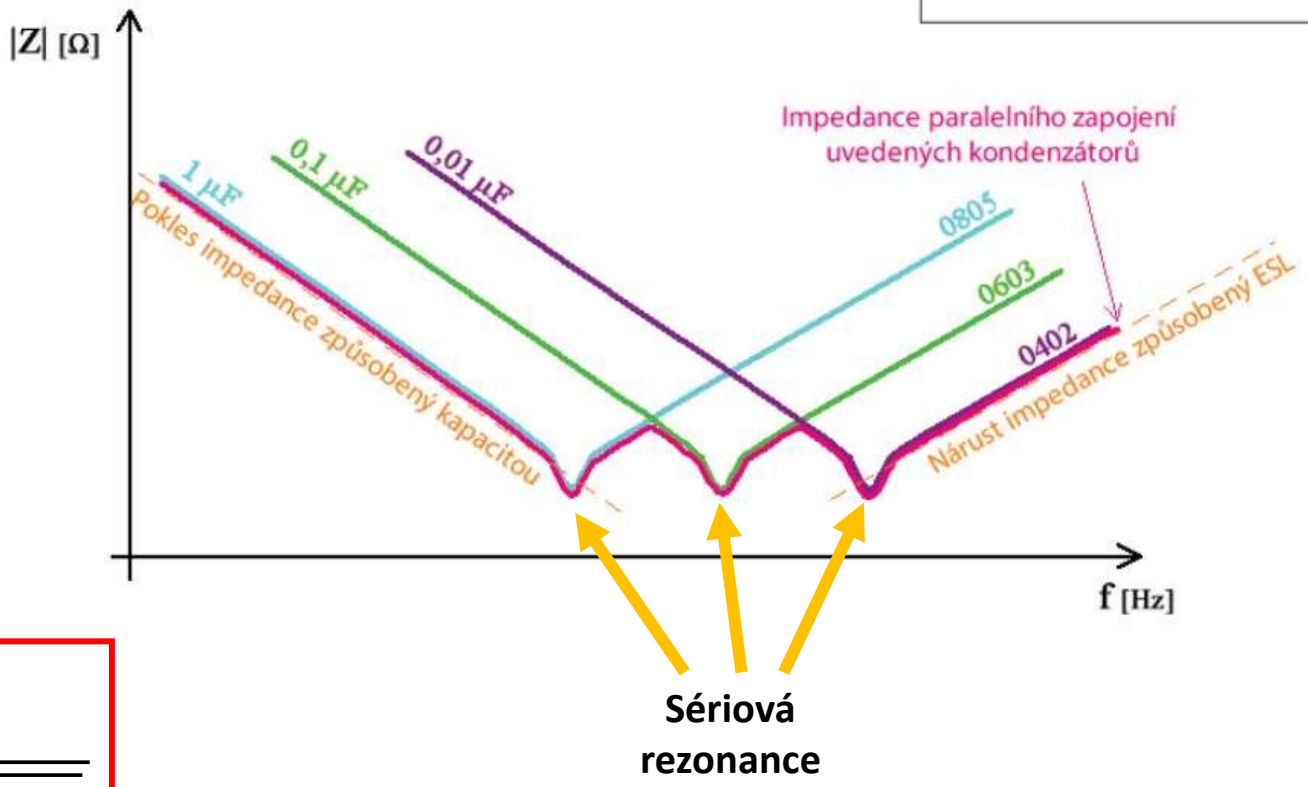


$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$X_L = X_C$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



Teplotní vlastnosti kondenzátorů

- **teplotní součinitel kapacity TKC** – relativní změnu kapacity při změně teploty o 1°C

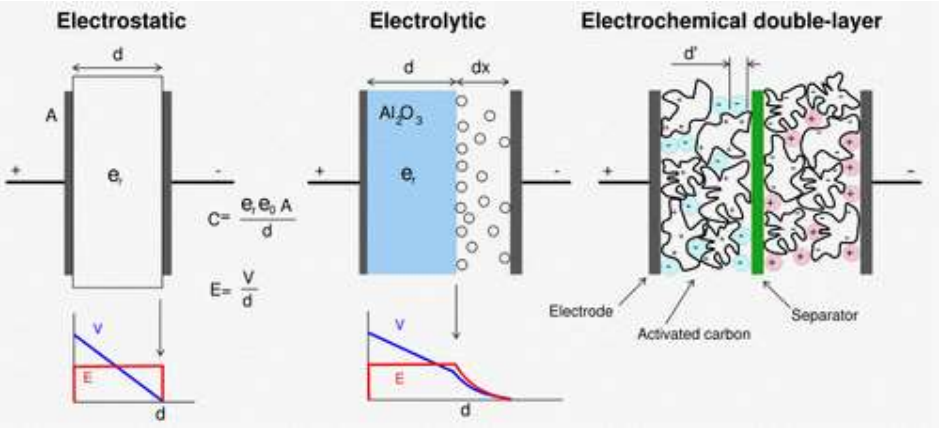
$$TKC = \frac{1}{C}\frac{\Delta C}{\Delta \vartheta}\cdot 100 \qquad [\%/°C]$$

- **teplotní součinitel ztrátového činitele tgδ** – relativní změna ztrátového činitele při změně teploty o 1°C

$$TKtg\,\delta = \frac{1}{tg\,\delta}\frac{\Delta tg\,\delta}{\Delta \vartheta}\cdot 100 \qquad [\%/°C]$$

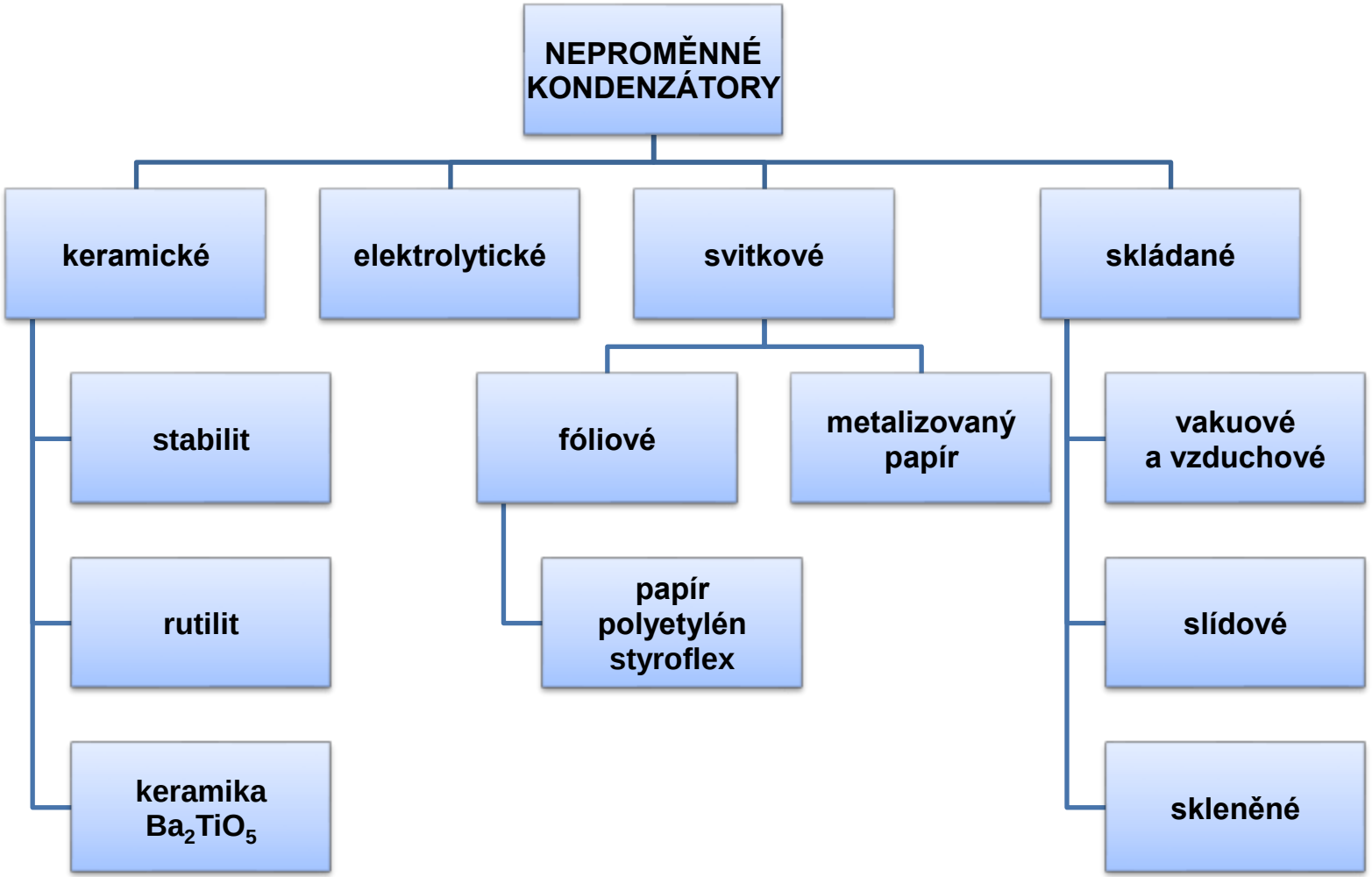
Rozdělení kondenzátorů

- **proměnné**
- **neproměnné**
- **technologické provedení** – skládané (křehká dielektrika), svitkové (ohebná dielektrika), keramické, elektrolytické, elektrochemické
- **materiál dielektrika**
  - slída, papír, vzduch,
  - plastická hmota, keramika

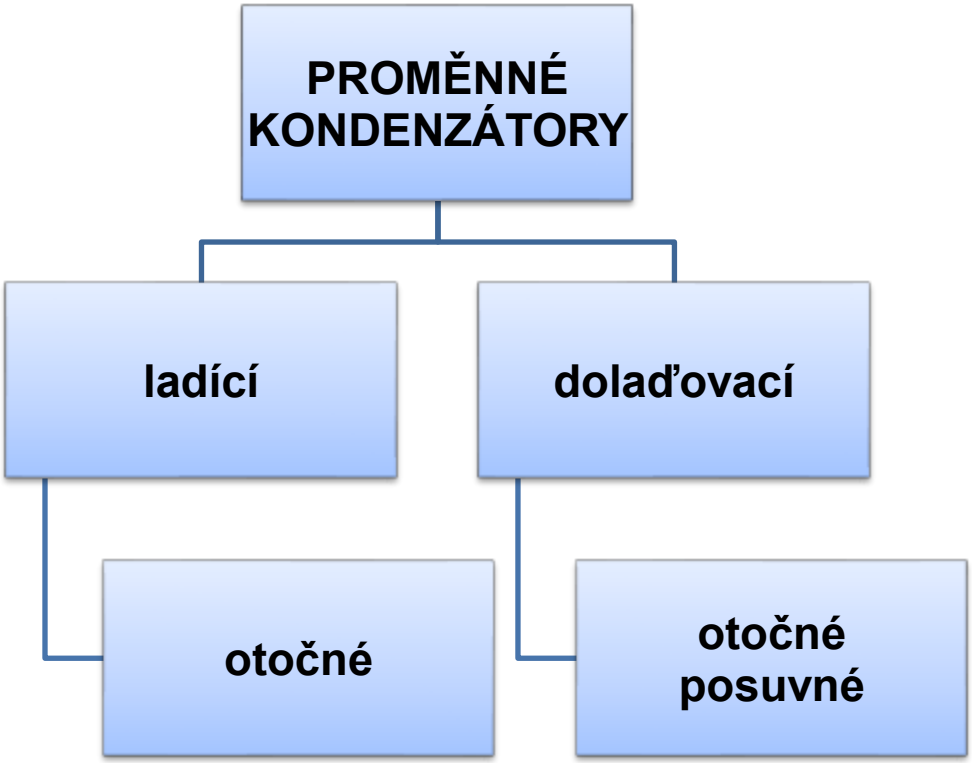




Rozdělení kondenzátorů - neproměnné



Rozdělení kondenzátorů - proměnné



Rozdělení kondenzátorů - neproměnné

- **slídové** – dobré vlastnosti pro vf techniku, malé ztráty, malá kapacita (10 nF), malý izolační odpor, parametry málo závislé na frekvenci
- **svitkové** – dlouhé pásy dielektrika s kovovou fólií, kapacita jednotky µF, velká vlastní indukčnost
- **papírové** – impregnovaný papír
- **MP (metalizovaný papír)** – vrstva nízkotavného kovu Zn-Ag pro vyšší kapacitu, zmenšení rozměrů, hmotnosti, regenerační schopnosti



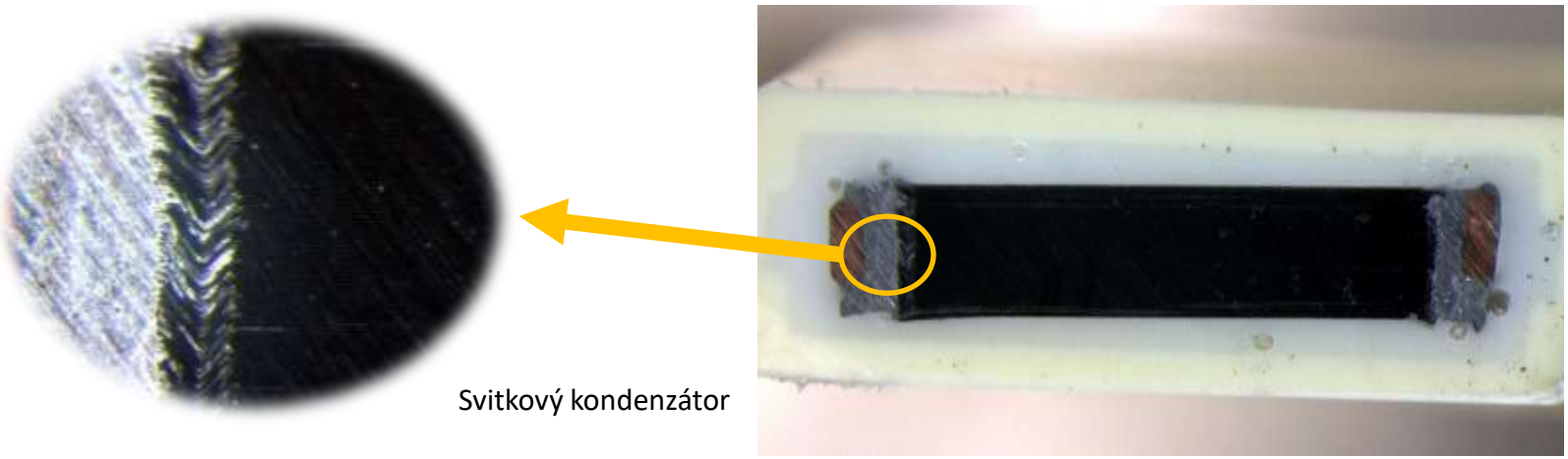






Rozdělení kondenzátorů - neproměnné

- **polystyrénové** – měřicí a vf technika, záporný TKC, malý ztrátový činitel, velký izolační odpor, malá teplotní odolnost, nevhodné pro impulzní obvody
- **terylénové (polyesterové)** – velký ztrátový činitel, velký izolační odpor, široký teplotní rozsah
- **teflonové** – velká cena, malá změna C a tgδ v širokém rozsahu teplot, široký rozsah frekvencí, vhodné pro vyšší výkony



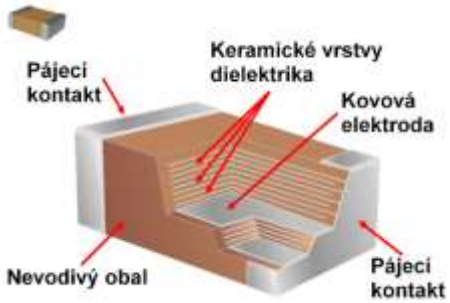
Svitkový kondenzátor

Rozdělení kondenzátorů - neproměnné

- **keramické** – lisování, sušení a vypálení keramických směsí
  - **typ I** – porcelánové hmoty, malá permitivita (3-5), rutilové hmoty TiO2 (ε_r=80-140), stabilní, lineární teplotní závislost, vhodné pro vf aplikace, STABILIT
  - **typ II** – vazební a blokovací kond., kapacita teplotně závislá, velká permitivita (1000), materiály s feroelektrickými vlastnostmi, $BaTiO_3$, PERMITIT
  - **typ III** – velká kapacita, feroelektrická polovodičová keramika, dielektrikum tvořeno polovodičem a izolantem, polovodivá zrna obalena izolantem, na bázi $BaTiO_3$, velké ztráty, malé provozní napětí

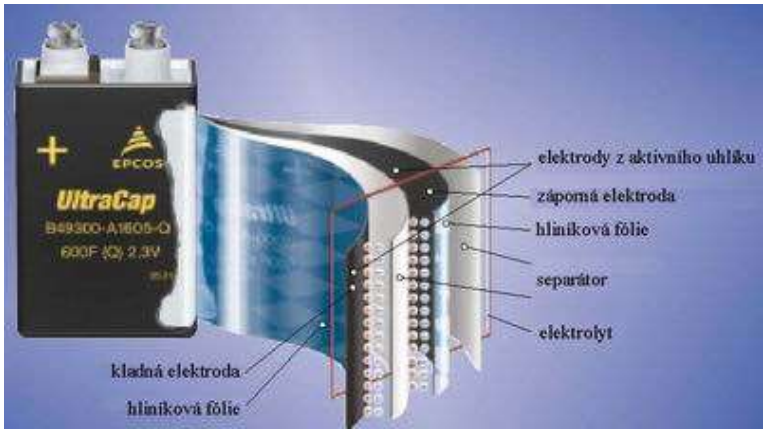






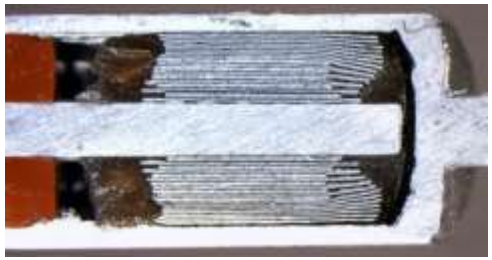
Rozdělení kondenzátorů - neproměnné

- **elektrolytické** – dielektrikum tvoří tenká vrstva oxidu na povrchu Al nebo Ta elektrody (anoda), katoda tvořena elektrolytem, mokré a suché, správná polarita napětí, velké hodnoty kapacit, velký ztrátový činitel, velká teplotní závislost

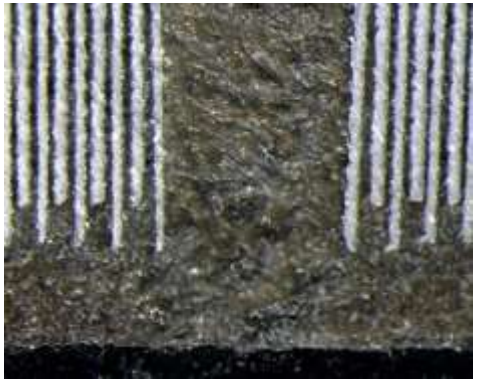










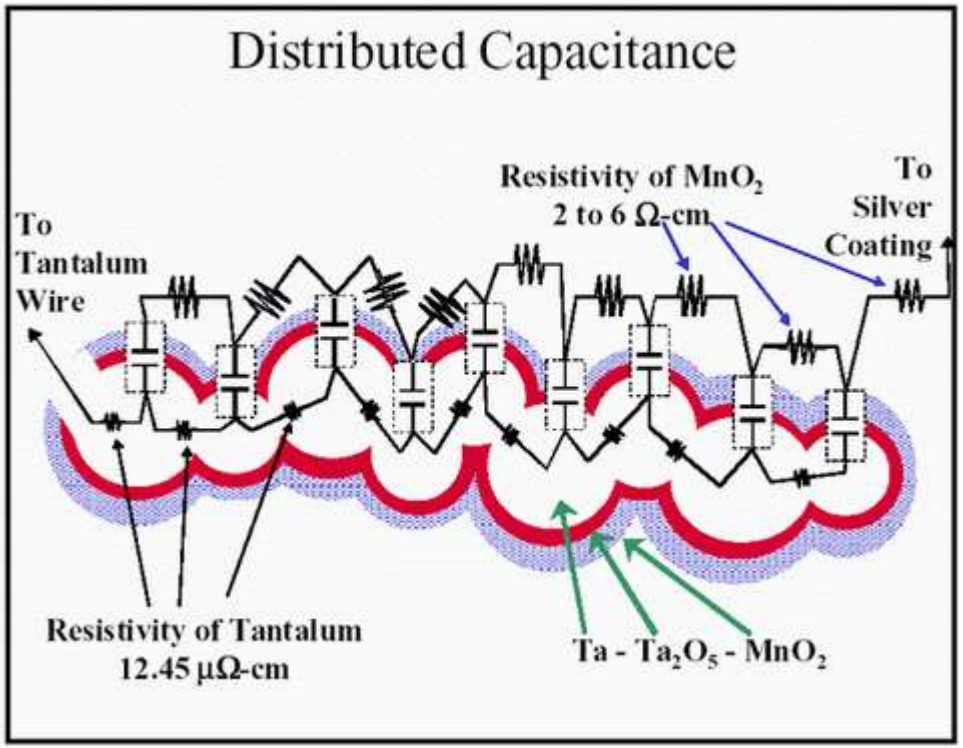


Rozdělení kondenzátorů - neproměnné

- **tantalové** – mokré a suché, Ta tvoří anodu, elektrolytem H_2SO_4 ve stříbrném kalíšku (katoda), u suchých je anoda pokryta MnO_2, dále nanesena vrstva C a Ag (katoda), vyšší stabilita parametrů, vyšší pracovní frekvence 100 kHz, malé provozní napětí







Rozdělení kondenzátorů - proměnné

- **změna kapacity jen v určitém rozsahu**
- změna kapacity – **změna polohy desek**
- **dielektrikum** – vzduch, keramika, sklo, polystyrén
- **dolaďovací (trimry)** – změna v malém rozsahu (desítky pF)
- **ladící** – definovaný průběh kapacity, plynulé nastavení, lineární nebo nelineární průběh, nahrazovány varikapy



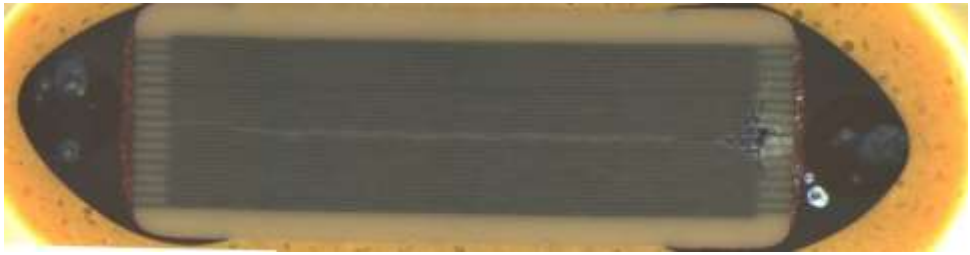


Průraz kondenzátoru



bez poruchy

první průraz



následek zkratu



Cívky

Konstrukce cívek



- konstrukčně složitá součástka s výraznou vlastní nebo vzájemnou indukčností
- frekvenčně závislá součástka
- dobré vlastnosti jen v úzkém rozsahu frekvencí napětí, proudů a teplot
- **indukčnost** – úměra mezi mag. tokem a protékajícím proudem, závislost na relativní permeabilitě μ_r
- **složení** - magnetický obvod a vinutí
- permeabilita vakua - $4\pi.10^{-7}$ [H/m]

$$L = N\frac{\Phi}{I} \qquad [H, Wb, A]$$

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{S}{l} N^2 \qquad [H, H/m, m^2, m]$$

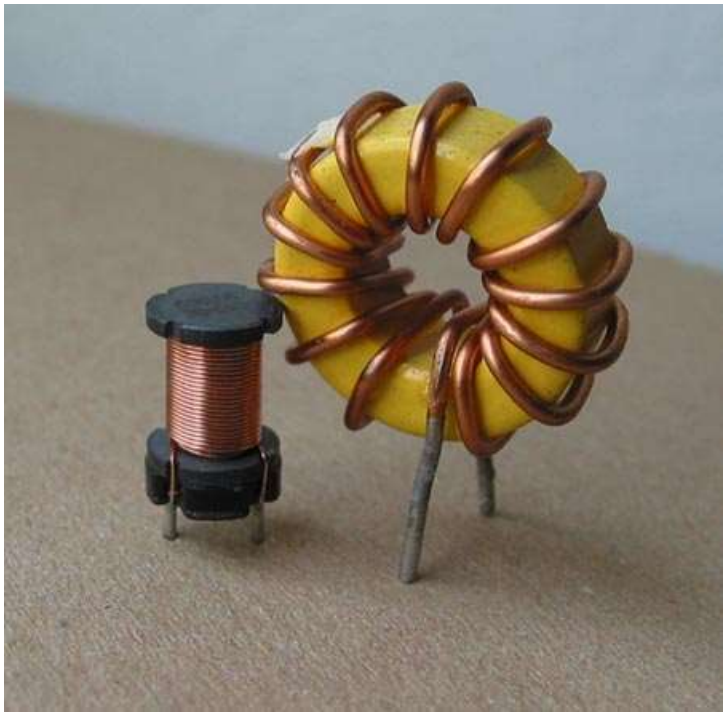


Rozdělení cívek

- selenoidy
- toroidy

- vzduchové cívky
- cívky s jádrem

- tlumivky



$$N = \kappa\sqrt{L}$$

N – počet závitů cívků

κ- materiálová konstanta a tvar jádra

L – požadovaná indukčnost

Rozdělení cívek

- **vzduchové** – malé indukčnosti (1 µH – 100 mH), lakované Cu vodiče, vf lanka pro odstranění skin efektu, max. frekvence - jednotky MHz

- **cívky s magnetickým jádrem** – zvyšují mag. vodivost → zvýšení indukčnosti, jádro – mag. měkký materiál pro potlačení ztrát (železo, ferit)

- **tlumivky** – cívky velkých indukčností (1 H), mag. jádro,filtrace napájecích napětí, realizace vazeb, oddělení napájení







FERIT

- **výrazné zvýšení indukčnosti cívky**
- výroba spékáním (sintrování)
- oxidy železa a jiných kovů s odporem 100 kΩ – 100 GΩ
- zanedbatelné ztráty vířivými proudy
- manganato-zinečnatý ferit (Mn-Zn-Fe2O4) – H
- nikelnato-zinečnatý ferit (Ni-Zn-Fe2O4) – N
- μ_r > 1000 pro frekvence do 50 kHz
- μ_r = 10 - 600 pro frekvence do 200 MHz

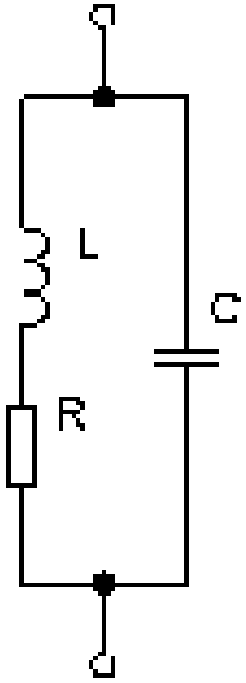




Princip činnosti: https://www.youtube.com/results?search_query=inductors

Náhradní schéma

- náhradní schéma – frekvenční vlastnosti a ztráty v cívce
- sériové nebo paralelní schéma
- **ztráty v reálné cívce** – ztrátový úhel δ, ztrátový činitel tg δ
- činitel jakosti (kvality) Q



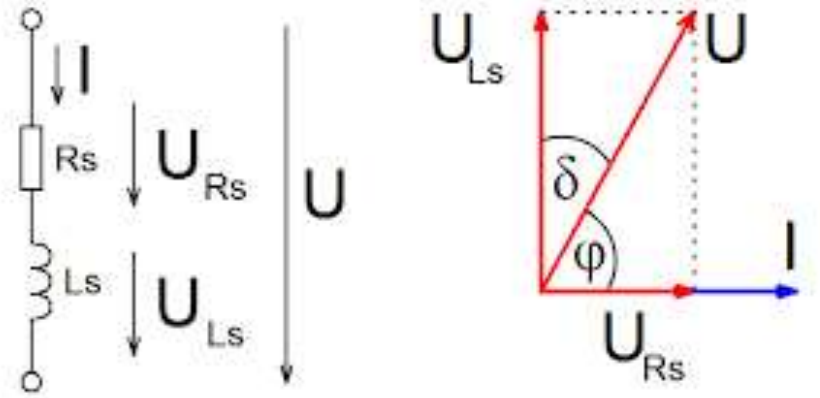
$$Q = \frac{1}{tg\,\vartheta}$$

L – vlastní indukčnost cívky

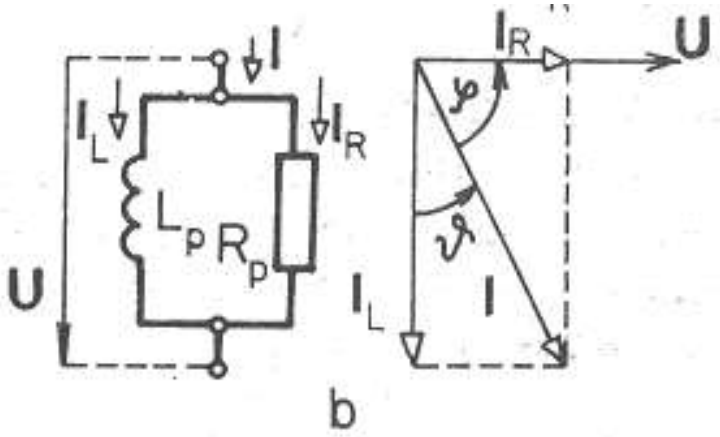
C – parazitní kapacita cívky

R – ztráty v cívce, zahrnuje ztráty ve vodičích, ztráty magnetického obvodu, ztráty vířivými proudy

Náhradní schéma



$$tg\,\vartheta = \frac{U_{Rs}}{U_{Ls}} = \frac{R_S}{\omega L_S}$$



$$tg\,\vartheta = \frac{I_R}{I_L} = \frac{\omega L_P}{R_P}$$

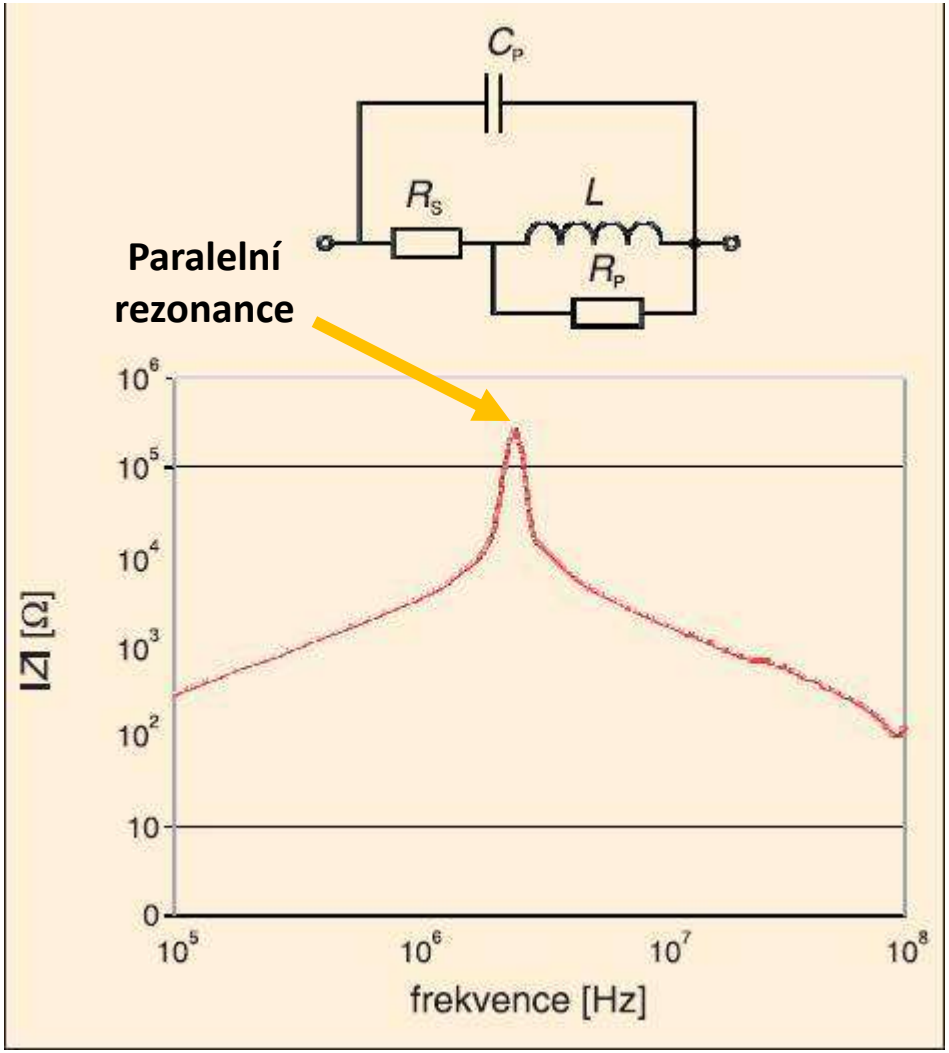
Frekvenční vlastnosti

$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

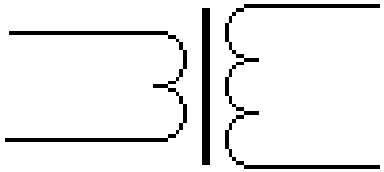
$$X_L = X_C$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

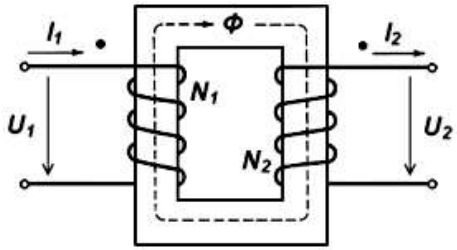


Transformátory

Konstrukce transformátoru

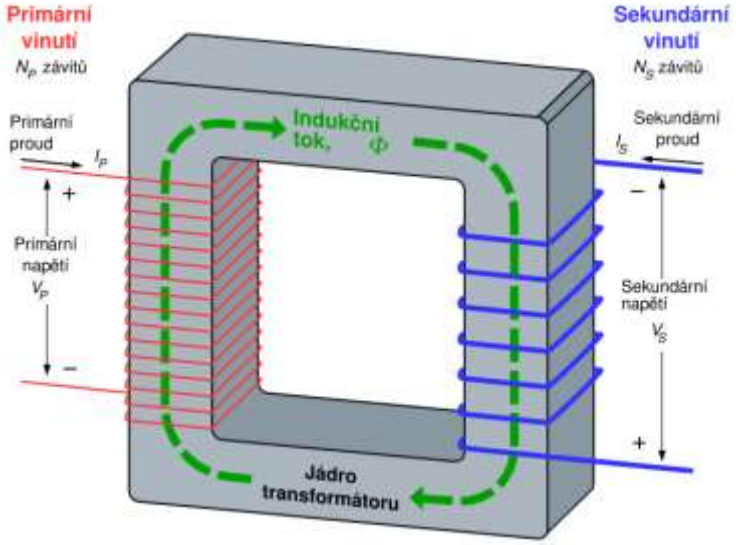


- **primární a sekundární vinutí**
- dvě a více cívek
- **vazba magnetickým tokem** – galvanické oddělen
- vzájemná indukčnost M [H]
- jádro – plechy (EI, M, C), ferit, permalloy



$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = p$$

$$p^2 = \frac{Z_2}{Z_1}$$

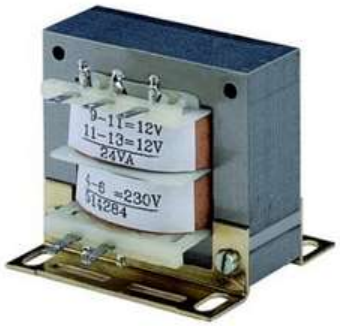


$$P_1 = P_2$$

Rozdělení transformátorů

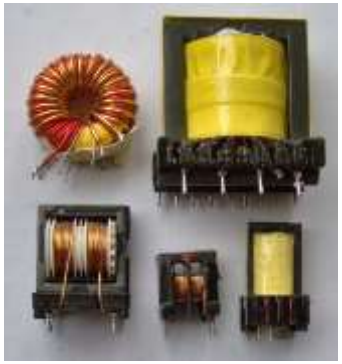
- **síťové** – napájecí zdroje, velká účinnost (95 %)
- **sdělovací** – přizpůsobení impedance, galvanické oddělení, vazební, přenos výkonu v širokém frekvenčním rozsahu, přenos bez harmonického zkreslení – malé sycení jádra (permalloy, ferit), speciálně uspořádané vinutí, malá účinnost (50 %),
- **vysokofrekvenční** – otevřený mag. obvod, válcové jádro, hrníčkové jádro se vzduchovou mezerou

Princip činnosti: https://www.youtube.com/results?search_query=transformer



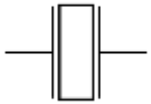




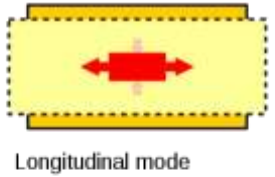


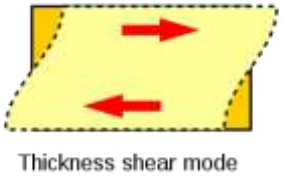
Krystal

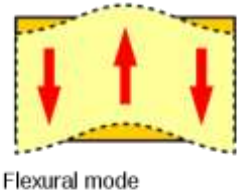
Konstrukce transformátoru

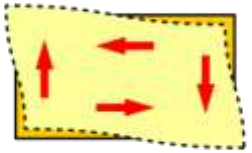


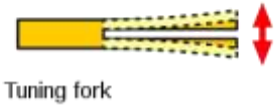
- **piezoelektrický jev** - jen některé krystalické látky (krystal křemene SiO_2)
- mechanické namáhání → vznik elektrického napětí
- elektrické napětí → vznik mechanické deformace
- mechanická rezonance krystalu → vliv na elektrické parametry → rezonanční obvod
- **přesná a stabilní frekvence** – určená směrem a rozměrem řezu destiček krystalu
- použití – rezonátor, oscilátor, filtr, taktování procesorů

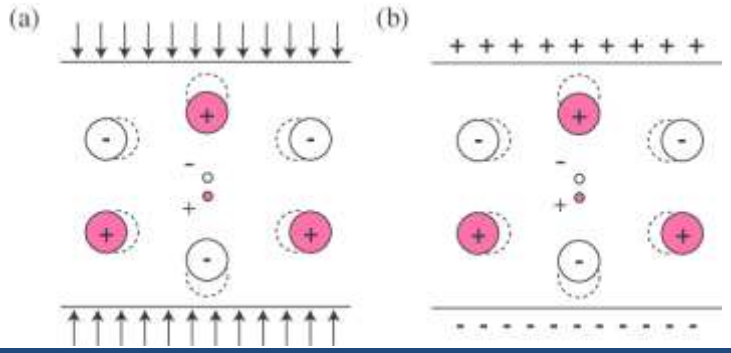
















Kontrolní otázky

- Jak je definována pasivní součástka?
- Vyjmenujte alespoň 3 pasivní součástky.
- Popište konstrukci a princip rezistoru.
- Jaký je rozdíl mezi NTC a PTC termistorem?
- K čemu se používá varistor?
- Popište konstrukci a princip kondenzátoru.
- Jaká dielektrika se používají pro konstrukci kondenzátorů?
- Popište konstrukci a princip cívky.
- Co je ztrátový činitel kondenzátoru a cívky?
- Popište princip a konstrukci transformátoru.
- Co je to krystal a jak funguje?



Použitá literatura

- Musil, V.: **Elektronické součástky.** VUT Brno, 2005, ISBN 80-214-2627-6
- Vaníček, F.: **Elektronické součástky: principy, vlastnosti, modely.** ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-03112-8
- Jerhot, J.: **Elektronické součástky a zesilovače.** VŠSE Plzeň, 1979
- FOIT, J.; HUDEC, L.: **Základy elektroniky.** ČVUT v Praze, 2009, ISBN 978-80-01-04236-6
- Vobecký, J.; Záhlava, V.: **Elektronika : součástky a obvody, principy a příklady.** Grada Publishing, 2005, ISBN 80-247-1241-5
- Sze, S.M.; Kwok, K.Ng.: **Physics of semiconductor devices.** Wiley-Interscience, 2007, ISBN 978-0-471-14323-9
- Kasap, S.O.: **Principles of electronic materials and devices.** McGraw-Hill, 2006, ISBN 0-07-124458-1
- Schroder, D.K.: **Semiconductor material and device characterization.** John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73906-5