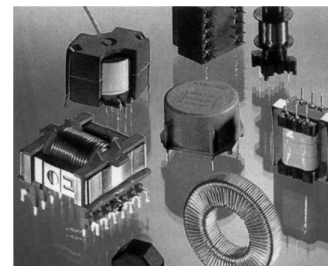


### 1.4.3 DUŠILKE

#### 1.4.3.1 Splošno o dušilkah

Dušilke so posebne vrste tuljav, ki imajo poleg induktivnosti izražene nekatere specifične lastnosti kot so induciranje visokonapetostnih kor (npr. vžiganje neonskih ali ksenonskih svetilk), preoblikovanje električne toka (trikotna oblika toka pri vzburjanju s pravokotnimi impulzi), filtrirar visokofrekvenčnih komponent v signalu in podobno. Dušilke ima pogostokrat zračno režo za doseganje boljše linearnosti B/H karakteristik z jedrom iz lamelirane pločevine ali feritnim jedrom v različnih oblik (lončki, obročki, palice, ...).



Feritni material sestavlja feromagnetni prašek, ki je zlepljen (sintran) z izolacijskim vezivom. Feritni materiali se razlikujejo glede na frekvenčno področje uporabe (izgube s frekvenco naraščajo), zato je potrebno izbrati optimalni ferit za pričakovano frekvenčno področje uporabe. Pri visokih frekvencah se lahko pojavijo tudi izgube v nosilnem telesu (tuljavnik), zato mora biti tudi to iz primerne materiala.

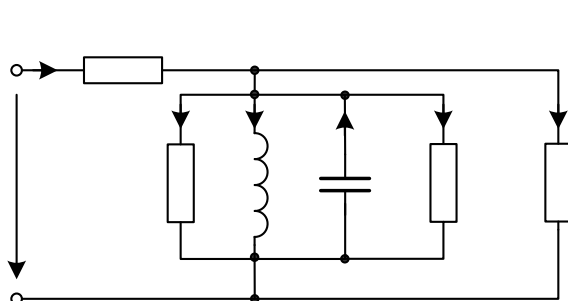
Induktivnost kot geometrična osnovna lastnost, se pojavlja pri tuljavi, transformatorju, valovodu in že v ravnem vodniku skozi katerega teče tok. Pogostokrat so dušilke izvedene tako, da je okoli vodnika nameščeno feritno jedro ali pa je speljan skozi feritni obroč (npr. v stikalnih napajalnikih).

Dušilke so ene redkih komponent v elektrotehnik, ki niso standardizirane in tipizirane kot velja npr. za kondenzatorje. Zahtevano vrednost ter ostale potrebne lastnosti moramo zato dimenzionirati pri načrtovanju elektriškega vezja, šele ko je skonstruirana dušilka v vezju tudi preizkušena, lahko preidemo na serijsko izdelavo. Za dimenzioniranje in izračun dušilk najdemo potrebne podatke, karakteristike in napotke v tehnični literaturi (podpori) proizvajalcev feritnih in drugih feromagnetnih materialov. Najpogosteje se poslužujemo poenostavljenih enačb in prirejenih diagramov, saj nas natančen izračun kaj hitro privede do diferencialne enačbe 2. reda že v primeru solenoida. Pogostokrat uporabimo za konstrukcijo dušilke tipizirano jedro, za katerega je že definirana geometrija navitja in poznana permeabilnost jedra, kar lahko združimo v neko konstanto. V tem primeru zavisi induktivnost od te konstante in števila ovojjev, kar omogoča preprosto enačbo:

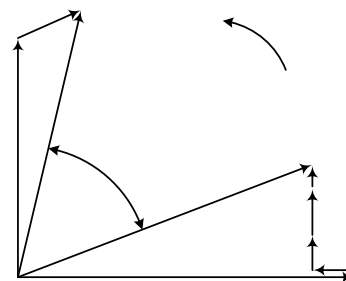
Ta konstanta se v praksi imenuje  $A_L$  in podaja induktivnost v  $nH$ . Proizvajalci podajajo za vsako obliko in feritni material ustrezno število  $A_L$ , ki je tudi natisnjeno na samem jedru.

$$L = A_L \cdot N^2 \dots [nH]$$

V realnih razmerah se pojavljajo poleg induktivnosti še parazitne lastnosti kot so, upornost vodnika in vzporedne upornosti (izgube izolacijske upornosti, izgube jedra in medvojnja kapacitivnost). Na nadomestnem vezju dušilke ponazarja  $R_s$ - upornost vodnika,  $G_L$ - ekvivalentno upornost zaradi skin efekta in vrtničnih tokov v ovojih,  $C$ -ekvivalentno kapacitivnost med ovoji,  $G_C$  upornost dielektrika in  $G_K$  ekvivalentno upornost izgub v feromagnetnem jedru.



Nadomestno vezje realne dušilke



Kazalčni diagram realne dušilke

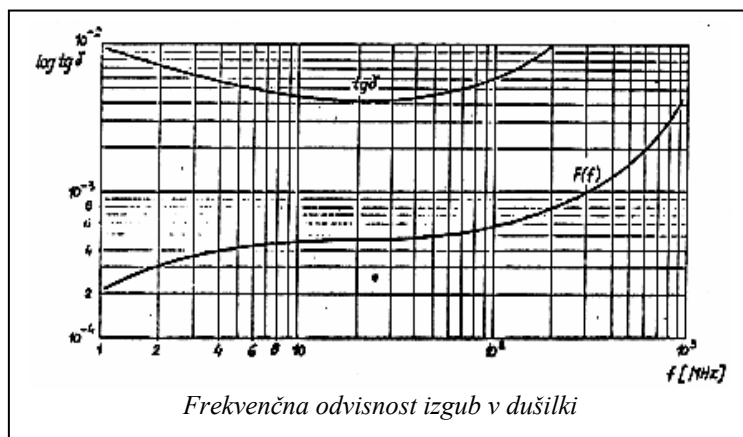
Glede na frekvenčno področje uporabe lahko pogostokrat nekatere stranske učinke zanemarimo. Faktor izgub  $tg\delta$  je frekvenčno odvisen in se za nizke oz visoke frekvence računa različno.

Za nizke frekvence velja izraz  $tg\delta = \frac{R_s}{\omega L}$ , za visoke frekvence pa:  $tg\delta = \frac{1}{R_p \omega L}$

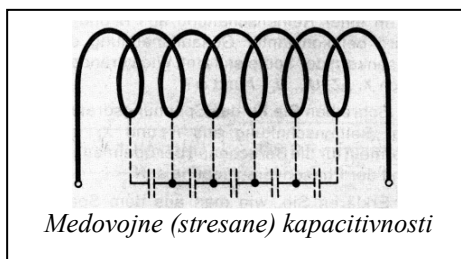
Pri nizkih frekvencah izgube povzročajo predvsem  $R_s$ , pri visokih frekvencah pa vzporedne upornosti.  $R_p$  predstavlja nadomestno upornost vseh vzporednih upornosti v nadomestni shemi.

Na sliki je ponazorjen frekvenčni potek izgubnega faktorja  $tg\delta(f)$  in frekvenčni potek celotnih izgub v dušilki  $F(f)$ .

Izgube je možno zmanjšati z uporabo debelejših žic, še boljše cevi ali pa z uporabo VF pletenice (0,1 – 10MHz). Vendar uporaba VF pletenice pri višjih frekvencah zaradi medsebojne stresane kapacitivnosti ni več smiselna (lastna resonanca!).

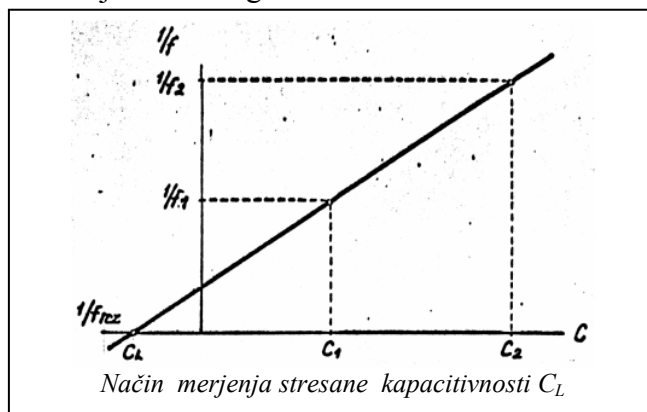


Splošne ugotovitve so, da so izgube tem manjše, čim manj ovojov uporabimo za dano induktivnost, vrtnične - zvišamo električno upornost jedra (lamelirano jedro z izolacijo med lamelami), histerezne – zmanjšamo magnetno gostoto in uporabo kvalitetnejših feromagnetikov.



Z magnetnim oklopom dušilke se zmanjša vpliv zunanjih magnetnih in električnih polj vendar se povečajo vrtnične izgube.

Lastno kapacitivnost dušilke lahko izmerimo po resonančni metodi posredno z dodajanjem dveh kondenzatorjev znanih kapacitivnosti in ekstrapolacijo premice v diagramu (glej sliko).



### 1.4.3.2 Vrste dušilk

Glede na specifične potrebe lahko delimo dušilke na štiri skupine:

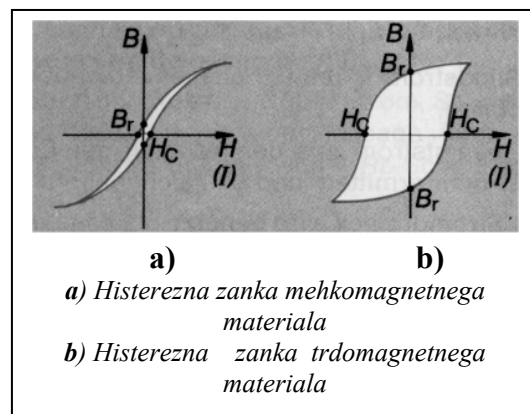
- dušilke brez predmagnetjenja z enosmernim tokom,
- dušilke z predmagnetjenjem,
- dušilke z zračno režo,
- dušilke brez zračne reže.

Z vsako vrsto dušilke velja svoj način izračunavanja induktivnosti.

### Dušilke brez predmagnetjenja

Kadar teče skozi dušilko samo izmenični tok, ni enosmernega predmagnetjenja in se magnetna gostota spreminja simetrično po histerezni zanki v obe smeri. Histerezne izgube so sorazmerne površini histerezne zanke. Z velikostjo magnetne gostote oz. toka se spreminja tudi permeabilnost, induktivnost pa lahko izračunamo po izrazu:

$$L = \frac{\Phi}{I} \cdot N$$

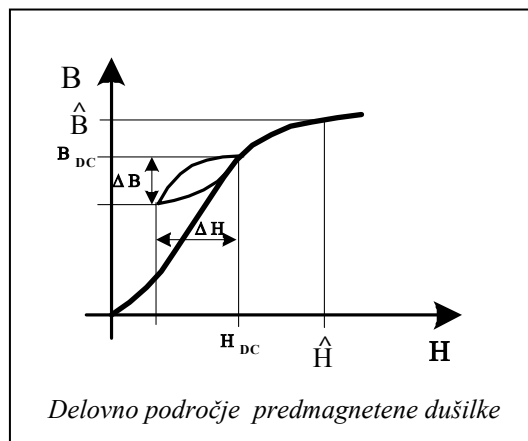


**Dušilke s predmagnetenjem**

Kadar teče poleg izmeničnega toka skozi dušilko tudi enosmerni tok smatramo, da je predmagnetena. Enosmerni tok v histerezni zanki sorazmerno pomakne delovno točko v področje željene permeabilnosti in magnetne gostote (npr. dušilka v smislu glajenja valovitosti napetosti iz usmerniškega vezja).

Za induktivnost velja sledeči izraz:

$$L = \frac{\Delta B}{\Delta I} \cdot A_{fe} \cdot N$$



**Dušilke z zračno režo**

Kadar želimo, da ima dušilka bolj linearno  $\mu_r/B$  odvisnost in bolj tokovno neodvisno induktivnost, lahko to dosežemo zračno režo v jedru. Glede na to, da je permeabilnost zraka dosti manjša od permeabilnosti jedra, se močno poveča upornost za magnetne silnice, kar posledično pomeni manjši magnetni pretok oz. gostoto. Vendar je odvisnost magnetne gostote od toka bolj linearna in zasičenje jedra ne pride tako hitro do izraza, slabost pa je, da morajo biti jedra ustrezno večja, da omogočajo potreben magnetni pretok.

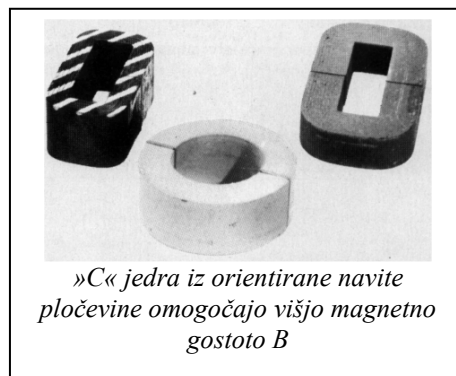
Induktivnost se izračuna po sledečem izrazu, pri čemer je z  $\delta$  označena velikost zračne reže:

$$L = \mu_0 \cdot \frac{N^2}{\delta}$$

**Dušilke brez zračne reže**

Velike induktivnosti omogočajo le dušilke brez zračne reže, srednja dolžina silnic  $l$  pa mora biti čim krajša.

Zaradi nelinearne karakteristike  $\mu_r/B$  za feromagnetno jedro se z velikostjo toka spreminja tudi induktivnost dušilke. Relativna permeabilnost  $\mu_r$  in izgube sta odvisni od temenske vrednosti  $B$ . Relativna permeabilnost dinamo pločevine tudi ni v vseh smereh enaka. Najpogosteje je optimalna v smeri valjanja (orientirana), kar je potrebno upoštevati pri izsekavanju lamel. To je najbolj izkoriščeno pri toroidnih ali C-jedrih iz zvite tračne pločevine (npr. za varjake). Takšna jedra iz lepljene orientirane pločevine v svitek dopuščajo višjo magnetno gostoto, kar posledično pomeni manjše število ovojev za željeno induktivnost kot bi jih potrebovali sicer.



$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A_{fe}}{l}$$

**1.4.3.3 Izračun dušilke z jedrom iz lamelirane pločevine**

Za dušilko z železnim jedrom obstaja vrsta izračunov, vendar je induktivost močno odvisna od magnetne gostote in velikosti zračne reže. Za dušilko z jedrom oblike »M« in zračno režo, velja izračun po sledečih enačbah:

- Za primer brez zračne reže:

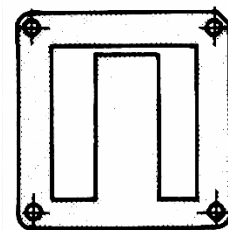
$$L = 4\pi \cdot N^2 \cdot \frac{A_{fe}}{l} \cdot \mu_r \cdot 10^{-9}$$

- Za zračno režo reda mm :

$$L = 4\pi \cdot N^2 \cdot \frac{A_{fe}}{l} \cdot \frac{\mu_r}{d\mu_r + 1.1l} \cdot 10^{-9}$$

- Za več mm veliko zračno režo:

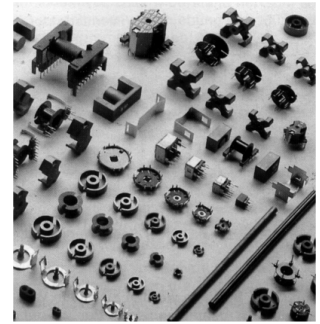
$$L = 4\pi \cdot N^2 \cdot \frac{A_{fe}}{d} \cdot 10^{-9}$$



Lamela dušilke tip »M«

**1.4.3.4 Značilnosti feritnih materialov**

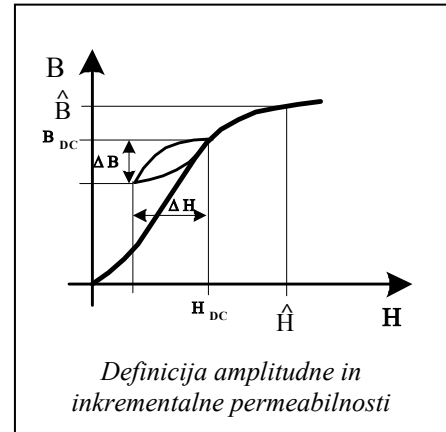
Za frekvenčno področje od nekaj 100Hz do 100MHz so uporabna le feritna jedra za katera je poleg različne permeabilnosti značilen tudi relativni izgubni faktor  $tg\delta/\mu_{ro}$ , ki je močno odvisen od materiala in delovne frekvence. Feritna jedra so na razpolago v najrazličnejših oblikah ( palice, lončki, obročki, specialne oblike, npr. za odklonske tuljave,..). Potrebno je vedeti, da so sestavljiva feritna jedra dobavljiva v parih (stične površine obeh polovic so brušene istočasno) zaradi čim boljšega prileganja stičnih površin ne glede ali so brez ali z zračno režo.



**Permeabilnost  $\mu$**  podajajo proizvajalci glede na specifično obliko in materiale in je lahko podana različno. Največkrat je podana kot:

- **Začetna** ( $\mu_i$  - na začetku magnetilne krivulje)
- **Efektivna** ( $\mu_{ef}$  - za jedra z zračno režo)
- **Navidezna** (npr. za feritne palčke)

• Amplitudna... 
$$\mu \approx \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\hat{B}}{\hat{H}}$$



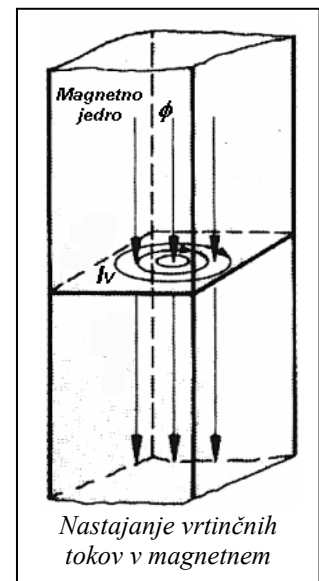
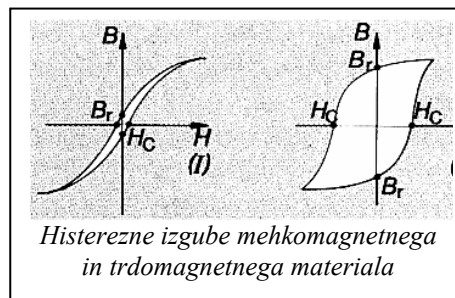
• Inkrementalna (DC+AC)..... 
$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H}$$

**Izgubni faktor  $tg\delta$ :**

$$tg\delta = \frac{R_j}{\omega L}$$

$R_j = R_v + R_H + R_r$

- $R_v = v \cdot L \cdot f^2$  ..... vrtinčne izgube
- $R_H = h \cdot L \cdot f$  ..... histerezne izgube
- $R_r = r \cdot L \cdot f$  ..... preostale izgube



**Relativni izgubni faktor  $tg\delta/\mu_i$ :**

Pogostokrat so izgube podane v obliki relativnega izgubnega faktorja, ki je primeren za izračunavanje izgub v primeru dodatne zračne reže ( $\mu_{ef}$ ).

$$\frac{\mu_i}{\mu_{ef}} = \frac{tg\delta}{tg\delta_{ef}} \rightarrow tg\delta_{ef} = \mu_{ef} \cdot \frac{tg\delta}{\mu_i}$$

Sorazmerno s permeabilnostjo se zmanjšajo tudi izgube (glej enačbi). Relativni izgubni faktor je podan grafično v odvisnosti od frekvence in vrste feritnega materiala (npr. komercialna oznaka 6G).

Za izračun dušilk za enosmerne tokove se lahko poslužujemo namenskih programov na nekaterih spletnih strežnikih kot je npr.:

[http://www.powerdesigners.com/InfoWeb/calculators/ChokeCalc/dc\\_choke.shtm](http://www.powerdesigners.com/InfoWeb/calculators/ChokeCalc/dc_choke.shtm)

**Značilnejši diagrami za feritne materiale (primeri)**

