

### Příklad:

1. Na str. 83 je v příkladu výpočtu nezatížený odporový dělič se členy  $R_1 = 12 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 8 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 20 \text{ k}\Omega$  a příčným proudem  $I = 5 \text{ mA} = 0,005 \text{ A}$ . Jak jsou jednotlivé odpory wattově zatíženy?

Proud  $I = 5 \text{ mA}$  je společný. Jeho druhá mocnina  $I^2 = 25 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ . Dosazujeme do vztahu (190) jednotlivé hodnoty odporů a zjišťujeme jejich výkonové zatížení:  $P_1 = R_1 I^2 = 12 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 300 \cdot 10^{-3} = 0,3 \text{ W}$ ;  $P_2 = 8 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 200 \cdot 10^{-3} = 0,2 \text{ W}$ ;  $P_3 = 10 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 250 \cdot 10^{-3} = 0,25 \text{ W}$ ;  $P_4 = 20 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 500 \cdot 10^{-3} = 0,5 \text{ W}$ .

(Protože jde o odpory řádově stejné, je i jejich zatížení přibližně stejné. V praxi můžeme použít všechny odpory stejného typu — s rezervou z typizované řady zatížitelnosti o něco větší, např. 0,5 W místo 0,25 W apod.)

2. Zatížení členů odporového děliče s odběrem bylo vypočteno v příkladu 2. čl. 9 odst. b) na str. 85.

*Odpory spojené paralelně.* U paralelně spojených odporů jsou (většinou) nejen nestejné velikosti odporů, ale prochází jimi i různě velký proud, takže již při dvou paralelně spojených odporech máme čtyři různé veličiny (pokud nejde o spojení stejných odporů). Zato napětí — nebo úbytek napětí — je na obou odporech stejné.

Jednotlivé odpory mají příkon podle vztahu (190)

$$P = RI^2 \quad [\text{W}; \Omega, \text{A}]$$

Celkový příkon několika odporů spojených paralelně

$$\Sigma P = P_1 + P_2 + \dots \quad [\text{W}; \text{W}, \text{W}] \quad (192)$$

Celkový příkon  $P$  (elektrické zatížení) odporu se rozdělí mezi jednotlivé odpory v nepřímém poměru jejich velikostí. Pro dva odpory

$$P_1 = P \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad [\text{W}; \text{W}, \Omega] \quad (193)$$

popř.

$$P_2 = P \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad [\text{W}; \text{W}, \Omega] \quad (194)$$

kde  $P_1, P_2$  jsou zatížení odporů  $R_1, R_2$ ,  
 $R_1, R_2$  jednotlivé odpory.

V tab. 14 jsou pro normalizované hodnoty odporů uvedena příslušná zatížení.

### Příklad:

Dvojici paralelně spojených odporů  $R_1 = 3,3 \text{ k}\Omega$  a  $R_2 = 330 \Omega$  prochází proud  $I = 0,1 \text{ A}$ . Jaké zatížení musí každý z nich snést? Výsledný odpor dvojice je

$$R = \frac{3\,300 \cdot 330}{3\,300 + 330} = \frac{108\,900}{3\,630} = 300 \Omega$$

Zatížení při proudu  $I = 0,1 \text{ A}$  (190)

$$P = 300 \cdot 0,1^2 = 300 \cdot 0,01 = 3 \text{ W}$$

A chceme-li zjistit napětí na koncích dvojice odporů, použijeme Ohmova zákona, vztah (1)

$$U = 300 \cdot 0,1 = 30 \text{ V}$$

Zatížení jednotlivých odporů určíme ze vztahů (193) a (194)

$$P_1 = \frac{3 \cdot 330}{3\,300 + 330} = \frac{990}{3\,630} = 0,273 \text{ W}$$

$$P_2 = \frac{3 \cdot 3\,300}{3\,300 + 330} = \frac{9\,900}{3\,630} = 2,73 \text{ W}$$

Zatížení výsledného odporu (192)

$$P = 0,273 + 2,73 = 3 \text{ W}$$

## 10. Výpočet indukčnosti

1. Vysokofrekvenční cívky jsou buď bez jádra (vzduchové) nebo s jádrem z vf železa nebo feritu, tvaru trnu, dolaďovacího šroubu, hrníčku aj.

a) *Válcová cívka o jedné vrstvě* (obr. 28a) vzduchová, bez jádra (solenoid)

Indukčnost je dána vztahem

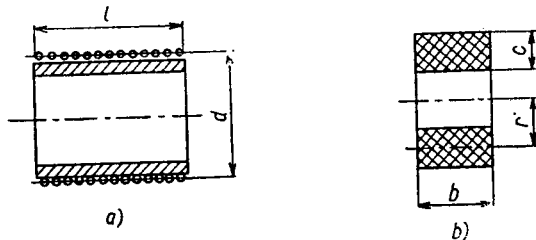
$$L = \frac{\pi^2 N^2 d^2 \cdot 10^{-3}}{l \left(1 + 0,45 \frac{d}{l}\right)} \quad [\mu\text{H}; \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}] \quad (195)$$

kde  $L$  je indukčnost,

$N$  počet závitů,

$d$  průměr cívky až do středu vodičů,

$l$  délka cívky (části s vinutím).



Obr. 28. Indukčnost cívky o: a) jedné vrstvě, b) několika vrstvách

Tento vztah má tu výhodu, že se obejde bez tabulky opravných činitelů (např. tzv. Nagaokova činitele), závislého na poměru průměru k délce cívky.

Schematické značky pro vinutí bez jádra, se železovým (vf) jádrem a železným (nf) jádrem jsou na obr. 29.

Potřebujeme-li zjistit počet závitů pro žádanou indukčnost, stanovíme ze vztahu (195) veličinu

$$N = \sqrt{\frac{Ll \left(1 + 0,45 \frac{d}{l}\right)}{\pi^2 d^2 \cdot 10^{-3}}} \quad [—; \mu\text{H}, \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}] \quad (196)$$

Obr. 29. Schematické značky vinutí bez jádra  
— i s jádrem

b) *Vinutí o několika vrstvách (křížové)* (obr. 28b). (Výpočet poněkud závisí na poměrech rozměrů, počtu kroků křížení aj.). Jsou-li rozměry  $r$ ,  $b$  i  $c$  přibližně stejné, platí s dostatečnou přesností pro indukčnost vzorec

$$L = \frac{0,315 r^2 N^2}{6r + 9b + 10c} \quad [\mu\text{H}; \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}] \quad (197)$$

kde  $r$  je střední poloměr (do poloviny výšky vinutí),

$b$  šířka cívky,

$c$  výška vinutí.

Počet závitů takové cívky pro žádanou indukčnost

$$N = \sqrt{\frac{L(6r + 9b + 10c)}{0,315 r^2}} \quad [—; \mu\text{H}, \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}] \quad (198)$$

Vztahy platí s dostatečnou přesností i pro jiné druhy cívek o několika vrstvách (voštinové, „divoké“ vinutí na tělísku aj.).

*Příklady:*

1. Válcová cívka na trubce o průměru 3 cm má v jedné vrstvě 80 závitů drátu 0,28 mm dvakrát hedvábím opředěného. Osová délka vinutí  $l = 3$  cm. Jaká je indukčnost této cívky?

Údaje dosadíme do vzorce (195)

$$L = \frac{9,87 \cdot 6\,400 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{3 \left(1 + 0,45 \frac{3}{3}\right)} = \frac{568\,512 \cdot 10^{-3}}{4,35} \approx 131 \mu\text{H}$$

2. Na trubku průměru 2,5 cm máme navinout cívku o indukčnosti 200  $\mu\text{H}$  drátem 0,25 mm, izolovaným lakem + hedvábím. Kolik bude mít cívka závitů?

Délku  $l$  zprvu odhadneme na 4 cm. Dané údaje dosadíme do vzorce (196) a zjistíme počet závitů

$$N = \sqrt{\frac{200 \cdot 4 \left(1 + 0,45 \frac{2,5}{4}\right)}{9,87 \cdot 2,5^2 \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{\frac{800 \cdot 1,28}{0,0617}} = \sqrt{\frac{1\,024}{0,0617}} = 128,5 \text{ závitů}$$

Zkontrolujeme skutečnou délku  $l$ , odhadnutou na 4 cm. Vnější průměr vodiče 0,25 mm lak + hedvábi (např. z tab. 32 na str. 169) je 0,325 mm. Násoben počtem závitů dá délku cívky  $l = 0,325 \times 128,5 = 41,76 \text{ mm} = 4,18 \text{ cm}$ . To je v mezích přesnosti výpočtu. Jinak bychom museli vyjít z vypočtené hodnoty  $l$  a počet závitů upravit.

3. Křížově vinutá cívka o 400 závitech na tělísku průměru 8 mm vodičem 0,2 mm izolovaným lakem má šířku  $b = 5 \text{ mm}$ , výšku vinutí  $c = 6 \text{ mm}$ , z čehož vyplývá střední poloměr  $r = 7 \text{ mm}$ . Jakou má cívka indukčnost?

Po dosazení do vzorce (197) dostaneme

$$L = \frac{0,315 \cdot 0,7^2 \cdot 400^2}{6 \cdot 0,7 + 9 \cdot 0,5 + 10 \cdot 0,6} = \frac{24\,640}{14,7} = 1\,674 \text{ } \mu\text{H} = 1,67 \text{ mH}$$

c) *Vysokofrekvenční cívky s jádrem.* Použitím speciálního vysokofrekvenčního železa nebo feritu jako jádra v dutině vf cívek se zvýší jejich indukčnost a činitel jakosti. Jádra mají nejčastěji tvar trnu se závitem (šroubová jádra). Pro větší indukčnosti nebo k odstínění elektromagnetického pole cívky se používá jader plášťových neboli hrníčkových.

Změnou polohy jádra ve vinutí se jeho indukčnost mění o 5 až 15 %. Také šroubovým trnem v hrníčkovém jádře se indukčnost mění nejméně o 5 % až 10 %.

**Železová jádra.** Vf cívky se železovým jádrem mají indukčnost

$$L = kN^2 \quad [\mu\text{H}; -, -] \quad (199)$$

kde  $L$  je vlastní indukčnost,

$k$  činitel jádra,

$N$  počet závitů.

Počet závitů potřebný pro žádanou indukčnost  $L$  vypočítáme ze vztahu

$$N = \sqrt{\frac{L}{k}} \quad [-; \mu\text{H}] \quad (200)$$

K vypočtenému údaji přidáme 3 až 5 % závitů, aby bylo možné cívku doladit (větší procento u šroubového jádra). Pro starší typy jader byl uváděn *směrný činitel  $k$  pro šroubová jádra*

$$M \ 7 \times 13 \text{ mm} \quad k = 0,011 \text{ až } 0,0125^*)$$

$$M \ 10 \times 19 \text{ mm} \quad k = 0,016$$

pro *hrníčková jádra*

$$\text{průměru } 14 \text{ a } 23 \text{ mm} \quad k = 0,036 \text{ až } 0,038$$

(Má-li vinutí v hrníčkovém jádru značnou vlastní kapacitu, často spíše několik procent závitů proti výpočtu odebíráme.)

*Příklady:*

1. Křížově vinutá cívka na trolitulovém tělísku se šroubovým jádrem  $M \ 7 \times 13 \text{ mm}$  obsahuje 126 závitů. Jakou má indukčnost? Podle vztahu (199) s použitím činitele  $k = 0,012$

$$L = 0,012 \cdot 15\,876 = 190,5 \text{ } \mu\text{H}$$

2. Kolik závitů musí mít vinutí v hrníčkovém jádru, aby mělo indukčnost 2 mH (= 2 000  $\mu\text{H}$ )? (Činitel  $k = 0,036$ .) Použijeme vztahu (200) a odečteme asi 3 % závitů

$$N = \sqrt{\frac{2\,000}{0,036}} = \sqrt{55\,550} = 236,4 \text{ závitů}$$

Po odečtení 3 % závitů dostaneme skutečný počet závitů

$$N' = 236,4 - 7 = 229,4 \text{ závitů, přibližně } 230 \text{ závitů}$$

\*) Menší číslo platí pro jednovrstvové kv cívky, větší pro křížové vinutí na izolantovém tělísku.

Nověji se u šroubových a hrníčkových jader místo činitele  $k$  udává (přesnější) cívková permeabilita  $\mu_c$ . Běžně se pohybuje v mezích 1,1 až 2,3. Je to poměr indukčnosti  $L$  cívky s jádrem k indukčnosti vinutí  $L_0$  bez jádra.

$$\mu_c = \frac{L}{L_0} \quad [—; \mu H, \mu H] \quad (201)$$

Výsledná indukčnost s jádrem

$$L = L_0 \mu_c \quad [\mu H; \mu H, —] \quad (202)$$

Ze vztahu (202) lze též určit potřebnou indukčnost vinutí bez jádra (např. pro její výpočet z geometrických rozměrů)

$$L_0 = \frac{L}{\mu_c} \quad [\mu H; \mu H, —] \quad (203)$$

Podobně se mění při použití vf jádra i činitel jakosti  $Q$  cívky s jádrem v porovnání s činitelem jakosti  $Q_0$  vinutí bez jádra v poměru

$$q = \frac{Q}{Q_0} \quad (204)$$

Činitel jakosti cívky s jádrem má velikost

$$Q = Q_0 q \quad (205)$$

*Příklad:*

Vinutí bez jádra má indukčnost  $L_0 = 160 \mu H$  a činitele jakosti  $Q = 100$ . Jak se tyto údaje změní použitím šroubového jádra M 8 x 18 mm jakosti D?

Z tab. 15 zjistíme pro tento tvar železového jádra činitele  $\mu_c = 1,75$  a  $q = 1,3$ . Dosazením do vztahu (202) najdeme největší indukčnost

$$L = 160 \cdot 1,75 = 280 \mu H$$

a ze vztahu (205) činitele jakosti cívky s jádrem

$$Q = 100 \cdot 1,3 = 130$$

*Poznámka:* Nemusí jít vždy jen o zvýšení hodnot. Z tab. 15 je patrné, že někdy není indukčnost  $L$  cívky s jádrem o mnoho větší ( $\mu_c = 1$ ), činitel jakosti  $Q$  je dokonce menší ( $q < 1$ ). Jádro tu slouží hlavně k doladění.

*Druhy železových jader.* Železová jádra prášková se značila podle permeability a kmitočtů, pro něž se mohla používat, písmenem a barevnou značkou:

- A (bez barvy) — pro všeobecné použití
- B (červená) — pro kmitočty nad 5 MHz
- D (žlutá) — pro kmitočty do 5 MHz

Vlastnosti železových jader jsou uvedeny v tab. 15, 16.

Tab. 15. Železová jádra šroubová stříkaná (ČSN 35 8460/61)

Jádro ( $D \times l$ ) mm	Stoupání mm	Druh B		Druh D	
		$\mu_c$	$q$	$\mu_c$	$q$
4 x 10	4 x 0,5	1,17	1,10	1,40	1,20
4 x 10	4 x 0,7	1,17	1,10	1,40	1,20
6 x 6	6 x 0,5	1,32	1,10	1,54	1,20
6 x 10	6 x 0,5	1,45	1,10	1,68	1,30
6 x 10	6 x 1	1,45	1,10	1,68	1,30
6 x 12	6 x 0,5	1,62	1,15	1,93	1,30
6 x 16	6 x 1	1,45	1,05	1,91	1,50
7 x 13	7 x 1	1,33	1,00	1,45	1,20
8 x 18	8 x 1,25	1,60	1,10	1,75	1,30
10 x 20	10 x 1	1,80	0,90	2,23	1,60
10 x 25	10 x 1,5	2,10	1,00	2,30	1,60

*Poznámka:*  $D$  je průměr,  $l$  je délka. Význam označení druhu B a D viz text; podobně význam činitelů  $\mu_c$  a  $q$ .

Tab. 16. Železová jádra hrncová, stříkaná

Velikost	Rozměr ( $D \times l$ ) mm	Šroubové jádro mm	Změna $L^1$ %
14	14 × 12	4 × 0,7 × 10	8
23	23 × 18	8 × 1,25 × 18	10
36	36 × 27	10 × 1,5 × 25	15

1) Přibližná velikost; není obsažena v normě ČSN 35 8462.

**Upozornění:** Železová jádra právě popsaná jsou zastaralá a nadále se nevyrábějí. Příslušné normy, ČSN 35 8460 a další, jsou zrušeny! Uvádíme je pro ty, kdož je mohou použít — pro nové konstrukce se nehodí!

**Feritová jádra.** Nověji přicházejí v úvahu pouze jádra zhotovená z feritů. U typů hrníčkových a transformátorových druhů E se místo činitele cívkové permeability udává měrná indukčnost  $A_L$  (nebo  $a_L$ ). Je to indukčnost jednoho závitů na příslušném jádře a udává se v  $\mu\text{H} \cdot 10^{-3}$  neboli v nH.

Indukčnost vinutí s feritovým jádrem — s použitím činitele  $A_L$  — je

$$L = A_L \cdot 10^{-3} N^2 \quad [\mu\text{H}; \mu\text{H}, -] \quad (206)$$

Příslušný počet závitů pro dané jádro určíme z upraveného vztahu (206)

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{\frac{L \cdot 10^3}{A_L}} \quad [-; \mu\text{H}, \mu\text{H}] \quad (207)$$

Rozměry feritových jader Závodů práškové metalurgie PRAMET n. p. Šumperk jsou uvedeny v tab. 17, 18, 19, 20.

Tab. 17. Šroubová jádra feritová

Rozměr $D \times s \times l^1$	Výrobní číslo
3,5 × 0,5 × 10 3,0 × 0,5 × 8 3,5 × 0,5 × 5	504500/N01 504501/H6 504502/N01
4 × 0,5 × 8	504600/H10 /N01 /N02 /N01P
4 × 0,5 × 12	504601/H10 /H11 /N05 /N1 /N02
6 × 0,5 × 12	504602/H10 /N05 /N01
6 × 0,5 × 20 6 × 0,75 × 12 6 × 0,75 × 20	504603/H10 504604/H10 504605/H10
8 × 0,75 × 20 8 × 0,75 × 30 8 × 1 × 30	504700/H10 504701/H10 504702/H11

<sup>1)</sup>  $D$  je průměr,  $s$  je stoupání,  $l$  je délka, vše v mm.

Tab. 18. Feritová jádra plášťová (hrníčková)

Rozměr $D \times h^1$ mm	Staré značení	Nové značení	Konstanta $A_L$ [nH/N <sup>2</sup> ]	Mezera mm
18 × 11	0930-115/H12	505250/H12	2 000	0
		252/H12	63	0,66
		253/H12	100	0,34
		254/H12	160	0,2
		255/H12	250	0,1
18 × 11	0930-115/H22	505250/H22	2 500	0
		253/H22	100	0,66
		254/H22	160	0,34
		255/H22	250	0,2
		256/H22	400	0,1
26 × 16	0930-116/H12	505350/H12	3 200	0
		351/H12	100	0,82
		352/H12	160	0,42
		353/H12	250	0,24
		354/H12	400	0,15
26 × 16	0930-116/H22	505350/H22	4 200	0
		352/H22	160	0,82
		353/H22	250	0,42
		354/H22	400	0,24
		355/H22	630	0,15
36 × 22	0930-144/H12	505450/H12	5 000	0
		452/H12	250	1,25
		453/H12	400	0,67
		454/H12	630	0,36
		455/H12	1 000	0,21
36 × 22	0930-144/H22	505450/H22	8 000	0
		452/H22	250	1,25
		453/H22	400	0,67
		454/H22	630	0,36
		455/H22	1 000	0,21
		456/H22	1 600	0,1

<sup>1)</sup>  $D$  je vnější průměr,  $h$  je výška hrnce.

**Poznámka:** Tolerance konstanty  $A_L$  je u jader bez vzduchové mezery  $\pm 25\%$ ; se vzduchovou mezerou  $\pm 3\%$ , s výjimkou typu  $36 \times 22$  mm s označením 505455 a 505456, u nichž je tolerance  $A_L \pm 5\%$ . Údaj za lomici čarou u označení (např. 505452/H22) udává výchozí materiál (ferit) podle tab. 20.

Tab. 19. Feritová jádra typu E (obr. 37d)

Starší značení	Nové značení <sup>1)</sup>	Rozměry [mm]			
		$A$	$L$	$C$	$S$
0930-014	503096/H10	12	5	3	3
0930-016	503050/H10	20	8	5	5
0930-017	503100/H10	25	10	6	6
0930-018	503150/H10	32	13	8	8
0930-019	503250/H10	42	21	12	15
0930-020	503300/H10	55	28	17	20

<sup>1)</sup> Za lomící čarou je uveden druh feritového materiálu (viz tab. 20).

Hrníčková feritová jádra jsou složena ze dvou polovin se zabroušenými okraji. Prostřední části se buď těsně stýkají, nebo je mezi nimi přesně definovaná vzduchová mezera. S tloušťkou mezery klesá indukčnost nepřímo úměrně (větší mezera — menší indukčnost).

#### Příklady:

1. V hrníčkovém jádře  $\varnothing 18 \times 11$  mm čís. 505256/H 22 se vzduchovou mezerou 0,1 mm je umístěno vinutí s 25 závitů. Jakou má cívka indukčnost?

Pro uvedený typ jádra (tab. 18) je udáno  $A_L = 400$ . Ze vztahu (206) určíme indukčnost

$$L = 400 \cdot 10^{-3} \cdot 25^2 = 250 \mu\text{H}$$

2. S hrníčkovým jádrem rozměrů jako v příkladě 1, ale se vzduchovou mezerou 0 mm (čís. 505250/H 22) chceme zhotovit vřetelnicu o indukčnosti 10 mH. Kolik závitů k tomu potřebujeme?

10 mH = 10 000  $\mu\text{H}$ . Pro mezeru 0 mm je z tab. 17 měrná indukčnost  $A_L = 2 500$  nH. Dosazením do vztahu (207) dostaneme počet závitů

$$N = \sqrt{\frac{10\,000}{2\,500 \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{\frac{10\,000}{2,5}} = \sqrt{4\,000} = 63,3 \text{ závitů}$$

Speciálních feritových tyček se dnes používá jako antén, zvláště pro malé tranzistorové přijímače.

Tab. 20. Cs. feritový materiál

Materiál		H22	H20	H13	H10
Vlastnosti					
Počáteční permeabilita $\mu_p$		2 200 $\pm 25\%$	2 000 $\pm 20\%$	1 800 $\pm 20\%$	1 300 $\pm 20\%$
Měrný ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta / \mu_p$ při $f$	$10^{-4}$ MHz	8 0,02	22 0,1	15 0,1	20 0,1
Curieho teplota $t_{\text{cur}}$	$^{\circ}\text{C}$	90	140	90	90
Magnetická indukce $B$ při intenzitě magnetického pole $H$	T A/cm	0,36 10	0,40 10	0,36 10	0,32 10
Koercitivní síla $H_c$	A/cm	0,2	0,2	0,2	0,3
Měrný hysterezní ztrátový činitel $h/\mu_p^2$ (odpovídá q 2-24-100) při $f$	$10^{-6}$ cm/A [ $\Omega/\text{H}^{3/2}$ · mA] kHz	4,1 6 4			5,5 8 20
Teplotní činitel permeability (TK) $\mu$ $\mu_p$ (+20 až 60 $^{\circ}\text{C}$ )	$10^{-4}/^{\circ}\text{C}$	2	4,5	4	3,5
Měrný odpor	$\Omega$ cm	$10^2$	$10^2$	$10^2$	$10^2$
Měrná hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	4,8	4,8	4,8	4,8
Použití		1	2	3	4

## Použití:

- 1 Hrníčková jádra, jádra tvaru E;
- 2 Jádra tvaru E nebo U;
- 3 Šroubová jádra, tyčinky, jádra pro mazací hlavy;
- 4 Tyčinky, trubičky, šroubová jádra, jádra E a hrníčková;
- 5 Hrníčková jádra;
- 6 Tyčinky, toroidy, jádra U, vychylovací kroužky;

Fonox (Pramet, n. p., Šumperk)

H12	H11	H6	N2	N1	N05	N02	N01	N01P
1 200 +30% -20%	1 100 $\pm 20\%$	600 $\pm 20\%$	200 $\pm 20\%$	120 $\pm 20\%$	50 $\pm 20\%$	20 $\pm 20\%$	8 $\pm 20\%$	12 $\pm 20\%$
10 0,1	20 0,1	30 1	80 1	100 10	200 20	400 50	1 000 100	1 250 200
180	160	200	200	260	350	450	500	550
0,42 10	0,36 10	0,44 10	0,40 50	0,35 50	0,30 50	0,27 80	0,20 100	
0,3	0,3	0,7	1,2	2,5	4,5	12	15	15
1,7 2,5 20		2 2,9 20						
0 až 3	6	1 až 4	15	35	60	80	100—200	80
$10^2$	$10^2$	$10^2$	$10^4$	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^2$	$10^6$
4,8	4,8	4,8	4,7	4,7	4,6	4,3	4,4	4,3
5	6	7	8	9	10	11	12	13

- 7 Hrníčková jádra, anténí tyčky;
- 8 Anténí tyčky, šroubová jádra;
- 9 Hrníčková jádra, tyčinky, šroubová jádra;
- 10 Tyčinky, šroubová jádra, hrníčková jádra;
- 11 Šroubová jádra, tyčinky;
- 12, 13 Tyčinky, šroubová jádra;

**Vinutí se železným jádrem.** Pro nízké kmitočty (tónové v zesilovačích a síťové v transformátorech a tlumivkách) se používá železných jader, většinou uzavřených, složených pro zmenšení ztrát i snazší sestavování z tenkých plechů. Ty jsou navzájem odděleny izolační vrstvičkou laku nebo okují na povrchu, popř. polepením tenkým papírem.

Materiálem na železná jádra je ocel s několika procenty křemíku (transformátorový a dynamový plech), speciální tzv. magneticky měkké slitiny železa s niklem aj. kovy (permaloy) nebo ocel s magneticky orientovanými molekulami (orthoperm). Pro vyšší kmitočty (nad 300 Hz) se s výhodou používá i jader feritových. Z pásů orientovaných plechů se vinou tzv. jádra typu C, jejichž zabroušené plochy po rozříznutí svitku se stáhnou k sobě držákem a tak — podobně jako u feritových jader E — po navléknutí cívky s vinutím se jádro vytvoří prostým přiložením obou polovin k sobě a stažením. Údaje o hlavních materiálech na jádra jsou uvedeny v tab. 21.

Pro výpočet cívek a transformátorů se železným jádrem je nutné znát některé další veličiny magnetického pole.

Intenzita magnetického pole cívky bez jádra (tzv. solenoidu)

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad [A/m; T, H/m] \quad (208)$$

kde  $H$  je intenzita magnetického pole,

$B$  magnetická indukce (hustota magnetického toku),

$\mu_0$  permeabilita vakua.

Pro praktické výpočty používáme vztahu

$$H = \mu_0 \frac{NI}{l} \quad [A/m; H/m, —, A, m] \quad (209)$$

Magnetická indukce

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad [T; —, H/m, A/m] \quad (210)$$

kde  $B$  je magnetická indukce,

$\mu_r$  poměrná permeabilita jádra,

$\mu_0$  permeabilita vakua,

$H$  intenzita magnetického pole.

Permeabilita vakua má hodnotu

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ H/m} \quad (211)$$

Poměrná permeabilita jádra

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad [—; T, H/m, A/m] \quad (212)$$

*Hopkinsonův zákon* pro magnetické obvody je obdobou Ohmova zákona pro obvody elektrického proudu. Využíváme jej při výpočtu magnetických obvodů, zvláště při výpočtu železného jádra tlumivek a transformátorů.

1. Magnetomotorické napětí

$$F_m = \Phi R_m \quad [Az; Wb, Az/Wb] \quad (213)$$

kde  $F_m$  je magnetomotorické napětí,

$\Phi$  (fi) magnetický tok,

$R_m$  magnetický odpor (reluktance).

2. Magnetický tok

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \quad [Wb; Az, Az/Wb] \quad (214)$$

3. Magnetický odpor (reluktance)

$$R_m = \frac{F_m}{\Phi} \quad [Az/Wb; Az, Wb] \quad (215)$$

Pro konstrukční návrh používáme vztahu

$$R_m = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S} \quad [Az/Wb; m, H/m, m^2] \quad (216)$$



kde  $\mu_r$  je poměrná permeabilita materiálu,  
 $\mu_0$  permeabilita vakua,  
 $l$  délka střední silové čáry,  
 $S$  průřez jádra.

### Indukčnost vinutí se železným jádrem

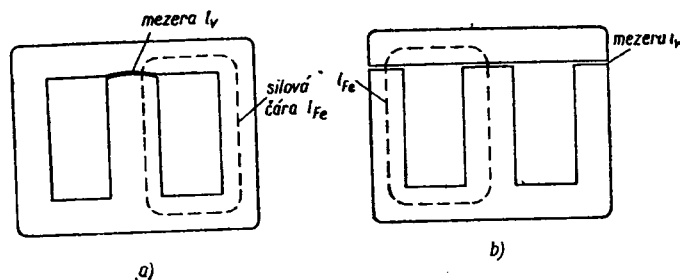
V praxi přicházejí hlavně dva druhy vinutí ze železným jádrem, určené pro nízké kmitočty (tónové nebo síťové):

- s jádrem zcela uzavřeným pro síťové transformátory
- a jiná vinutí bez stejnosměrné magnetizace,
- b) s jádrem přerušným vzduchovou mezerou pro filtrační tlumivky a výstupní transformátory se stejnosměrnou magnetizací.

1. Indukčnost vinutí na uzavřeném jádře (obr. 30a) s použitím magnetického odporu (reluktance)

$$L = \frac{4\pi N^2 \cdot 10^{-9}}{R_m} = \frac{1,256 N^2 \cdot 10^{-8}}{R_m} \quad [H; \text{---}, Az/Wb] \quad (217a)$$

kde  $R_m$  je reluktance,  
 $N$  počet závitů.



Obr. 30. Jádra tlumivek: a) uzavřené, b) se vzduchovou mezerou

Velikost reluktance  $R_m$  je dána vztahem (216), po dosazení a úpravě dostaneme

$$L = \frac{4\pi N^2 \mu S_{Fe} \cdot 10^{-9}}{l_{Fe}} \quad [H; \text{---}, cm^2, cm] \quad (217b)$$

### 2. Indukčnost vinutí na jádře s mezerou (obr. 30b)

a) s reluktancí jádra a mezery

$$L = \frac{4\pi N^2 \cdot 10^{-9}}{\Sigma R_m} = \frac{4\pi N^2 \cdot 10^{-9}}{\frac{l_{Fe}}{\mu S_{Fe}} + \frac{l_v}{S_v}} \quad [H; cm, cm^2] \quad (218)$$

kde  $l_v$  je délka silové čáry v mezeře,

$\mu$  permeabilita jádra,  
 $S_{Fe}$  účinný průřez jádra,  
 $S_v$  účinný průřez vzduchové mezery.

**Poznámka:** Vlivem rozptylu ve vzduchu je účinný průřez vzduchové mezery  $S_v$  asi o 10 až 25 % větší než průřez jádra, takže  $S_v = (1,1 \text{ až } 1,25) S_{Fe}$  podle tloušťky mezery.

Počet závitů pro danou indukčnost zjistíme ze vzorce

$$N = \sqrt{\frac{L \left( \frac{l_{Fe}}{S_{Fe}} + \frac{l_v}{S_v} \right) \cdot 10^9}{4\pi}} \quad [\text{---}; H, cm, cm^2] \quad (219)$$

### Příklady:

1. Na uzavřeném železném jádře z transformátorových plechů o účinném průřezu  $S_{Fe} = 2 \text{ cm}^2$  a střední délce silové čáry  $l_{Fe} = 10 \text{ cm}$  je navinuto 1 200 závitů izolovaného vodiče. Permeabilita materiálu jádra (při použité magnetické indukci)  $\mu = 2 000$ . Jakou má tato cívka indukčnost?

Údaje dosadíme do vztahu (217b)

$$L = \frac{12,56 \cdot 1 200^2 \cdot 2 000 \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{10} = \frac{72,5}{10} = 7,25 \text{ H}$$

2. Kolik závitů se musí navinout na železnó jádro s mezerou šířky 0,5 mm o střední délce silové čáry v železe  $l_{Fe} = 11$  cm, účinného průřezu  $S_{Fe} = 3$  cm<sup>2</sup> s permeabilitou  $\mu = 1\,600$ , abychom dostali tlumivku o indukčnosti  $L = 4,5$  H?

V tomto případě jsou dva druhy reluktance, proto použijeme vztahu (218). Chybí nám ještě průřez mezery — odhadem  $S_v = 1,2 S_{Fe} = 3,6$  cm<sup>2</sup>. Délku  $l_v$  je třeba dosadit v cm.

Dosazením vyjde

$$N = \sqrt{\frac{4,5 \left( \frac{11}{1\,600 \cdot 3} + \frac{0,05}{3,6} \right) \cdot 10^9}{12,56}} = \sqrt{5,8 \cdot 10^6} = 2\,400 \text{ závitů}$$

### Přitažlivá síla elektromagnetu

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2 S}{\mu_0} = 4SB^2 \quad [\text{kp; T, m}^2, \text{H/m; cm}^2, \text{T}] \quad (220)$$

kde  $F$  je přitažlivá síla,

$S$  plocha pólů,

$B$  magnetická indukce.

### Příklady:

1. Elektromagnet tvaru U, napájený stejnosměrným proudem, má póly rozměrů  $1,5 \times 2$  cm a magnetickou indukcí  $B = 0,8$  T. Jaké břemeno unese?

Elektromagnet tvaru U má dva póly o celkové ploše  $S = 2 \cdot 3 = 6$  cm<sup>2</sup>. Dosazením do vztahu (220) zjistíme nosnost

$$F = 24 \cdot 0,8^2 = 24 \cdot 0,64 = 15,4 \text{ kp}$$

2. Jakou silou je přitahována membrána v telefonním sluchátku k pólovým nástavcům rozměrů  $2 \times 8$  mm, je-li magnetická indukce v mezeře mezi póly a membránou  $B = 0,2$  T?

Membrána je přitahována silou (220)

$$F = 4 \cdot 2 \cdot 0,16 \cdot 0,2^2 = 0,051 \text{ kp}$$

## 11. Úprava relé pro jiné napětí

Občas potřebujeme upravit nějaký elektromagnet pro jiné napájecí napětí, aniž by se změnil výkon elektromagnetu, přitažlivá síla apod. Dnes je to nejčastěji relé (dříve též vinutí buzeného reproduktoru aj.).

Přitažlivá síla

$$F = 4SB^2 \quad [\text{kp; cm}^2, \text{T}] \quad (221)$$

kde  $F$  je přitažlivá síla,

$S$  plocha pólu,

$B$  magnetická indukce.

Protože součin

$$SB = \Phi \quad [\text{cm}^2, \text{T; Wb}] \quad (222)$$

kde  $\Phi$  je magnetický tok

a magnetický tok

$$\Phi \sim NI \quad [\text{Wb; —, A}] \quad (223)$$

kde  $NI$  je magnetomotorické napětí

je také přitažlivá síla

$$F \sim NI \quad [\text{kp; A}] \quad (224)$$

Magnetomotorické napětí je dáno vztahem

$$F_m = NI \quad [A^*]; \text{ —, A}] \quad (225)$$

kde  $I$  je proud,

$N$  počet závitů.

Přitažlivá síla je úměrná magnetomotorickému napětí, tj. součinu počtu závitů a procházejícího proudu. Při změně vinutí relé je tedy nutné původní magnetomotorické napětí (počet ampérzávitů) zachovat.

\*) Často se používá pro magnetomotorické napětí jednotky ampér-závit (Az).