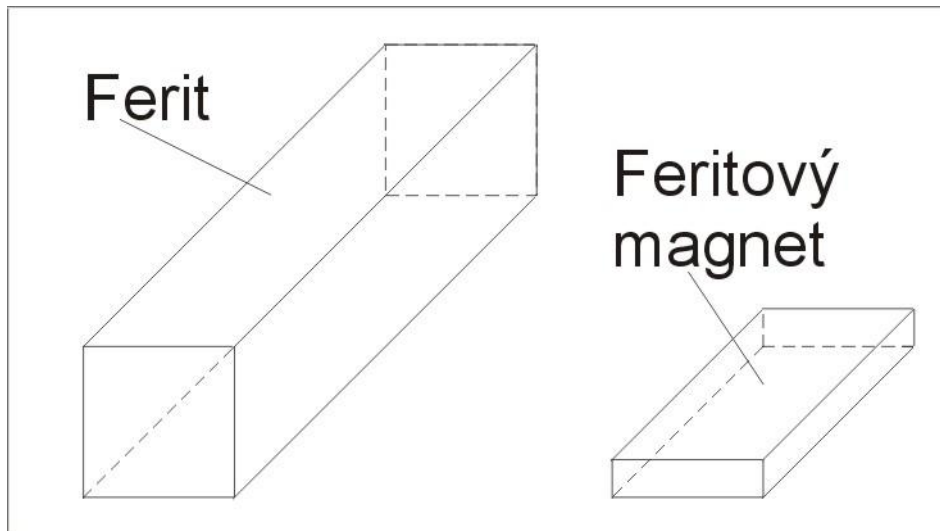


# Konstrukce rezonančního motoru

(c) Ing. Ladislav Kopecký, květen 2014

Jak bylo mnohokrát uvedeno, rezonanční motor musí mít magnetický obvod statoru vyrobený z materiálu, jenž má nízké ztráty, zejména vířivými proudy. V tomto směru je ideální ferit, který je elektricky nevodivý. Pro tuto konstrukci použijeme dva základní stavební prvky: feritový hranol o rozměrech 20 x 20 x 80 mm a feritový magnet s rozměry 20 x 40 x 5 mm.



Obr. 1. Základní stavební prvky rezonančního motoru.

Rotor bude ve tvaru disku z nemagnetického a elektricky nevodivého materiálu jako je například pertinax, sklotextit nebo silon, do něhož budou vsazeny výše zmíněné feritové magnety. Magnety budou rozmístěny při obvodu rotoru tak, aby mezery mezi magnety byly stejně velké jako je šířka magnetu. Počet magnetů v rotoru se bude lišit podle toho, kolik fází bude mít rezonanční motor a zda preferujeme vyšší otáčky nebo kroučící moment. Konstrukci rotoru si ukážeme na příkladu rotoru se třemi magnety, viz obr. 2. Nejdříve určíme vzdálenost magnetů od osy rotace. Označme délku magnetu jako  $x$  šířku magnetu  $y$  a vzdálenost magnetu od středu  $R_1$ . Potom můžeme napsat následující vztahy:

$$R_1 = (x/2)/\text{tg } \alpha \quad (1)$$

Kde

$$\alpha = 360/(4n) \quad (2)$$

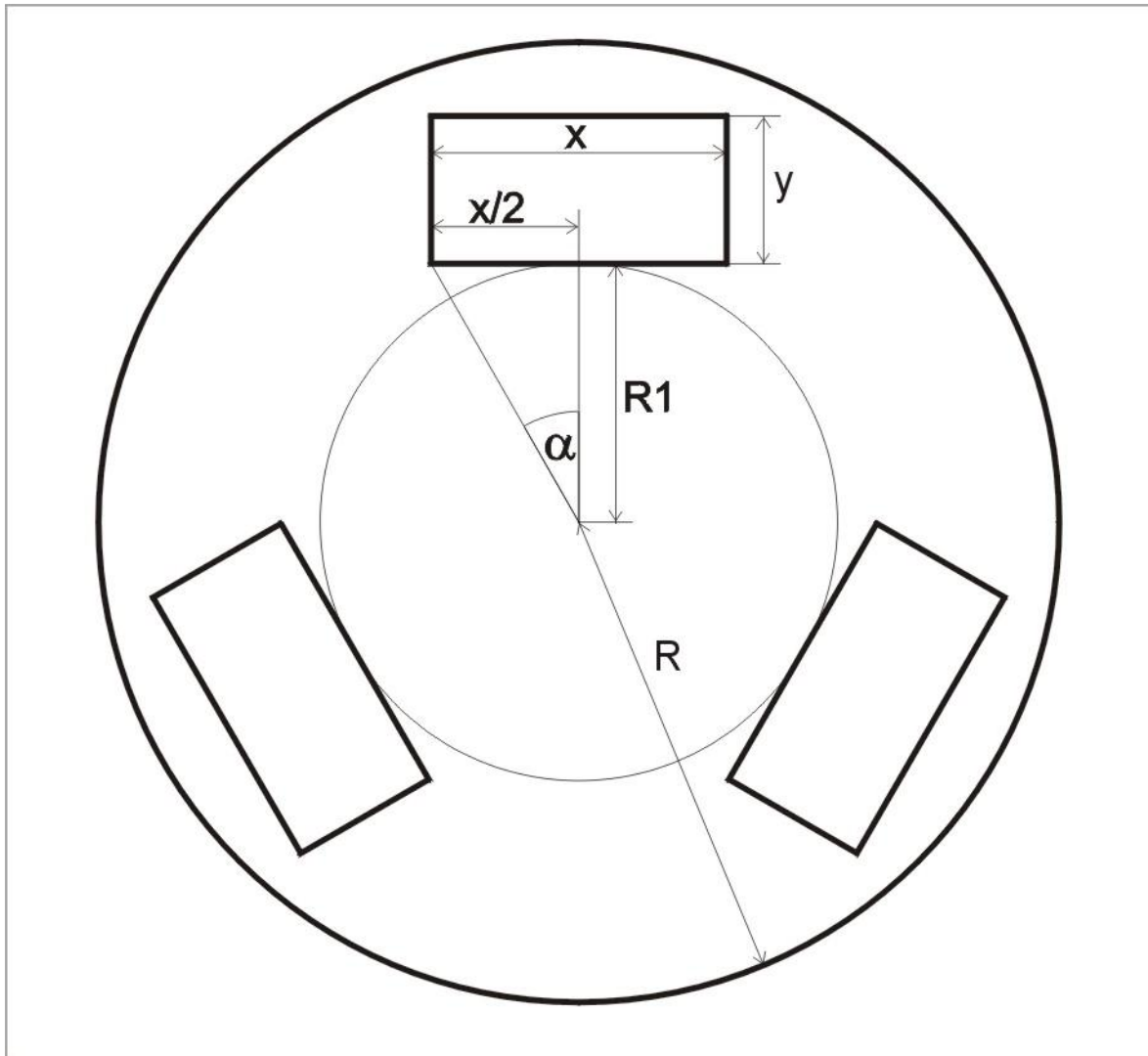
a kde  $n$  je počet magnetů v rotoru.

Poloměr rotoru vypočítáme podle tohoto vzorce:

$$R = R_1 + y + k \quad (3)$$

Kde  $y$  je šířka magnetu a  $k$  je zvolená konstanta.

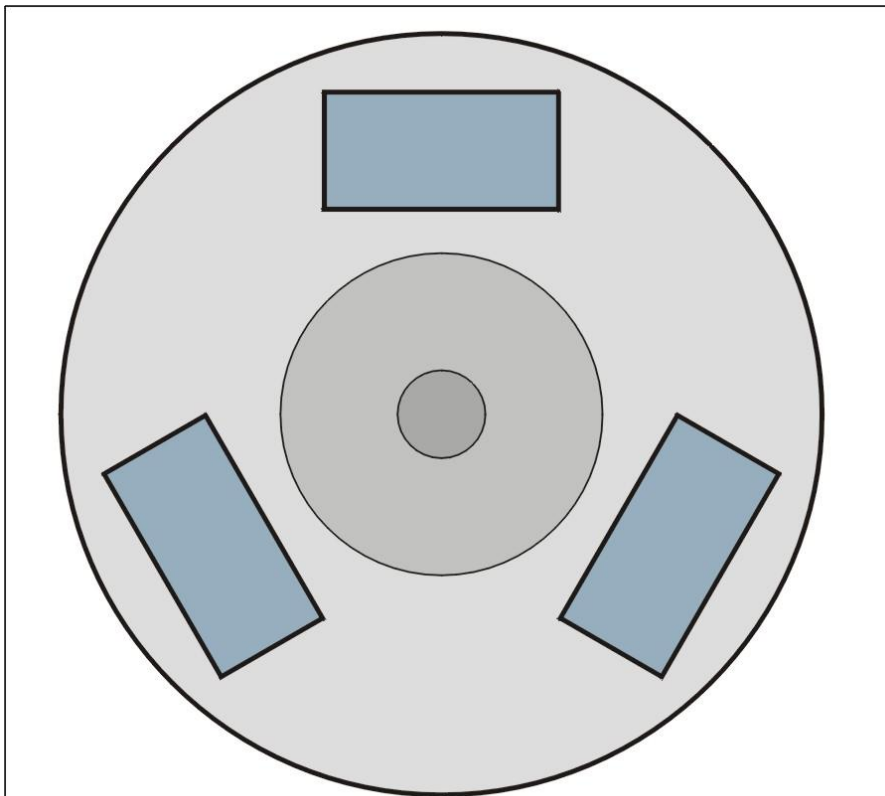
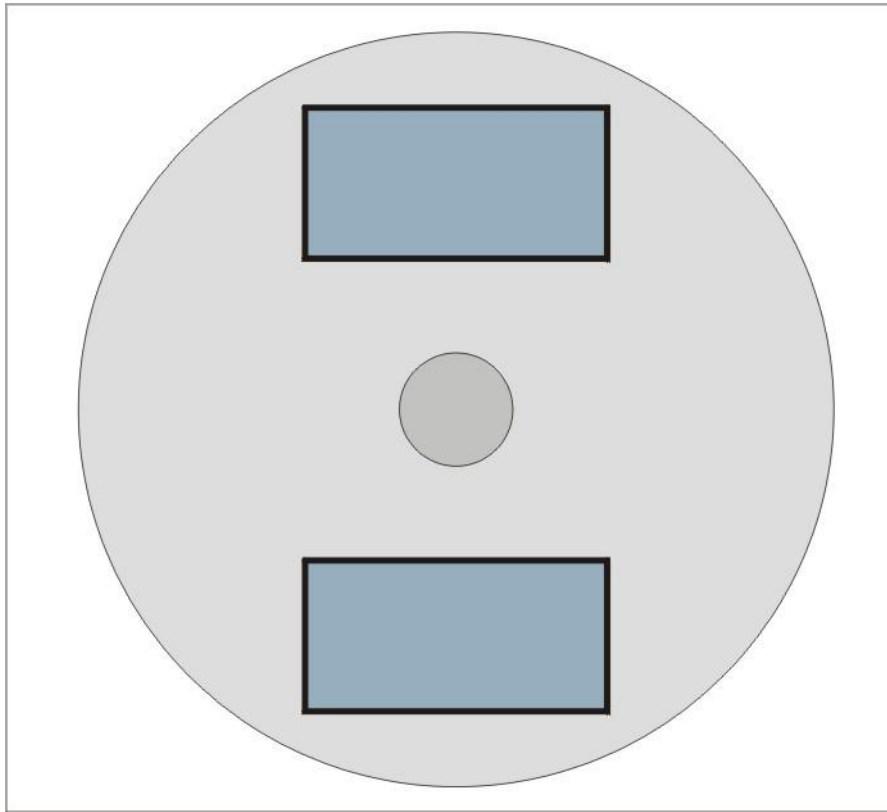
V tabulce 1 máme vypočítány parametry rotorů v závislosti na počtu magnetů  $n$ . Vypočítané poloměry  $R_1$  a  $R$  jsou pouze pro orientaci a je možné je podle potřeby zaokrouhlovat.

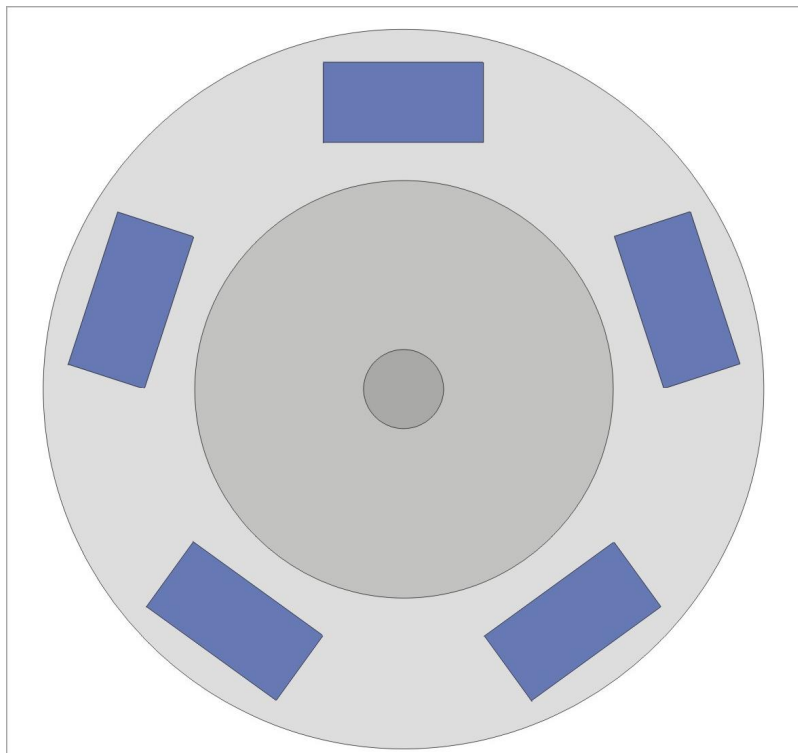
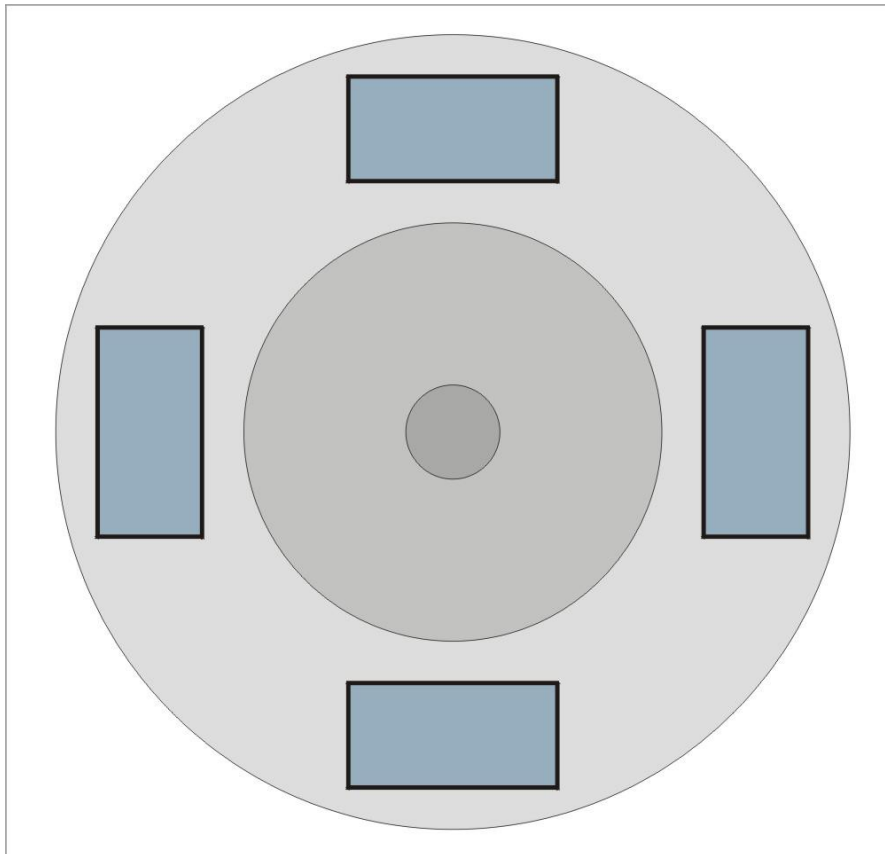


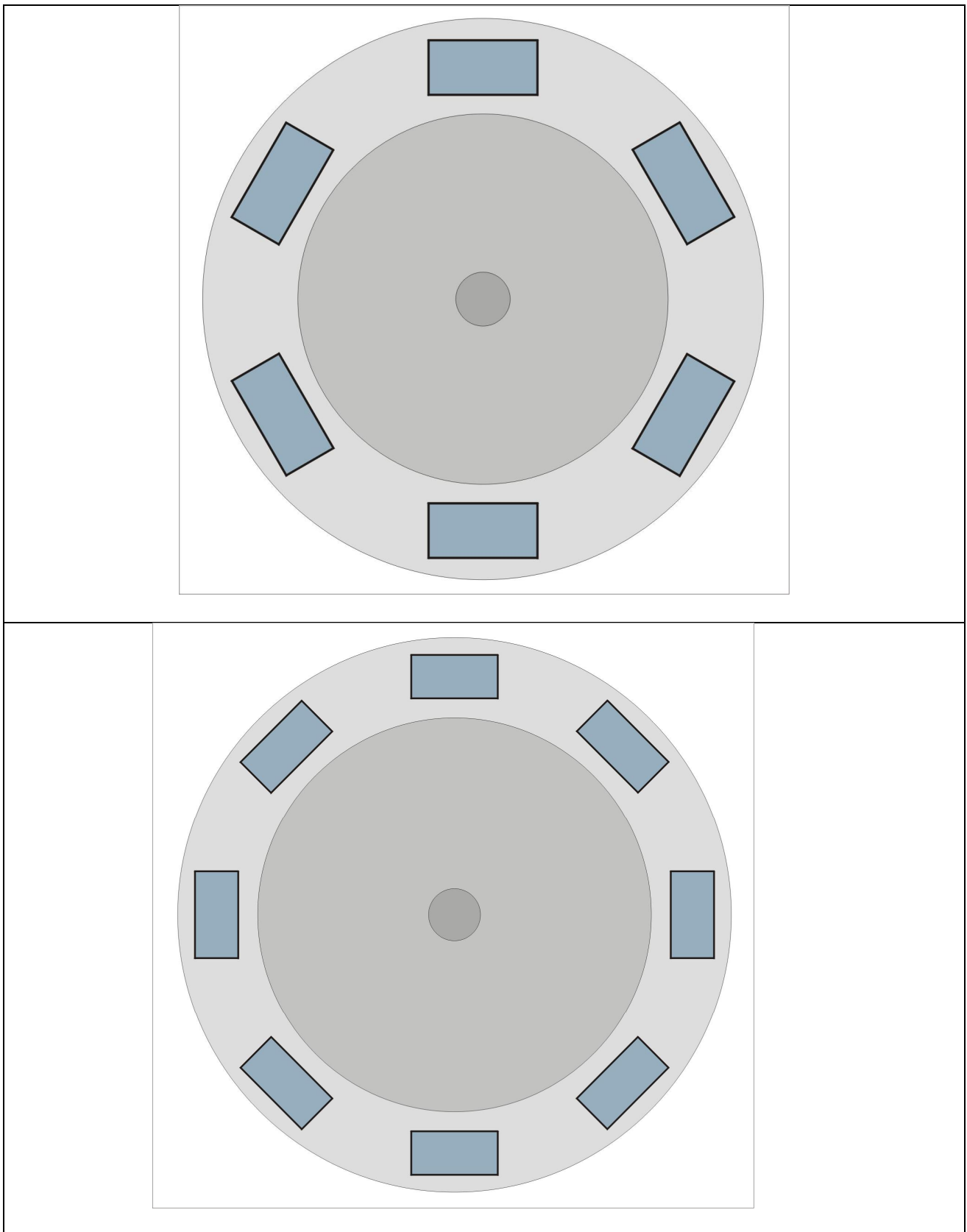
Obr. 2. Konstrukce rotoru

X	y	n	k	alfa	Alfa – rad	R1	R
40	20	2	2	7	45,7853981634	20	47
40	20	3	3	7	300,5235987756	34,6410161514	61,6410161514
40	20	4	4	7	22,50,3926990817	48,2842712475	75,2842712475
40	20	5	5	7	180,3141592654	61,5536707435	88,5536707435
40	20	6	6	7	150,2617993878	74,6410161514	101,6410161514
40	20	8	8	7	11,250,1963495408	100,5467898425	127,5467898425

Tabulka 1. Parametry rotoru pro různý počet magnetů.

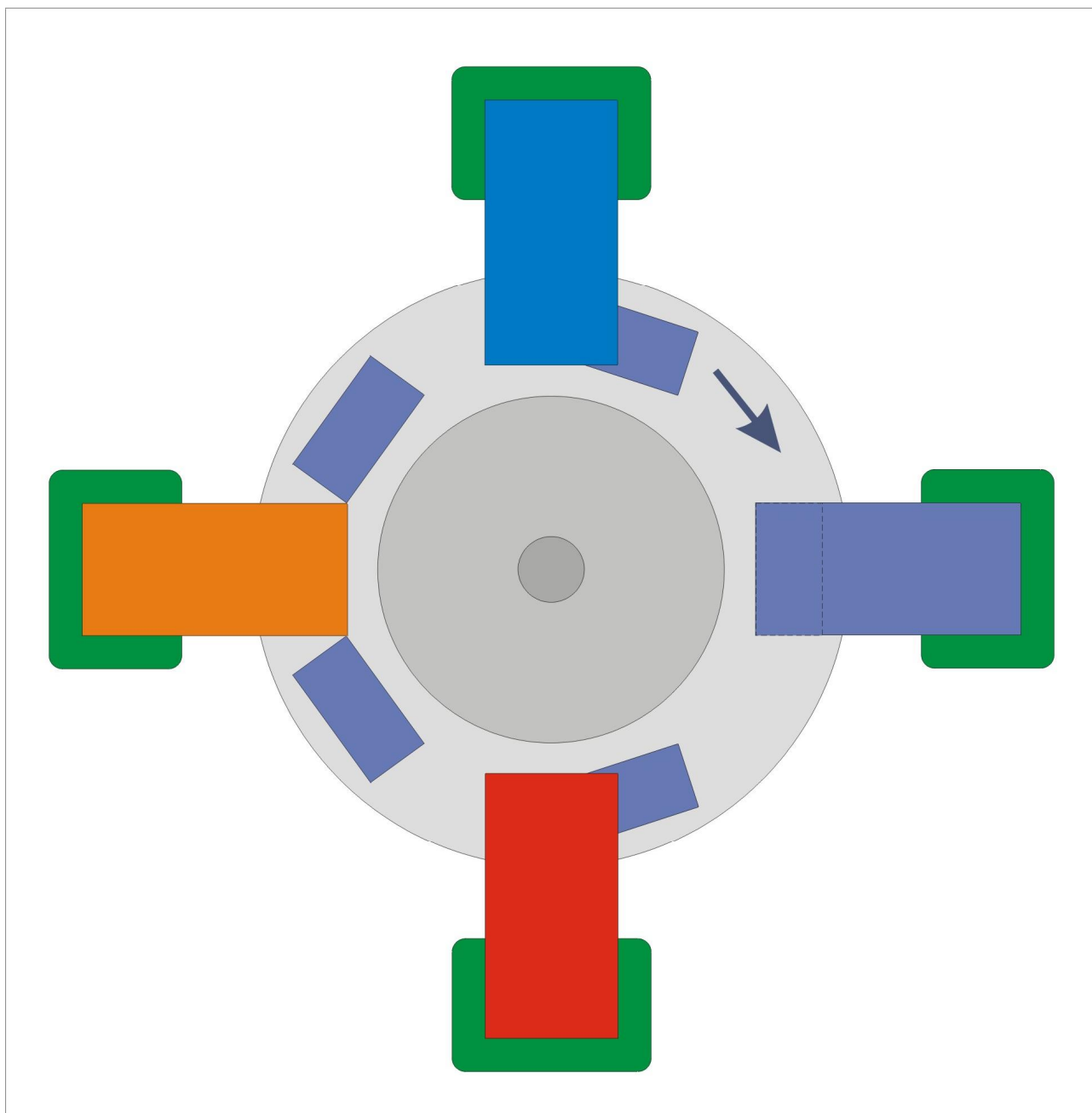






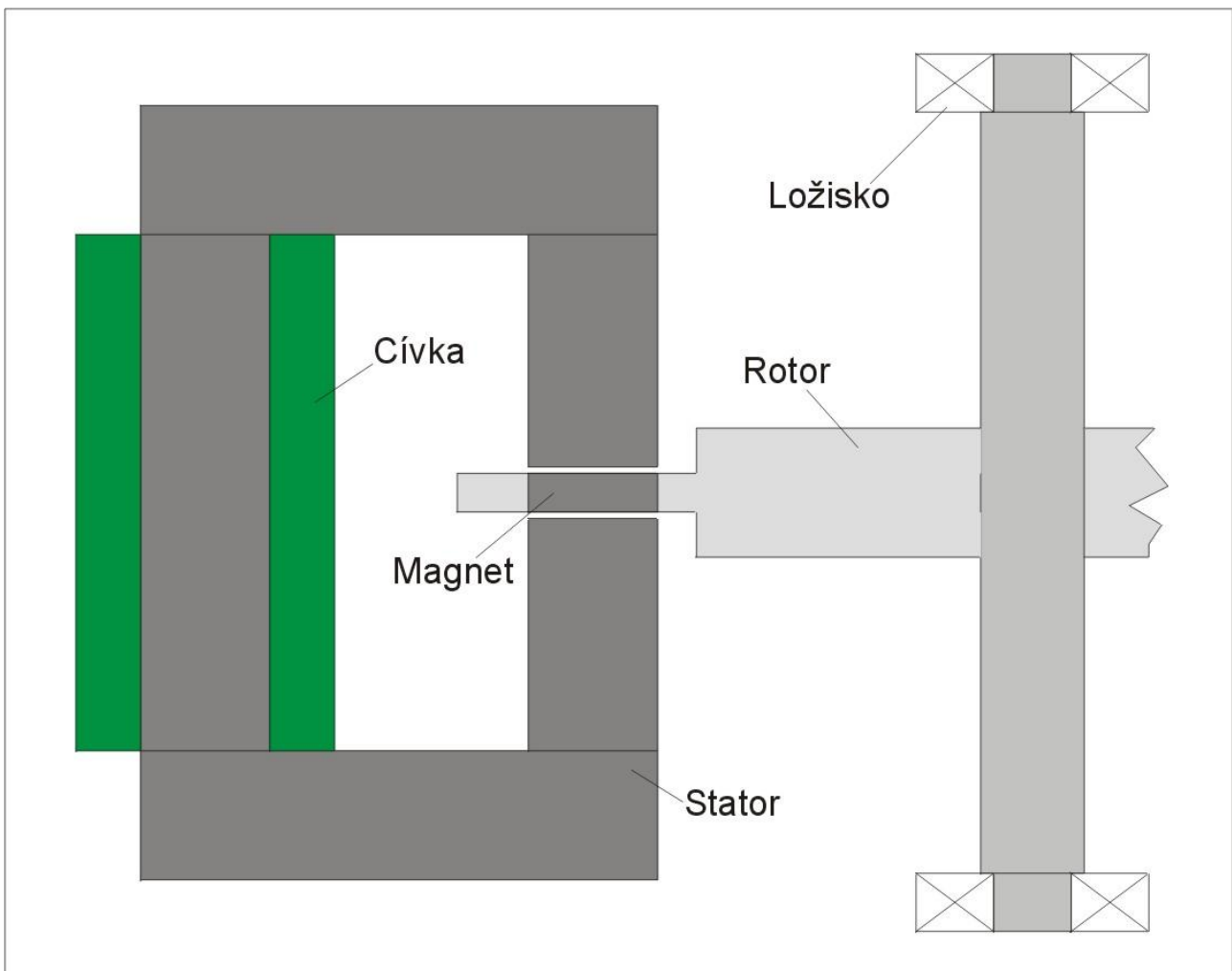
Tabulka 2. Obrázky rotorů s různým počtem magnetů

Stator tvoří cívky rozmístěné po obvodu rotoru s jádry složenými z feritových hranolů (viz obr. 1). Na dalším obrázku (obr. 3) máme příklad dvoufázového motoru s rotorem o pěti magnetech, kde je dobře vidět, jak jsou statorové cívky rozmístěny.



Obr. 3. Dvoufázový motor s pěti magnety v rotoru

Na obr. 4 máme nakreslený pohled z boku na statorovou cívku s C-jádrem a část řezu rotorem s magnetem. Počet ampérvávitů cívky musíme vypočítat v závislosti na velikosti mezery, resp. na tloušťce magnetu.



Obr. 4. Statorová cívka s C-jádrem

Nyní uděláme menší odbočku a řekneme si něco málo ze základů teorie elektromagnetického pole a magnetických obvodů, abychom byli schopni spočítat cívku v závislosti na průřezu magnetického obvodu a šířce vzduchové mezery.

Nejdříve probereme základní pojmy a vztahy mezi nimi. Uvažujme magnetický obvod, například takový, jaký je zobrazený na obr. 4. Tento obvod je složen z cívky, jíž protéká elektrický proud, magnetického obvodu a vzduchové mezery. Cívka protékána proudem vybudí v magnetickém obvodu magnetický tok  $\Phi$ . Součinu proudu tekoucího cívkou s počtem jejích závitů říkáme magnetomotorické napětí nebo magnetomotorická síla a značíme  $U_m$  nebo  $F_m$ . Jednotkou jsou Ampér-závity [Az]. Mezi magnetickým polem a magnetomotorickým napětím platí následující vztah:

$$\Phi = U_m / R_m \text{ [Wb, Az, H}^{-1}] \quad (4)$$

kde  $R_m$  je magnetický odpor.

Vztahu (4) se říká Hopkinsonův zákon.

Další důležitou veličinou v magnetickém obvodu je magnetická indukce  $B$ , jejíž jednotkou je Tesla. Je to vlastně hustota magnetického toku a platí pro ni tedy následující vztah:

$$B = \Phi / S \text{ [T, Wb, m}^2] \quad (5)$$

Neméně důležitou veličinou magnetického obvodu je intenzita magnetického pole  $H$ . Je to magnetomotorické napětí na jednotku délky:

$$H = U_m / l \quad [A/m, A, m] \quad (6)$$

Mezi intenzitou magnetického pole  $H$  a magnetickou indukcí platí tento vztah:

$$B = \mu \cdot H \quad [T, H/m, A/m] \quad (7)$$

kde  $\mu$  je magnetická permeabilita a skládá se ze dvou částí:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (8)$$

kde konstanta  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$  je permeabilita vakua a  $\mu_r$  je relativní permeabilita, která udává, kolikrát je permeabilita dané látky větší než permeabilita vakua.

Je zřejmé, že magnetická permeabilita  $\mu$  nějak souvisí s magnetickým odporem  $R_m$ , takže si nyní odvodíme, jak spolu tyto dvě veličiny souvisí. Když do vztahu (7) dosadíme za  $B$  podle (5) a za  $H$  podle (6) a (4), dostaneme následující rovnici:

$$\Phi / S = \mu \cdot U_m / l = \mu \cdot \Phi \cdot R_m / l$$

odkud po vykrácení  $\Phi$  a úpravě dostaneme

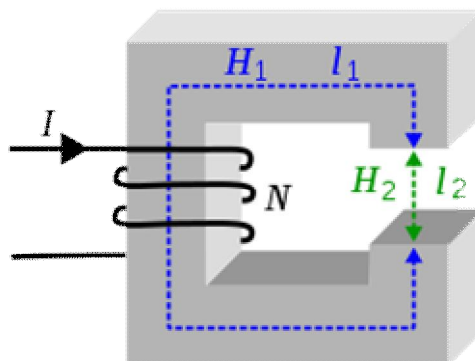
$$R_m = l / (\mu \cdot S) \quad [1/H, m, H/m, m^2] \quad (9)$$

(což je analogií se vzorcem pro elektrický odpor  $R = \rho \cdot l / S \quad [\Omega, \Omega \cdot m, m, m^2]$ ).

Mezi  $F_m$  a  $H$  platí kromě (6) také tento obecný vztah:

$$F_m = \oint H dl = \sum_{k=1}^{k=n} H_k \cdot l_k = N \cdot I \quad (10)$$

který lze názorně objasnit následujícím obrázkem



Obr. 5. Ilustrace vztahu mezi  $U_m$  a  $H$

pro který konkrétně platí:

$$U_m = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 = N \cdot I = U_{m1} + U_{m2} \quad (11)$$



Ve vztahu (11)  $l_1$  představuje střední délku siločáry magnetického obvodu a  $l_2$  představuje délku vzduchové mezery. V tom případě můžeme (11) na základě (7) přepsat následovně:

$$U_m = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 = B \cdot (l_1/\mu + l_2/\mu_0) \quad (12)$$

za předpokladu, že  $B$  je konstantní v celém magnetickém obvodu.

Je zřejmé, že délka vzduchové mezery má zásadní vliv na to, jak velké musí být magnetomotorické napětí, abychom dosáhli požadovaného magnetického toku  $B$ , protože zpravidla platí, že  $\mu \gg \mu_0$ .

A zbývá nám poslední veličina a tou je vlastní indukčnost  $L$ . Podle statické definice má cívka s  $N$  závitů indukčnost

$$L = N \cdot \Phi / I \quad (13)$$

Jak indukčnost  $L$  souvisí s magnetickým odporem  $R_m$ ? To si teď ukážeme. Protože pro magnetomotorické napětí platí

$$U_m = N \cdot I \quad [Az, N, A] \quad (14)$$

po dosazení do (13) za  $\Phi$  podle (4) a (9) dostaneme

$$L = N \cdot \Phi / I = N \cdot (U_m / R_m) / I = N \cdot (N \cdot I / R_m) / I = N \cdot (N \cdot I \cdot \mu \cdot S / l) / I$$

Odkud po úpravě

$$L = N^2 / R_m = N^2 \cdot \mu \cdot S / l \quad [H, -, H/m, m^2, m] \quad (15)$$

V praxi se často místo magnetického odporu používá magnetická vodivost  $A_L$ , pro kterou platí:

$$A_L = 1 / R_m = \mu \cdot S / l \quad [H/N^2, H/m, m^2, m] \quad (16)$$

Konstanta  $A_L$  potom udává indukčnost na jeden závit a tento parametr se objevuje mezi parametry jader pro transformátory a tlumivky. Indukčnost potom vypočítáme podle vztahu

$$L = A_L \cdot N^2 \quad (17)$$

Pro naše účely jsou nejdůležitější vztahy (12) a (15), přičemž (12) můžeme z estetických i praktických důvodů upravit takto:

$$U_m = B \cdot (l_m/\mu + \sigma/\mu_0) = (B/\mu_0) \cdot (l_m/\mu_r + \sigma) \quad [Az, T, H/m, m, -, m] \quad (18)$$

kde  $l_m$  je délka magnetického obvodu a  $\sigma$  je délka vzduchové mezery.

Pokud  $l_m/\mu_r \ll \sigma$ , můžeme (16) zjednodušit následovně

$$U_m \approx B \cdot \sigma / \mu_0 \quad [Az, T, m, H/m] \quad (19)$$

Pro ilustraci si nyní vypočítáme příklad: Máme magnetický obvod podle obr. 4, kde délka magnetického obvodu je 32 cm, délka mezery je 7 mm a průřez jádra je 8 cm<sup>2</sup>. Máme vypočítat

indukčnost cívky, magnetomotorické napětí a počet závitů, je-li maximální magnetická indukce 0,4T, relativní permeabilita 2000 a amplituda proudu 5A.

Řešení: Nejdříve vypočítáme magnetomotorické napětí  $U_m$  podle vztahu (16):

$$U_m = (B/\mu_0) \cdot (I_{Fe}/\mu_r + \sigma) = 0,4/(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot (0,32/2000 + 0,007) = \\ = 318310 \cdot (0,00016 + 0,007) = 2279 \text{ Az}$$

Dále podle (14) vypočítáme počet závitů:

$$N = U_m/I = 2279/5 = 456z$$

Nyní, když známe počet závitů, můžeme vypočítat indukčnost. K tomu potřebujeme znát indukčnost jednoho závitu, čili magnetickou vodivost  $A_L$ . Jelikož v magnetickém obvodu máme vzduchovou mezeru, musíme nejdříve vypočítat po částech magnetický odpor (v železe a ve vzduchové mezeře zvlášť), z něhož potom pomocí (17) vypočítáme  $A_L$ :

$$R_{mFe} = l_{Fe} / (\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S) = 0,32 / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2000 \cdot 0,0016) = 79577,5 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{m\sigma} = \sigma / (\mu_0 \cdot S) = 0,007 / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0016) = 3481514,4 \text{ H}^{-1}$$

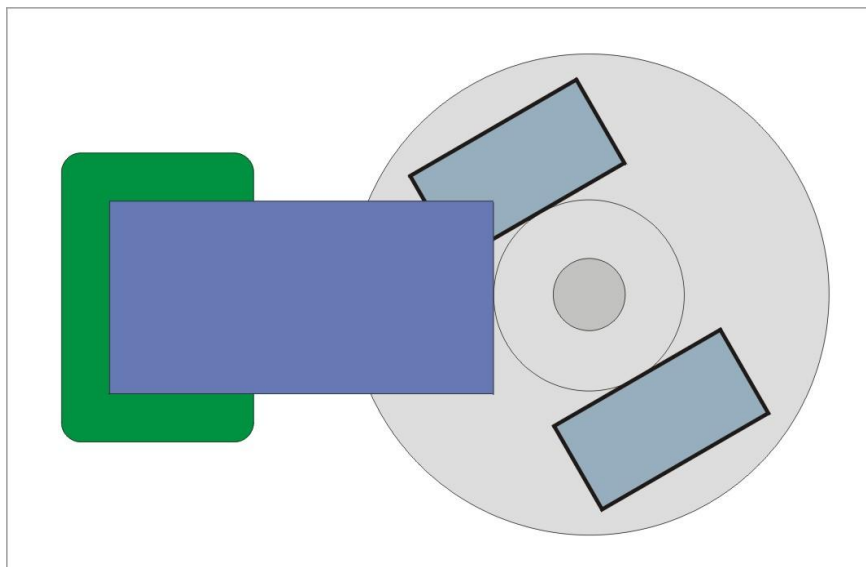
$$R_m = R_{mFe} + R_{m\sigma} = 79577,5 + 3481514,4 = 3561091,9 \text{ H}^{-1}$$

$$A_L = 1/R_m = 1/3561091,9 = 2,8081 \cdot 10^{-7} \text{ H} = 280,81 \text{ nH}$$

$$L = 2,8081 \cdot 10^{-7} \cdot 456^2 = 0,0584 \text{ H} = 58,4 \text{ mH}$$

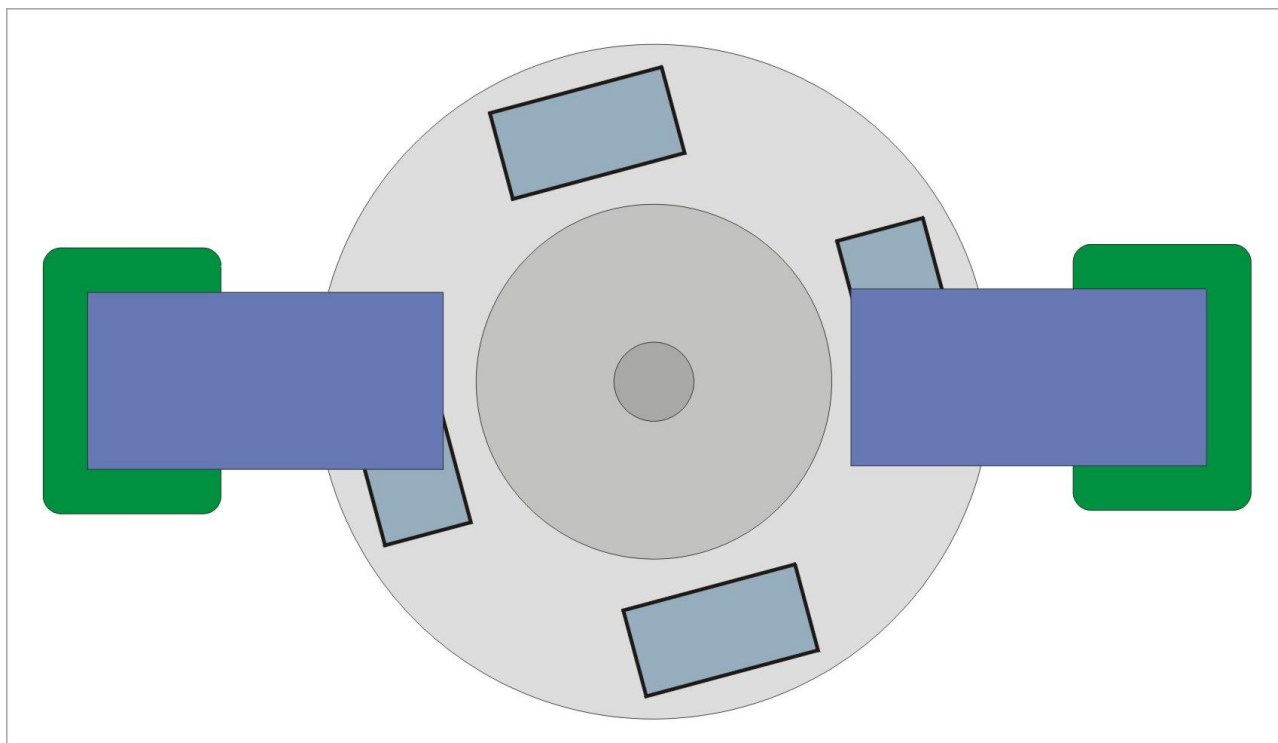
## Příklady konstrukce rezonančního motoru

### Jednofázový motor



Obr. 6. Jednofázový dvoupólový motor

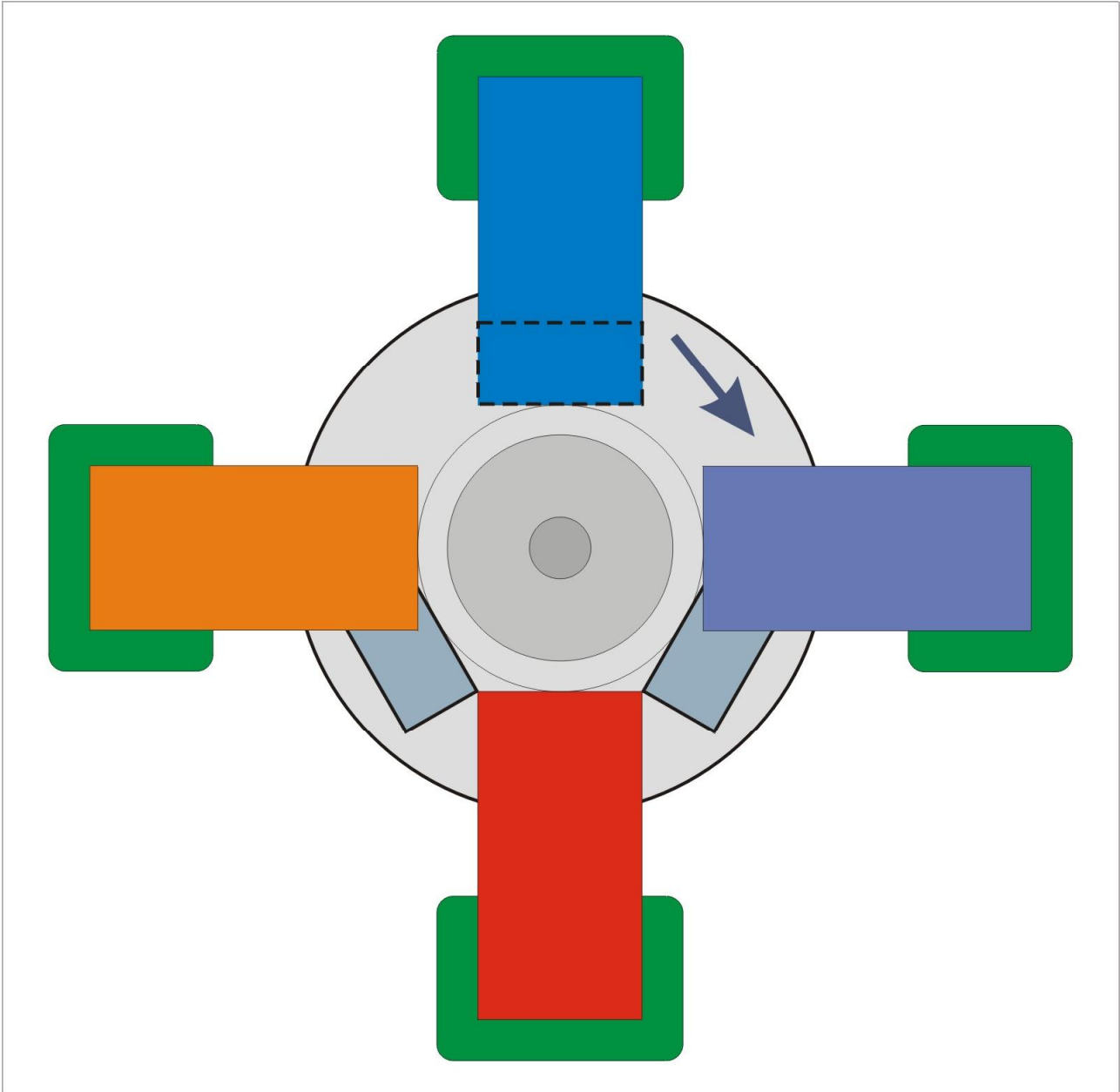
Nejjednodušší varianta jednofázového motoru je na obr. 6. Rotor - doplněný Hallovou sondou - zároveň slouží jako snímač polohy rotoru. Kdybychom použili dvě statorové cívky, museli bychom snímání polohy rotoru vyřešit jinak. Na obr. 7 máme čtyřpólovou variantu motoru.



Obr. 7. Jednofázový čtyřpólový motor

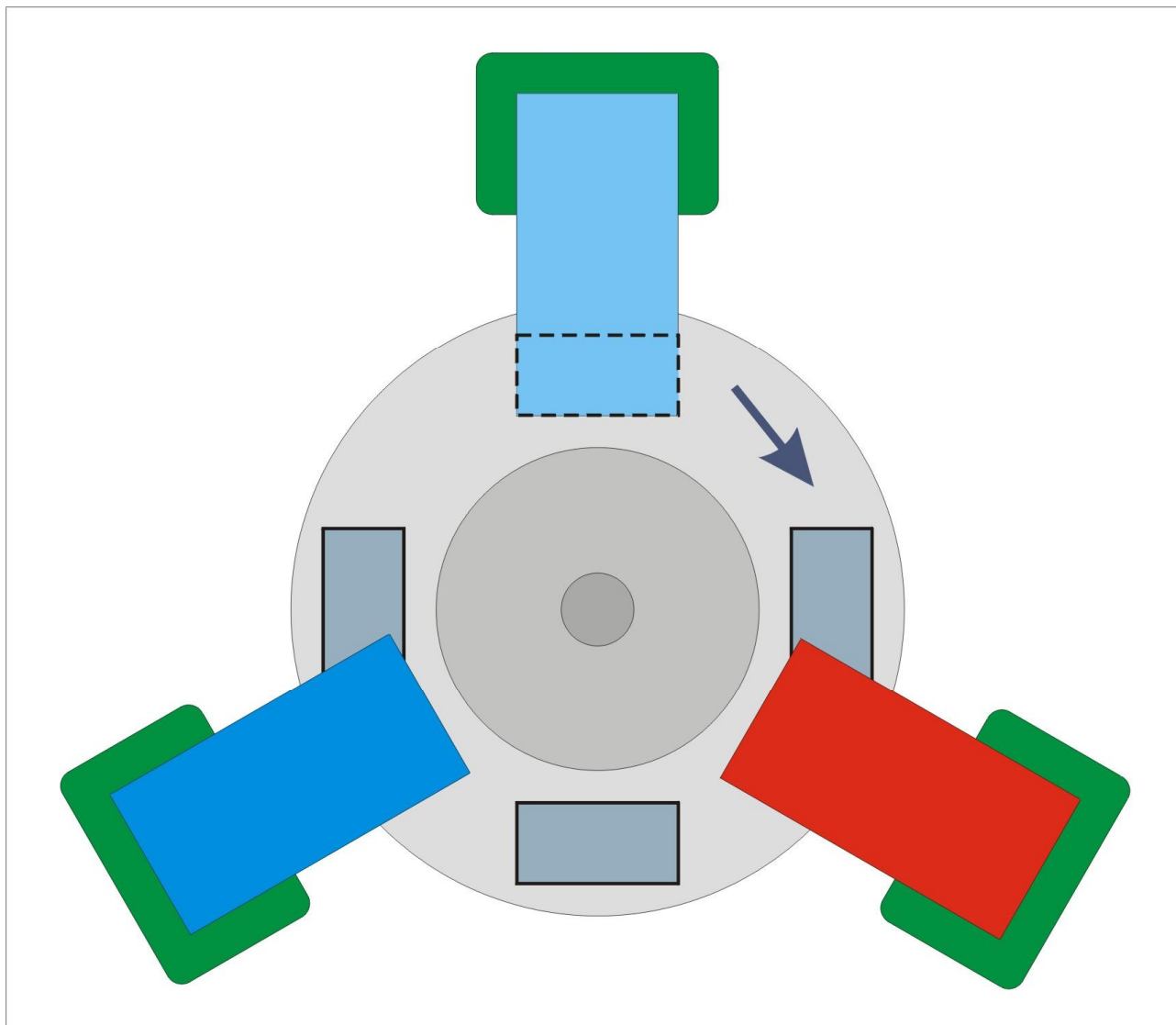
## Dvoufázový motor

Konstrukci dvoufázového motoru s pěti magnety v rotoru jsme mohli vidět výše na obr. 3. Minimalistickou verzi dvoufázového motoru můžete vidět na obr. 8 dole. V tomto případě nemůžeme rotor použít zároveň jako snímač polohy, ale musíme jej vyřešit jinak.

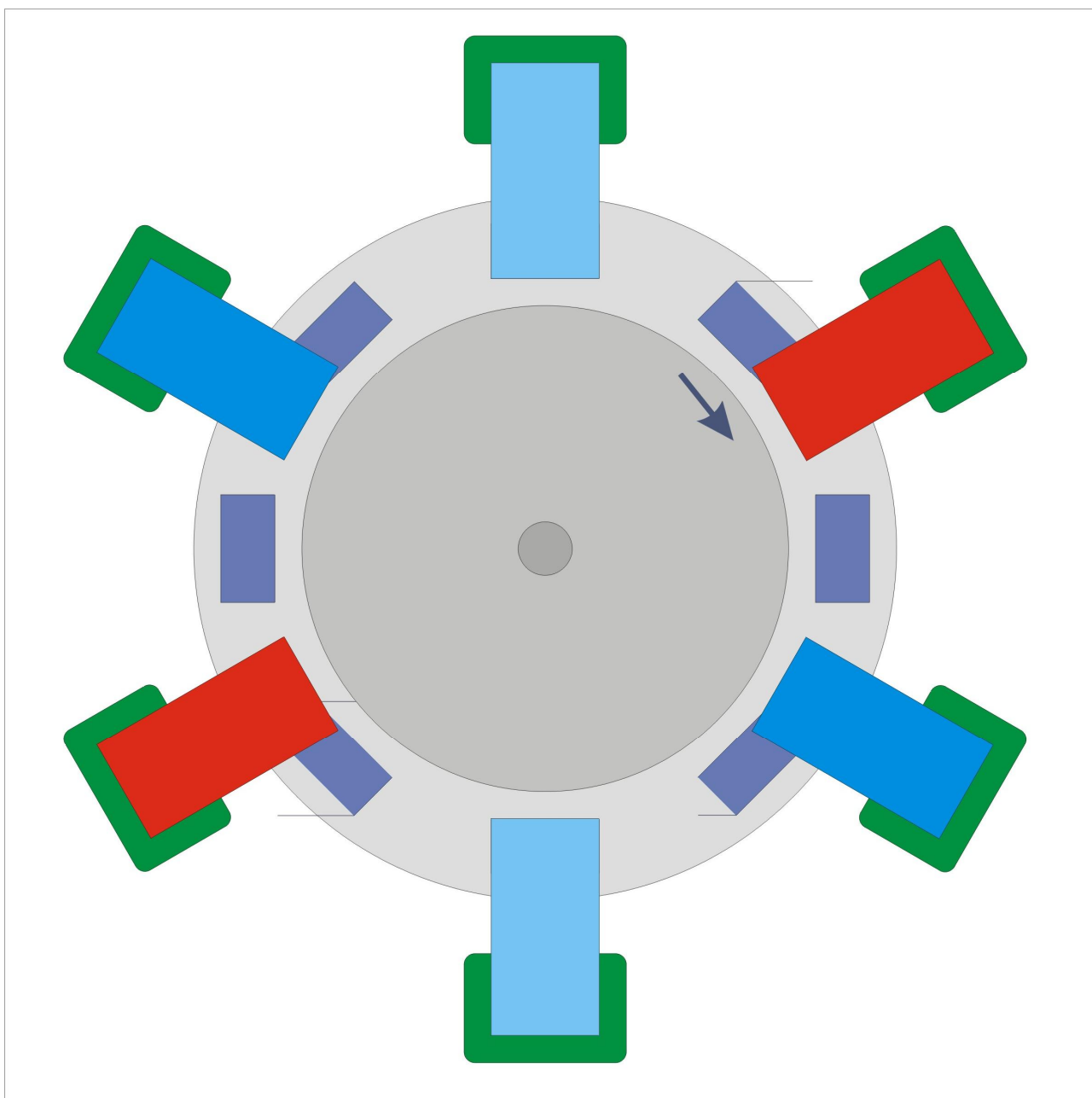


Obr. 8. Dvoufázový motor se třemi magnety v rotoru

## Trojfázový motor



Obr. 9. Trojfázový motor se čtyřmi magnety v rotoru

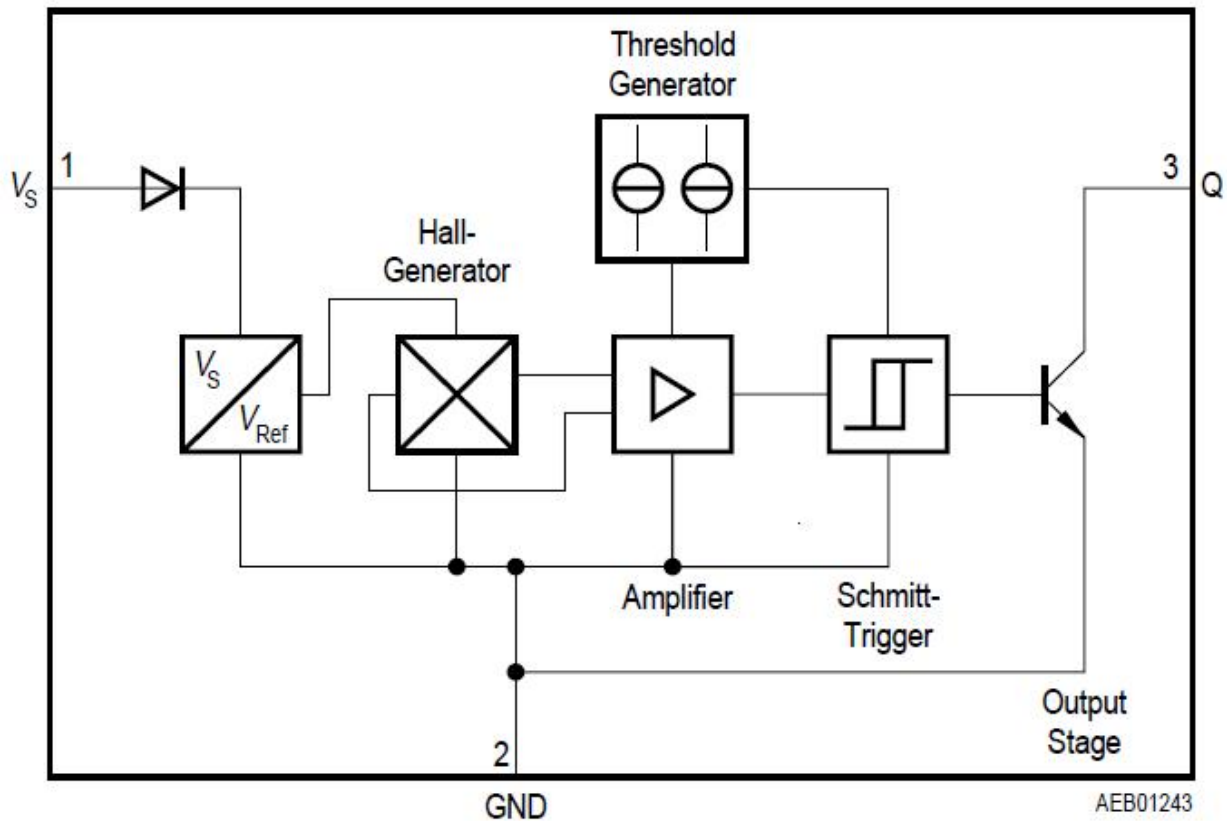


Obr. 10. Trojfázový motor s osmi magnety v rotoru

## Elektronika pro řízení BLDC a rezonančního motoru

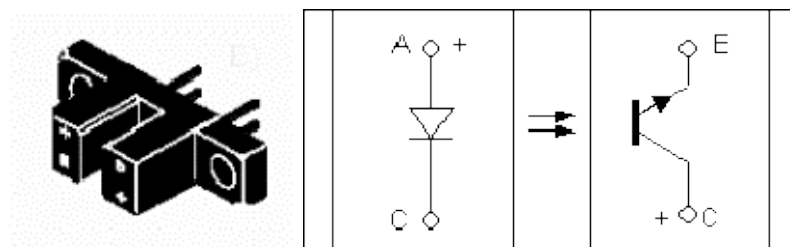
### Snímač polohy

Jako snímač polohy použijeme buď Hallovu sondu, nebo optickou závora. Hallova sonda reaguje na magnetické pole. V našem případě se bude jednat o magnetické pole permanentních magnetů. Ve většině případů můžeme použít magnety rotoru. Na obr. 11 je blokové schéma Hallovy sondy TLE4905L.



Obr. 11. Hallova sonda TLE4905L – blokové schéma

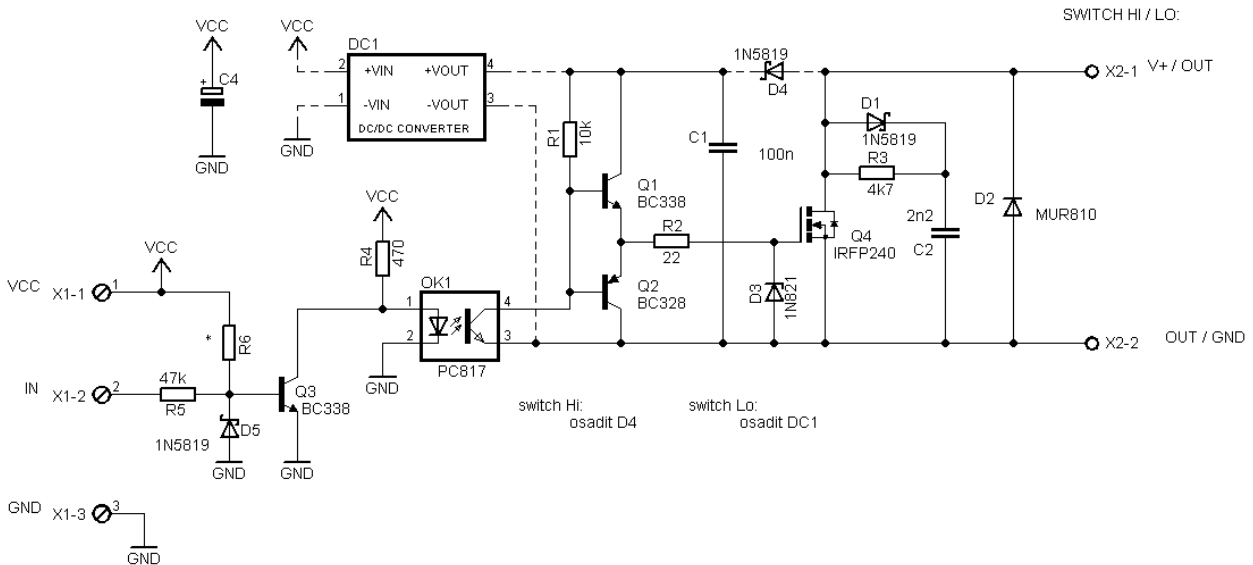
Optická závora se skládá ze zdroje světla (LED dioda) a detektoru (foto-tranzistoru). Může se jednat o kompaktní součástku v jednom pouzdře, obr. 12.



Obr. 12. Optická závora.

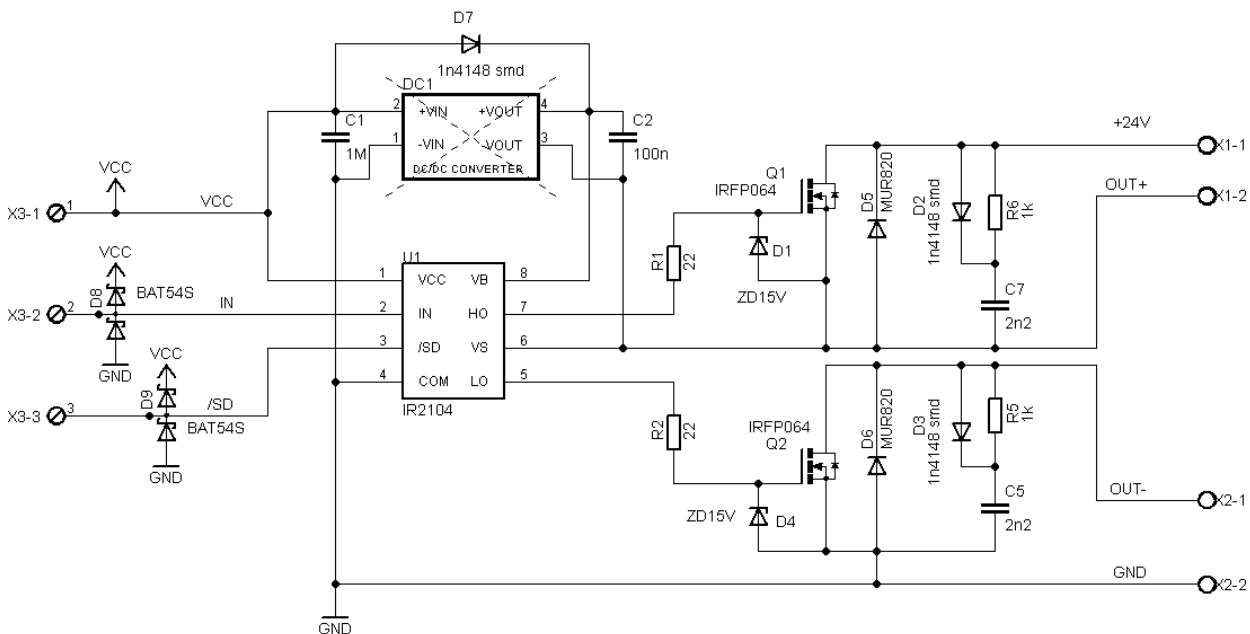
Poměrně široký sortiment optických závor nabízí například prodejce součástek GM Electronic:  
<https://www.gme.cz/optozavory-reflexni-optocleny>

## Výkonové spínače



Obr. 13. Výkonový elektronický spínač s diskretními součástkami

Výkonové spínače můžeme řešit například pomocí diskretních součástek jako na obr. 13. Toto zapojení se hodí pro nízké frekvence. Tento spínač je univerzální v tom smyslu, že ho lze použít buď jako horní spínač, nebo jako dolní spínač. Další výhodou je to, že optočlen zajišťuje zpoždění při sepnutí, aby při můstkovém nebo půlmůstkovém zapojení spínačů nedošlo k situaci, kdy ve stejném okamžiku vede jak horní, tak dolní spínač.

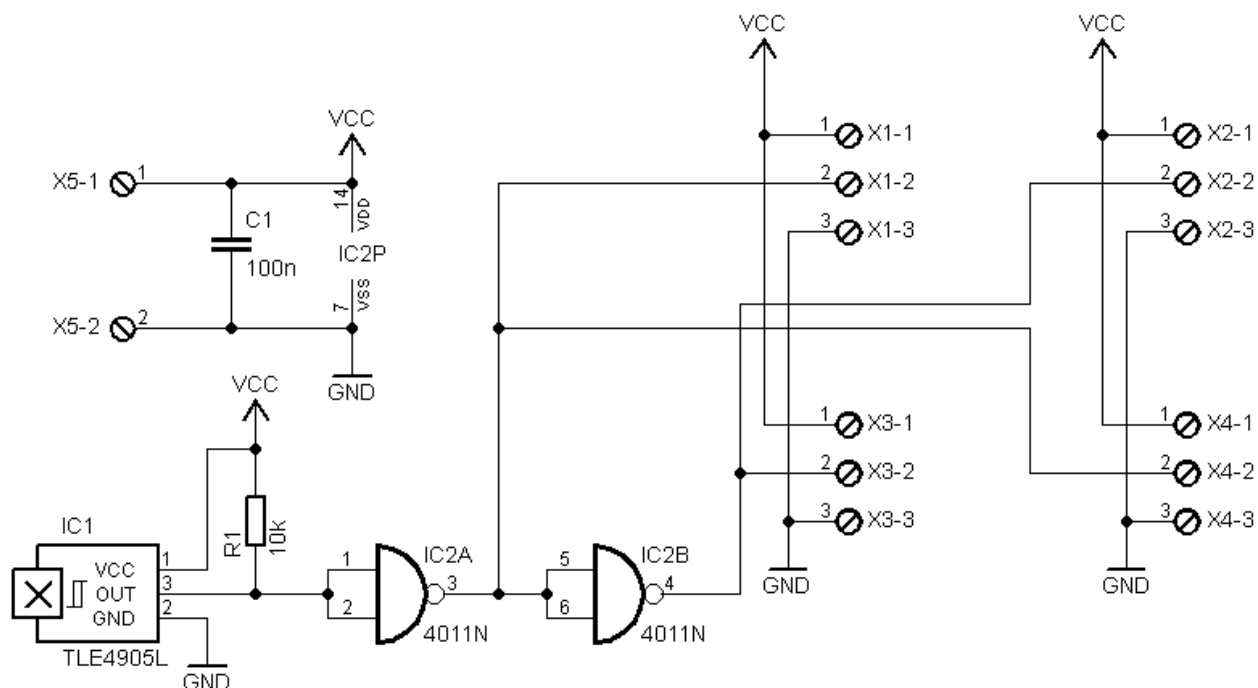


Obr. 14. Elektronický přepínač s integrovaným budičem

Na obr. 14 máme elektronický přepínač s budičem IR2104. Tento obvod můžeme použít i pro vysoké frekvence spínání. Toto řešení je však dražší díky ceně integrovaného budiče. Pokud nepotřebujeme rychlé spínání, což je případ rezonančního řízení motorů, dáme raději přednost zapojení podle obr. 13.



## Řízení



Obr. 15. Řízení jednofázového BLDC motoru

Na obr. 15 máme zobrazen příklad řízení jednofázového BLDC motoru. Konektory X1 – X4 jsou připojeny k řízení výkonových spínačů. Napětí VCC by mělo být dostatečně vysoké pro otevření tranzistorů řízených polem (MOSFET), tj. v rozsahu 10-15V.