

Stejnoseměrný pulzní motor

© Ing. Ladislav Kopecký, 2004

Úvod

Řada lidí se zabývá (nebo zabývala) myšlenkou sestavit elektromotor, který by dodával více energie než spotřebuje. Čas od času se ve sdělovacích prostředcích objeví senzační zpráva, že se taková věc podařila, ale taková zpráva často bývá zlehčována a doprovázena ironickými poznámkami. (Častěji je však zcela mimo zájem médií hlavního proudu.) Za několik týdnů vzrušení opadne a život jde nerušeně dál ve vyježděných kolejkách, takže spořádaný občan dá masmédiím zapravdu, že se zase jedná o nějaký humbuk, vždyť se přece ve škole učil, že nic takového není možné.

Zejména na internetu lze nalézt množství zpráv o takových senzačních objevech, mnohdy doprovázených technickými podrobnostmi, avšak často se jedná o jakýsi folklór a svým způsobem mytologii. Snad nejznámějším takovým vynálezem je Adamsův motor, z něhož čerpali inspiraci např. japonští vynálezci Kawai a Takahashi nebo dva jistí vynálezci z Austrálie (svůj motor nazvali Lutec 1000 a starý pán Adams je odsoudil jako plagiátory), dále pak různé samohodné magnetické motory, za všechny jmenujme Johnsonův motor, a v neposlední řadě Flynnův motor, který se tváří velmi věrohodně. I já jsem zatoužil přispět k technickému rozvoji v tomto směru a navrhl řešení, k němuž mě inspiroval výše zmíněný Adamsův a také Flynnův motor, přičemž mojí snahou bylo, aby tento motor byl jednoduchý, snadno vyrobitelný z běžně dostupných součástek (pokud možno bez elektroniky) a teoreticky zdůvodněný, takže bude možné vypracovat přesný matematický postup návrhu stroje, eventuálně odhadnout jeho účinnost, která pochopitelně přesáhne 100%.

Dříve než se pustíme do výkladu o vlastním motoru, nebude na škodu povědět si něco o motorech, které mě inspirovaly.

Flynnův motor

Na obr. 1 je zobrazen náčrt principu Flynnova motoru.

Tento princip vychází z jednoduchého faktu, že silové účinky magnetického pole jsou úměrné druhé mocnině magnetické indukce:

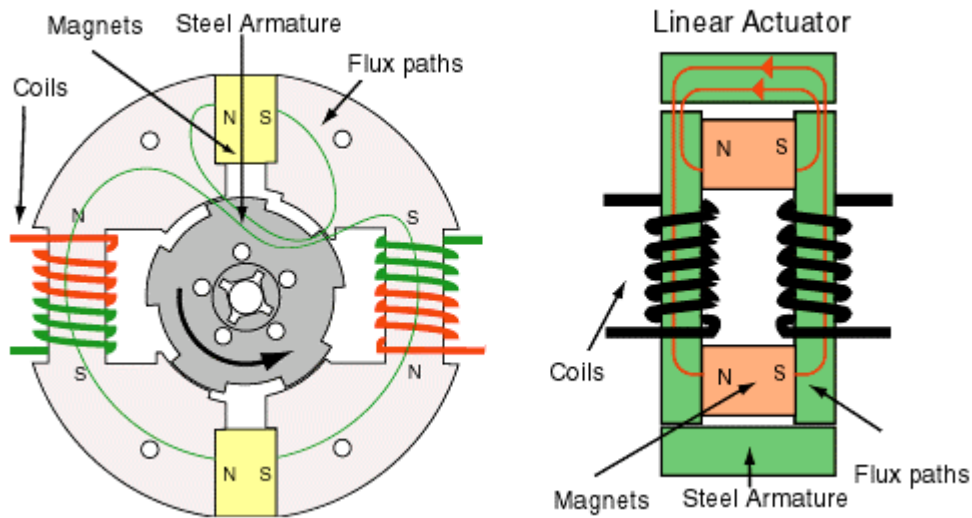
$$F = \frac{\beta^2 A}{2\mu_0}$$

kde β je magnetická indukce [T],

A je plocha, na níž mag. indukce působí [m²],

μ_0 je permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m),

F je síla [N].



Obr. 1. Princip Flynnova motoru

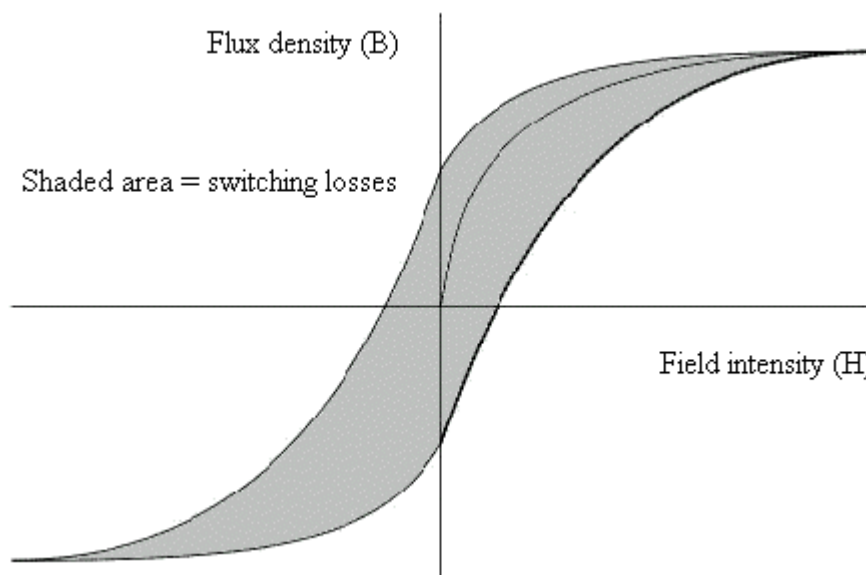
Nyní se podívejme na pravou část obrázku 1. Uvažujme, že obě cívky jsou buzeny takovým proudem, aby se veškerý magnetický tok uzavíral přes horní hranol. Když nyní odstraníme permanentní magnety, bude se poloviční magnetický tok uzavírat přes oba hranoly. Jestliže sílu, která nyní působí na oba hranoly, zvolíme za jednotkovou, bude síla, působící na horní hranol za přítomnosti obou magnetů, teoreticky rovna čtyřem jednotkám, jak plyne z výše uvedeného vztahu pro výpočet síly. Přidáním magnetů jsme tudíž celkově dostali dvojnásobek síly. V levé části obrázku je nakreslena aplikace tohoto principu na vytvoření střídavého elektromotoru.

Tento motor má však několik nedostatků:

- 1) Zabírá pouze jedna část statoru (při plném vybuzení cívky),
- 2) Když cívka není úplně vybuzena, druhá část rotoru působí opačným kroticím momentem,
- 3) Rotor je nerovnoměrně namáhán, což může vést k nadměrnému opotřebení ložisek.
- 4) Dalším nedostatkem (který však je vlastní všem současným motorům na střídavý proud) je, že jsou zde hysterezní ztráty. Na obr. 2 je nakreslena hysterezní smyčka. Oblast vyplněná šedou barvou představuje hysterezní ztráty, čili ztráty způsobené změnou polarity proudu.

Adamsův Motor

Žádným z těchto nedostatků netrpí řešení, se kterým přišel pan Adams z Nového Zélandu. Na obr. 3 vidíte schématické znázornění jeho motoru.

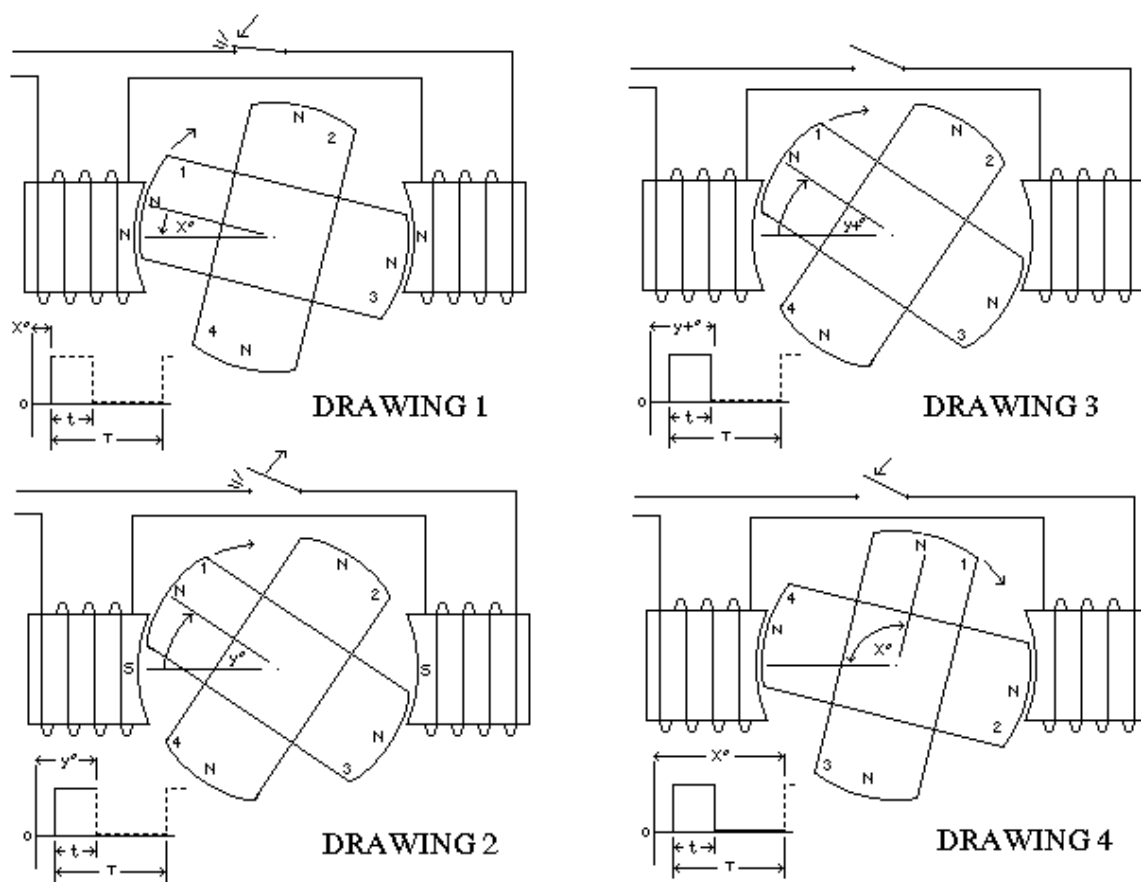


Obr. 2. Hysterezní smyčka

Adamsův motor připomíná klasický stejnosměrný motor s elektronickou komutací a permanentními magnety v rotoru, ale jsou zde podstatné rozdíly:

- 1) Proud ve statoru neobrací polaritu.
- 2) Stator je buzen stejnosměrnými impulzy.
- 3) Magnetický obvod statoru není uzavřen.
- 4) Magnety v rotoru jsou pólovány tak, aby severní póly všech magnetů směřovaly ven.
- 5) Cívky statoru jsou pólovány tak, aby magnety v rotoru vždy odpuzovaly.

Princip funkce Adamsova motoru je jednoduchý a na první pohled zřejmý z obr. 3. Pokud cívky statoru nejsou napájeny (spínač rozpojen), působí na rotor krouticí moment, vyvolaný přitažlivostí mezi jádry statoru a permanentními magnety rotoru, dokud se póly statoru a póly rotoru nekryjí, potom přijde do statorových cívek proudový impuls, který umožní překonání mrtvé polohy rotoru. Jak již bylo řečeno, výhodou tohoto motoru je to, že nemá hysterezní ztráty a navíc „zadarmo“ využívá přitažlivé síly permanentních magnetů v době, kdy cívky nejsou napájeny. Nevýhodou tohoto řešení je, že není uzavřen magnetický obvod statoru a že pohybem permanentních magnetů v blízkosti statorových cívek se v nich indukuje napětí, které působí proti napětí napájecímu.



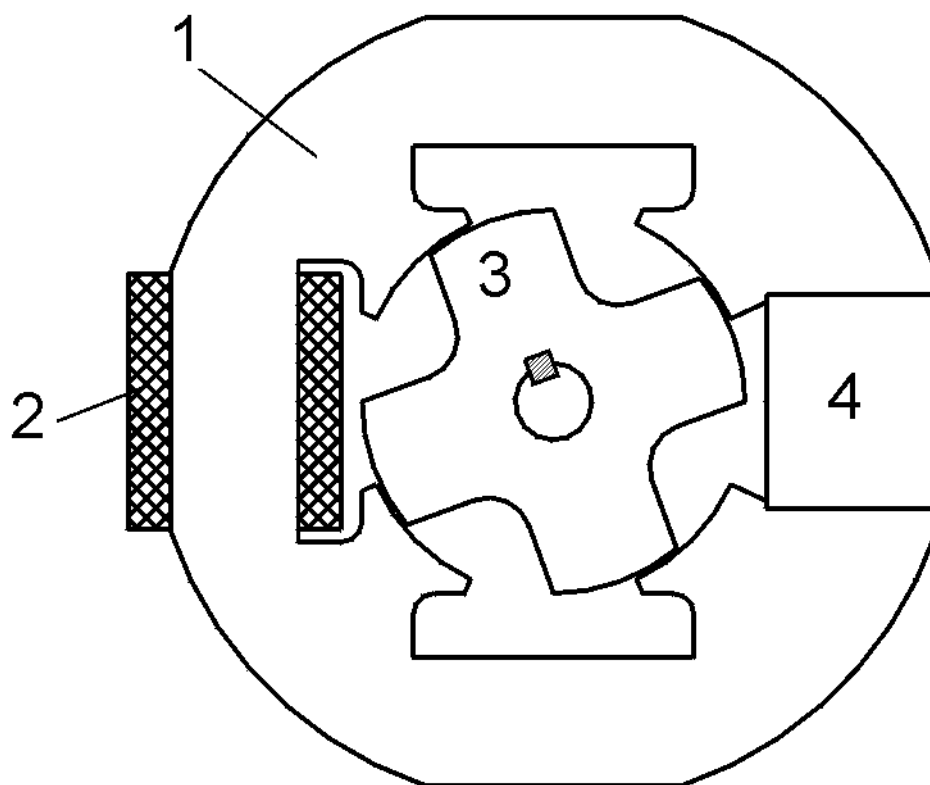
Obr. 3. Principiální schéma Adamsova motoru

Nové řešení

Spojením výhod a potlačení nevýhod obou motorů vzniklo řešení, které najdete na obr. 4. Stator (1) je tvořen uzavřeným magnetickým obvodem se čtyřmi vyniklými póly, které jsou buzeny z jedné strany cívkou (2), napájenou stejnosměrnými pulzy, odvozenými od polohy rotoru (3), z druhé strany silným permanentním magnetem (4). Rotor je tvořen pouze feromagnetickým materiálem taktéž s vyniklými póly. Nejsou zde tedy žádné magnety ani cívky. Jestliže cívkou neprochází elektrický proud, magnetický tok, buzený permanentním magnetem se téměř celý uzavírá mag. obvodem statoru a na rotor prakticky nepůsobí žádná síla. Pokud ve vhodném okamžiku do cívky přivedeme el. proud takové polarity, že mag. tok vybuzený touto cívkou působí proti mag. toku permanentního magnetu, oba toky se začnou uzavírat přes rotor a ten bude vyvolávat kroučící moment. Je zřejmé, že pomocí jediné cívky ovládáme dva magnetické toky, z nichž jeden je „zadarmo“. O tomto faktu se můžeme přesvědčit při pohledu do následující tabulky, kde jeden ze sloupců obsahuje hodnoty kroučícího momentu v závislosti na přítomnosti (resp. nepřítomnosti magnetu) a velikosti proudu protékajícího cívkou. Při proudové hustotě 3 A/mm^2 se přítomnost magnetu příliš výrazně neprojevuje. Je-li však proudová hustota vysoká (6 A/mm^2), je kroučící moment více než dvojnásobný proti případu, kdy magnet není přítomen. Dále si všimněte, že když cívka není buzena, blíží se kroučící moment nule, protože magnetický tok vyvolaný magnetem se téměř celý uzavírá státorem.

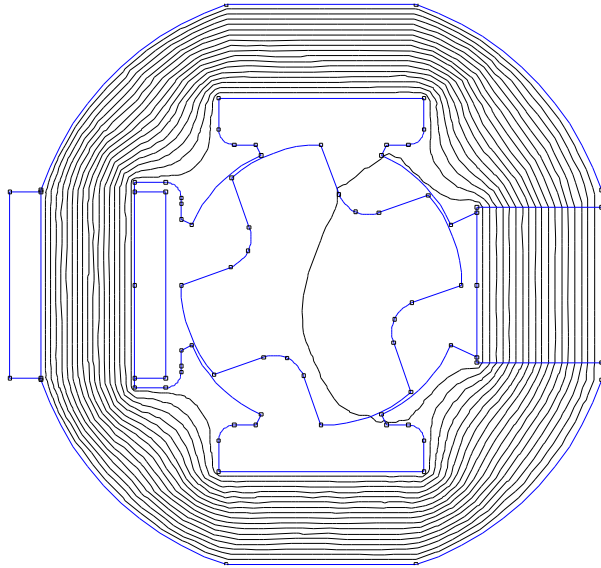
| Magnet [ano / ne] | Proudová hustota v cívce [A / mm ²] | Krouticí moment [Nm] |
|-------------------|---|----------------------|
| Ano | 3 | 1,9 |
| Ne | 3 | 1,76 |
| Ano | 6 | 6,56 |
| Ne | 6 | 2,97 |
| ano | 0 | 0,018 |

Tab. 1

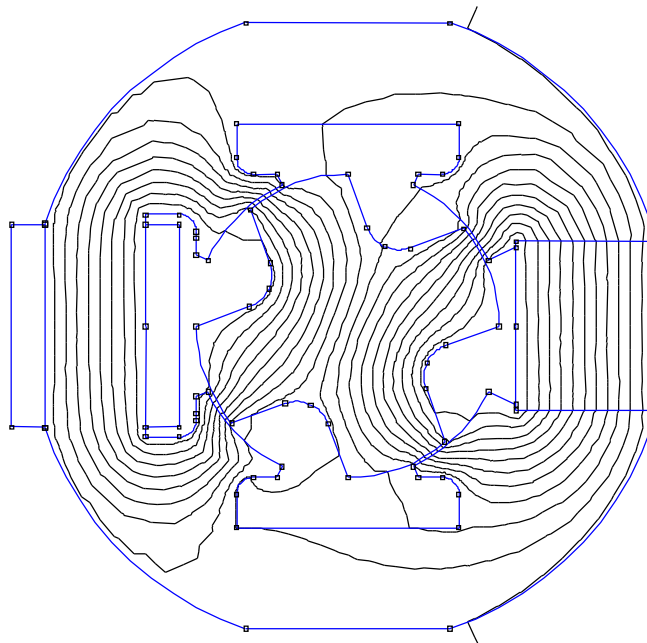


Obr. 4. Nové řešení motoru

Na obr. 5 můžete vidět průběhy siločar, které odpovídají pátému řádku tabulky a na obr. 6 je pak zobrazena situace odpovídající třetímu řádku tabulky.



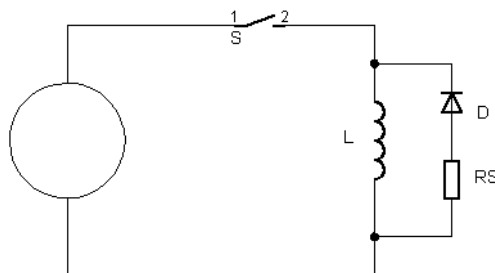
Obr. 5. Průběh mag. toku při proudové hustotě v cívce 0 A/mm^2



Obr. 6. Průběh mag. toku při proudové hustotě v cívce 6 A/mm^2

Nyní se podrobně podíváme na zařízení, které řídí přivádění pulzního proudu do statorové cívky. Tato pasáž je velmi důležitá a může podstatnou měrou ovlivnit výsledek našeho snažení, proto jí věnujte náležitou pozornost. Ideální by bylo, kdyby cívkou probíhal proud obdélníkového průběhu se střídou 1: 1. V tomto případě by bylo dosaženo maximálního výkonu motoru. V praxi je však situace – díky časové konstantě L/R – poněkud odlišná. Připojíme-li cívku na napětí, začne v ní narůstat proud od nuly po exponenciální křivce na hodnotu U/R , kde U je napájecí napětí a R je činný odpor obvodu. Po rozpojení obvodu cívky se v cívce naindukuje napětí opačné polarity, které způsobuje opalování kontaktů

mechanického spínače, nebo - v případě elektronického řízení - elektricky namáhá spínací polovodičový prvek a může ho zničit.



Obr. 5. Relaxační obvod cívky

Na obr. 5 máme zařízení, které dokáže této nepříjemnosti zabránit. Sepneme-li spínač S, cívkou začne procházet proud, který vzrůstá podle známého exponenciálního průběhu:

$$i(t) = U/R(1 - e^{-Rt/L}) \quad (1)$$

Po odeznění přechodového děje probíhá cívkou konstantní stejnosměrný proud o hodnotě

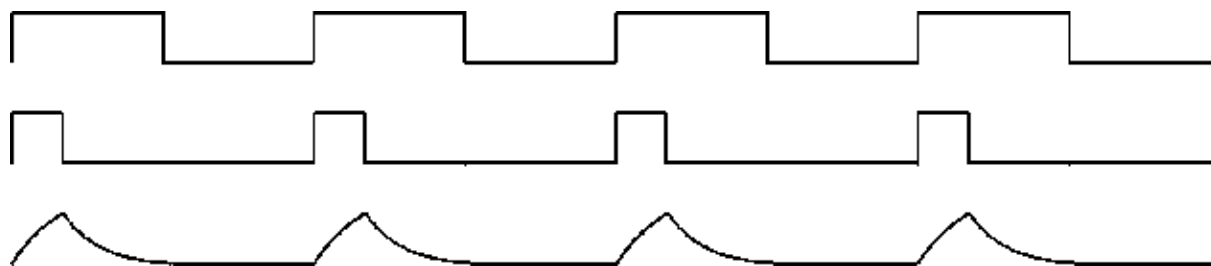
$$I = i(\infty) = U/R.$$

Cívka nyní obsahuje určitou energii, která se rovná vynaložené práci na její „nabití“. Jestliže spínač nyní rozpojíme, energie nahromaděná v cívce se „vybije“ přes diodu D a odpor R_S . Přitom dojde k opačnému exponenciálnímu ději podle vztahu

$$i(t) = i(t_1)e^{-Rt/L} \quad (2)$$

kde $i(t_1)$ je proud, kterého bylo dosaženo při odpojení zdroje napětí od cívky. Zatímco v prvním případě byl odpor R tvořen pouze odporem vinutí cívky R_L (další odpory v el. obvodu jsme zanedbali), v druhém případě je k tomuto odporu nutné přičíst hodnotu odporu R_S : $R = R_L + R_S$.

Nyní se podívejme na časování napěťových impulzů přiváděných do cívky. Jejich vhodným načasováním a volbou odporu R_S lze totiž docílit toho, že energie, která se v cívce nahromadila během připojení zdroje napětí, bude konat práci i při „vybíjení“ cívky. A to je další energie, kterou získáme „zadarmo“. Konvenční střídavé i stejnosměrné elektromotory totiž neobsahují „relaxační“ složku periody a tuto energii potlačují přivedením energie opačné polarity (u střídavého stroje se tomto plýtvání energií říká reaktance cívky, u stejnosměrného stroje komutace). Vraťme se však k našemu problému. Náš stroj má čtyři póly, během jedné otáčky tedy proběhnou čtyři pracovní cykly stroje. Každý cyklus rozdělme na čtyři stejné díly. Během fáze 1 je cívka připojena na napětí a roste v ní proud podle vztahu (1). V čase $t = t_1$ je napětí odpojeno a proud, tekoucí cívkou se začne uzavírat diodou D a odporem R_S , přičemž klesá podle exponenciálního průběhu (2). Odpor R_S musí mít takovou velikost, aby na konci druhé fáze v čase t_2 byl proud v cívce prakticky nulový. Situace je zřejmá z obr. 6. Horní čára představuje pólové nastavce statoru, prostřední čára představuje průběh napětí na cívce (V okamžiku sepnutí cívky je rotor v poloze mezi dvěma póly statoru.) a spodní čára znázorňuje průběh proudu protékajícího cívkou. Všimněte si, že časová konstanta při nárůstu proudu je větší než při jeho poklesu. Je to pochopitelně způsobeno odporem R_S . Jeho velikost zvolíme tak, aby v okamžiku, kdy se kryjí póly rotoru s póly statoru proud procházející cívkou nepřesahoval 5% jeho maximální hodnoty.



Obr. 6. Časové průběhy proudu a napětí v cívce v závislosti na poloze rotoru

Ve funkci rezistoru můžeme s úspěchem použít žárovku nebo – pro vyšší výkony - topné těleso. Požadovaný příkon spotřebiče můžeme vypočítat podle vzorce:

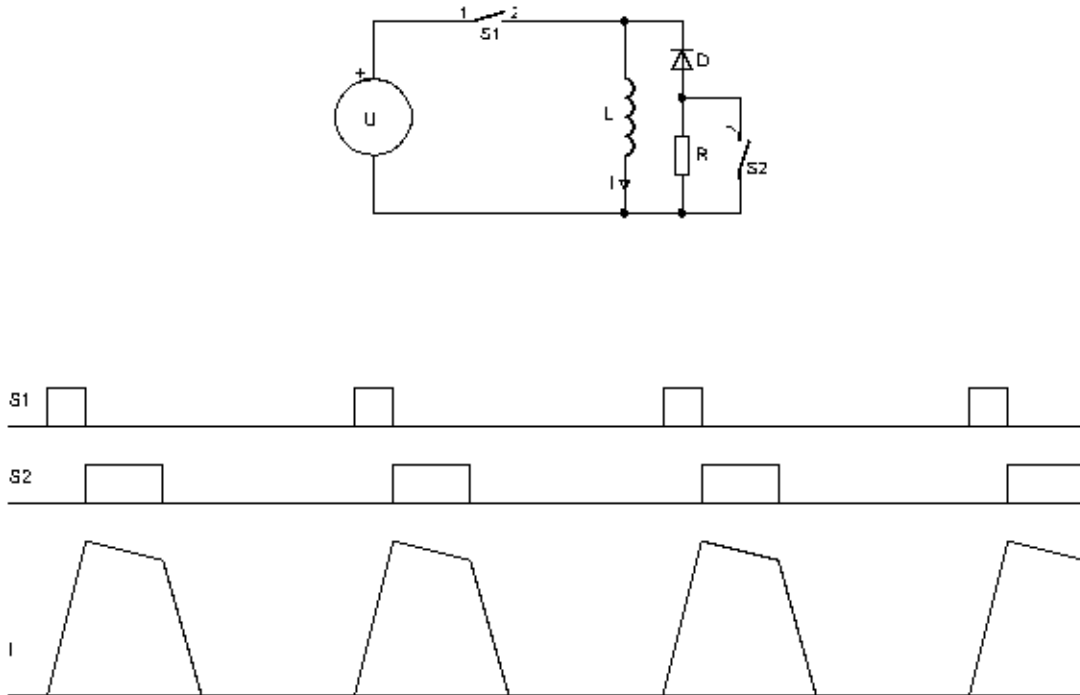
$$P = U^2/R_s \quad (3)$$

V následující tabulce jsou uvedeny vypočtené hodnoty příkonu, proudu a odporu:

| Příkon [W] | El. odpor [W] | El. proud [A] |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| 25 | 2116 | 0,109 |
| 40 | 1323 | 0,174 |
| 60 | 882 | 0,261 |
| 75 | 705 | 0,326 |
| 100 | 529 | 0,435 |
| 150 | 353 | 0,652 |
| 200 | 265 | 0,870 |
| 500 | 106 | 2,174 |
| 1000 | 53 | 4,348 |
| 2000 | 26 | 8,695 |

Pokud žárovka bude napájena napětím nižším než jmenovitým, musíme počítat s tím, že její odpor bude nižší. Této skutečnosti je možné využít u pomaluběžných strojů, kde frekvence spínání je nižší než časová konstanta vlákna žárovky. Než se vlákno stačí rozžhavit, protéká cívkou vyšší proud a tvar průběhu proudu (viz obr. 6) je příznivější, což se projeví vyšším výkonem.

Slabinou tohoto řešení je to, že průběh proudu v cívce bude mít k ideálnímu obdélníkovému průběhu hodně daleko - spíš bude mít průběh, který se bude podobat trojúhelníku. Pokusme se nyní vytvořit takové řešení relaxačního obvodu, aby se průběh proudu cívkou co nejvíce podobal obdélníku. Nárůst proudu musí být co nejstrmější, potom by měl proud klesat jen velmi zvolna a nakonec by měl co nejrychleji zaniknout. Schéma obvodu, který toto zajistí, najdete na obr. 7. Průběhy proudu jsou exponenciální, ale pro jednoduchost byly nahrazeny přímkami. Jak tento obvod funguje? Nejdříve na krátkou dobu sepne kontakt S1, který po dosažení jmenovité hodnoty proudu cívky opět vypne. Dříve než ale vypne, sepne kontakt S2. Po rozepnutí S1 se proud cívky uzavírá přes S2 a diodu D. Proud klesá po exponenciále s dlouhou časovou konstantou L/R_L , tedy velmi zvolna. Po určité době je kontakt S2 rozepnut a do obvodu cívky zařazen odpor R_s . Od tohoto okamžiku začne proud prudce klesat s časovou konstantou L/R , kde $R = R_L + R_s$.



Obr. 7.

Prudkého nárůstu proudu v cívice dosáhneme velkým poměrem napájecího napětí k indukčnosti cívky. Nyní si ukážeme, proč. Směrnice tečny obecné funkce času $f(t)$ v čase t je dána první derivací této funkce. V našem případě:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{d}{dt} (U/R(1 - e^{-Rt/L})) = \frac{U}{L} \cdot e^{-Rt/L} \quad (4)$$

V čase $t = 0$ je $di(0)/dt = U/L$.

Pro $t \ll \tau$ můžeme psát:

$$K = \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{U}{L} \quad (5)$$

Význam tohoto vztahu si ukážeme na příkladu.

Příklad:

Je dáno: $U = 300\text{V}$, $L = 2\text{H}$, $I_n = 2\text{A}$.

Máme vypočítat, za jakou dobu dosáhne proud jmenovité hodnoty I_n za předpokladu, že časová konstanta L/R je dostatečně velká.

Řešení:

Směrnice tečny je $K = U/L = 300/2 = 150$.

$$\Delta t = \Delta i / K = 2 / 150 = 13,3 \text{ ms.}$$