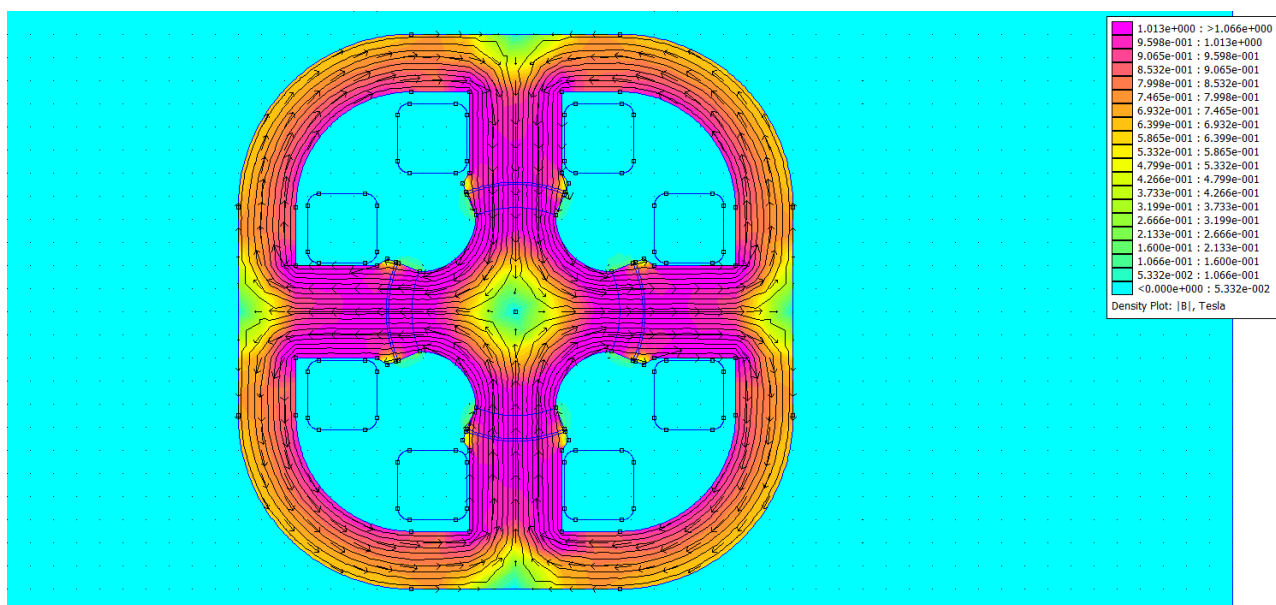


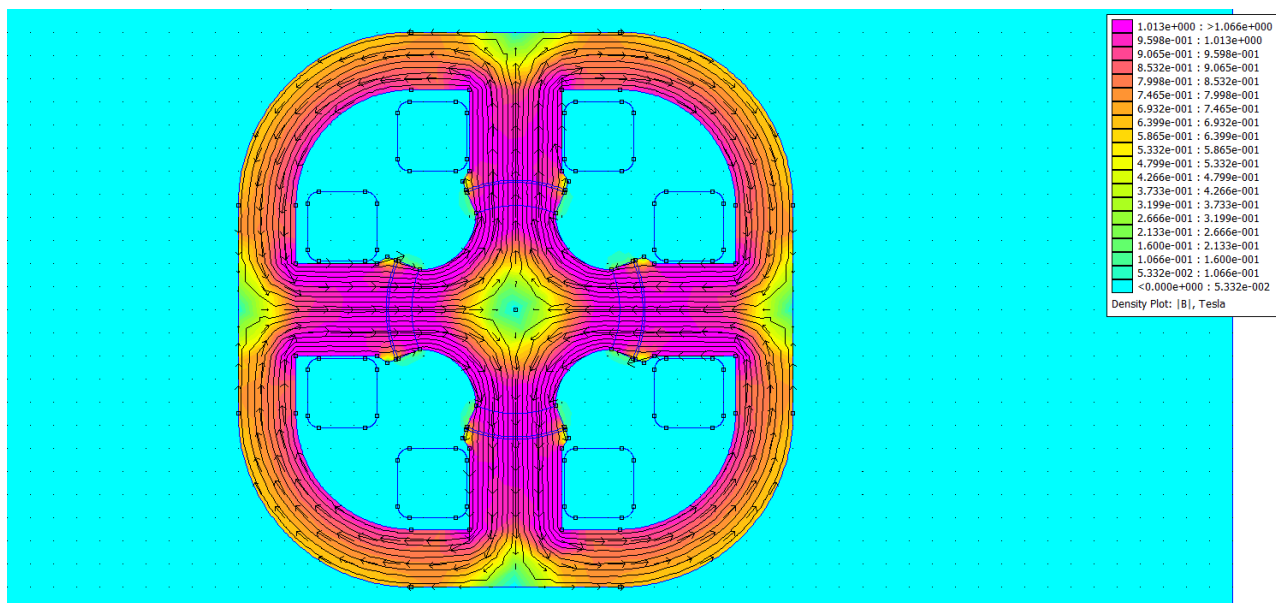
# Návrh Adamsova motoru III

© Ing. Ladislav Kopecký, červen 2018

Dosud jsme se zabývali především návrhem magnetického obvodu. Nyní svou pozornost obrátíme k návrhu elektroniky. Na obr. 1 máme simulaci motoru, jehož rotor je v rovnovážné poloze. Do této polohy se dostane silou magnetů, pokud cívkami neprotéká proud. Aby se rotor z této polohy dostal, musí cívkami proběhnout proudový impuls, který má takovou polaritu, že statorové póly magnety odpuzují. Po skončení proudového impulsu se rotor opět dostane do rovnovážné polohy, ale je otočený o  $90^\circ$  (viz obr. 2). Aby se rotor dostal z rovnovážné polohy nyní, musí mít proud v cívkách opačnou polaritu. Co z toho vyplývá pro návrh silové elektroniky? Zprv, musíme mít jedno čidlo polohy rotoru pro každý směr proudu, takže čidla budou dvě. Zadruhé, rotor se dostane do výchozí polohy po  $180^\circ$ , takže budeme potřebovat, aby jedno čidlo vyslalo řídicí impuls  $360/180 = 2$ krát za otáčku, takže na clonce čidla polohy budou dva otvory, pokud použijem optickou závoru.

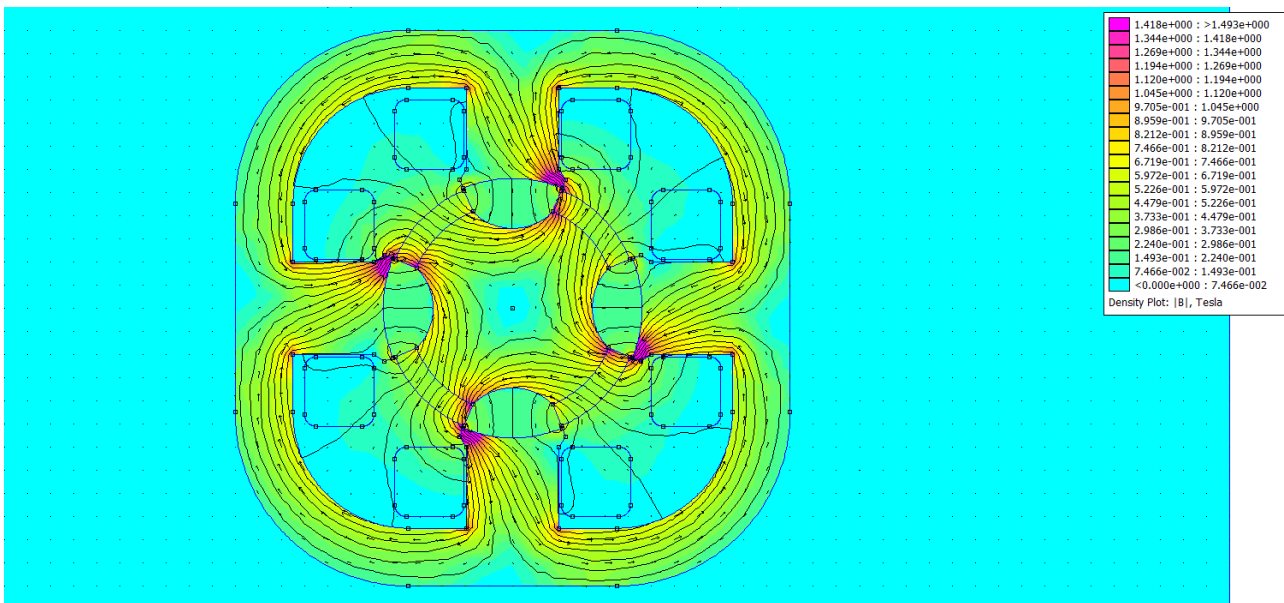


Obr. 1: Rotor v rovnovážné poloze 1



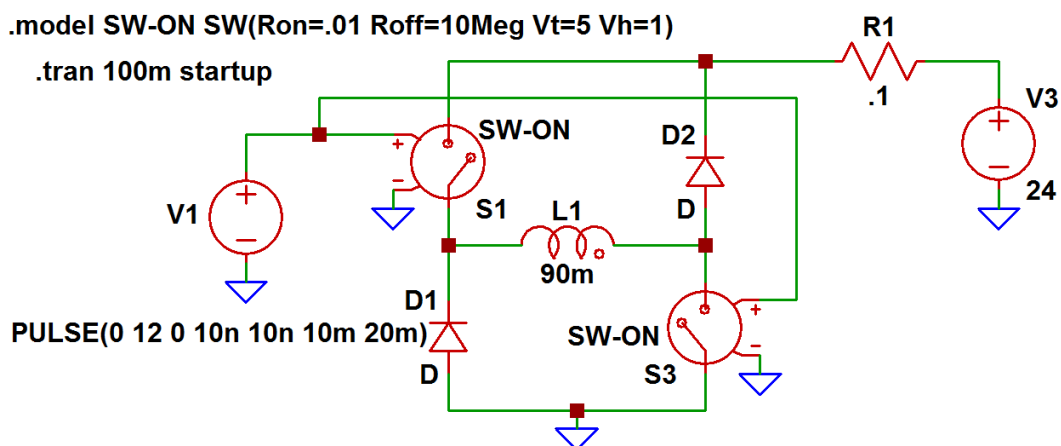
Obr. 2: Rotor v rovnovážné poloze 2

V případě použití Hallovy sondy budou na kotouči dva magnety. Nyní vyřešíme otázku, o jaký úhel se otočí rotor, zatímco signál z čidla bude v aktivním stavu, tj. budou sepnuty tranzistory výkonového spínače. Pro vyřešení tohoto problému si vypomůžeme dalším obrázkem, kde rotor bude v nestabilní poloze, tj. vychýlený z rovnováhy o  $45^\circ$  (viz obr. 3). V této poloze rotoru již sice nepotřebujeme, aby cívkami protékal proud, protože rotor se do klidové polohy dostane silou magnetů, ale zároveň rotor nebude bržděn, pokud cívkami poteče proud. Proud tedy v krajním případě může protékat cívkami během intervalu  $0$  až  $90^\circ$ , s opačnou polaritou v intervalu  $90^\circ$  až  $180^\circ$ . Teoreticky by tedy jedno čidlo mohlo být aktivní v intervalech  $0$  až  $90^\circ$  a  $180^\circ$  až  $270^\circ$ , zatímco druhé čidlo v intervalech  $90^\circ$  až  $180^\circ$  a  $270^\circ$  až  $360^\circ$ . To je však v praxi nerealizovatelné. Důvodem je fakt, že cívka klade střídavému (nebo pulzujícímu) proudu odpor a aby se „nabíla“ proudem za nulový čas, napájecí napětí by muselo být nekonečně vysoké. Stejně tak není možné za nulový čas cívkou zase „vybít“.



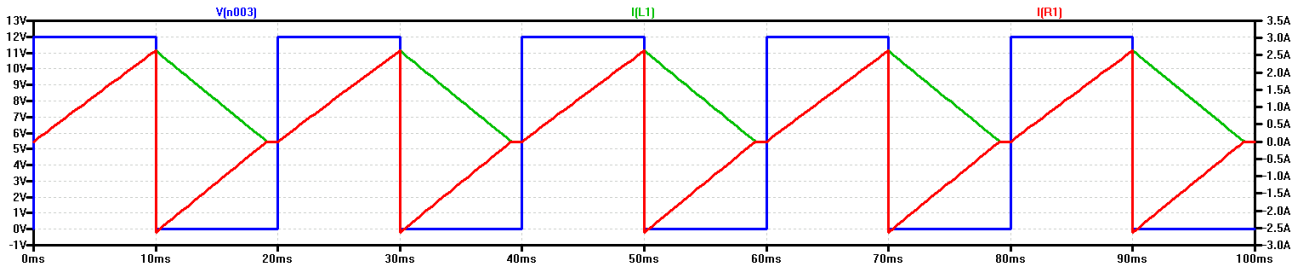
Obr. 3: Rotor v nerovnovážné poloze  $45^\circ$

Aby bylo jasné, o co jde, provedeme simulaci řízení proudu v cívce pomocí nesymetrického můstku. Na obr. 4 máme pulzní zdroj V1, spínače S1, S2, cívku L1, rekuperační diody D1, D2 a napájecí zdroj V3. Obr. 5 zobrazuje průběhy proudů a napětí.



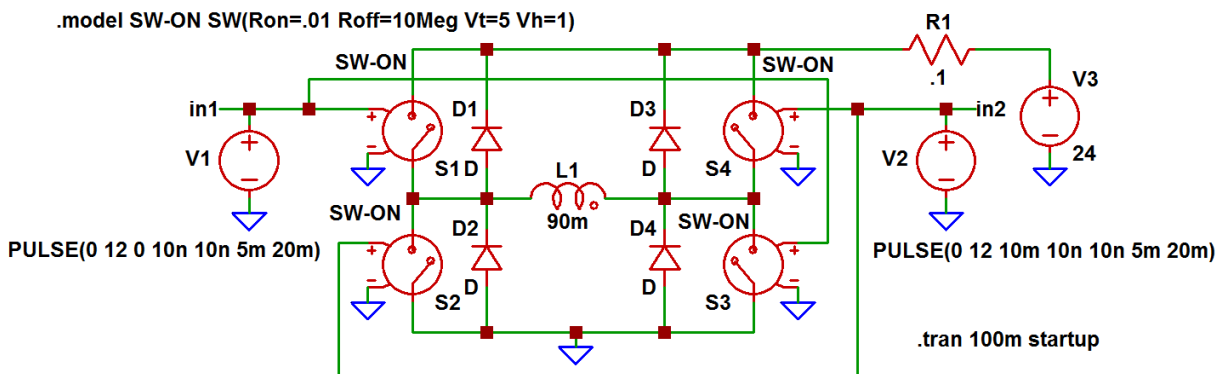
Obr. 4: Řízení proudu v cívce pomocí nesymetrického můstku

Na obr. 5 si můžete všimnout, že proud teče cívkou (zelená) téměř celou periodu ( $T = 20\text{ms}$ ), zatímco řídicí napětí je v aktivním stavu pouze  $T/2 = 10\text{ms}$ . Dále můžete vidět, že po dobu téměř  $10\text{ms}$  se proud vrací do zdroje.

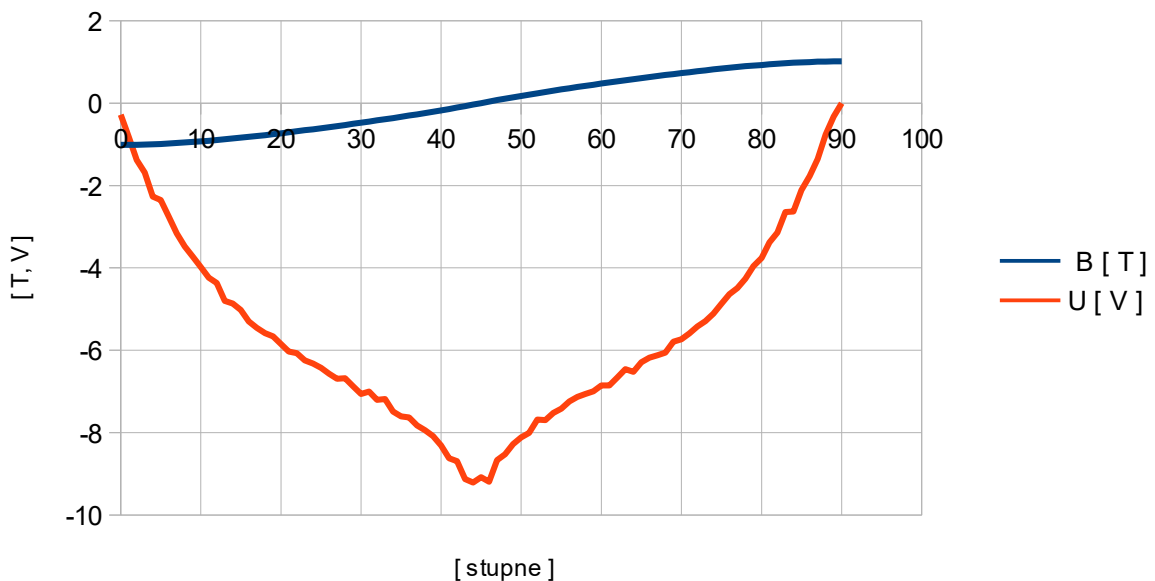


Obr. 5: Průběhy proudů a napětí v obvodu na obr 4:  
proud v cívce L1 – zelená, řídicí napětí – modrá, proud tekoucí ze/do zdroje – červená

To byla jednoduchá simulace, abychom měli představu, jak se chová cívka, když ji zapojíme do diagonály nesymetrického můstku. My však potřebujeme, aby se v cívce měnila polarita proudu. Proto budeme potřebovat takové obvody dva, tj. dva nesymetrické můstky a dva zdroje impulzů, jež budou fázově posunuté o  $90^\circ$ . Střídá těchto pulzních zdrojů nebude 50%, ale maximálně 25%. Dva nesymetrické můstky můžeme nahradit jedním úplným H-můstkem, kde jednotlivé spínače budou přemostěny antiparalelními diodami.



Obr. 6: Cívka zapojená do H-můstku



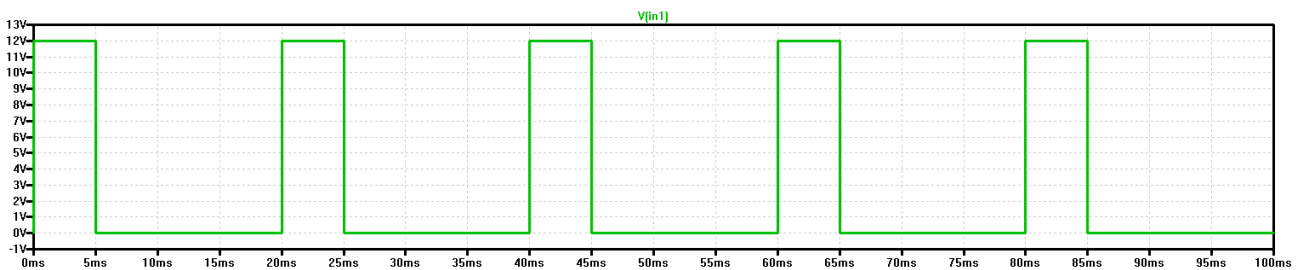
Graf 1: Závislost mag. indukce B a indukovaného napětí  $U_i$  na poloze rotoru

Délka periody pulzního zdroje je  $T = 20\text{ms} = 0,02\text{s}$ , což je frekvence  $f = 1/T = 1/0,02 = 50\text{Hz}$ . Předpokládáme, že máme motor čtyřpólový ( $p = 4$ ), takže takto řízený motor by měl otáčky:

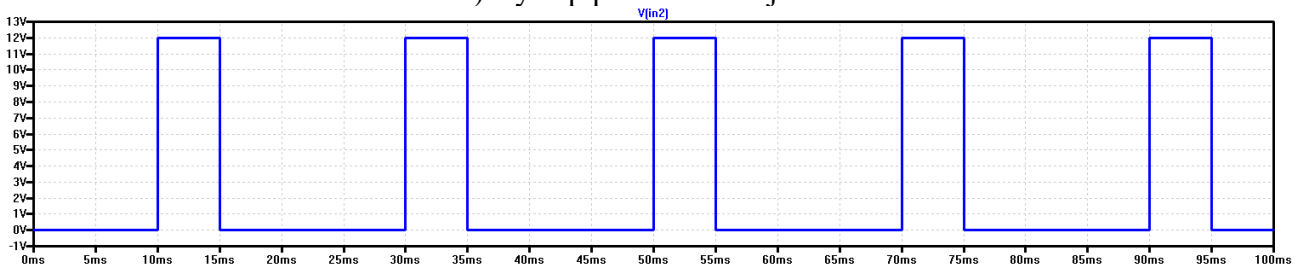
$$n = 2f \cdot 60/p = 2 \cdot 50 \cdot 60/4 = 1500 \text{ ot./min.}$$

Protože máme motor čtyřpólový, během jedné otáčky vzniknou dva pulzy čidla polohy, takže jedné otáčky ( $360^\circ$ ) odpovídá časový úsek 40ms. Čidlo polohy je v aktivním stavu po dobu 5ms, čemuž odpovídá otočení rotoru o  $45^\circ$ . Pokud nechceme, aby motor byl v určitém úseku bržděn, okénko clonky musí mít úhel otevření maximálně  $45^\circ$ , pokud počítáme s tím, že doba  $T_2$  vybití cívky se rovná době  $T_1$  jejího nabití. (Ve skutečnosti platí, že  $T_2 < T_1$ , protože v obvodu jsou ztráty.)

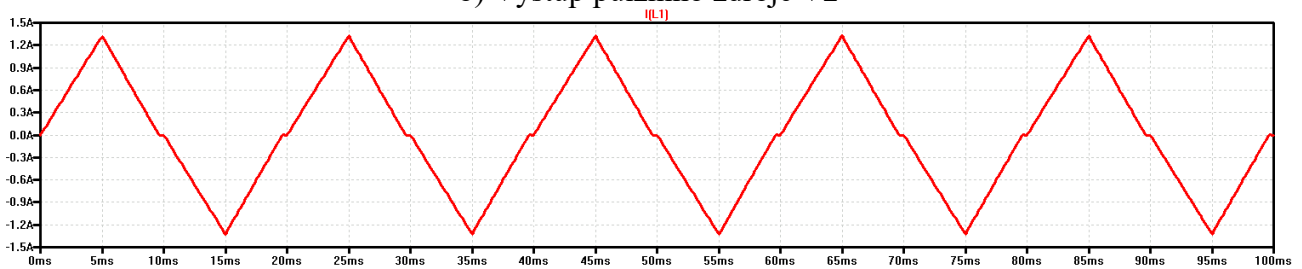
Model řízení motoru je zjednodušený nejen tím, že jsme použili ideální spínače, diody a cívky (bez ztrát vířivými proudy), ale také proto, že jsme neuvažovali, že se v cívkách bude indukovat napětí vlivem rotace magnetů v rotoru. To nyní napravíme a do série s cívkou  $L_1$  zařadíme sinusový zdroj napětí  $V_4$ . Zde se také dopustíme zjednodušení protože budeme předpokládat, že napětí indukované v cívkách má sinusový průběh, což nemusí být pravda. Abychom to mohli udělat, musíme určit fázi indukovaného napětí. Za počáteční polohu (čas  $t = 0$ ) budeme považovat polohu na obr. 1 a budeme sledovat napětí indukované v cívce na sloupku vpravo. To zjistíme tak, že pro různé polohy rotoru budeme měřit střední hodnotu magnetické indukce  $B$  v jádru cívky a vyhodnotíme změny  $B$ , čímž získáme průběh indukovaného napětí. Výsledek můžete vidět v grafu 1.



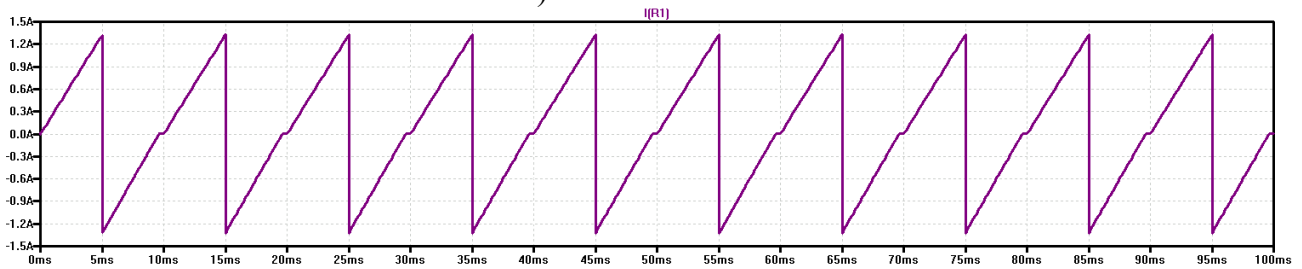
a) Výstup pulzního zdroje V1



b) Výstup pulzního zdroje V2



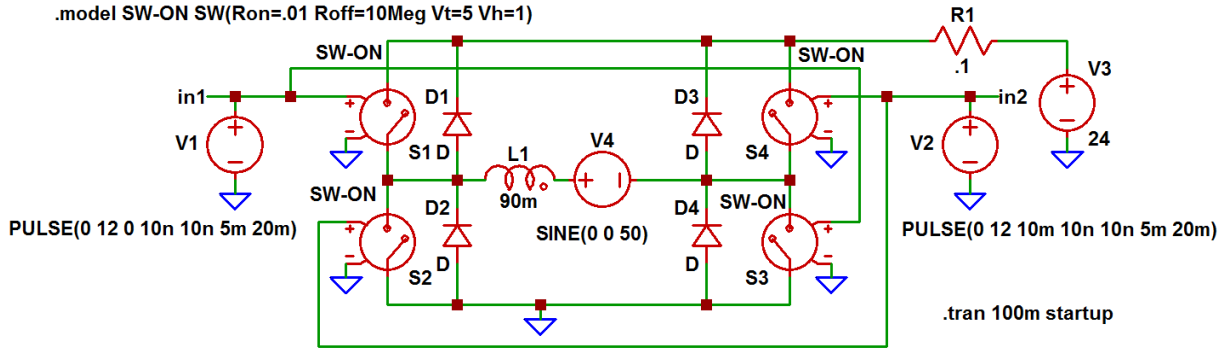
c) Proud v cívce L1



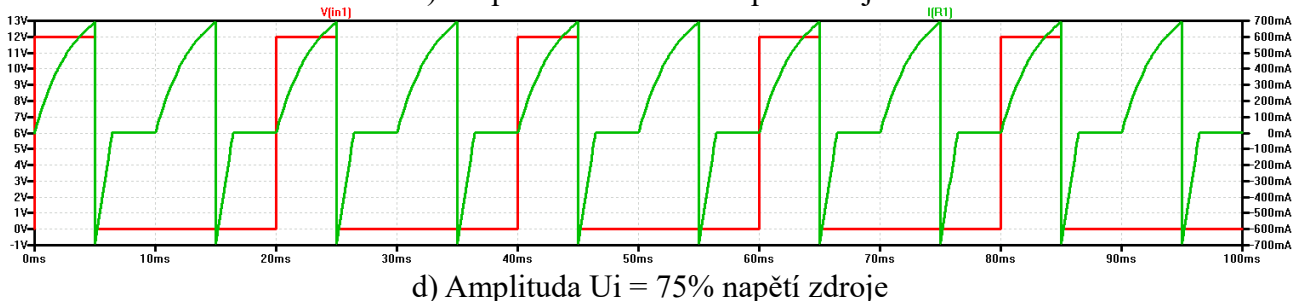
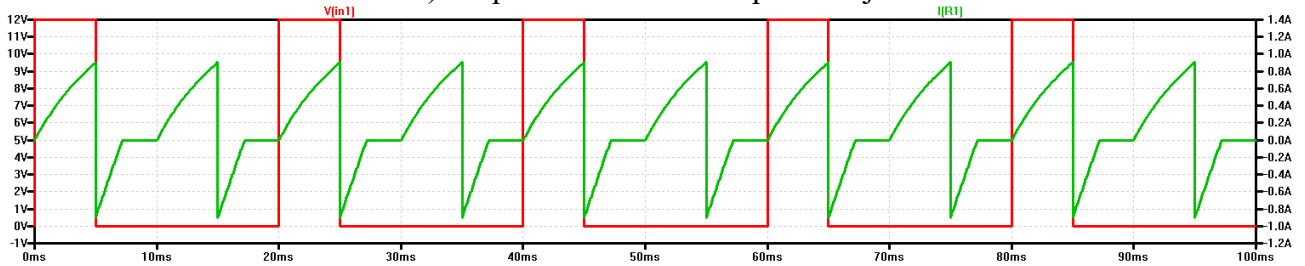
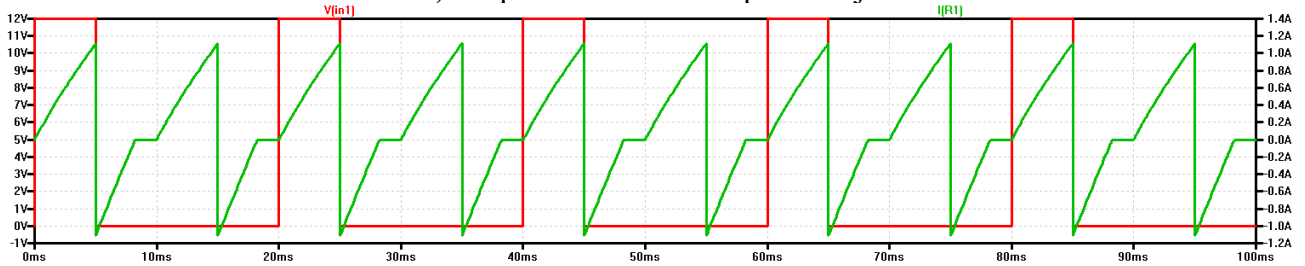
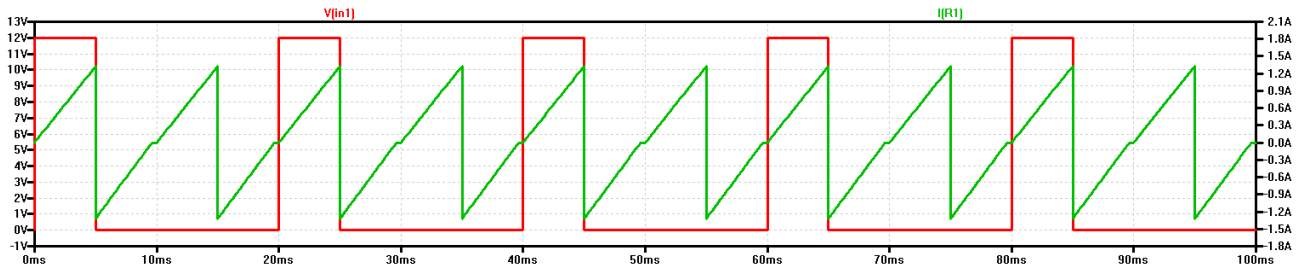
d) Proud ze/do zdroje V3

Obr. 7: Průběhy napětí a proudů v obvodu na obr. 6

Nyní upravíme schéma zapojení na obr. 6 tak, že přidáme do série s cívkou sinusový zdroj napětí.



Obr. 8: Upravené schéma zapojení satorové cívky v H-můstku



Obr. 9: Proud tekoucí ze/do zdroje – zelená, řídicí napětí V1 - červená

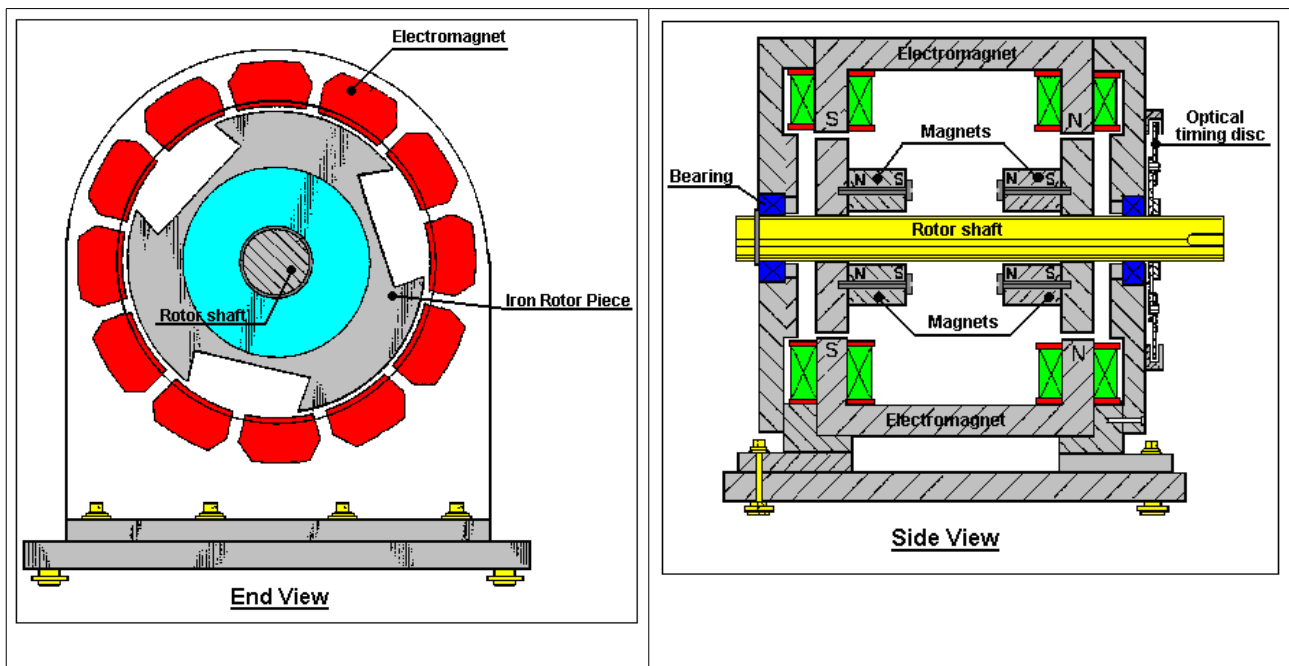
Musíme ale určit, jak bylo zmíněno výše, jeho správnou fází a polaritu. Graf 1 ukazuje, že v rovnovážné poloze rotoru je indukované napětí v cívce rovno nule (drobná nepřesnost je způsobena nedostatečně jemnými kroky, v nichž se měřila B). V tomto okamžiku se otevírají spínače můstku a do cívek začíná téct proud. V cívkách se začíná indukovat napětí, které podle Lenzova zákona působí proti napětí napájecímu. Tím máme určenou fází a polaritu indukovaného napětí: posun fáze

je 0 a napětí má takovou polaritu, aby působilo proti napětí zdroje. Na obr. 8 máme upravené schéma zapojení. Pro začátek jsme zvolili nulovou amplitudu indukovaného napětí  $U_i$  a budeme ji zvyšovat, abychom zjistili, jaký má vliv na množství energie vracené do zdroje. Výsledek ukazuje obr. 9. Pro kontrolu jsme nejdříve indukované napětí vyřadili úplně (obr. 9a). Postupně jsme zvyšovali velikost indukovaného napětí  $U_i$  a sledovali, jak se snižuje podíl energie vracené do zdroje. Při hodnotě amplitudy  $U_i$ , která byla 75% napájecího napětí, se podíl vracené energie snížil velmi podstatně (obr. 9d) – viz plocha záporného proudu.

## Závěr

Zdá se, že jsme objevili mechanismus, kterým je zajištěno, že u motorů běžné konstrukce nelze dosáhnout účinnosti nad 100%. Abychom dosáhli toho, že se nám do zdroje bude vracet více procent energie, museli bychom buď co nejvíce potlačit indukované napětí, nebo změnit jeho fázi tak, aby se do zdroje vracelo víc energie, aniž by docházelo ke snížení výkonu motoru. Druhou možnost si dost dobře neumím představit, ale první možnost možná řešil právě původní Adamsův motor, když indukované napětí omezil tak, že všechny magnety měly stejnou polaritu. Bylo to ovšem za cenu podstatného snížení krouticího momentu, protože toto uspořádání magnetů vylučuje vytvoření uzavřeného magnetického obvodu. Existuje však ještě jeden motor, který také omezuje napětí indukované v cívkách, ale ne za cenu zrušení uzavřeného magnetického obvodu. Jeho vynálezce se jmenuje Teruo Kawai a po něm je tento motor pojmenován. Motor byl patentován v USA pod číslem US Patent # 5,436,518 a jeho popis najdete například zde:

<http://rexresearch.com/kawai/1kawai.htm>



Obr. 10: Kawaiův motor

Na tento motor se podíváme někdy příště.