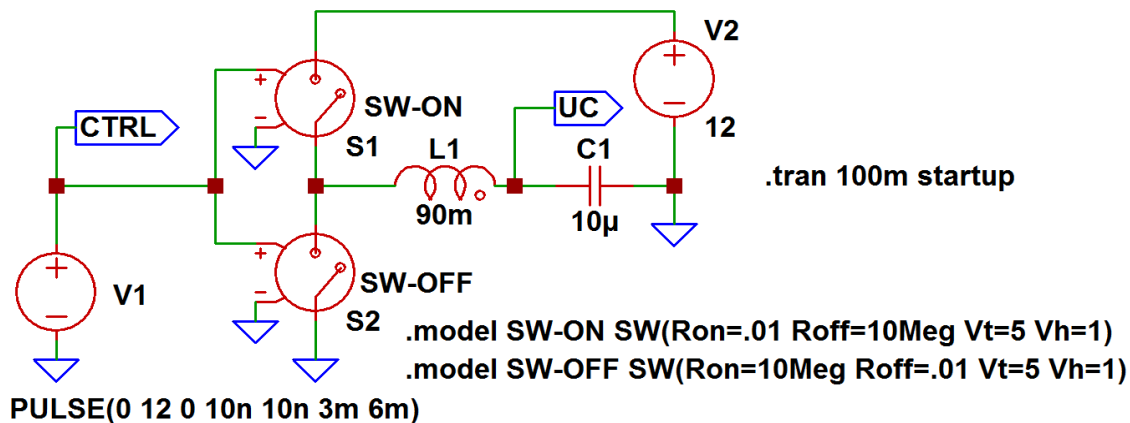


# Principy rezonančního řízení BLDC motoru II

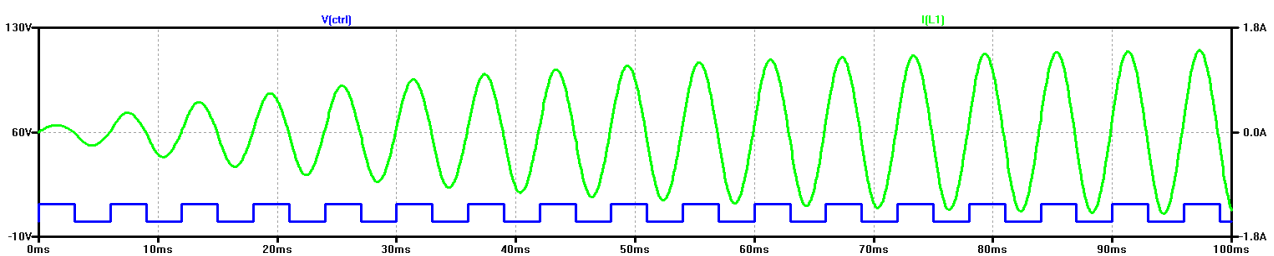
© Ing. Ladislav Kopecký, září 2016

Ve druhé části článku si všimneme skutečnosti, že BLDC motor, který má v rotoru magnety, má tu vlastnost, že v jeho statorových cívkách se indukují napětí, jež působí proti napětí napájecímu. Vzhledem k tomu, že sériový rezonanční obvod se chová jako čistě odporová zátěž, dosáhneme požadovaného proudu v cívce při mnohem nižším napětí než při buzení cívky klasickým způsobem např. střídavým proudem, protože zde nepůsobí induktivní reaktance. To má za následek, že vliv indukovaného napětí je mnohem významnější a negativně ovlivňuje výkon motoru. V tomto článku budeme hledat způsoby, jak tuto nepříjemnou vlastnost eliminovat.

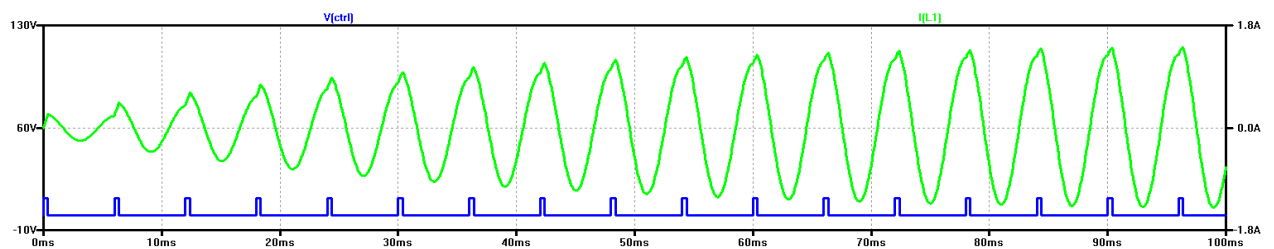
Nejjednodušší věc, která nás napadne, je použít vyšší napájecí napětí a proud v cívce nějakým způsobem regulovat. Regulací proudu při rezonančním řízení jsme se podrobně zabývali v jiných článcích, a tak zde uvedeme pro ilustraci pouze jednoduchou metodu pomocí změny střídy budicího signálu. Na obr. 1 máme sériový rezonanční obvod buzený přepínačem S1, S2, který je buzený zdrojem impulzů V1. Na obr. 2 máme zobrazen proud (zeleně) a řídicí impulzy (modře). Nyní zvýšíme napětí zdroje V2 na hodnotu 60V a zároveň změníme střídu tak, aby amplituda proudu zůstala přibližně stejná.



Obr. 1: Řízení proudu v rezonančním obvodu pomocí PWM



Obr. 2: Proud v RLC obvodu – střída: 50%, napájení: 12V

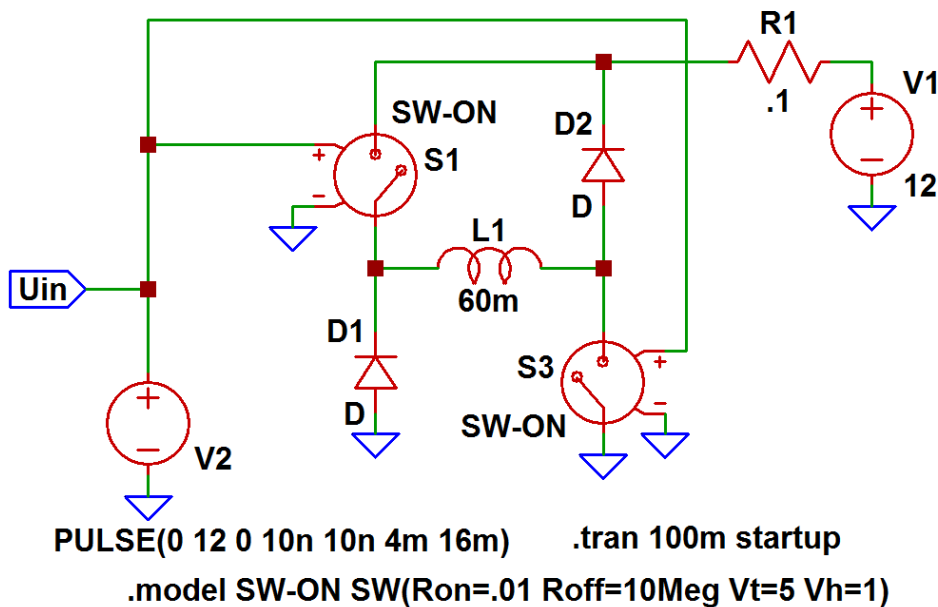


Obr. 3: Proud v RLC obvodu – střída: 6,3%, napájení: 60V

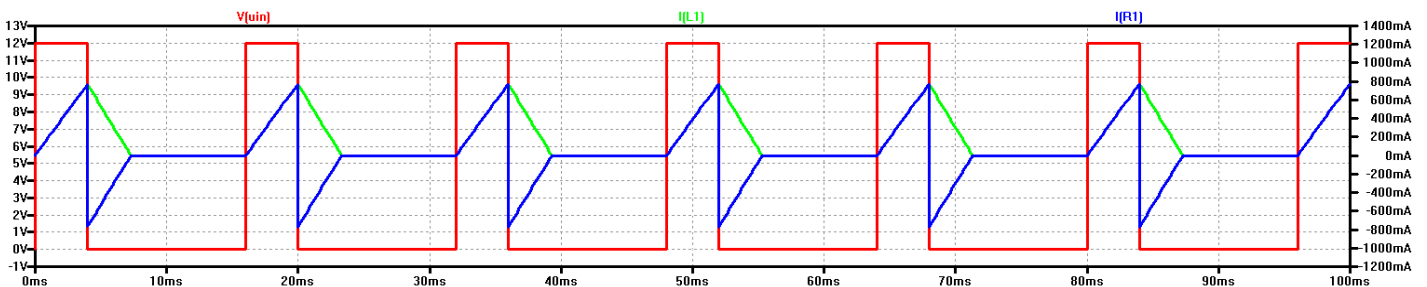
Na výsledek se můžete podívat na obr. 3. Pomineme-li menší zkreslení sinusovky, proud je prakticky stejný. Rozdíl je však v tom, že při napájecím napětí 60V má indukované napětí mnohem menší vliv než při napájecím

napětí 12V, což nám umožní podstatně zvýšit otáčky motoru.

Další možností je místo sériové rezonance použít rezonanci paralelní. Při paralelní rezonanci totiž používáme vyšší napájecí napětí. Zde však narážíme na technické překážky. Sériová rezonance má mimo jiné výhodu v tom, že mimo rezonanci má RLC obvod mnohem větší impedanci než v rezonanci, což u BLDC motoru pomáhá stabilizovat otáčky blízko rezonančním. U paralelní rezonance je tomu přesně naopak, takže bychom museli mít další obvod, který by stabilizoval otáčky motoru. Použití paralelní rezonance pro řízení BLDC motoru je tudíž nevhodné. Dalo by se však s úspěchem použít u synchronního nebo asynchronního motoru, protože tam lze udržovat rezonanci pomocí oscilátoru. Oscilátor s paralelním rezonančním obvodem používá zpětnou vazbu odvozenou od napětí v rezonančním obvodu. Realizace různých metod zavedení zpětné vazby byly podrobně popsány v článkách na webu <http://free-energy.xf.cz> a nebudeme se jimi zde zabývat. Místo toho se budeme věnovat následující metodě, která je velmi elegantní a jednoduchá. Vyjdeme z nesymetrického můstku, který je uveden na obr. 4.



Obr. 4: Nesymetrický můstek



Obr. 5: Průběhy proudů a napětí v nesym. Můstku

Na obr. 5 jsou zobrazeny průběhy proudů a řídicího napětí spínačů S1, S2. Zde můžete vidět, že část proudu se vrací zpátky do zdroje.

Nyní toto zapojení vylepšíme tak, že pomocí diody zamezíme vrácení proudu do zdroje a místo toho budeme nabíjet kondenzátor – viz obr. 6. Je zřejmé, že při vrácení energie cívky L1 do kondenzátoru C1 na kondenzátoru poroste napětí. Energie cívky  $E_L$  o indukčnosti L, jíž protéká proud I, je dána vztahem:

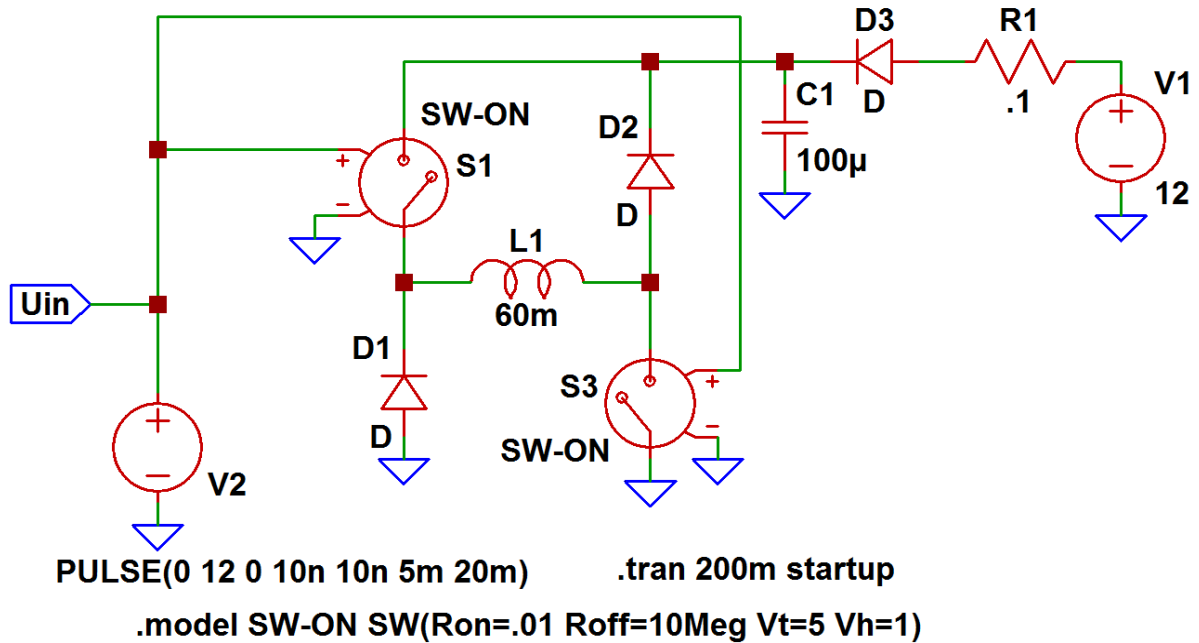
$$E_L = 1/2 \cdot L \cdot I^2 \quad (1)$$

Pro energii kondenzátoru  $E_C$  o kapacitě C, jenž je nabitý na napětí U, platí následující vztah:

$$E_C = 1/2 \cdot C \cdot U^2 \quad (2)$$

Pokud zanedbáme ztráty, předá cívka kondenzátoru všechnu svoji energii a platí  $E_L = E_C$ . Po dosazení do této rovnice podle (1) a (2), dostaneme následující rovnici:

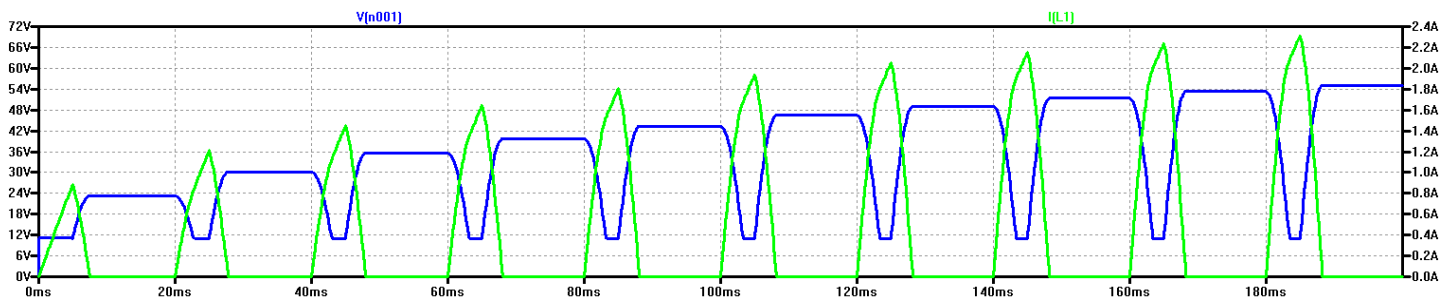
$$L \cdot I^2 = C \cdot U^2 \quad (3)$$



Obr. 6: Nesymetrický můstek – vylepšená verze

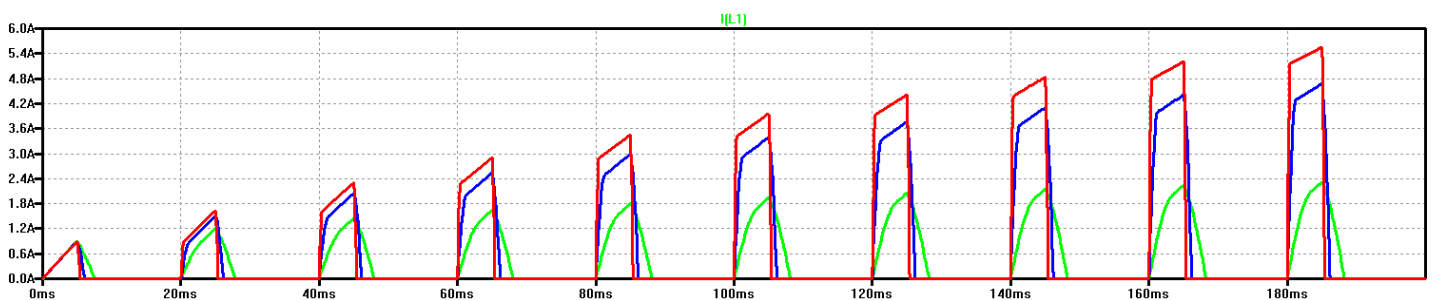
Je-li dán maximální proud  $I_{max}$ , můžeme na základě rovnice (3) vypočítat přírůstek napětí  $\Delta U_C$  na kondenzátoru po jeho nabití proudem z cívky:

$$\Delta U_C = I_{max} \cdot \sqrt{L/C} \quad (4)$$

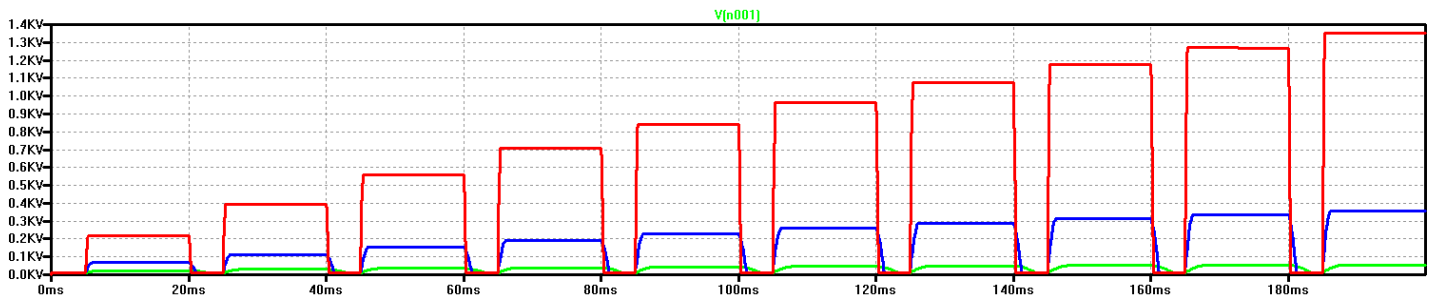


Obr. 7: Proud cívku a napětí na kondenzátoru

Za vztahu (4) je zřejmé, že napětí  $U_C$  bude tím větší, čím bude menší kapacita kondenzátoru a čím větší bude indukčnost cívky. Dále, čím více vzroste napětí na kondenzátoru, tím více vzroste proud cívku.



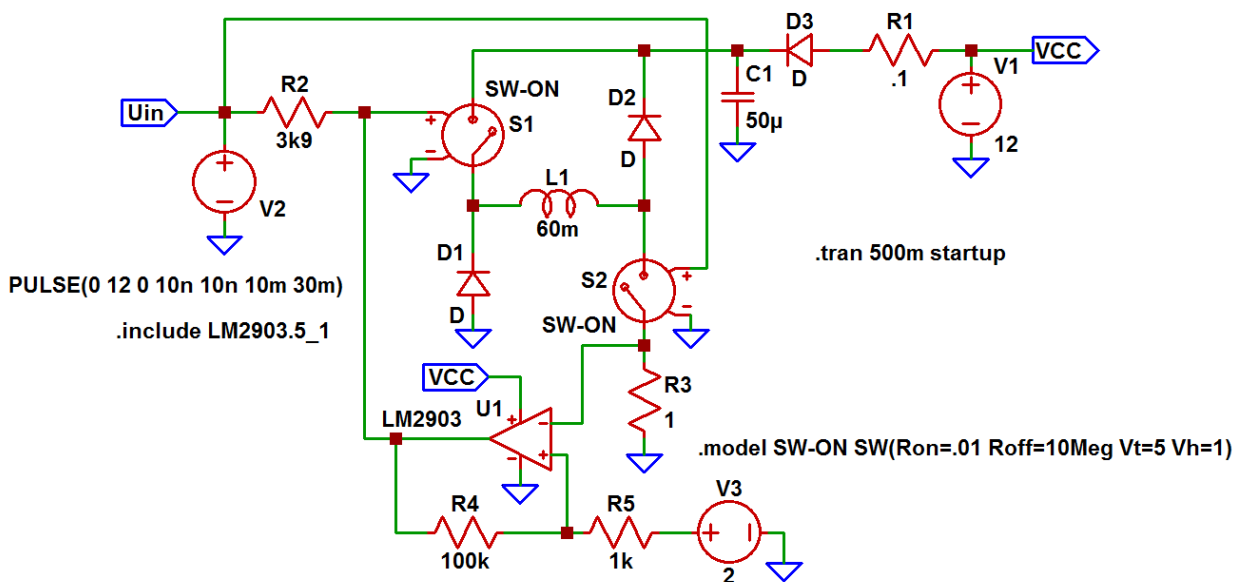
Obr. 8: Závislost proudu cívku na kapacitě kondenzátoru



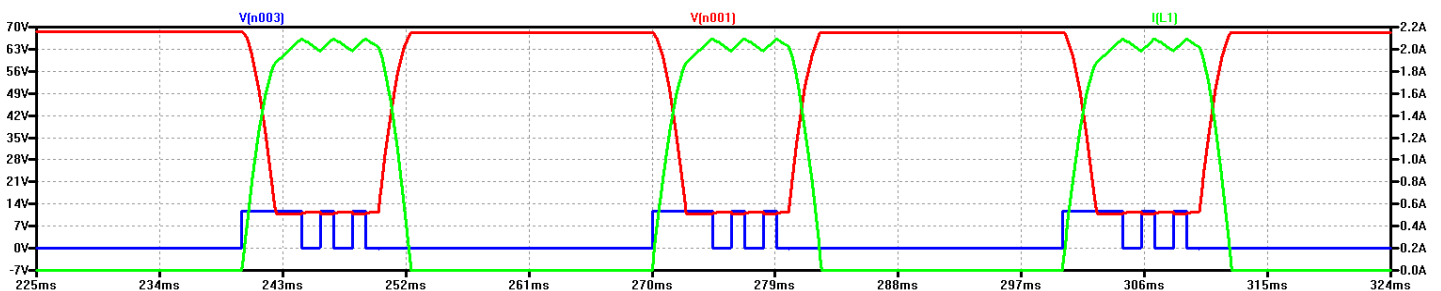
Obr. 9: Závislost napětí na kondenzátoru na jeho kapacitě

Na obr. 8 a 9 jsou zobrazeny průběhy proudu cívky a napětí na kondenzátoru pro kapacity  $100\mu\text{F}$ ,  $10\mu\text{F}$  a  $1\mu\text{F}$ . Z obr. 9 je zřejmé, že když použijeme malou kapacitu, napětí na kondenzátoru může dosáhnout velmi vysokých hodnot, které mohou zničit, jak kondenzátor, tak tranzistory ve spínačích S1, S2.

Z výše uvedeného je zřejmé, že změnou kapacity můžeme regulovat proud cívky. Nyní si ukážeme jiný způsob regulace proudu.



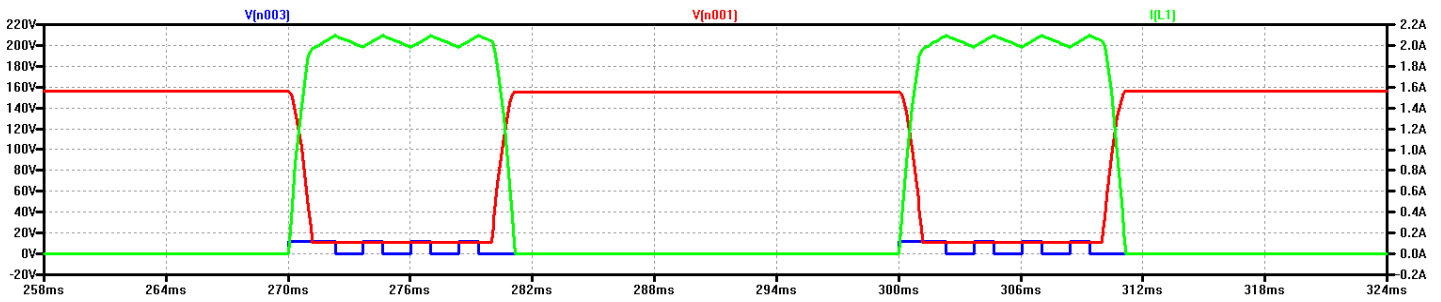
Obr. 10: Regule proudu v cívce pomocí komparátoru

Obr. 11: Regule proudu v cívce – výstup simulace při  $C1 = 50\mu\text{F}$ 

Obr. 10 ukazuje jednoduchý způsob regulace proudu pomocí komparátoru. Na výsledek simulace se můžete podívat na obr. 11. Zelená čára zobrazuje průběh proudu, modrá čára zobrazuje průběh řídicího napětí horního spínače S1 a červená čára ukazuje průběh napětí na kondenzátoru C1. Regulační obvod funguje tak, že komparátor U1 porovnává úbytek napětí na snímacím odporu R3 s referenčním napětím V3. Je-li napětí na R3, jež je určeno proudem protékajícím cívku L1, vyšší než referenční napětí V3, výstup komparátoru vypne horní spínač S1. Od tohoto okamžiku se proud cívku uzavírá přes spínač S2, odpor R3 a diodu D1 a postupně klesá. Jakmile napětí na R3 poklesne pod určitou hladinu napětí, danou referenčním napětím V3 a hysterezí

komparátoru, spínač S1 opět sepne a děj se opakuje, dokud je signál  $U_{in}$  v aktivní úrovni. Potom se vypnou oba spínače a energie nahromaděná v cívce se přenesou do kondenzátoru C1.

Pokud snížíme kapacitu kondenzátoru, nárůst a pokles proudu bude strmější a bude se více podobat obdélníku. Je to proto, že při nižší kapacitě kondenzátoru se tento nabije na vyšší napětí. Důvod jsme si vysvětlili výše.



Obr. 11: Regule proudu v cívce – výstup simulace při  $C1 = 10\mu\text{F}$

### Závěr:

Pokud chceme eliminovat vliv indukovaného napětí na výkon motoru, musíme nějak docílit vyššího napájecího napětí a zároveň regulovat proud do cívky. První způsob s využitím rezonance (viz obr. 1) je přímočarý a bude bezpochyby fungovat. Druhý způsob s použitím nesymetrického můstku, kondenzátoru a diody je však výhodnější, protože nevyžaduje zvýšené napájecí napětí. To si vyrábí sám. Přitom není nijak složitý. Jeho další výhodou je to, že se nemusíme starat o dosažení rezonance jako v prvním případě. Obvod na obr. 6 a 10 se vlastně také chová jako rezonanční, protože se do zdroje žádná energie nevrací a s frekvencí roste napětí na kondenzátoru i cívce. Můžeme jej proto nazvat polozonančním řízením.

Proud tekoucí cívkou v obvodu na obr. 10 je stejnosměrný pulzující. To znamená, že vlastně funguje jako Adamsův motor: stator bez proudu přitáhne magnet v rotoru do rovnovážné polohy a po přivedení proudu do statorové cívky dojde k odpuzení rotorového magnetu z rovnovážné polohy. Podobným způsobem funguje reluktanční motor. Ten v rotoru žádné magnety nemá, ale má v něm vyniklé póly z měkkého feromagnetika. To znamená, že proud tekoucí cívkou přitáhne pól rotoru do rovnovážné polohy při jakékoli polaritě proudu v cívce.

Pokud bychom chtěli v cívce BLDC motoru mít proud obou polarit, museli bychom mít dva nesymetrické můstky a dva snímače polohy rotoru (na obr. 6 a 10 je snímač polohy představován zdrojem impulzů V2). Časování snímačů polohy by muselo být nastaveno tak, aby mezi vypnutím jednoho a sepnutím druhého snímače byla dostatečně dlouhá časová prodleva, aby cívka L1 stačila kondenzátoru C1 předat energii.