

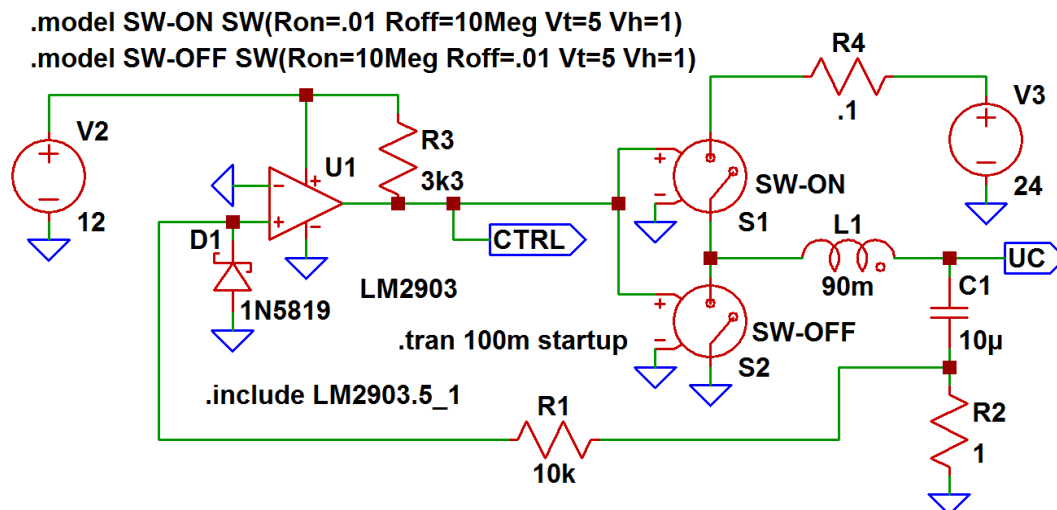
Principy rezonančního řízení BLDC motoru

© Ing. Ladislav Kopecký, srpen 2016

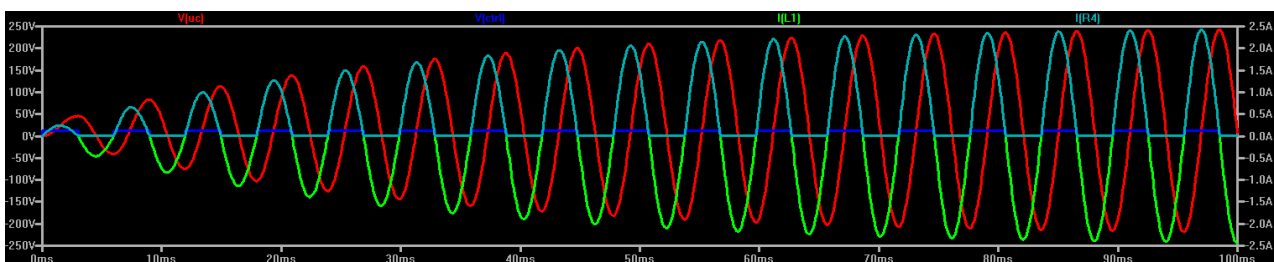
Tento článek není míněn jako návod na stavbu nějakého konkrétního zařízení, ale jeho účelem je objasnění principů, jak věci fungují. Pokud bychom chtěli na základě těchto znalostí postavit nějaké funkční zařízení, jsou k tomu potřebné další příslušné odborné znalosti a praxe. Spíše by se dalo mluvit o vědecké práci. Proto v následujících simulacích jsou například použity idealizované spínací prvky, nikoli schémata zapojení reálných spínačů.

Nejdříve si musíme říci, co je míněno pojmem BLDC motor. Je to stejnosměrný motor s elektronickou komutací a anglická zkratka BLDC znamená „BrushLess DC“, což je v českém překladu „bezkartáčový stejnosměrný“. Pro jednoduchost se budeme zabývat pouze jednofázovou verzí motoru, což pro objasnění principů stačí.

Pro řízení BLDC motoru není možné použít oscilátor z mého patentu – viz obr. 1.



Obr. 1: LC Oscilátor



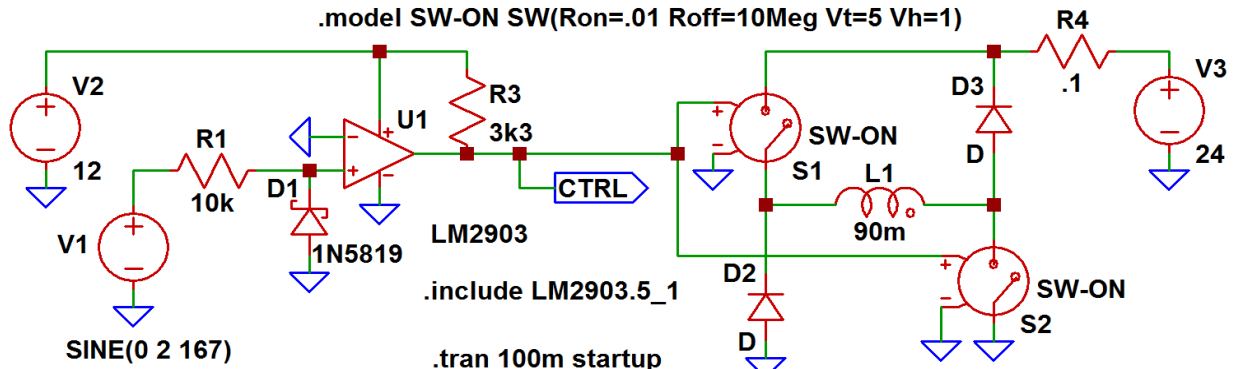
Obr. 2

Na obr. 2 máme zobrazeny průběhy proudu a napětí v obvodu na obr. 1, z něhož je zřejmé, že průběhy jednotlivých veličin odpovídají rezonanci:

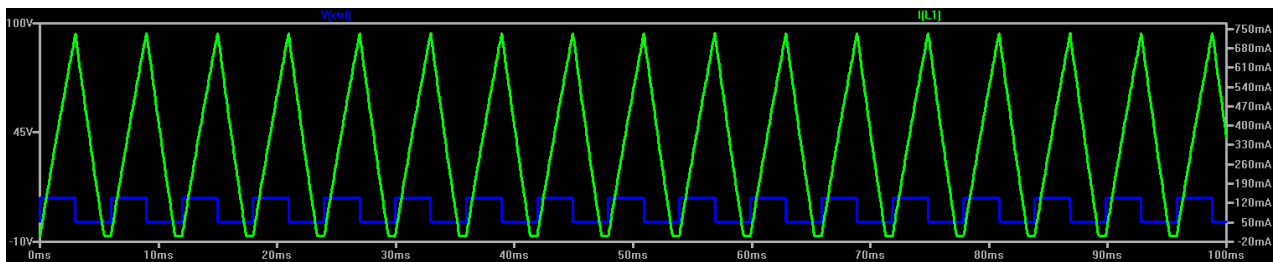
- 1) Fázový posun mezi proudem a napětím (na cínce nebo na kondenzátoru) je 90° .
- 2) Řídicí signál CTRL je ve fázi s proudem.
- 3) Proud se nevrací zpátky do zdroje, což je známkou toho, že se jedná o výhradně odporovou zátěž.

Pro úplnost ještě dodejme, že napětí na kondenzátoru je oproti napětí na cívce otočeno o 180° . To znamená, že se tato napětí vzájemně ruší, což je důvodem toho, že z hlediska zdroje se LC obvod v rezonanci jeví jako činná zátěž, která má nulovou imaginární složku.

BLDC motor ke své činnosti potřebuje znát polohu svého rotoru a na základě této znalosti je spínán proud do statorových cívek. U jednofázového motoru máme pouze jednu cívku a dva nebo čtyři spínače. Nejjednodušší je řízení pomocí nesymetrického můstku (obr. 3).

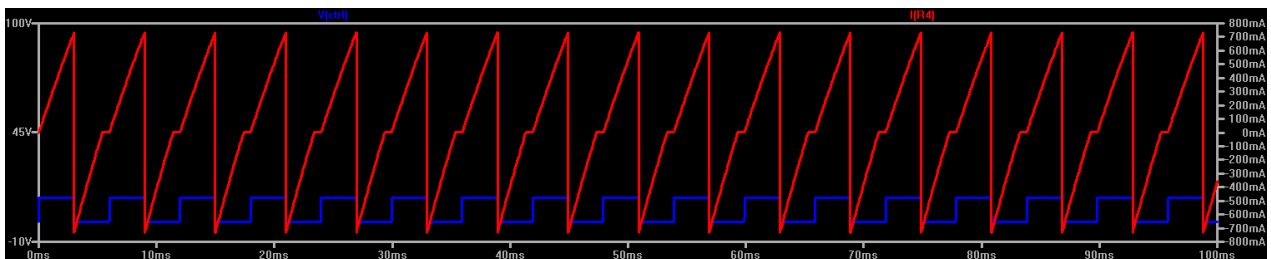


Obr. 3: Nesymetrický můstek



Obr. 4: Průběh proudu v cívce BLDC motoru s nesym. můstkem

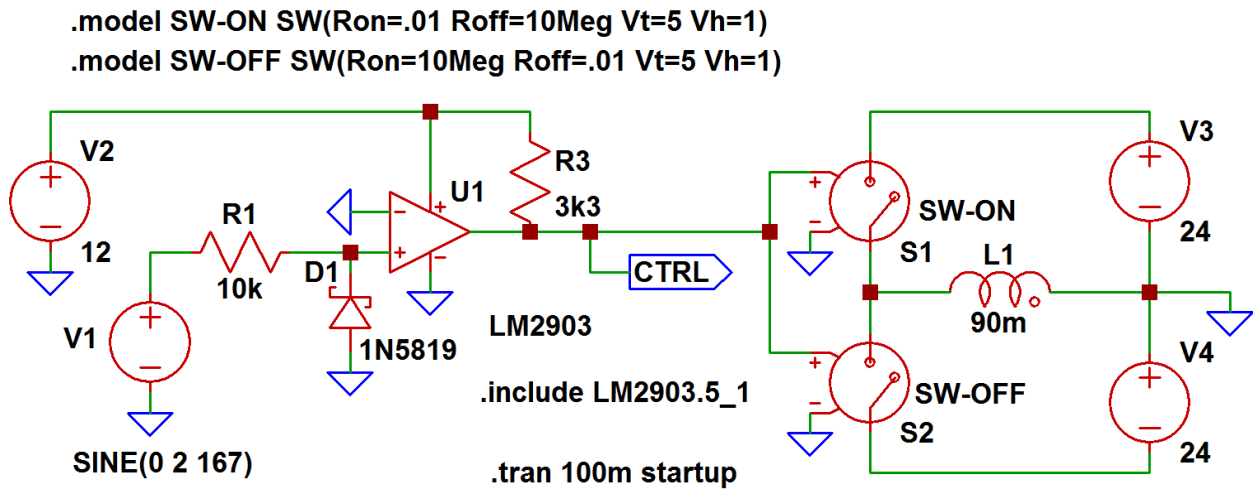
Zde spínají a vypínají oba spínače S1, S2 současně. Po jejich vypnutí se energie nahromaděná v cívce vrací zpátky do zdroje V3 pomocí diod D1, D2. Tento způsob řízení se používá zejména u spínaných reluktančních motoru (SRM). Kdybychom jej chtěli použít u BLDC motoru, museli bychom cívkou zapojit tak, aby magnety odpuzovaly. Na rozdíl od rezonančního řízení se zde energie zpátky do zdroje vrací, jak ukazuje obr. 5.



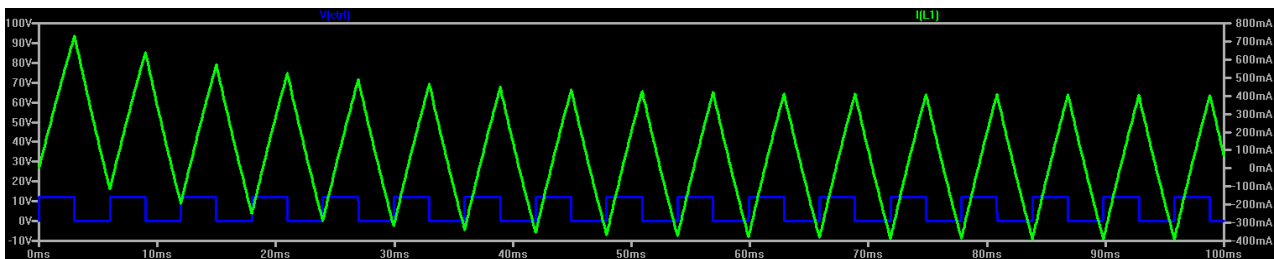
Obr. 5: Průběh proudu odebíraného ze zdroje

Pokud chceme, aby statorová cívka magnet nejen odpuzovala, ale také přitahovala, musíme v cívce periodicky měnit směr proudu. To se dá zařídit dvěma způsoby: zaprvé, použitím symetrického zdroje, zadruhé, použitím úplného H-můstku. Na obr. 6 je schéma zapojení řízení se symetrickým zdrojem napětí. V tomto případě spínače S1, S2 spínají střídavě. Na obr. 7 můžete vidět, že proud v cívce je skutečně střídavý. Předpokladem pro správné fungování je to, aby spínače byly schopné spínat v obou směrech, protože i v tomto případě se energie vrací zpátky do zdroje. To v případě použití tranzistorů zpravidla nebývá splněno, proto se antiparalelně k tranzistorům připojují rychlé

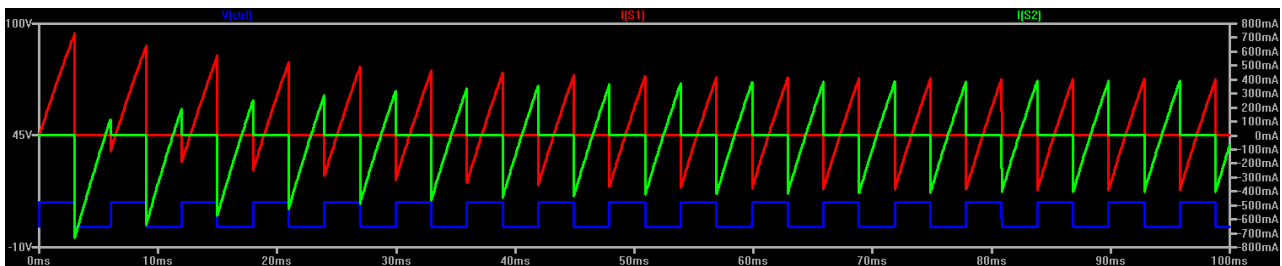
diody.



Obr. 6: Půlmůstkové řízení se symetrickým zdrojem napětí



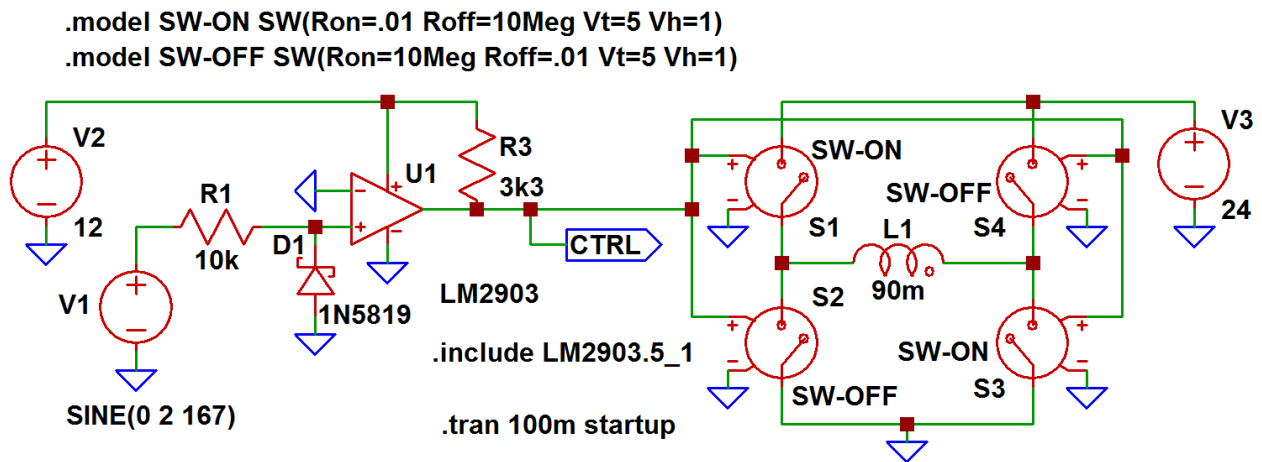
Obr. 7: Průběh proudu v cínce BLDC motoru se symetrickým zdrojem



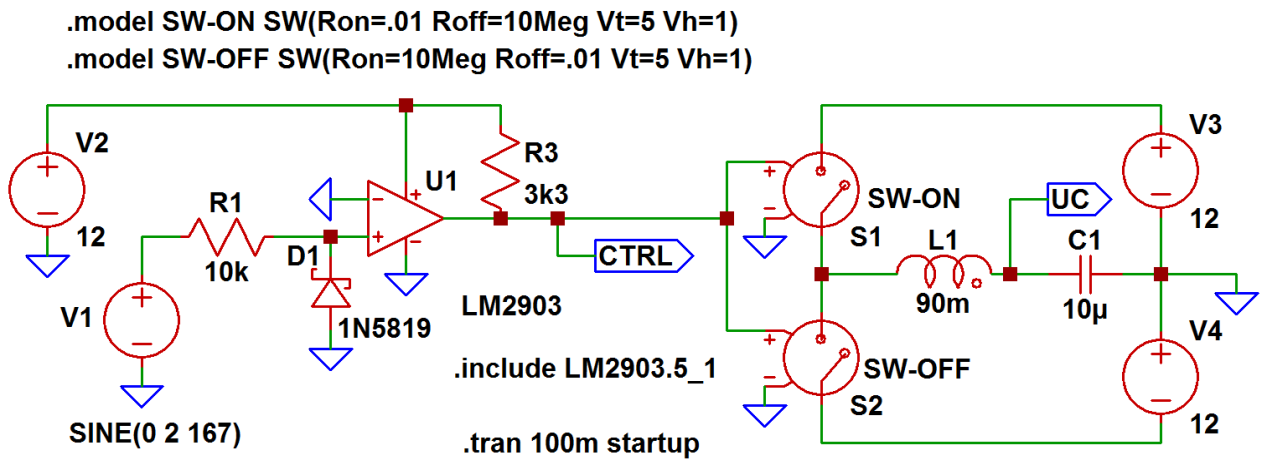
Obr. 8: Průběhy proudů spínači S1, S2

Řízení s úplným H-můstkem (viz obr. 9) fuguje podobně jako řízení s půlmůstkem a symetrickým napájecím zdrojem. Průběhy proudů cívkou a spínači je identické s půlmůstkovým řízením (viz obr. 7, 8), proto je zbytečné je zde uvádět.

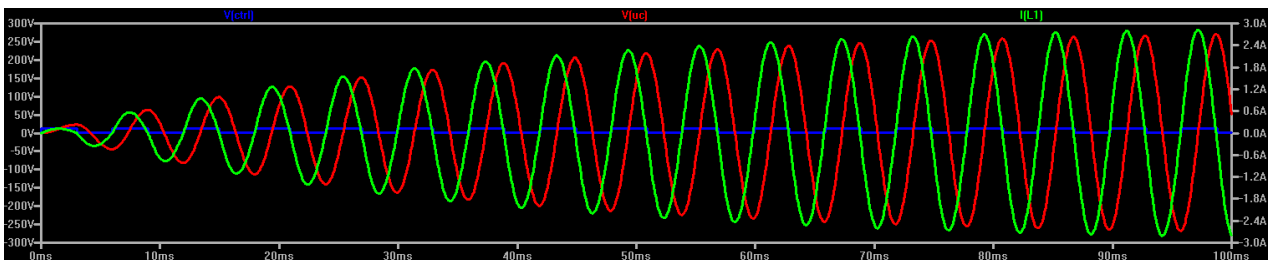
Nyní se podíváme na možnosti rezonančního řízení BLDC motoru. Zapojení s nesymetrickým můstkem (obr. 3) je pro rezonanční řízení zcela nevhodné. Začneme tedy zapojením na obr. 6. Na obr. 10 máme toto zapojení s přidáním rezonančního kondenzátorem C1. Obrázky č. 11 a 12 ukazují, že jsou splněny všechny 3 podmínky rezonance na str. 1. Pokud nastavíme jiný kmitočet než rezonanční, bude se část proudu vracet zpátky do zdroje.



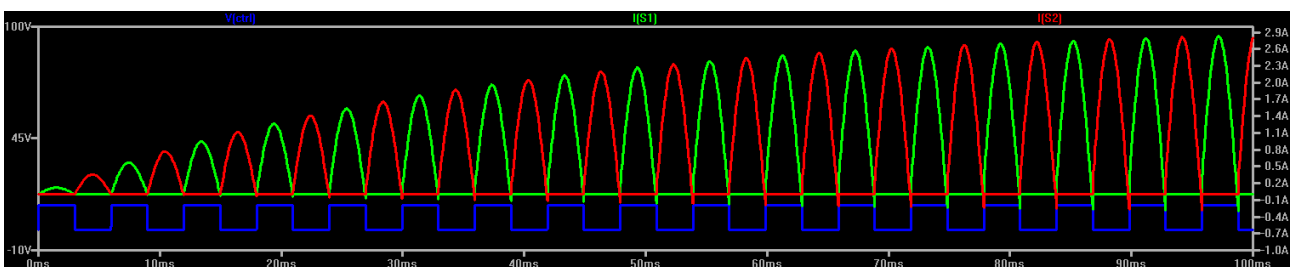
Obr. 9: Řízení s úplným H-můstkem



Obr. 10: Rezonanční řízení s půlmůstkem a sym. zdrojem

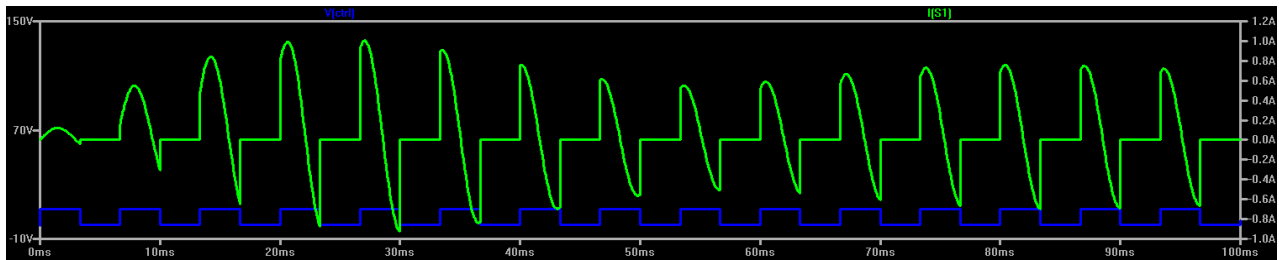


Obr. 11: Průběh proudu a napětí v rez. obvodu na obr. 10.



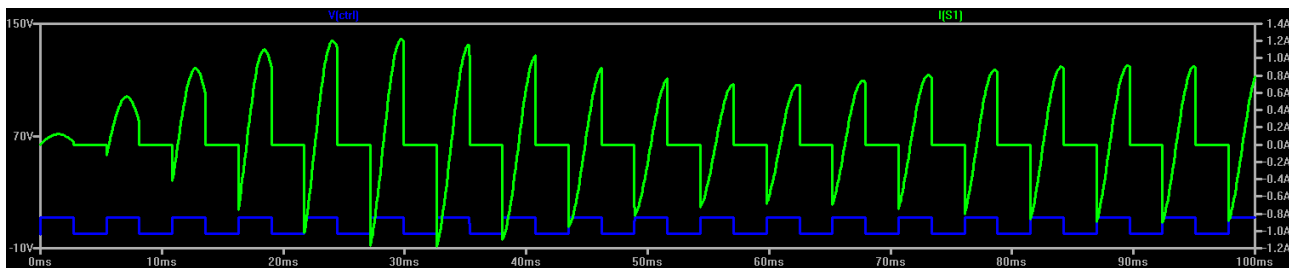
Obr. 12: Průběhy proudů spínači S1, S2.

Nejdříve nastavíme frekvenci nižší než rezonanční, dejme tomu 150Hz, a podíváme se na průběh proudu spínačem S1:



Obr. 13: Průběh proudu spínačem S1 – podrezonanční frekvence 150Hz

A potom nadrezonanční frekvenci:



Obr. 14: Průběh proudu spínačem S1 – nadrezonanční frekvence 184Hz

Obrázky 13 a 14 ukazují, že mimo rezonanci se část energie vrací zpátky do zdroje. Můžeme tedy dojít k závěru, že rezonance snižuje ztráty způsobené zahříváním přívodních vodičů. Další ztráty závisí na použitém zdroji energie. Pokud to bude akumulátor, musíme brát v úvahu, že akumulátor se nabíjí s účinností menší než 100%. Pokud je zdrojem energie generátor, energie vrácená zpátky se zcela zmaří. Proto je v každém případě vhodné mezi zdroj a BLDC motor zařadit diodu, zabraňující zpětnému nabíjení akumulátoru nebo zmaření v generátoru a energii vrácenou zpátky zachycovat do kondenzátoru.

Pokud nepoužijeme rezonanci, vrátí se do zdroje větší podíl energie pouze v případě, že doba, po kterou budou spínače sepnuty, bude mnohem kratší než je časová konstanta cívky $\tau = L/R$, kde L je indukčnost cívky a R je její odpor. Dále je potřeba brát v úvahu to, že magnetické obvody motorů jsou tvořeny izolovanými ocelovými plechy s příměsí (cca 3%) křemíku, což sice zvyšuje jejich činný odpor, ale přesto zde ztráty vířivými proudy vznikají.

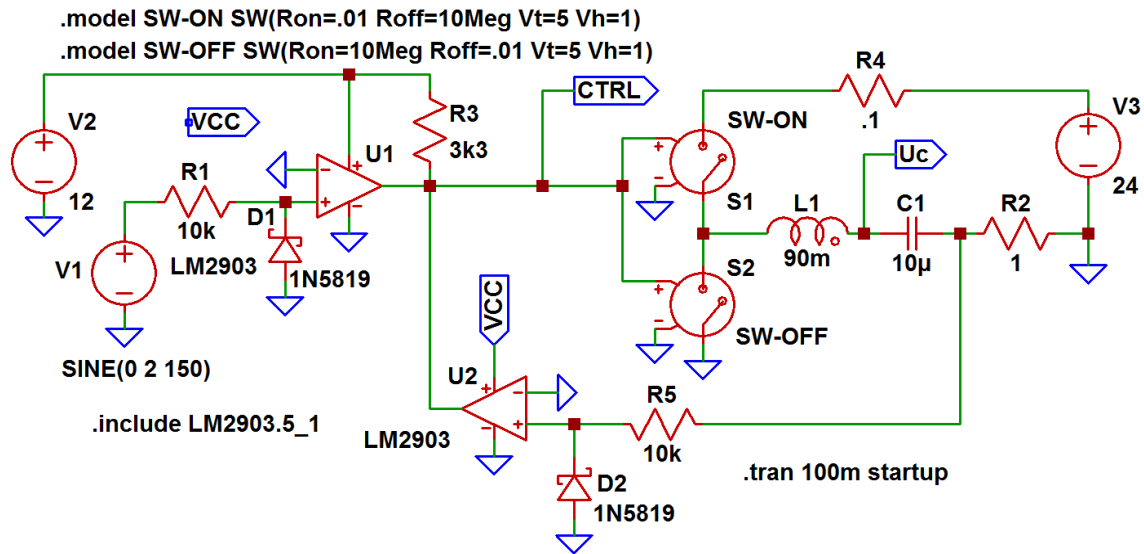
Použití rezonance má v každém případě smysl, ale musí být zároveň použit pro magnetický obvod motoru takový materiál, který zabrání vzniku vířivých proudů.

Jak už bylo řečeno na začátku, při řízení BLDC motoru nelze použít oscilátor na obr. 1. Musíme se proto postarat o udržování rezonance jiným způsobem. Jak jsme se přesvědčili výše, když jsme trochu mimo rezonanci, nic dramatického se neděje, protože při dodržení určitých zásad, lze energii vrácenou zpět opět využít.

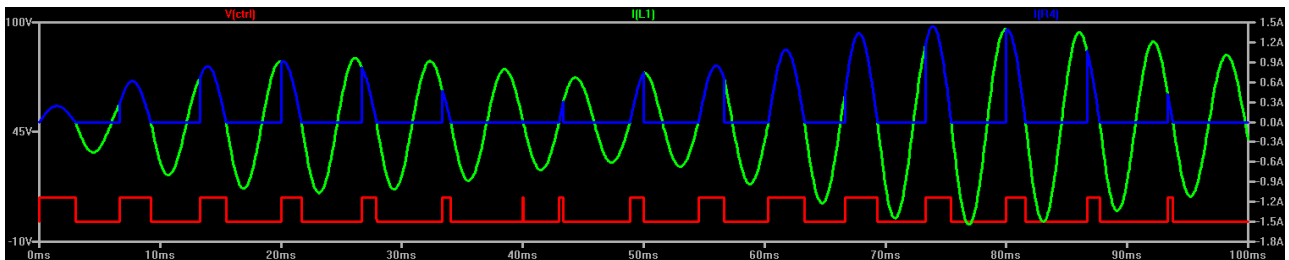
Nyní si ukážeme metodu, jak zamezit vracení proudu do zdroje i v případě, kdy jsme mimo rezonanci. Jde o to, zkombinovat rezonanční řízení pomocí oscilátoru (viz obr. 1) a klasické řízení BLDC motoru pomocí spínání spínačů na základě znalosti polohy rotoru.

Začneme pro jednoduchost pŕlmŕstkovým pŕepŕnacíem, pŕestože pro samotné řízení BLDC motoru není použitelné. Na obr. 15 máme zapojení oscilátoru, kde funkci zpětné vazby plní komparátor U2. Zároveň je zde komparátor U1, který dostává střídavý signál od sběrné cívky BLDC motoru, v níž se indukuje napětí pohybem rotorových magnetů. Jak vidíte na obrázku, výstupy obou komparátorů jsou spojeny. Tím vlastně vytvářejí logický součin obou signálů. Jsou-li oba signály ve fázi, je vytvářen signál obdélníkového průběhu o střídě 50% a otáčky motoru odpovídají rezonanci. Pokud jsou otáčky pod nebo nad rezonancí, střída řídicího signálu kolísá, jak ukazuje obr. 16 (červená čára). Na obr. 16 máme zobrazenou situaci, kde frekvence od motoru je 150Hz, zatímco rezonanční kmitočet oscilátoru je 167Hz. Na obr. 16 si dále můžete všimnout, že přes odpor R4 teče ze zdroje

proud pouze jedním směrem (modrá čára), což bylo smyslem tohoto zapojení.



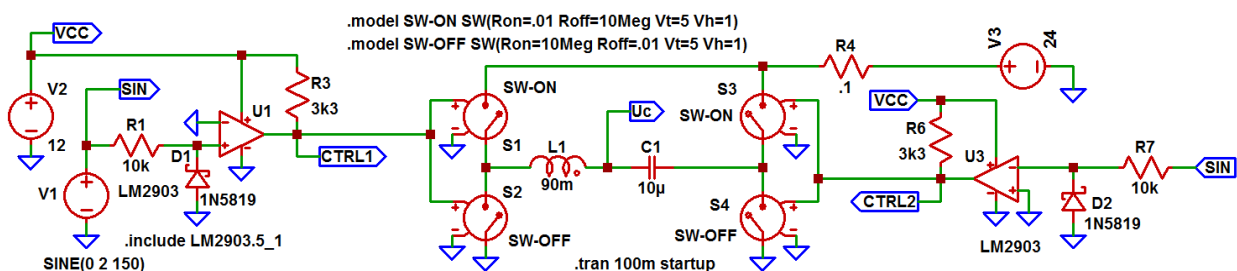
Obr. 15: Půlmůstkové rezonanční řízení BLDC motoru



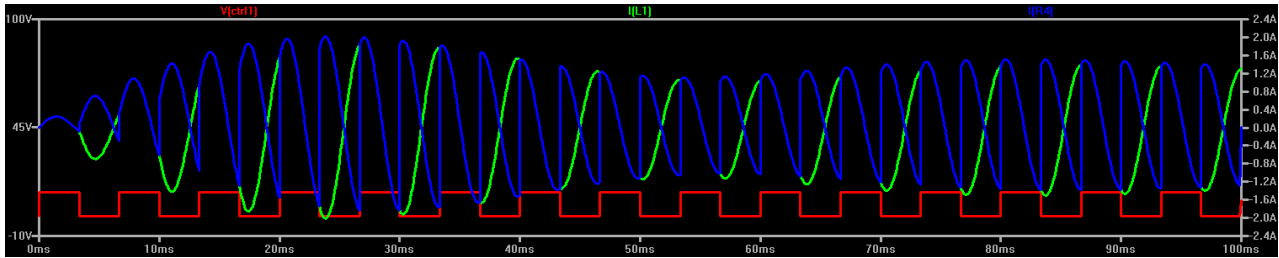
Obr. 16

Zapojení na obr. 15 je pouze ilustrací principu. Aby bylo použitelné v praxi, museli bychom nějakým způsobem zajistit rozběh motoru. Mohli bychom například použít symetrický napájecí zdroj, jehož zápornou větev bychom po rozběhu vypnuli. Zároveň bychom museli mít během rozběhu zkratovaný rezonanční kondenzátor.

Nyní analogicky provedeme rezonanční řízení s celomůstkovým přepínačem. Na obr. 17 máme řízení motoru od polohy rotoru s rezonančním kondenzátorem. Je to taková příprava na skutečné rezonanční řízení. Na obr. 18 si můžete všimnout, že proud mezi zdrojem a motorem teče oběma směry, jak ukazuje modrá čára.

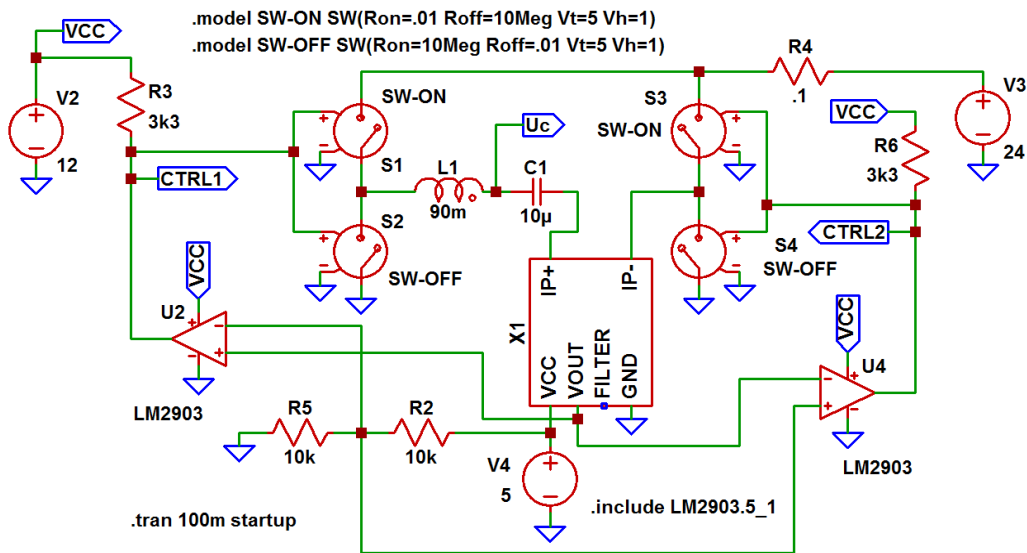


Obr. 17: Celomůstkové řízení BLDC motoru

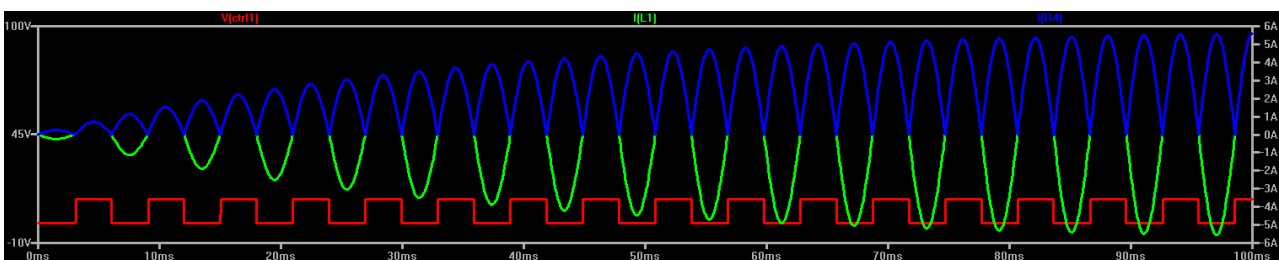


Obr. 18

Dalším krokem bude vytvoření oscilátoru s celomůstkovým zapojením přepínačů, který je zobrazen na obr. 19. Pro snímání proudu jsme museli použít galvanicky oddělený snímač proudu. V tomto případě to byl integrovaný obvod ACS712. Ten potřebuje napájecí napětí 5V a převádí střídavý proud na stejnosměrné napětí, přičemž nulovému proudu odpovídá napětí 2,5V. Další možností by bylo použít proudový transformátor.

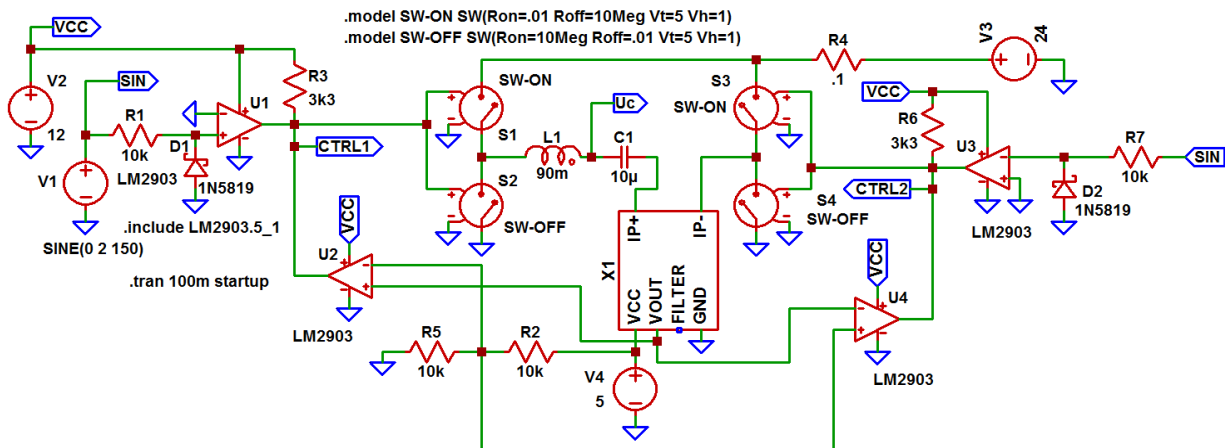


Obr. 19: Oscilátor s úplným H-můstkem

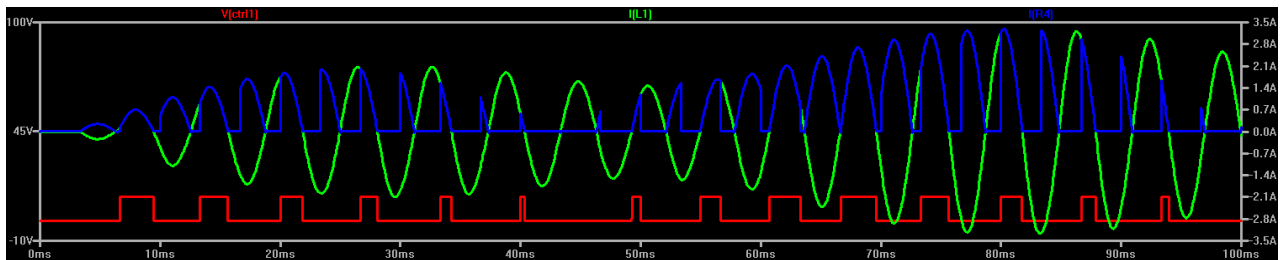


Obr. 20

Nyní spojíme obě schémata na obr. 17 a 19, čímž dostaneme opravdové celomůstkové rezonanční řízení BLDC motoru. To znamená, že z hlediska zdroje se při každých otáčkách bude BLDC motor jevit jako činná zátěž. Ovšem z hlediska výkonu motoru bude potřeba zajistit, aby se otáčky motoru co nejvíce shodovaly s rezonančním kmitočtem oscilátoru. Toho dosáhneme nejlépe tak, že budeme regulovat zatížení motoru. Metod regulace zátěže je mnoho a záleží na konkrétní aplikaci motoru. Popis těchto metod by byl nad rámec tohoto článku.



Obr. 21: Celomůstkové rezonanční řízení BLDC motoru



Obr. 22