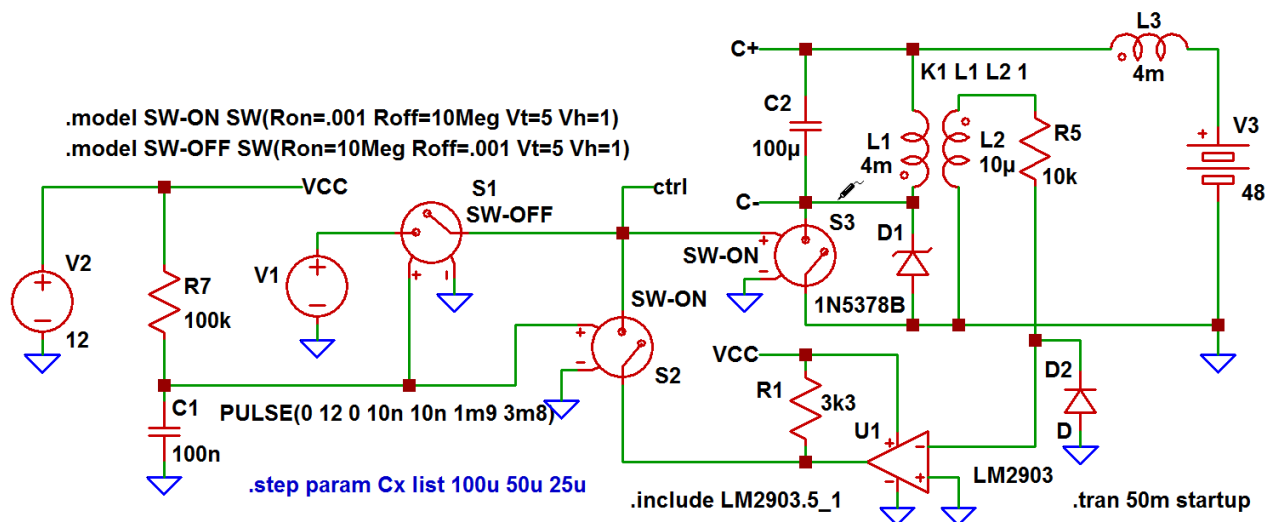


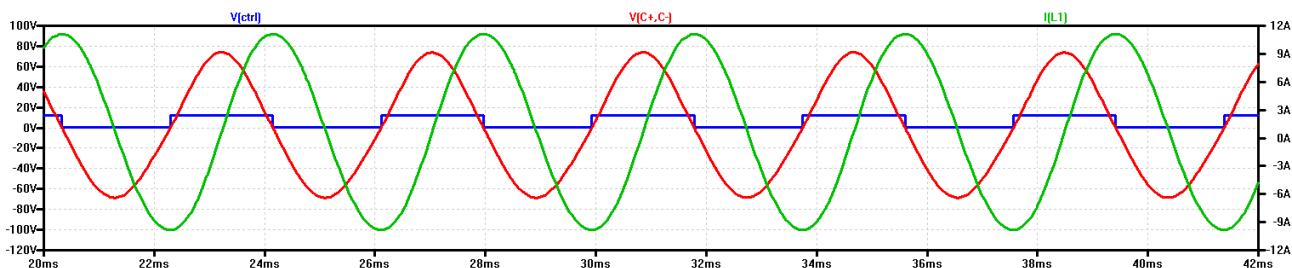
LC oscilátory s transformátorovou vazbou II

© Ing. Ladislav Kopecký, květen 2017

V první části článku jsme skončili u realizaci oscilátoru s reálným spínačem. Nyní se opět vrátíme k základní idealizované verzi oscilátoru s paralelním LC obvodem, kterou mírně upravíme. Ta úprava bude spočívat v přemístění rezonančního kondenzátoru ze sekundární strany transformátoru na stranu primární. Důsledky této změny budou velmi překvapivé a pro praktické aplikace velmi užitečné.

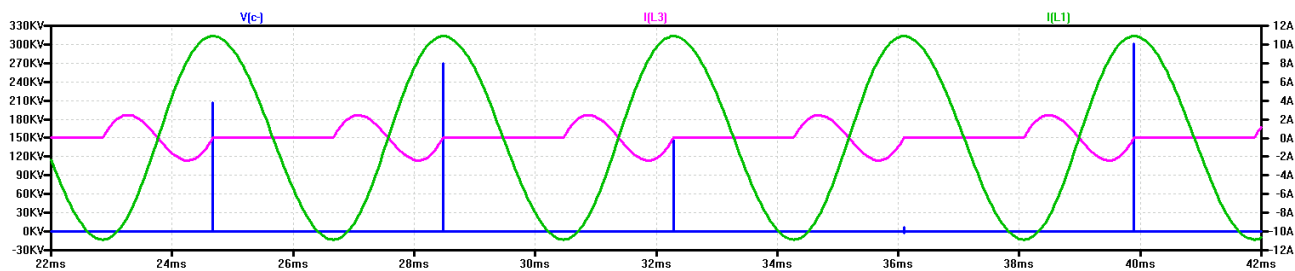


Obr. 1: Oscilátor s kondenzátorem na primární straně transformátoru



Obr. 2

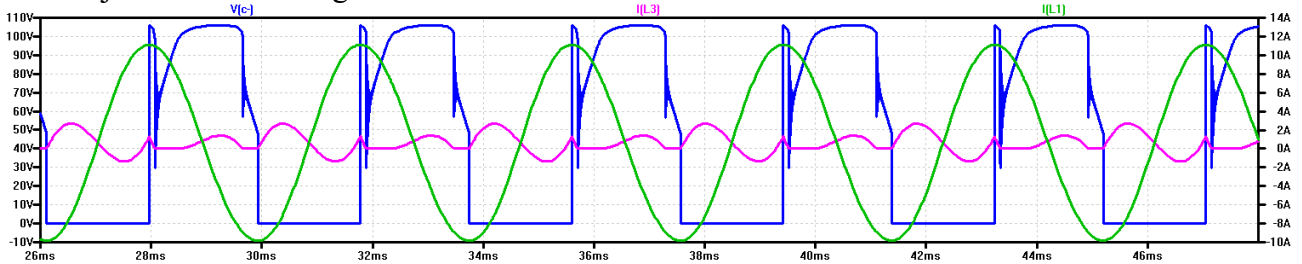
Kromě změny umístění rezonančního kondenzátoru C2 došlo ke změně v transformátoru: indukčnost sekundární cívky je mnohem nižší proto, aby se v sekundárním vinutí indukovalo jen tak velké napětí, aby jej bylo možné vyhodnotit pomocí komparátoru U1. Také je třeba poznamenat, že sekundární vinutí nebude zatíženo proudem, takže může být navinuto tenkým drátem. Nyní odpojíme ochrannou diodu D1 a změříme proud protékající cívkami L1 a L3:



Obr. 3: Proud cívkami L1 a L3 – bez ochranné diody

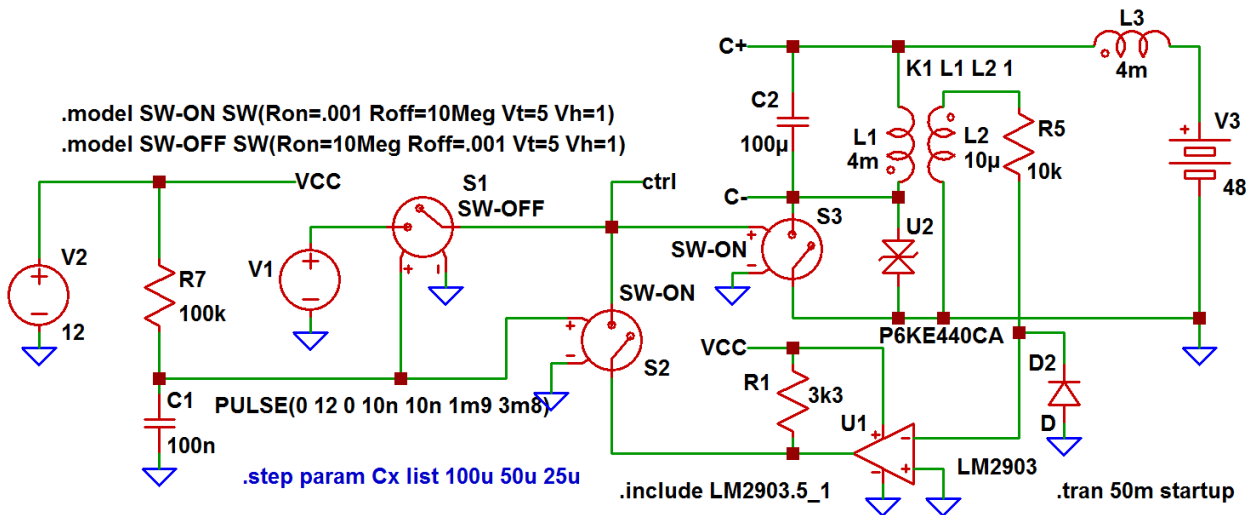
Na obr. 3 vidíme, že téměř všude proud se vrací zpátky do zdroje (fialová čára). Dále si můžete všimnout, že na spínači se objevují špičky velmi vysokého napětí, které jsou schopny zničit spínač.

Pokud diodu D1 opět zapojíme paralelně k spínači S3, napětové špičky se sice sníží, ale zároveň se do zdroje vrátí méně energie:

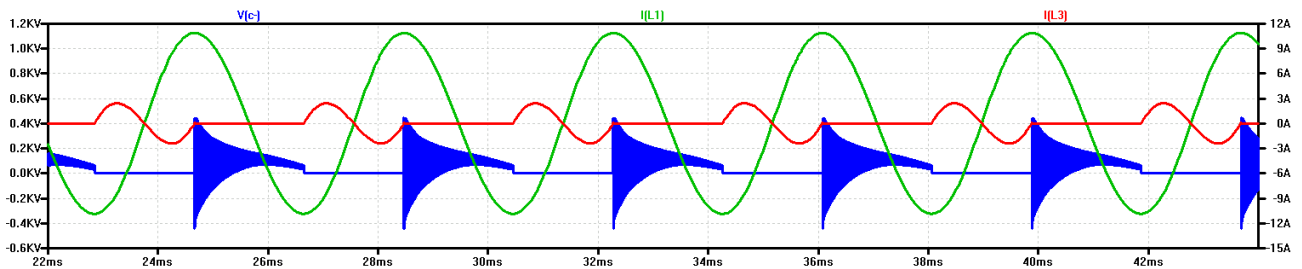


Obr. 3: Proud cívkami L1 a L3 – s ochrannou diodou

Z toho vyplývá, že se budeme snažit použít tranzistor s co největší odolností proti přepětí a použijeme transil na vyšší napětí, který tranzistor spolehlivě ochrání. Tím zajistíme, že se nám do zdroje vrátí vyšší podíl energie.



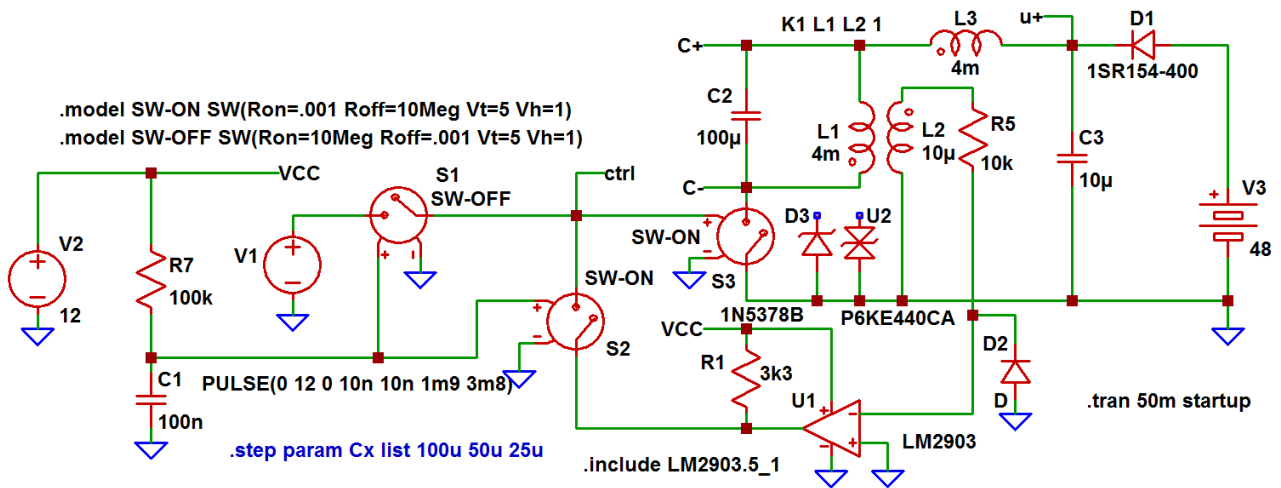
Obr. 5: Oscilátor s ochranou pomocí transilu



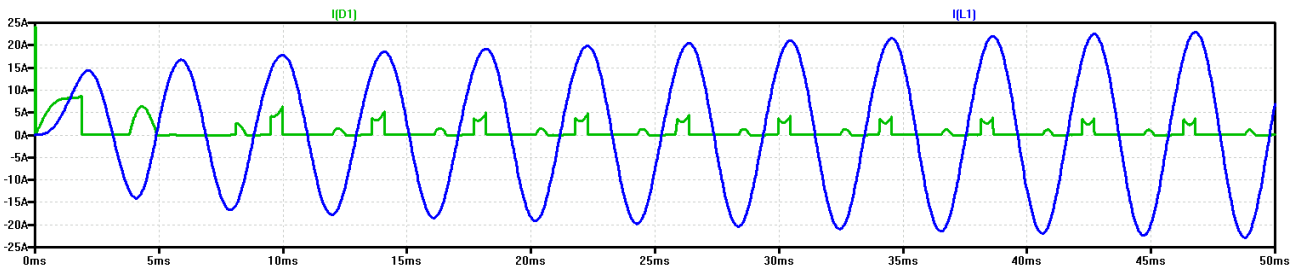
Obr. 6

Na obr. 5 a 6 se můžeme přesvědčit, že výše uvedená slova platí. Zenerovu diodu na 100V jsme nahradili transilem s jmenovitým napětím 440V. Na obr. 6 vidíte, že do zdroje se vrací téměř tolik energie, kolik je z něho odebíráno (červená čára).

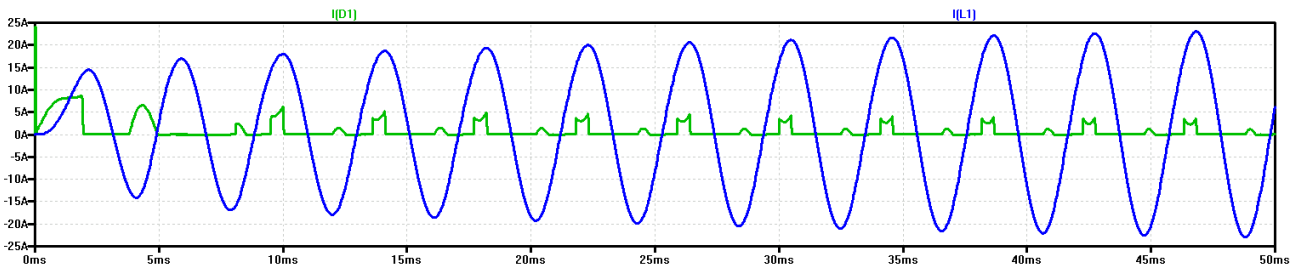
Abychom mohli měřit skutečný odběr proudu ze zdroje, provedeme následující úpravu zapojení (obr. 7). Ke zdroji V3 přidáme diodu D1 a kondenzátor C3 a budeme sledovat průběh proudu diodou D1 pro různé typy ochrany. Na obrázcích 8 až 10 vidíme, že transil na 440V má prakticky totožný účinek jako když není zapojena žádná ochrana. Při ochraně s diodou se Zenerovým napětím 100V je nejen větší odběr proudu ze zdroje, ale je menší také amplituda proudu v cívce L1.



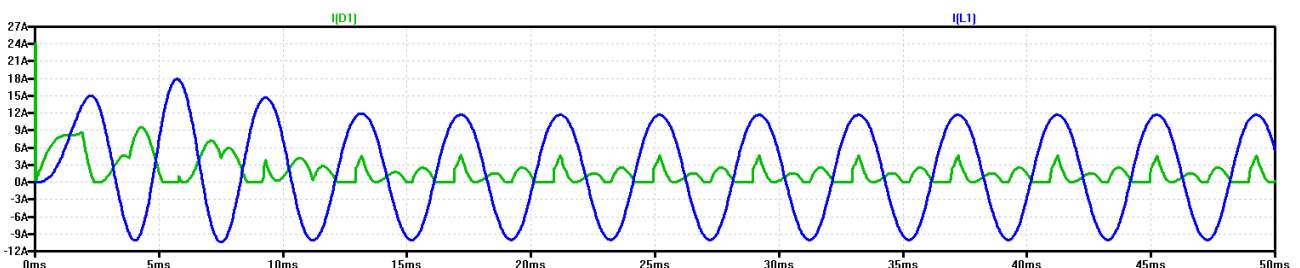
Obr. 7: Oscilátor s měřením odběru proudu



Obr. 8: Bez ochran

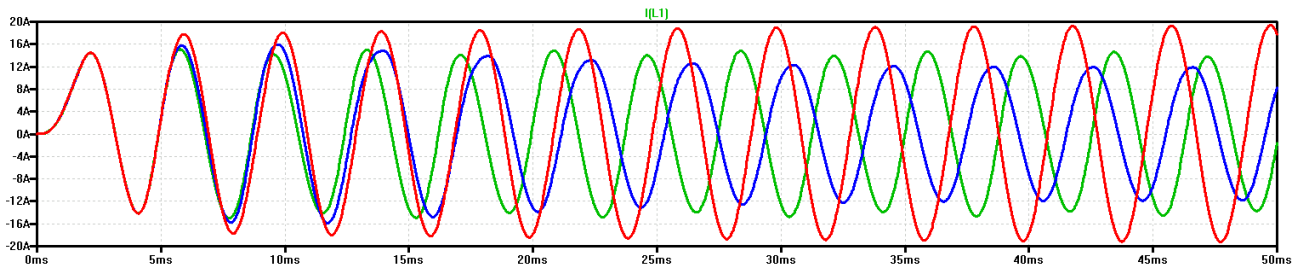


Obr. 9: Ochrana 440V

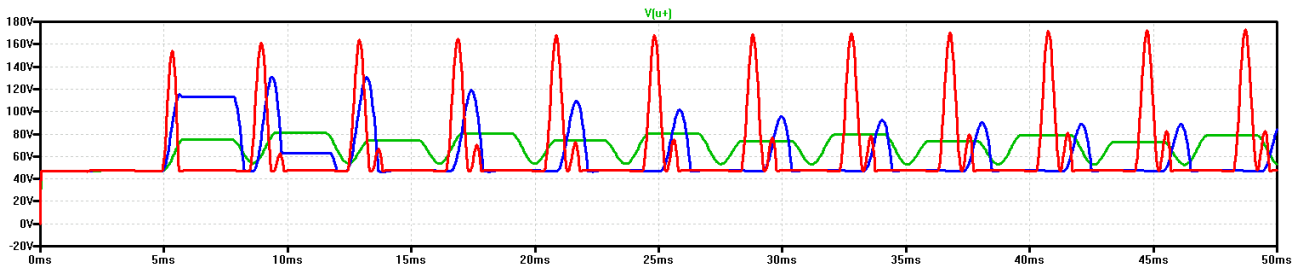


Obr. 10: Ochrana 100V

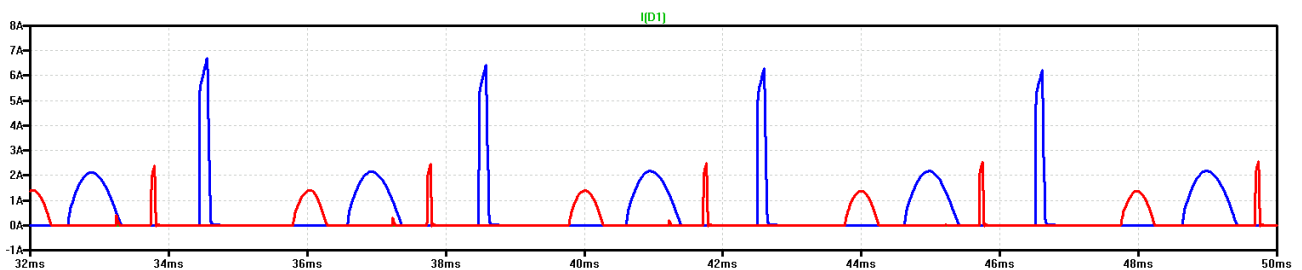
Přidaná dioda D1 a kondenzátor C3 neslouží jenom k změření odběru proudu ze zdroje, ale mají vliv i na průběh proudu v LC obvodu. Důvod je ten, že rekuperovanou energií z cívky se nabíjí kondenzátor C3, takže napětí na kondenzátoru překročí napětí napájecího zdroje. Na obr. 11 jsou zobrazeny průběhy proudu $I(L1)$ při kapacitě $100\mu\text{F}$, $25\mu\text{F}$ a $5\mu\text{F}$ kondenzátoru C3. Na dalších dvou obrázcích jsou průběhy napětí na C3 a proudu diodou D1. Na obr. 14 potom můžete vidět porovnání proudu $I(L1)$ s odběrem proudu ze zdroje při $C3 = 100\mu\text{F}$. Odběr proudu ze zdroje je zanedbatelný proto, že ztráty v oscilátoru jsou minimální. V praxi se však projevují i ztráty ve spínači a v magnetickém obvodu, které zde nejsou zohledněny.



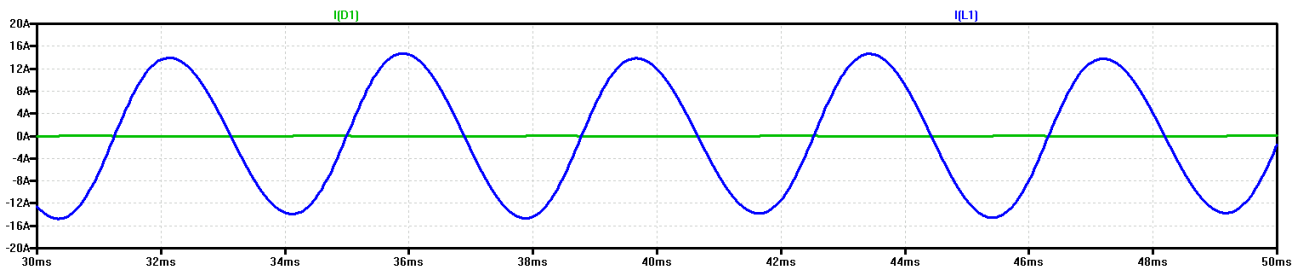
Obr. 11: Průběhy proudu cívkou L1 při různých hodnotách C3



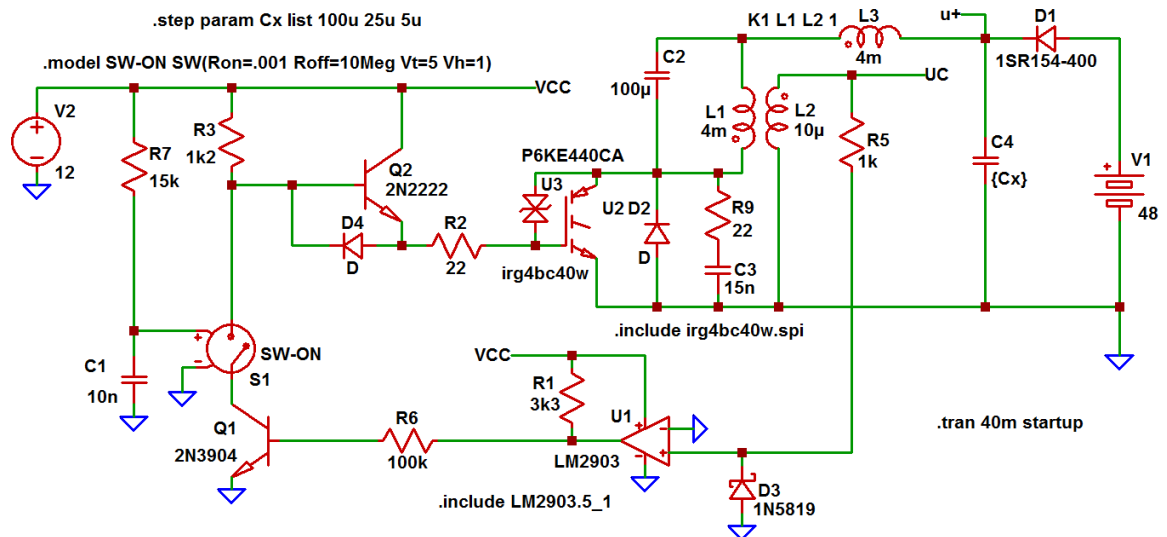
Obr. 12: Průběhy napětí na kondenzátoru C3 při jeho různých hodnotách



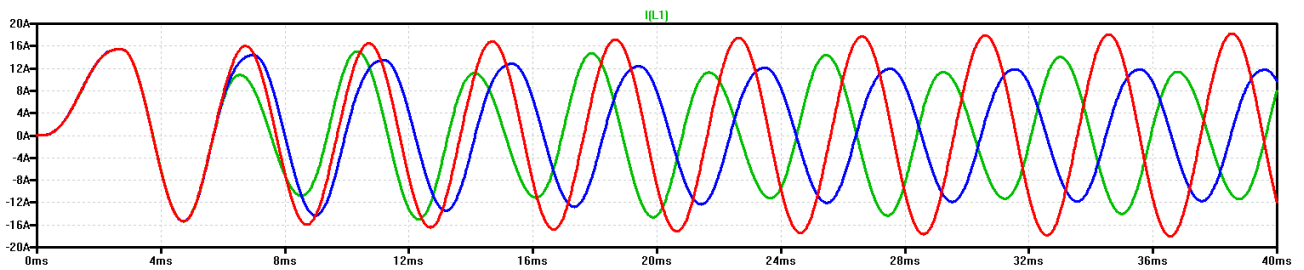
Obr. 13: Průběhy odběru proudu ze zdroje při různých hodnotách C3

Obr. 14: Průběh proudu $I(L1)$ a odběru proudu ze zdroje při $C3 = 100\mu\text{F}$

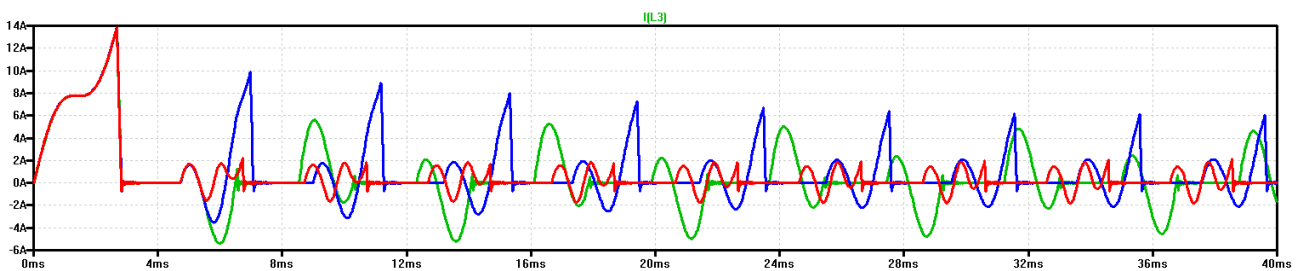
Nyní ve schématu na obr. 7 ideální spínač S3 nahradíme reálným spínačem s IGBT tranzistorem a ochranami proti přepětí s transilem, diodou a RC členem. Dále budeme testovat vliv kapacity C3 na parametry oscilátoru. Obr. 16 ukazuje, že vliv kapacity C3 na průběh proudu $I(L1)$ je nezanedbatelný. Z obr. 17 je zřejmé, že do kondenzátoru C3 se vrací významný podíl energie. Je celkem logické, že kapacita C3 má výrazný vliv i na napětí na něm, jak ukazuje obr. 18. Obrázek 19 ukazuje proud protékající diodou D1, tj. odběr proudu ze zdroje V1. Je celkem překvapivé, že s klesající kapacitou C3 neroste odběr proudu podobně jako amplituda proudu cívkou L1, ale největší odběr proudu je při prostřední hodnotě kapacity. Je tedy možné optimalizovat energetickou účinnost oscilátoru s ohledem na parametry součástek (tranzistoru a jeho ochran).



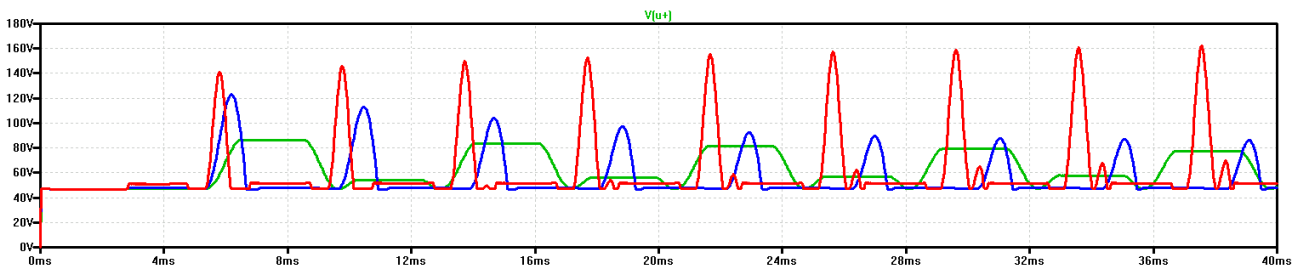
Obr. 15: Oscilátor s reálným spínačem



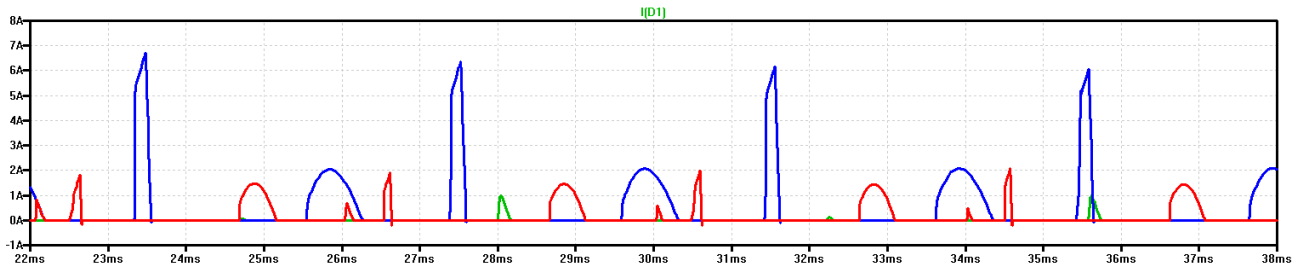
Obr. 16: Proud cívkou L1 pro různé hodnoty C3



Obr. 17: Proud cívkou L3 pro různé hodnoty C3

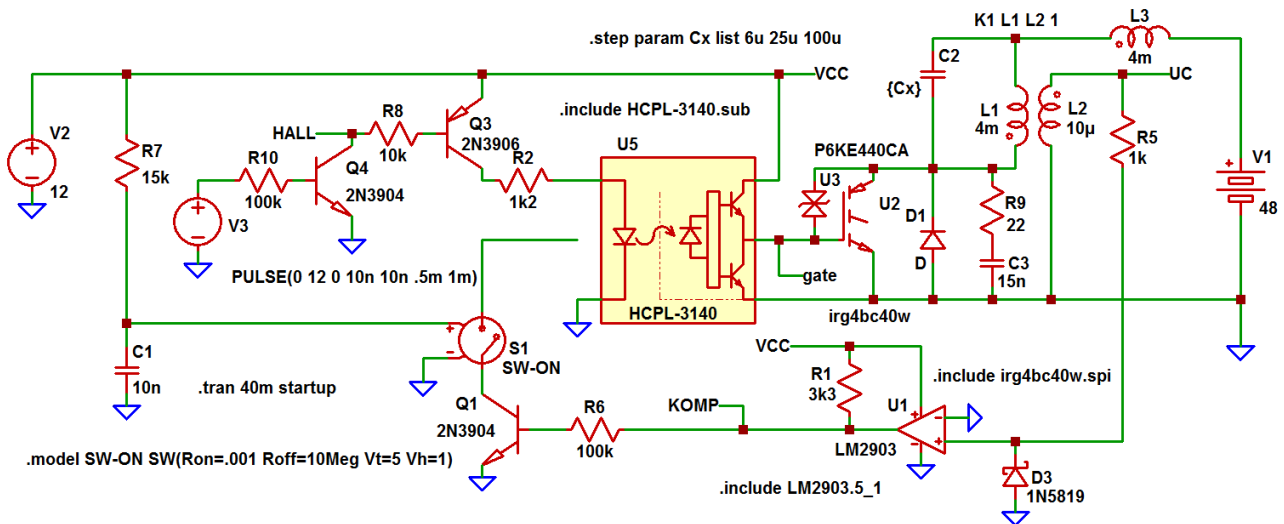


Obr. 18: Napětí na C3 pro jeho různé kapacity

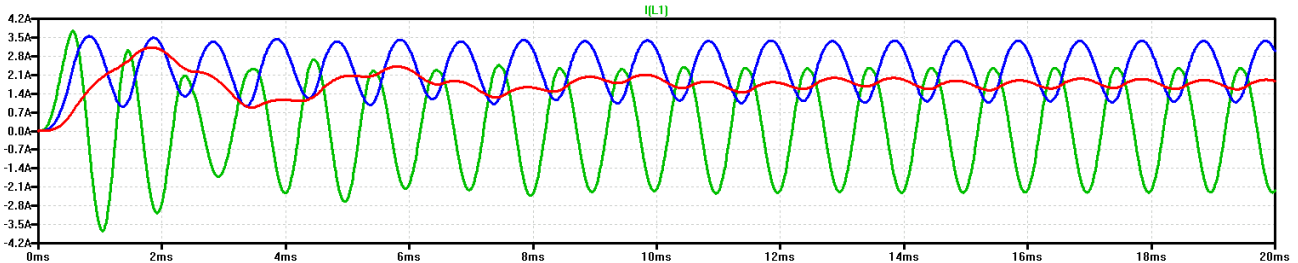


Obr. 19: Proud diodou D1 pro různé hodnoty C3

Nakonec si ukážeme jeden příklad aplikace oscilátoru: rezonanční řízení BLDC motoru. Jak známo, spínače v tomto motoru jsou řízeny v závislosti na poloze rotoru nejčastěji pomocí Hallových sond. Z tohoto důvodu nemůžeme přímo použít náš oscilátor. Můžeme však řízení od polohy rotoru zkombinovat s oscilátorem. Jak se to dá udělat, ukazuje obr. 20. Zdroj impulzů V3 a tranzistor Q4 představují Hallovu sondu, která je aktivní v log. 0. Je-li signál z Hallovy sondy v aktivním stavu, je otevřen tranzistor Q3, který ovládá optočlen U5. Optočlen pro buzení spínače U2 je dále řízen pomocí komparátoru U1, který je součástí oscilátoru. Nejdříve necháme zpětnovazební signál z komparátoru nezapojený a budeme sledovat, jak se bude chovat rezonanční obvod pro různé kapacity C2.

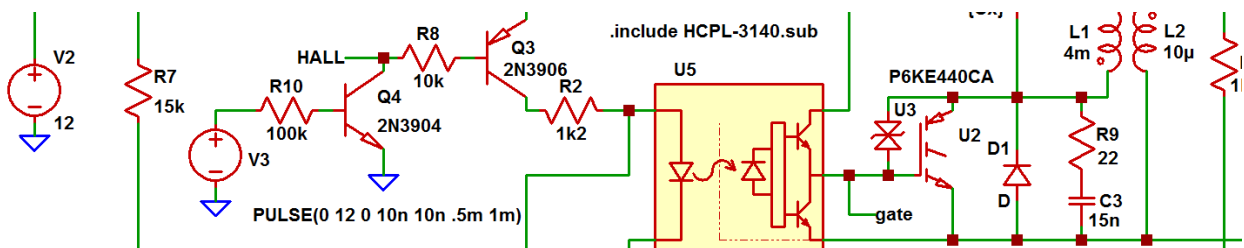


Obr. 20: Rezonanční řízení BLDC motoru – zpětná vazba nezapojena

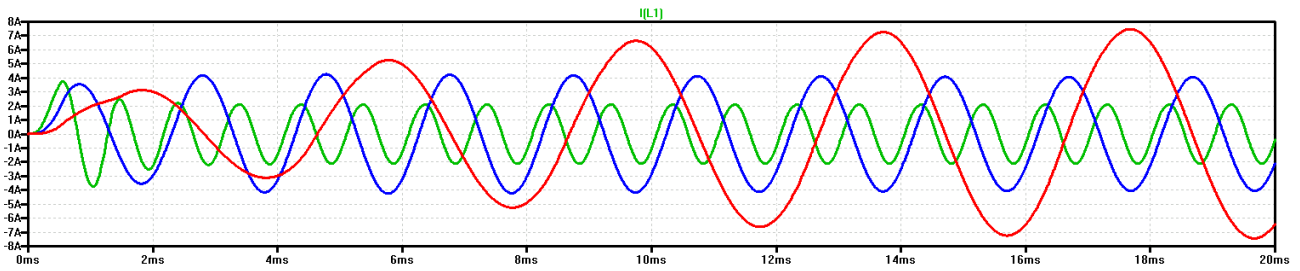
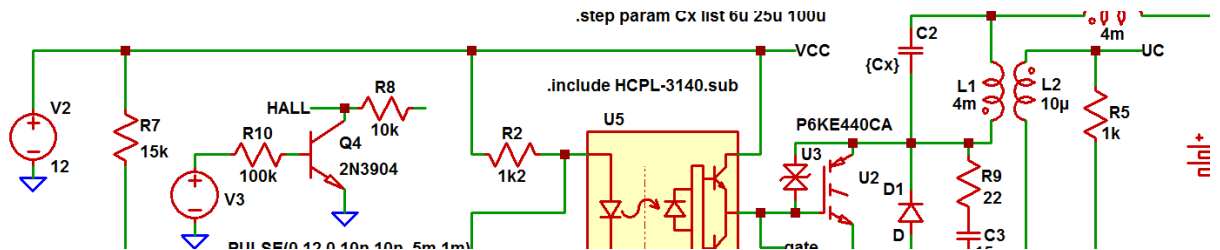


Obr. 21: Průběhy proudu $I(L1)$ – bez ZV

Na obr. 21 máme zobrazen průběh proudu cívkou L1 pro různé kapacity kondenzátoru C2. Zelená křivka odpovídá zhruba situaci, kdy dochází k rezonanci: frekvence 1kHz a $C2 = 6\mu\text{F}$. Další dvě křivky odpovídají kapacitám $25\mu\text{F}$ a $100\mu\text{F}$. Při těchto kapacitách jsme evidentně mimo rezonanci, při níž je menší zvlnění proudu $I(L1)$ a obsahuje stejnosměrnou složku. Nyní zapojíme zpětnou vazbu (ZV) (viz obr. 22) a budeme opět sledovat průběh proudu $I(L1)$ pro různé kapacity C2. Výsledek najdete na obr. 23.

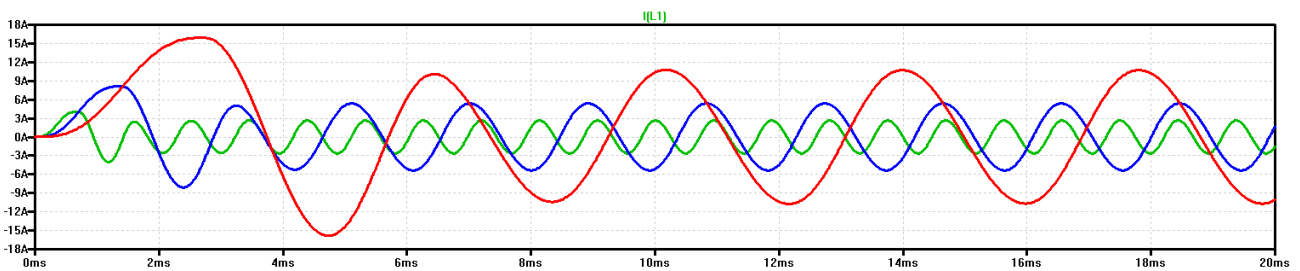


Obr. 22: Detail schématu z obr. 20 se zapojenou zpětnou vazbou

Obr. 23: Průběhy proudu $I(L1)$ – se ZV

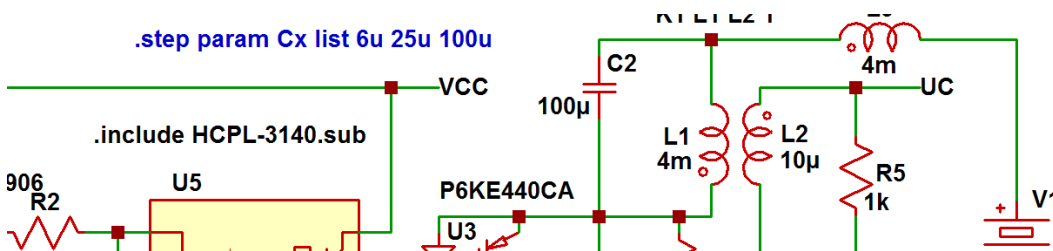
Obr. 24: Detail schématu z obr. 20 s vyřazením čidlem polohy rotoru

Nyní provedeme další experiment, který bude spočívat ve vyřazení Hallové sondy z provozu a zapojení odporu R2 přímo na napájení VCC (viz obr. 24).

Obr. 25: Průběhy proudu $I(L1)$ – se ZV a vyřazenou Hallovou sondou

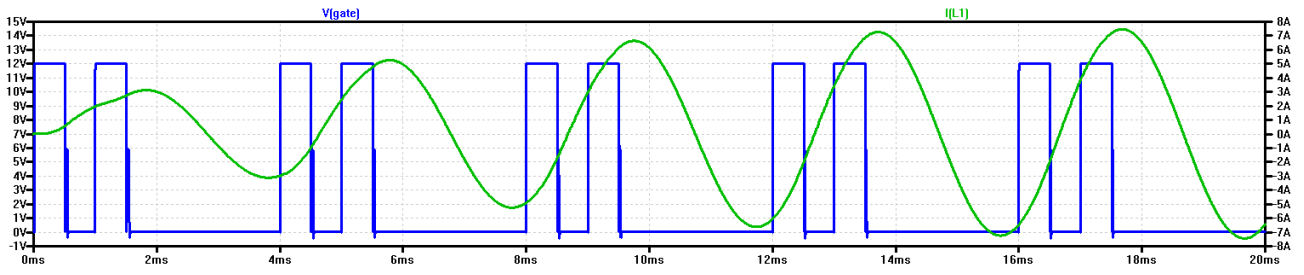
Porovnáme-li obrázky 23 a 25, vidíme, že vliv Hallové sondy na amplitudu $I(L1)$ je minimální.

Nakonec u kondenzátoru C2 zrušíme parametr Cx, nastavíme u něho pevnou hodnotu $100\mu\text{F}$ a budeme sledovat průběh $I(L1)$ a řídicí napětí tranzistoru (signál „gate“) (viz obr. 26 a 27).

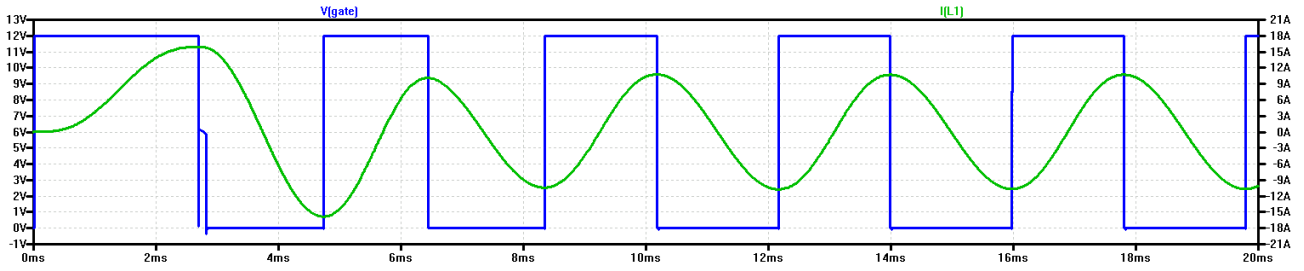


Obr. 26: Detail změny ve schématu z obr. 20

Pro zajímavost jsme ještě znovu odpojili Hallovu sondu a provedli stejné měření (viz obr. 27 a 28). Ze srovnání obrázků vyplývá, že vliv Hallové sondy na $I(L1)$ je nepatrný. Důležité ale je, že LC obvod je stále v rezonanci.



Obr. 27: Průběh $I(L1)$ a řídicího napětí tranzistoru (signál „gate“)



Obr. 28: Průběh $I(L1)$ a řídicího napětí tranzistoru (signál „gate“) - bez Hall. sondy