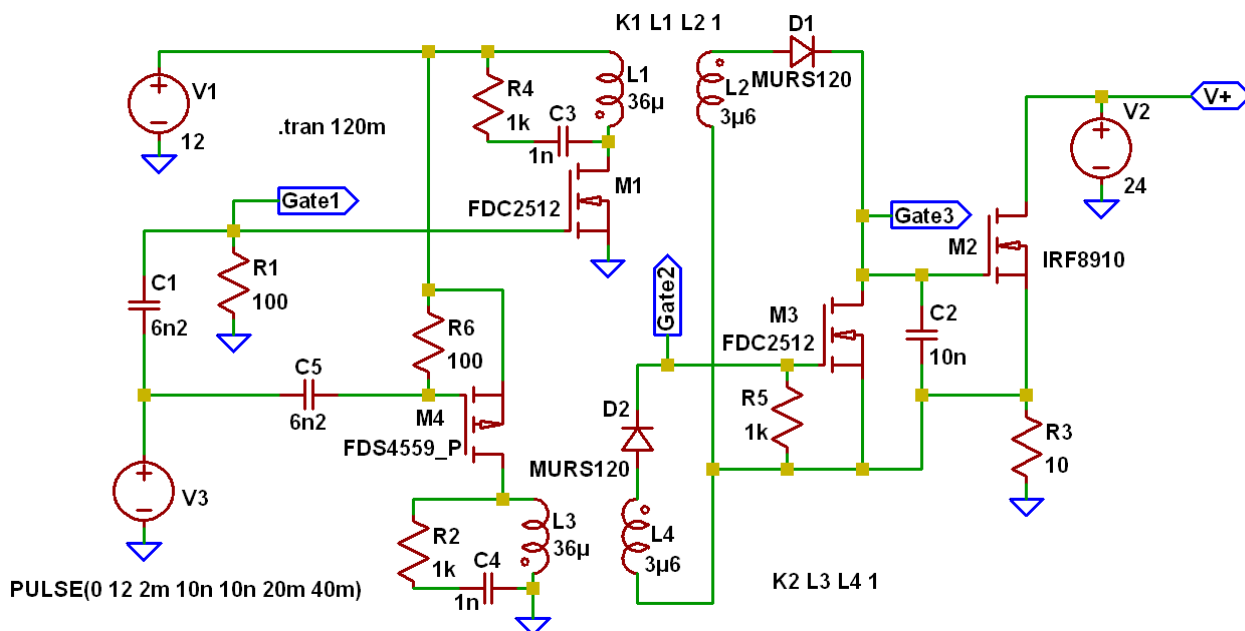


# Zapojení horního spínače pro dlouhé doby sepnutí III

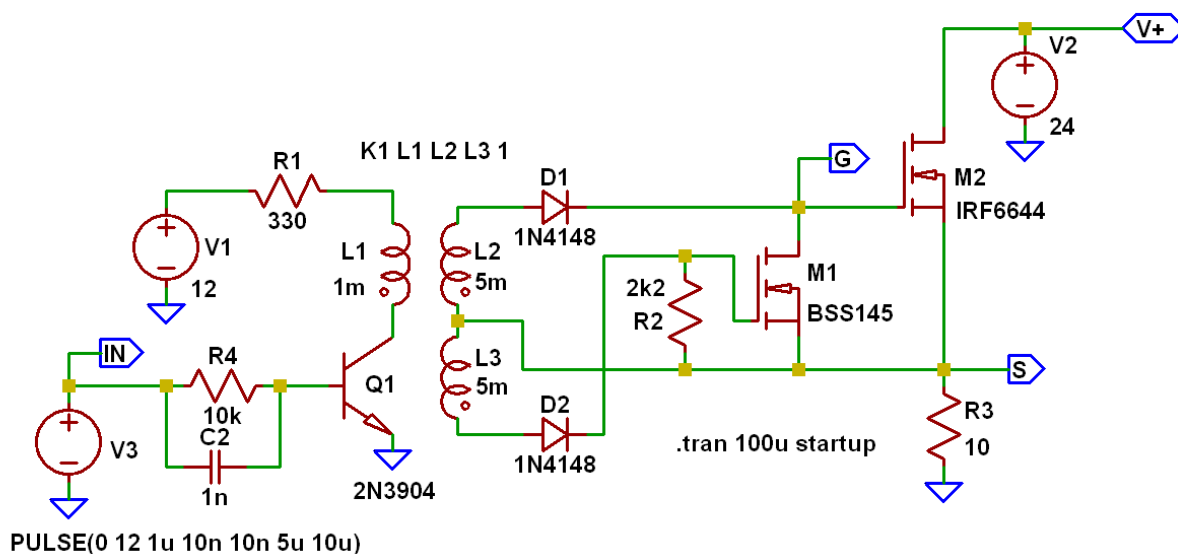
(c) Ing. Ladislav Kopecký, srpen 2015

V předchozí části tohoto článku jsme dospěli k zapojení horního spínače se dvěma transformátory, které najdete na obr. 1. Nyní se zaměříme na další zjednodušení spínače. Budeme se snažit najít takové zapojení, kde bude pouze jeden transformátor, nejlépe pouze se dvěma vinutími.



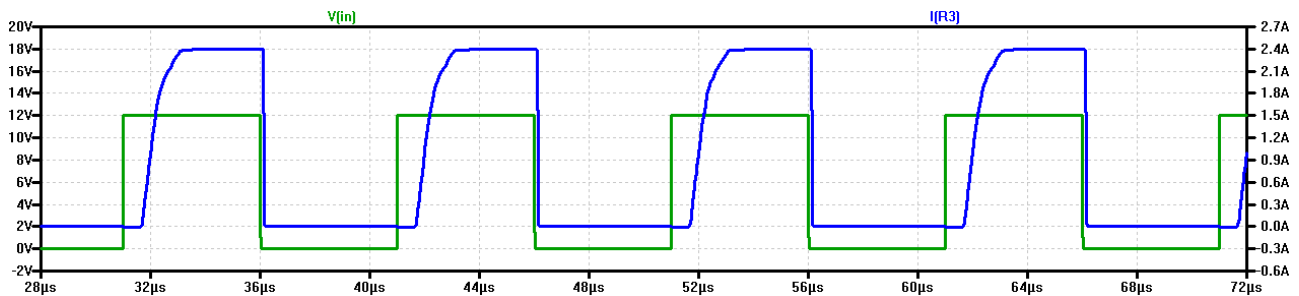
Obr. 1: Zapojení horního spínače se dvěma transformátory

Až dosud jsme používali princip blokujícího měniče. Abychom dosáhli dalšího zjednodušení zapojení, použijeme princip propustného měniče.



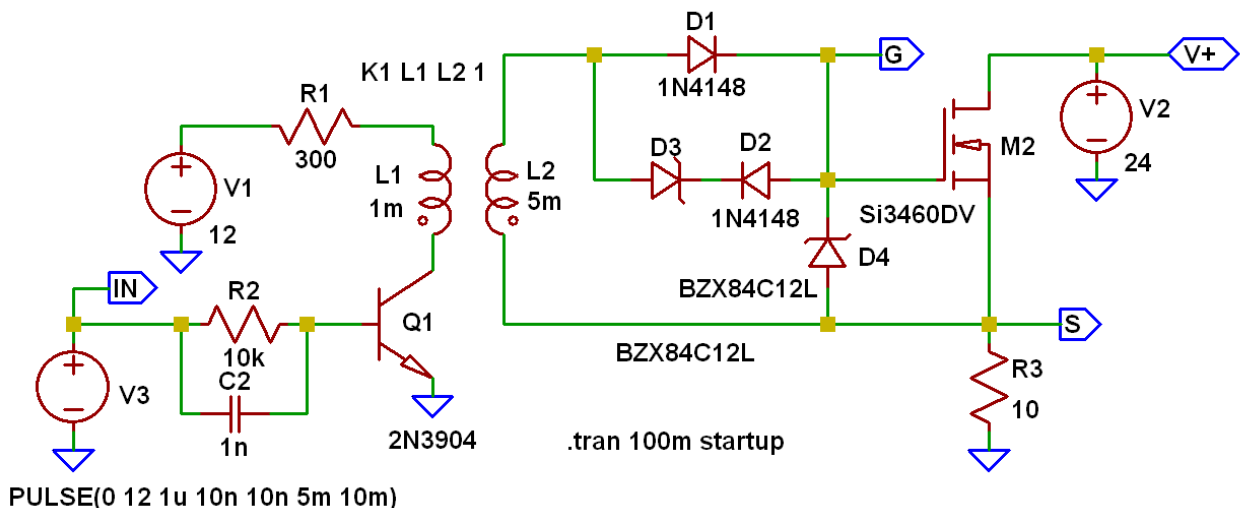
Obr. 2: Zapojení horního spínače s jedním transformátorem se dvěma sekundárními cívkami

Na obr. 2 máme zapojení s jedním transformátorem se dvěma sekundárními vinutími. Princip funkce je velmi jednoduchý. Po příchodu vzestupné hrany vstupního obdélníkového signálu (zdroj V3) se otevře tranzistor Q1, který připojí primární cívku L1 transformátoru ke zdroji V1. V L1 začne exponenciálně růst proud, což způsobí, že se v sekundárních cívkách začne indukovat napětí. Cívky jsou zapojeny tak, aby při nárůstu proudu byla propustná dioda D1, zatímco při poklesu proudu vede D2. To znamená, že při vzestupné hraně vstupního signálu se tranzistor M2 otevře tím, že se nabije kapacita  $C_{GS}$  mezi vývody S a G tohoto tranzistoru. Po sestupné hraně vstupního signálu se otevře tranzistor M1, který kapacitu  $C_{GS}$  vybije a tranzistor M2 zavře. K opětovnému zavření M1 slouží odpor R2, který vybije jeho kapacitu  $C_{GS}$ .



Obr. 3: Výsledek simulace zapojení z obr. 2.

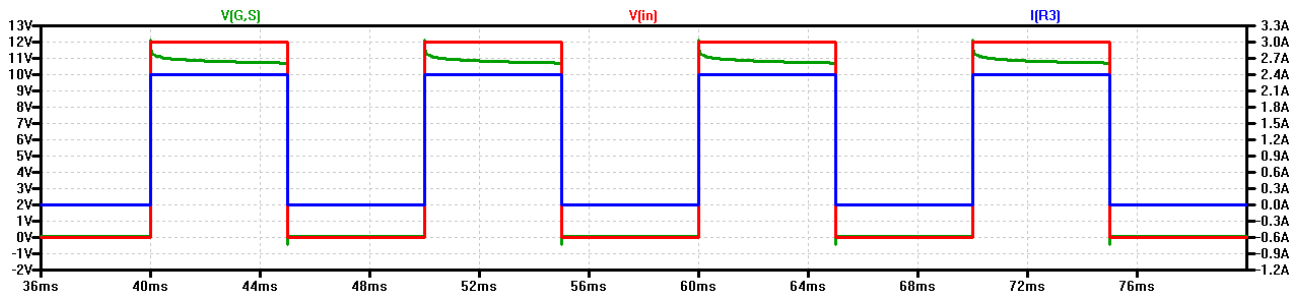
Na obr. 3 se můžete podívat na výsledek simulace. Je zde zobrazen průběh vstupního signálu a výstupního proudu zatěžovacím odporem R3. Všimněte si, že nárůst proudu má větší zpoždění než jeho pokles. To je výhodné pro použití tohoto spínače u elektronických přepínačů, protože nemusíme řešit tzv. dead time. Na výpočet tohoto obvodu se podíváme později, avšak na tomto místě prozradíme, že velikost odporu R1, který omezuje proud do cívky L1, je svázána s indukčností L1 podle vztahu  $L \cdot I^2 = \text{konst.}$ , přičemž velikost I je dána velikostí R1 podle Ohmova zákona. Pokud zvětšíme odpor, musíme zároveň zvětšit indukčnost L1. Zvětšením hodnoty R1 sice uspoříme energii, avšak zaplatíme za to snížením rychlosti spínače. Jestliže jsme zvětšili indukčnost L1, ve stejném poměru musíme zvětšit i indukčnosti L2 a L3 tak, aby zůstal zachován převodový poměr transformátoru.



Obr. 4: Zapojení horního spínače s jedním transformátorem s jednou sekundární cívkou

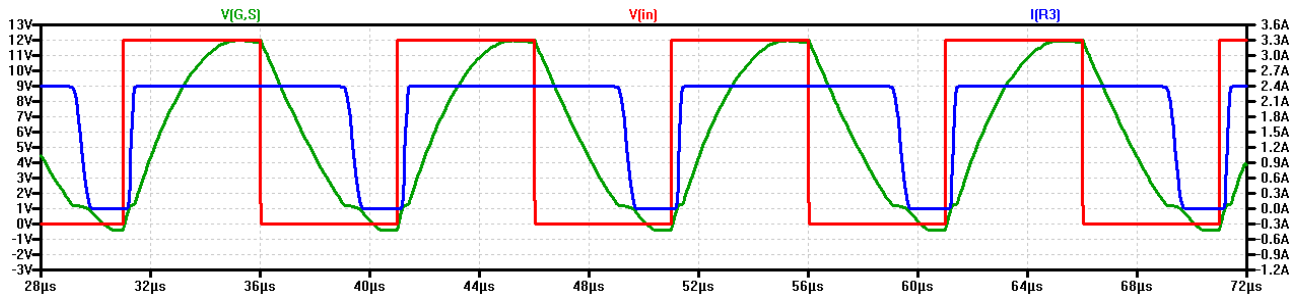
Zapojení s jedním transformátorem se pokusíme ještě více zjednodušit. Výsledek našeho úsilí najdete na obr. 4. Mechanismus otevření tranzistoru M2 je úplně stejný jako u zapojení podle obr. 2. Rozdíl je ve funkci zavření M2. Když dojde k sestupné hraně vstupního signálu a proud cívkou L1 zaniká, objeví se na cívce L2 napětí opačné polarity, které přes Zenerovu diodu D3 a diodu D2

vybije kapacitu  $C_{GS}$  a tranzistor M2 se zavře. Zenerova dioda je nutná proto, že zabrání vybití  $C_{GS}$  po odeznění kladného impulsu, takže tranzistor M2 zůstane otevřený až do příchodu sestupné hrany vstupního signálu.



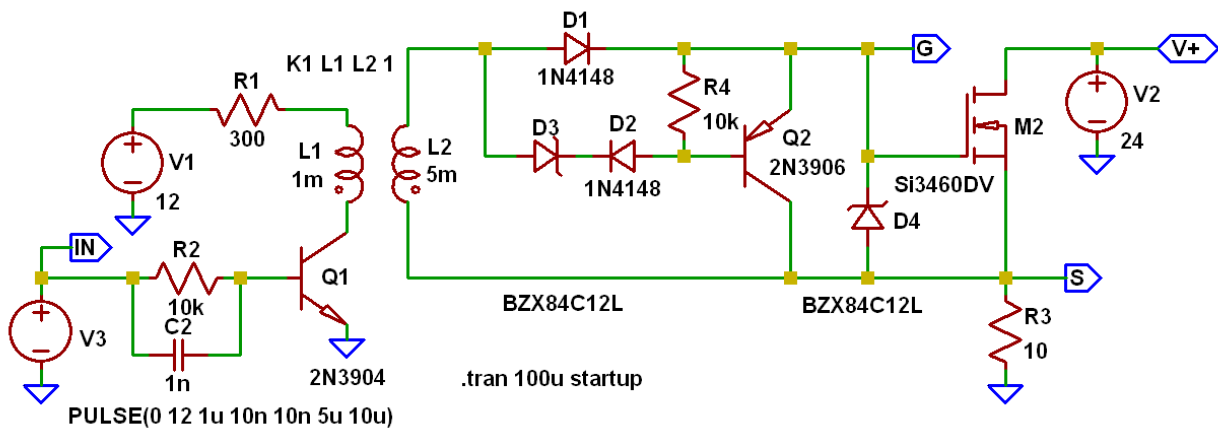
Obr. 5: Výsledek simulace zapojení z obr. 4 – frekvence 100Hz

Zapojení na obr. 4 je opravdu jednoduché a funguje spolehlivě, takže si čtenář může říci, že publikovat zapojení na obr. 2 bylo zbytečné. Není tomu tak. Zapojení na obr. 4 má jednu skrytou nevýhodu, která na obr. 5 není patrná. Když použijeme velmi krátké impulzy na vstupu a zvolíme vhodné měřítko zobrazení, nevýhodu ihned uvidíme.



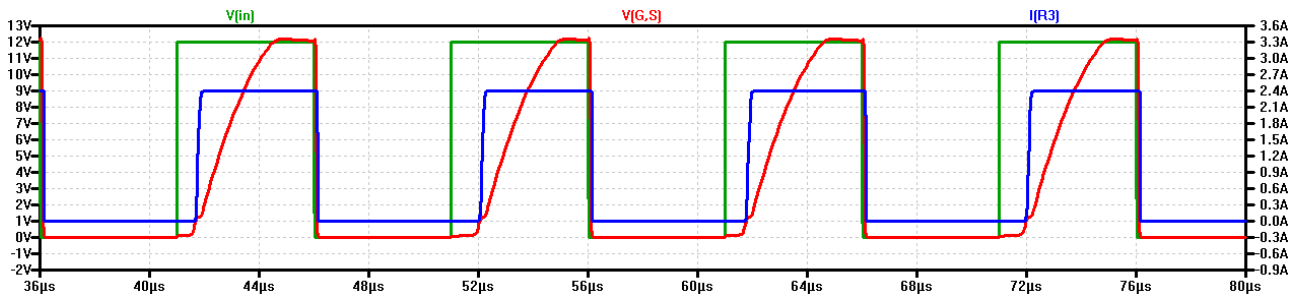
Obr. 6: Výsledek simulace zapojení z obr. 4 – frekvence 100kHz

Na obr. 6 můžete vidět, že zpoždění vypnutí je podstatně větší než zpoždění sepnutí spínače, takže pro elektronický přepínač bychom potřebovali zvláštní zpožďovací obvod pro „dead time“. Horní spínač tohoto typu bychom však mohli s úspěchem použít například pro snižující měnič nebo jinou aplikaci, kde potřebujeme pouze horní spínač. Tento nedostatek však lze snadno odstranit za cenu jediného tranzistoru typu pnp:



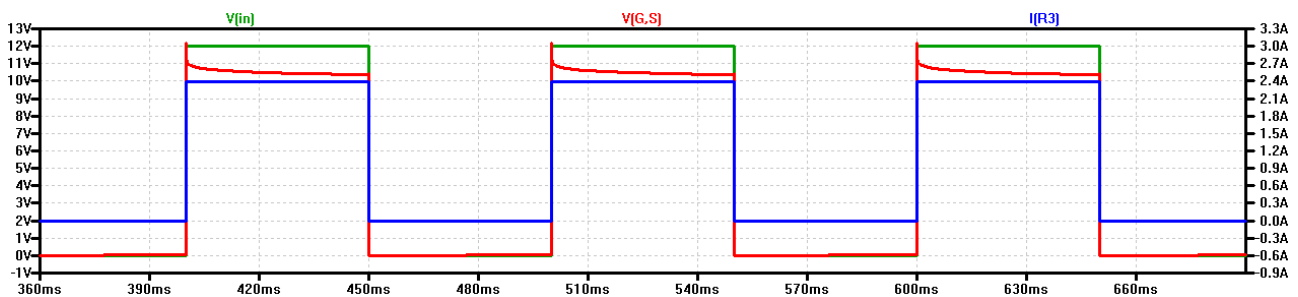
Obr. 7: Zapojení horního spínače s jedním transformátorem s jednou sekundární cívkou – verze 2

Na obrázku výše je tranzistor typu pnp zapojen tak, aby po příchodu impulsu záporné polarity se tento otevřel a vybil kapacitu  $C_{GS}$  tranzistoru M2.



Obr. 8: Výsledek simulace zapojení z obr. 7 – frekvence 100kHz

Z obr. 8 je zřejmé, že použití tranzistoru Q2 v zapojení na obr. 7 podstatně urychlí vypnutí M2, takže se nakonec ukázalo, že si vystačíme s transformátorem pouze s jedním primárním a jedním sekundárním vinutím. Zapojení na obr. 2 je tedy jen jakýmsi přechodným vývojovým stádiem na cestě k optimálnímu hornímu spínači. Nakonec se ještě přesvědčíme, zda tento horní spínač je použitelný i pro dlouhé časy sepnutí:

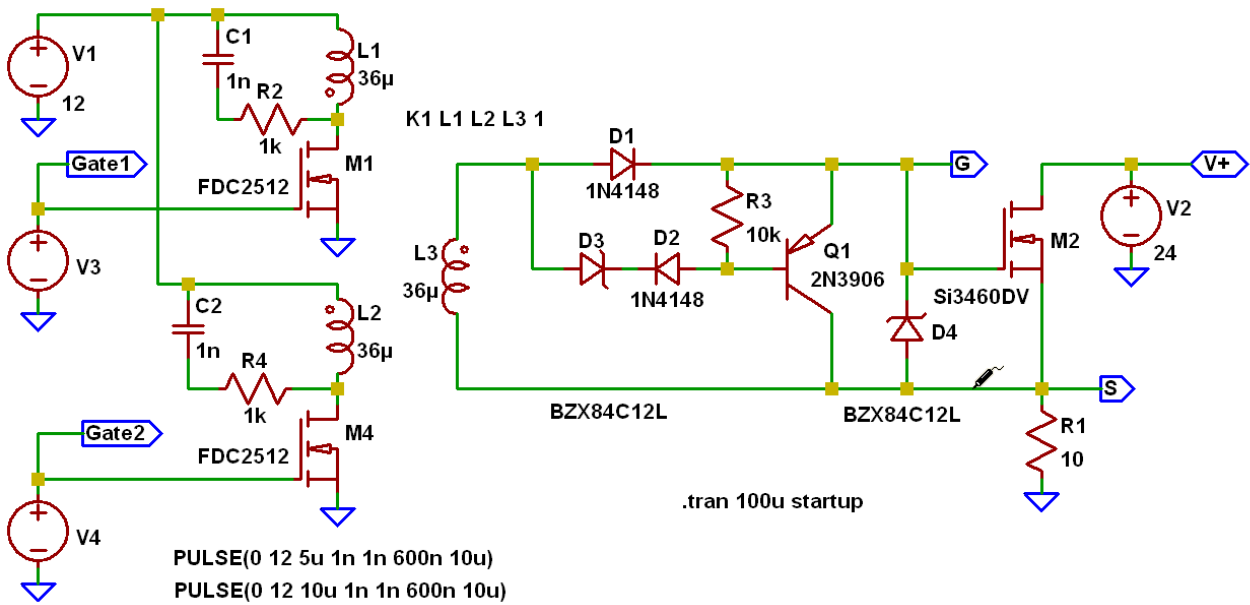


Obr. 9: Výsledek simulace zapojení z obr. 7 – frekvence 10Hz

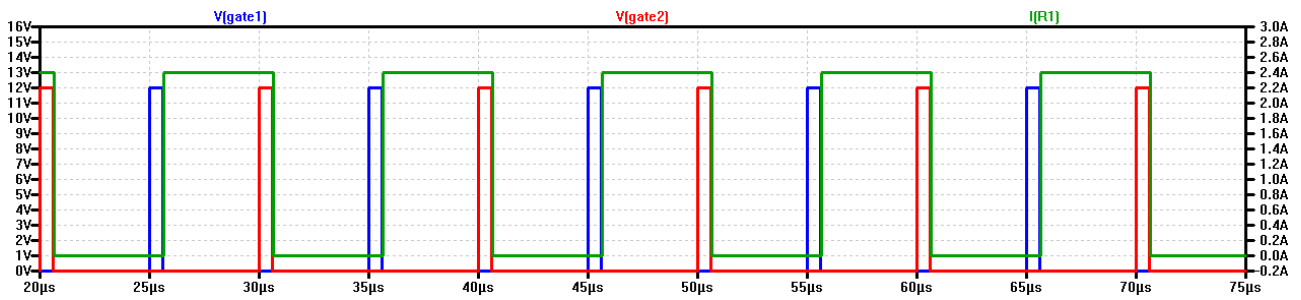
Na obr. 9 se můžete přesvědčit, že tento spínač lze použít i pro velmi dlouhé intervaly sepnutí v řádu desítek milisekund.

Zapojení spínače na obr. 7 má přece jen jednu nevýhodu, kterou platí za svoji jednoduchost. Zřetelně je to vidět na obr. 8: Zde vidíme, že nárůst napětí na „gate“ tranzistoru M2 je pozvolný (červená křivka). To znamená, že se M2 otevírá pozvolna, což má za následek výkonovou ztrátu. To omezuje použití tohoto spínače na spínání nižších výkonů. (U rezonančního řízení by to vadit nemuselo, protože k přepínání dochází při průchodu proudy nulou.)

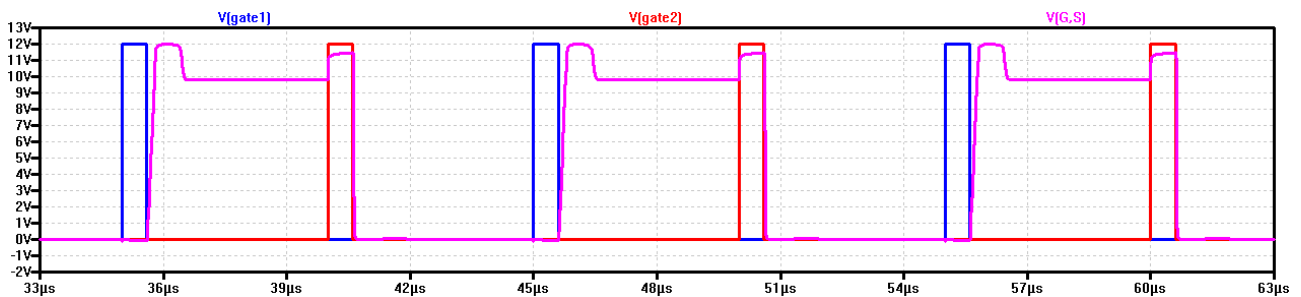
Abychom tuto vadu na kráse odstranili, musíme se vrátit k principu blokujícího měniče a transformátoru se třemi vinutími. Na obr. 10 máme základní zapojení spínače této koncepce. Sekundární strana zůstala v principu zachována, ale změnila se strana primární. Zde máme dvě vinutí, dva spínací tranzistory a dva zdroje úzkých impulzů V3 a V4. V3 slouží k zapínání, zatímco V4 k vypínání spínače. Výhoda tohoto zapojení spočívá v tom, že nárůst napětí na gate M2 je skokový, protože jsme – jak už bylo uvedeno – použili princip blokujícího měniče. Další výhodou je, že můžeme periodicky opakovat impulzy ze zdroje V3, takže dosáhneme prakticky libovolně dlouhé doby sepnutí. Pokud potřebujeme, aby spínač kopíroval vstupní obdélníkový signál, můžeme použít princip z obr. 1, kde pro vytvoření spínacího a vypínacího impulsu jsou použity derivační členy. Na obr. 12 si všimněte, že průběh napětí na gate tranzistoru M2 je skokový (fialová čára). Další výhodou zapojení na obr. 10 je to, že můžeme použít transformátor s cívkami o nízké indukčnosti, resp. s málo závity a nepotřebujeme omezovací odpory, což snižuje množství energie, které potřebujeme na sepnutí a vypnutí spínače.



Obr. 10: Zapojení horního spínače s jedním transformátorem se dvěma primárními cívkami

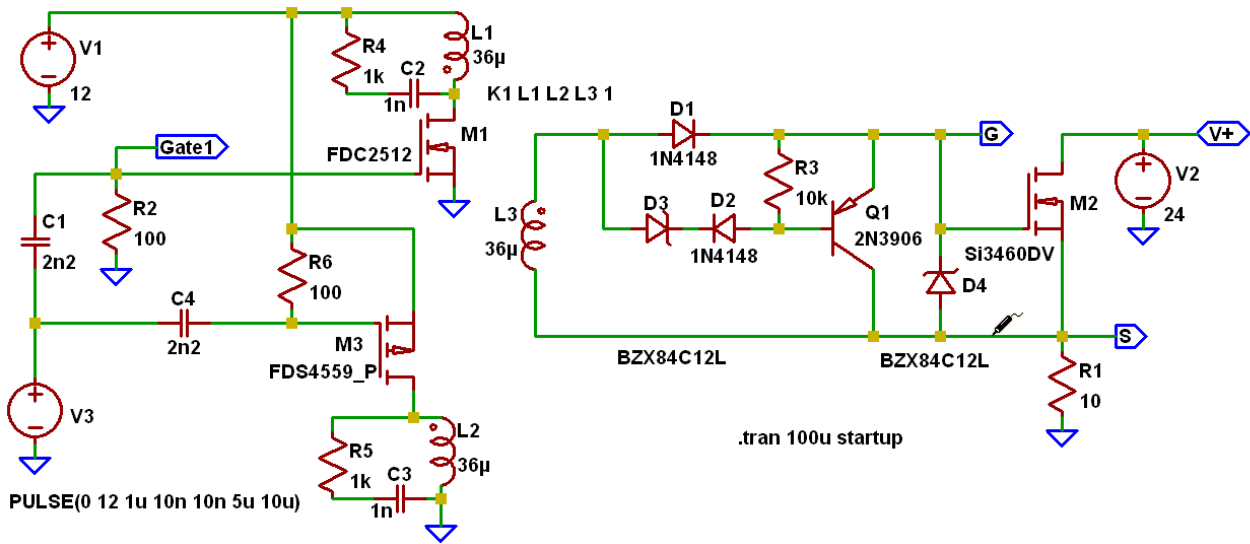


Obr. 11: Výsledek simulace zapojení z obr. 10

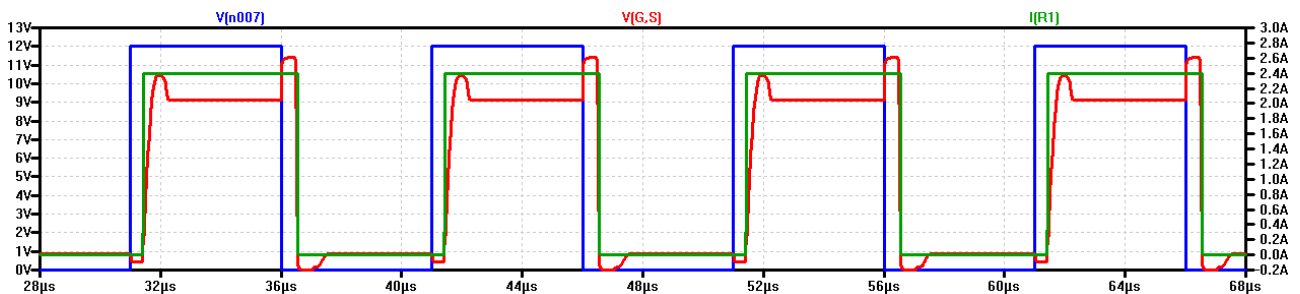


Obr. 12: Výsledek simulace zapojení z obr. 10 – průběh napětí na gate M2

Jen pro úplnost ještě uvedeme schéma zapojení horního spínače s jedním zdrojem obdélníkových impulzů (obr. 13).



Obr. 13: Zapojení horního spínače s transformátorem se dvěma primárními cívkami – verze 2



Obr. 14: Výsledek simulace zapojení z obr. 13

Nakonec se podíváme na výpočty. Výpočty spínače na principu blokujícího měniče jsme se již zabývali, proto jen stručně zopakujeme princip. K otevření tranzistoru typu MOSFET potřebujeme jednorázově dodat určité množství energie k nabití především vstupní kapacity  $C_{GS}$ . Pro množství této energie platí následující přibližný vztah

$$E \approx \frac{1}{2} \cdot C_{GS} \cdot U_{GS}^2 \quad (1)$$

Tato energie je dodána vybitím primární cívkou transformátoru, jejíž energie je dána rovnicí

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (2)$$

Na základě těchto dvou rovnic vypočítáme indukčnost cívky a proud  $I$ , který protéká cívkou v okamžiku rozepnutí tranzistoru. Na počtu závitů, resp. převodovém poměru transformátoru příliš nezáleží.

Nyní se podíváme na spínač na principu propustného měniče (viz obr. 7), kde je situace o trochu složitější. Začneme jednoduchou simulací. Na obr. 15 máme zdroj impulzů, transformátor a omezující odpor. Na dalším obrázku jsou zobrazeny průběhy napětí a proudu v obvodu. Po příchodu vzestupné hrany obdélníkového impulzu (červená) začne růst exponenciálně proud (zelená) primární cívkou podle vztahu

$$i = U/R \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

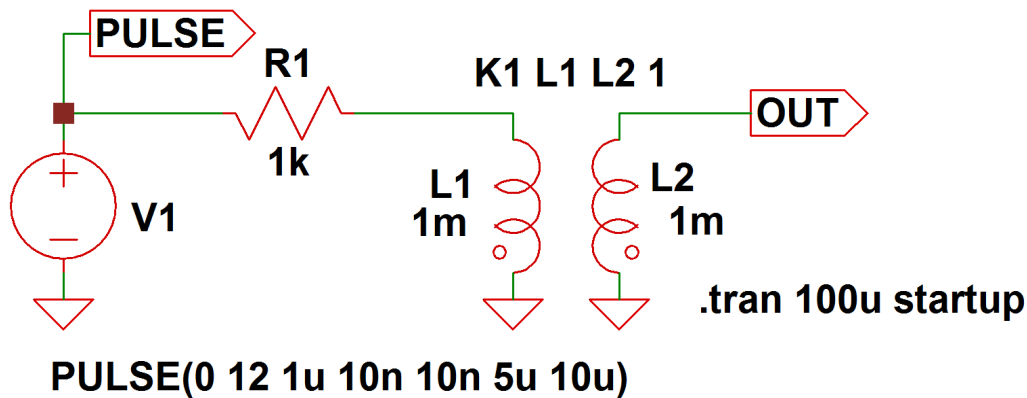
kde  $\tau = L/R$  je časová konstanta.

Modrá čára zobrazuje napětí indukované v sekundární cívce. Velikost tohoto napětí v čase  $t$  je dána derivací (tj. okamžitou změnou) proudu podle vzorce

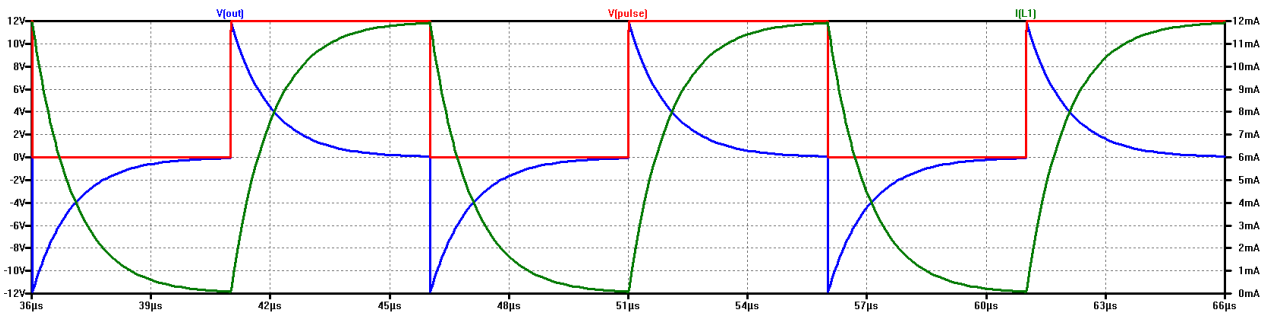
$$u(t) = L \cdot di/dt \quad (4)$$

za předpokladu, že indukčnost  $L$  je konstantní, transformátor má převodový poměr 1: 1 a nulové ztráty. Dosadíme-li do (4) za  $i$  podle (3), dostaneme po výpočtu derivace pro indukované napětí následující vztah

$$u = U \cdot e^{-t/\tau} \quad (5)$$

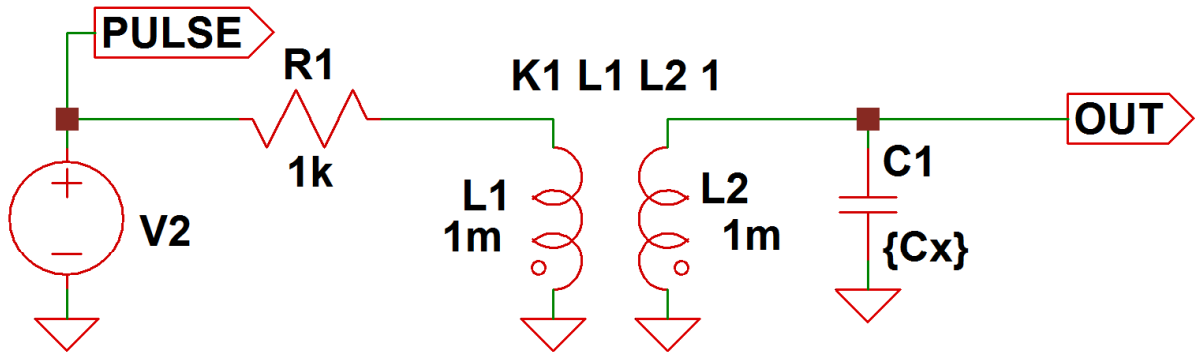


Obr. 15



Obr. 16

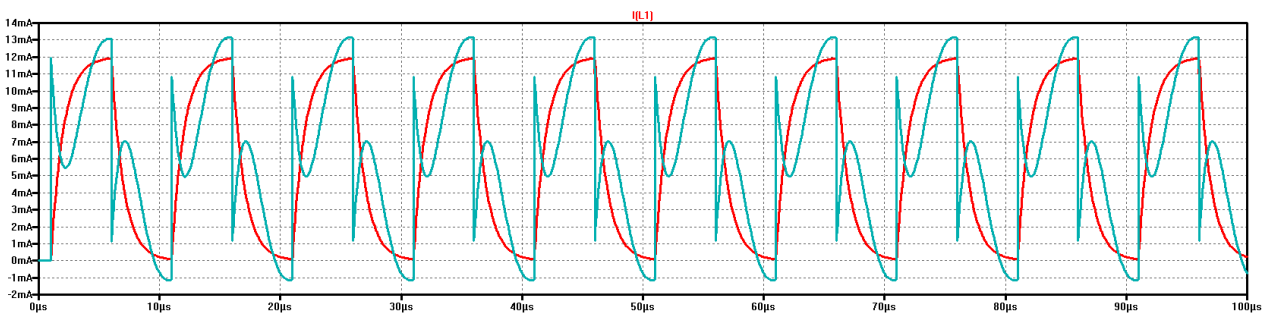
Protože v čase  $t = 0$  je  $u(0) = U$ , je amplituda indukovaného napětí rovna napětí napájecího zdroje. Dále situaci zkomplikujeme tím, že k sekundárnímu vinutí paralelně připojíme kondenzátor a budeme sledovat, co to provede s průběhy obvodových veličin. V simulačním schématu na obr. 17 máme na pravé straně kondenzátor, u něhož se automaticky nastavují dvě hodnoty: 1pF a 1nF. První hodnota je zanedbatelná a budeme ji považovat za nulovou (Program zadat 0 neumožňuje.). To nám umožní v jednom obrázku sledovat průběh dané veličiny bez a se zapojeným kondenzátorem. Na obr. 18 vidíme, že zapojení kondenzátoru paralelně k sekundární cívce poměrně brutálním způsobem změnil průběh proudu. Na obr. 19 potom můžete vidět, že po zapojení kondenzátoru amplituda napětí na výstupu klesla téměř na polovinu. (Určit exaktní hodnotu amplitudy napětí na C2 výpočtem by bylo značně obtížné, proto se spokojíme se simulací a převodový poměr trafo odhadneme.)



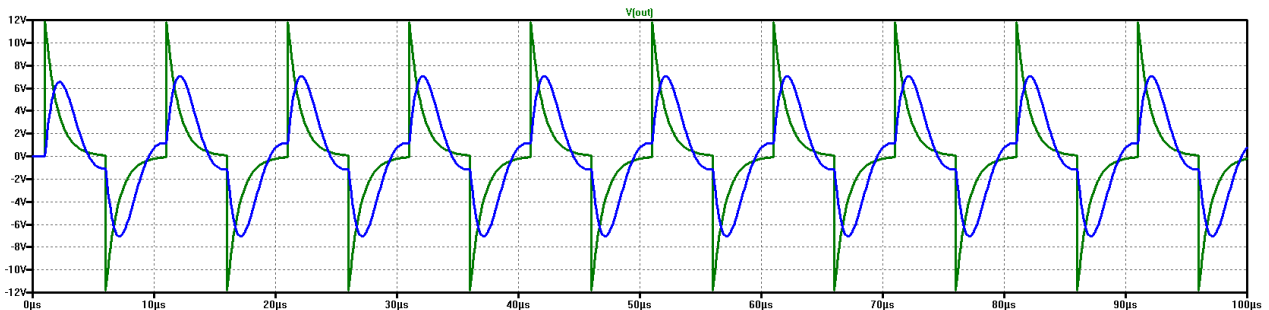
`PULSE(0 12 1u 10n 10n 5u 10u) .tran 100u startup`

`.step param Cx list 1p 1n`

Obr. 17



Obr. 18: Vliv C1 na průběh proudu primární cívky



Obr. 19: Vliv C1 na průběh výstupního napětí

Na základě výše uvedených zjištění můžeme stanovit následující postup výpočtu:

- Podle (1) určíme energii  $E$  potřebnou k otevření tranzistoru.
- Podle (2) určíme indukčnost primární cívky  $L1$  a proud  $I$  po ustálení resp. skončení přechodového děje
- Na základě znalosti  $I$  a napájecího napětí  $U$  podle Ohmova zákona (pro neznalé :  $R = U/I$ ) vypočítáme velikost omezovacího odporu.
- Určíme počet závitů primární a sekundární cívky tak, aby převodový poměr trafo byl minimálně 1: 2.