

Návrh obvodu snubberu - praktické tipy

Snubbery (snubber = tlumič) se používají pro omezování přechodových jevů a pomáhají snižovat EMI (electromagnetic interference).

1. Změřte kruhovou frekvenci na MOSFETu v bodě SW po jeho vypnutí. Naletujte kvalitní keramický nebo svitkový kondenzátor mezi bod SW a GND, který způsobí snížení kruhové frekvence na polovinu původní hodnoty. Efektivní kapacita v tomto bodě je 1/3 hodnoty vnějšího kondenzátoru. Parazitní indukčnost vypočítáme na základě vztahu:

$$F_{RING} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S \times C_T}}$$

kde C_T je celková (vlastní plus externí) kapacita.

2. Aby se kriticky snížily zákmity, zdvojnásobte velikost vnějšího kondenzátoru. Do série s vnějším kondenzátorem zapojte odpor R, který vypočítáte ze vztahu:

$$d = \frac{R}{2} \times \sqrt{\frac{L_S}{C_S}}$$

kde d je činitel tlumení (damping factor), za který dosadíme hodnotu 1. C_S je vypočítaná efektivní kapacita v uzlu SW, nikoli kapacita vnějšího kondenzátoru.

(Index „s“ je z anglického spurious = parazitní, pp.)

3. Rezistor snubberu R zapojte na stranu k zemi RC obvodu. Pokud se zákmity kriticky nesníží, hodnota vnějšího kondenzátoru je příliš nízká. Avšak zvýšení této hodnoty může být nepraktické. Změřte kladné a záporné napěťové špičky na rezistoru snubberu, jež budou nejvyšší při maximálním vstupním napětí. Výkon vyzářený rezistorem vypočítáme ze vzorce: The power dissipated in the resistor is calculated by:

$$P(R_{SNUB}) = \frac{1}{2} \times C_{SNUB} \times (V_P^2 + V_N^2) \times F_{SW}$$

kde V_P a V_N představují kladné a záporné napěťové špičky na rezistoru snubberu a F_{SW} je spínací frekvence. To může představovat nepřijatelné množství ztracené energie. Pokud je tomu tak, může být požadován kompromis mezi účinností a utlumením zákmitů.

Pro paralelní tlumení platí:

$$d = \frac{1}{2R} \times \sqrt{\frac{L_S}{C_S}}$$

or

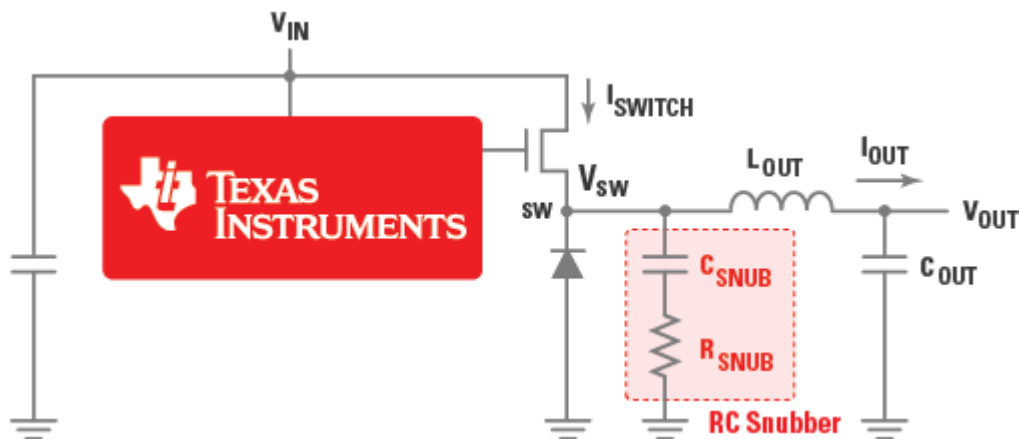
$$R_{SNUB} = \frac{1}{2d} \times \sqrt{\frac{L_S}{C_S}}$$

For critical damping ($d = 1$):

$$C_{\text{SNUB}} \geq 5 \times C_S$$

$$R_{\text{SNUB}} = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{L_S}{C_S}}$$

Příklad návrhu snubberu pro snižující měnič



Obr. 2: Příklad zapojení snubberu u snižujícího měniče

Změřte osciloskopem signál v bodě mezi MOSFETem a induktorem. Uvidíte napěťové špičky a zákmity na hranách tohoto signálu. Změříte periodu zákmitů, která bude, dejme tomu, 7ns, což představuje 143MHz. Naletujte kondenzátor mezi bod SW a zem. Řekněme, že hodnota 330pF způsobí zdvojnásobení periody zákmitů na 14ns.

Calculate C_S from:

$$C_S = C_{\text{EXT}} / 3 = 330 \text{ pF} / 3 = 110 \text{ pF}$$

Calculate L_S from:

$$L_S = \frac{1}{C_S \times (2\pi \times f_{\text{RING}})^2} = \frac{1}{110 \text{ pF} \times (6.28 \times 143 \text{ MHz})^2} = 11.2 \text{ nH}$$

Calculate C_{SNUB} from:

$$C_{\text{SNUB}} \geq 5 \times C_S$$

$$C_{\text{SNUB}} \geq 5 \times 110 \text{ pF} = 550 \text{ pF} ; \text{ use } 560 \text{ pF}$$

Calculate R_{SNUB} from:

$$R_{\text{SNUB}} = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{L_S}{C_S}} = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{11.2 \text{ nH}}{110 \text{ pF}}} = 5 \text{ ohms}$$

Zapojte R_{SNUB} a C_{SNUB} . Řekněme, že při vstupním napětí 40V změříte na rezistoru napěťové špičky: $V_{\text{pos}} = 40\text{V}$ a $V_{\text{neg}} = 20\text{V}$. Pro pracovní kmitočet 150kHz rezistor snubberu vyzáří výkon:

$$P(R_{SNUB}) = \frac{1}{2} \times C_{SNUB} \times (V_P^2 + V_N^2) \times F_{SW} = \frac{1}{2} \times 560 \text{ pF} \times (1600+400) \times 150 \text{ kHz} = 0.084 \text{ watts}$$

Hledáte-li integrované obvody pro DC/DC, navštivte [Texas Instruments Power Management website](http://www.ti.com/power).

Dodatky překladatele:

1) Zkoušet připojovat různé hodnoty kondenzátoru a pak měřit zákmity s cílem snížit je na polovinu mi přijde zbytečně pracné a nepraktické, proto nabízím rychlou a matematicky přesnou metodu výpočtu parazitní indukčnosti L_S a kapacity C_S .

Označme C_A jako známou kapacitu přidaného kondenzátoru (A jako added).

Frekvence parazitních zákmitů se řídí Thompsonovým vzorcem pro rezonanci (viz první vzorec výše), který pro naše účely přepíšeme do tvaru:

$$L_S \cdot C_S = 1/\omega_r^2 \quad (1)$$

kde $\omega_r = 2\pi f_r$ je rezonanční úhlá frekvence, f_r je frekvence v Hz.

Nejdříve změříme frekvenci f_1 resp. periodu T_1 zákmitů bez přídavného kondenzátoru a dosadíme do rovnice (1):

$$L_S \cdot C_S = 1/\omega_{r1}^2 = 1/(2\pi f_1)^2 = T_1^2/(2\pi)^2 \quad (2)$$

Potom paralelně k dané součástce nebo obvodu, v němž chceme utlumit parazitní zákmity, připojíme kondenzátor C_A o známé kapacitě a změříme frekvenci f_2 nebo periodu T_2 parazitních kmitů. Předpokládáme-li, že kondenzátor C_A je s parazitní kapacitou spojen paralelně, výsledná kapacita parazitního rezonančního obvodu bude nyní dána jejich součtem. Můžeme tedy dosadit do rovnice (1) a dostaneme:

$$L_S \cdot (C_S + C_A) = 1/\omega_{r2}^2 = 1/(2\pi f_2)^2 = T_2^2/(2\pi)^2 \quad (3)$$

Takže máme soustavu dvou lineárních rovnic o dvou neznámých, kterou napíšeme ve tvaru:

$$\begin{aligned} L_S \cdot C_S &= k_1 \\ L_S \cdot C_S + L_S \cdot C_A &= k_2 \end{aligned} \quad (4)$$

kde

$$k_1 = 1/\omega_{r1}^2 = 1/(2\pi f_1)^2 = T_1^2/(2\pi)^2 \quad (5a)$$

a

$$k_2 = 1/\omega_{r2}^2 = 1/(2\pi f_2)^2 = T_2^2/(2\pi)^2 \quad (5b)$$

První rovnici ze soustavy (4) vynásobíme (-1) a obě rovnice sečteme. Dostaneme rovnici pro neznámou parazitní indukčnost L_S :

$$L_S \cdot C_A = k_2 - k_1 = (T_2^2 - T_1^2)/4\pi^2$$

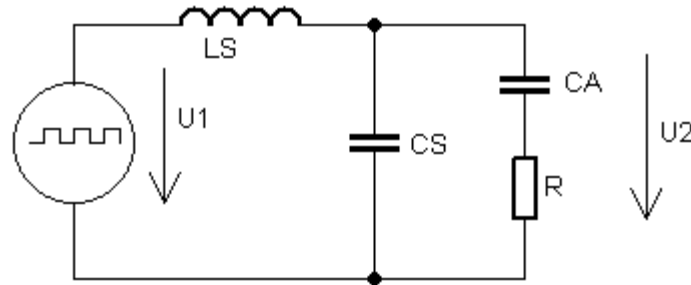
odkud dostaneme výsledný vzorec pro parazitní indukčnost:

$$L_S = (T_2^2 - T_1^2) / (4\pi^2 \cdot C_A) \quad (6)$$

Parazitní kapacitu C_S vypočítáme dosazením do rovnice (1):

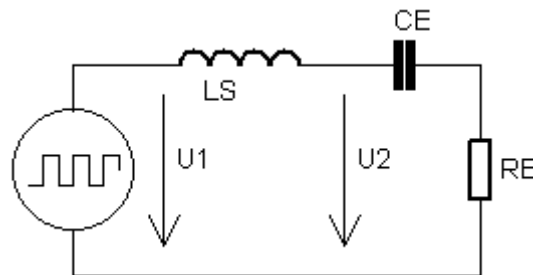
$$C_S = 1 / (\omega_{r1}^2 \cdot L_S) \quad (7)$$

2) Hodnotu rezistoru R snubberu můžeme odvodit následovně. Na dalším obrázku máme náhradní schéma snubberu a parazitního rez. obvodu z obr. 1.



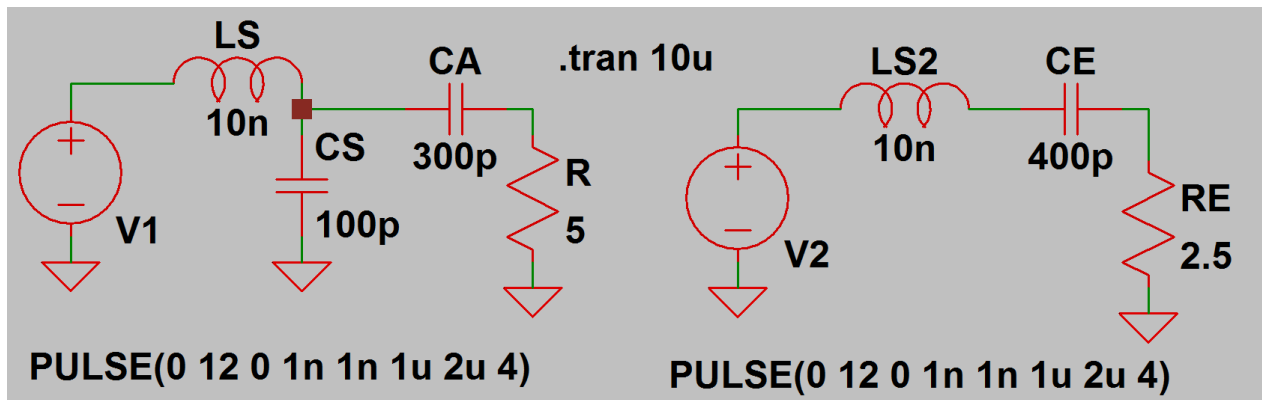
Obr. 2: Zapojení snubberu do parazitního LC obvodu

Popis chování obvodu na obr. 3 není jednoduché řešit exaktně, proto náhradní obvod na obr. 2 zjednodušíme na tvar:

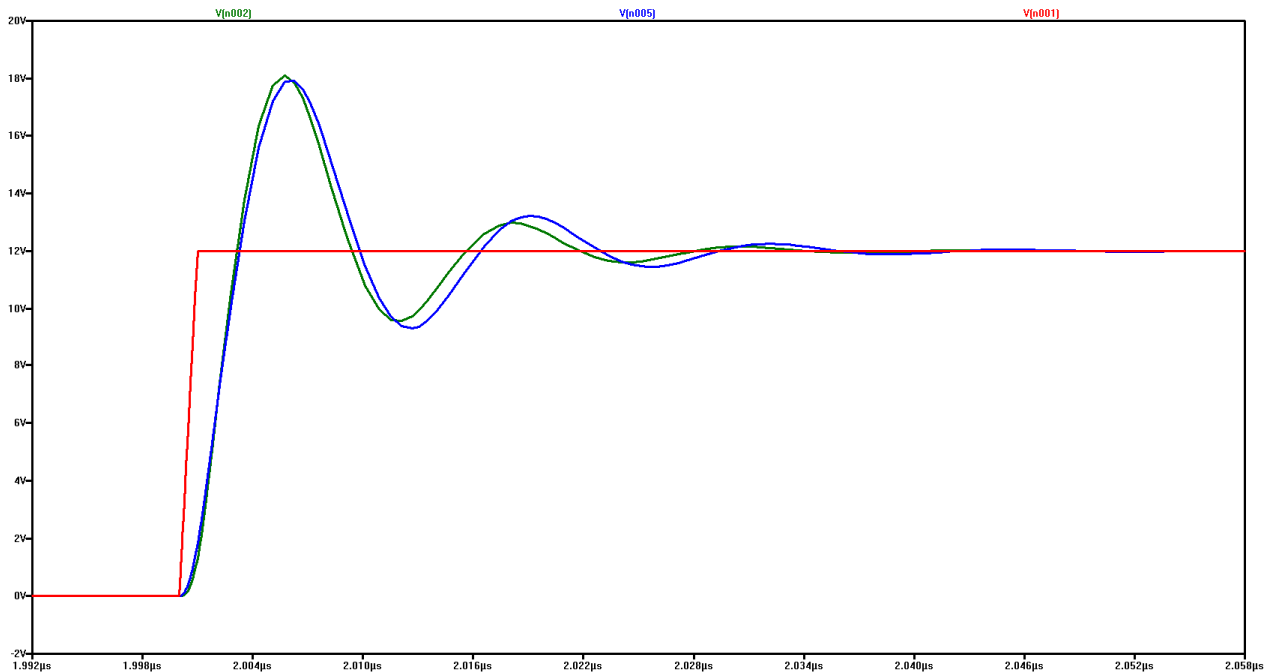


Obr. 3: Rezonanční LCR obvod

Na obr. 3 jsme kondenzátory C_S a C_A nahradili kondenzátorem C_E , jehož hodnota je součtem hodnot obou předchozích kondenzátorů. Vztah mezi hodnotou odporu na obr. 2 a obr. 3 najdeme experimentálně pomocí simulace:



Obr. 4: Simulace pro určení hodnoty R



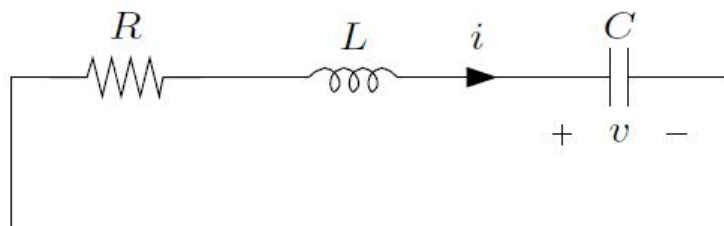
Obr. 5: Výsledek simulace podle obr. 4

Na obr. 5 vidíme, že pro poloviční hodnotu odporu R z obr. 2 dostaneme téměř shodné přechodové charakteristiky (tj. odezvy na jednotkový skokový signál). Jinými slovy: Abychom dostali přibližně ekvivalentní obvod (viz obr. 3) k obr. 2, musí platit: $CE = CS + CA$ a $RE = R/2$.

Nyní určíme vztah mezi odporem R snubberu a odezvou systému na jednotkový skokový signál.

Rezonanční obvod na obr. 6 lze popsat diferenciální rovnicí druhého řádu s konstantními koeficienty, která má obecný tvar

$$ay'' + by' + cy = 0 \quad (8)$$



Obr. 6. Sériový RLC obvod

V našem případě sestavíme diferenciální rovnici obvodu na obr. 6 následovně. Metodou smyčkových proudů sestavíme následující rovnici:

$$Ri + Li' + v = 0 \quad (9)$$

Pro napětí na kondenzátoru platí:

$$i = Cv' \quad (10)$$

Když dosadíme za i do (9), dostaneme diferenciální rovnici druhého řádu ve tvaru:

$$v'' + \frac{R}{L}v' + \frac{1}{LC}v = 0 \quad (11)$$

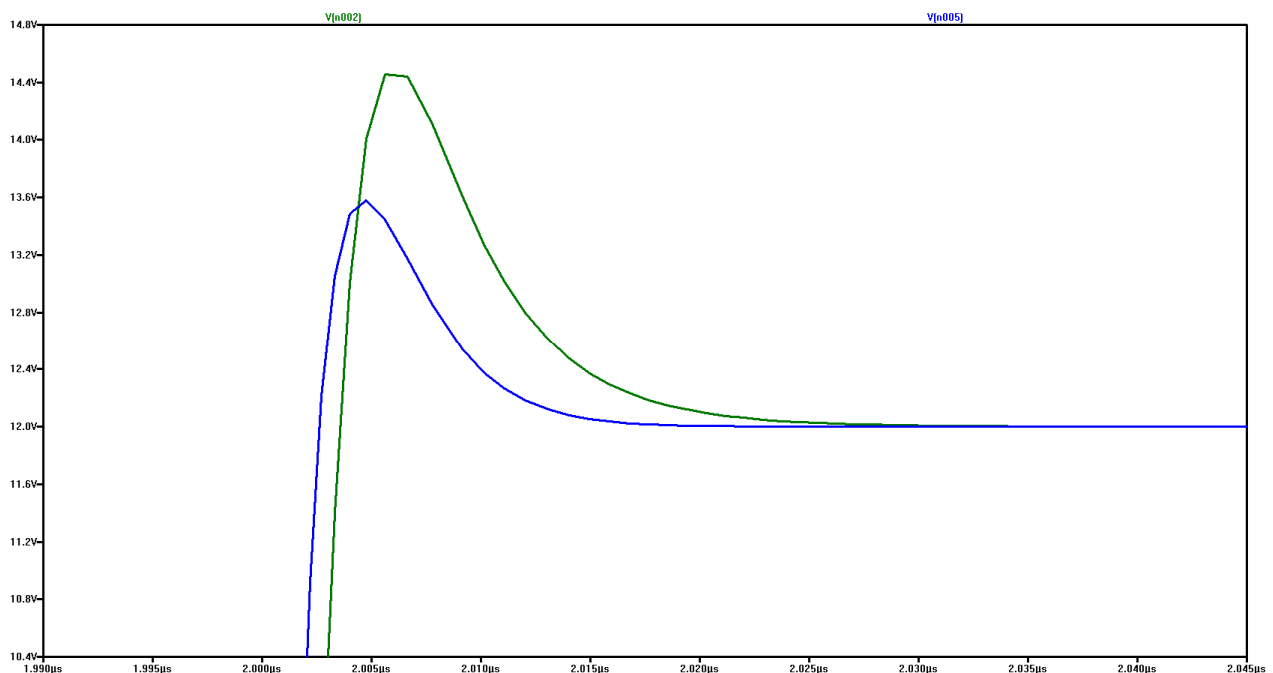
Řešením rovnice se zde nebudeme zabývat, ale podíváme se rovnou na výsledky:

- System je stabilní, když $R, L, C > 0$, což je evidentně splněno.
- System je přetlumený, když $R > 2\sqrt{L/C}$.
- System je kriticky tlumený, když $R = 2\sqrt{L/C}$ (12)
- System je podtlumený, když $R < 2\sqrt{L/C}$ a v tomto případě je frekvence oscilací dána vztahem: $\omega = \sqrt{1/LC - (R/2L)^2}$.

Nyní se vrátíme k obr. 4 a určíme velikost odporu RE tak, aby byl kriticky tlumený:

$$R_E = 2\sqrt{(LS/2CE)} = 2\sqrt{(10/0,4)} = 10\Omega$$

Když provedeme simulaci s hodnotami $R = 20\Omega$ a $R_E = 10\Omega$, shoda jako na obr. 5 přestává platit, ale obvod se snubberem (vlevo na obr. 4) je značně podtlumený. Lepšího výsledku dosáhneme, když zvětšíme CA na desetinásobek C_S , tj 1nF. V tom případě vliv parazitní kapacity C_S téměř úplně potlačíme a odpor R vypočítáme podle vzorce (12): $R = 2\sqrt{(LS/CA)} = 2\sqrt{(10/1)} = 6,32\Omega$. Na výsledek se můžete podívat dole:



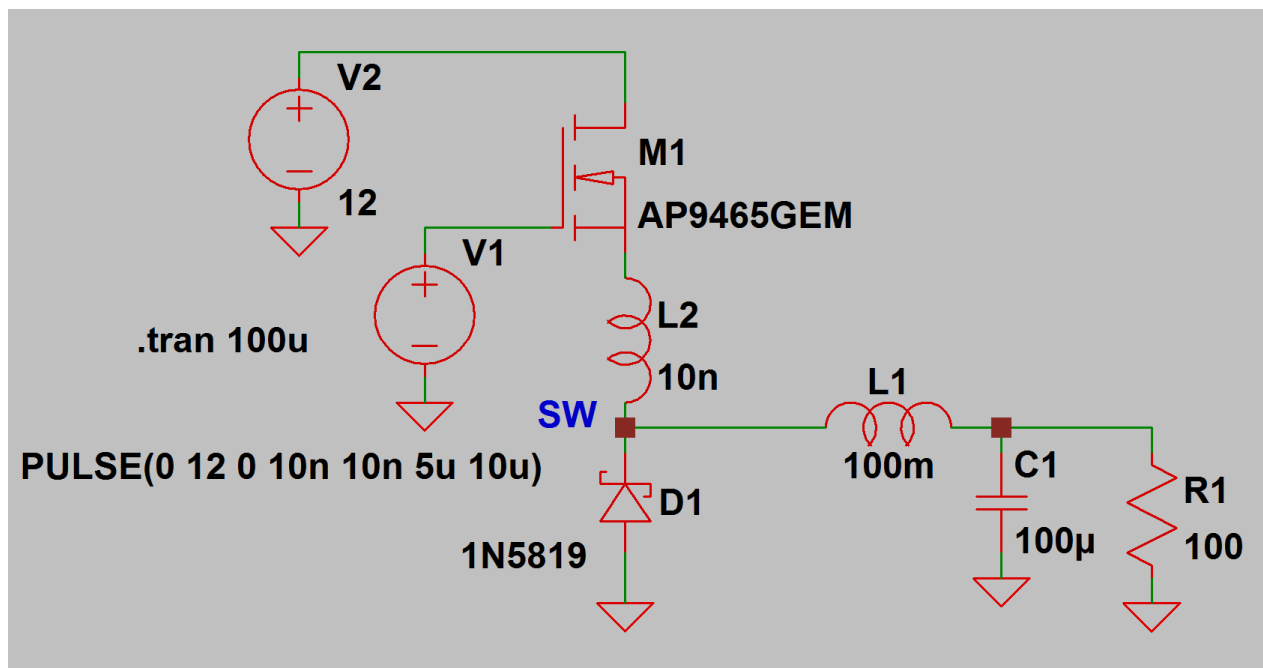
Obr. 7: Zelená - obvod se snubberem, modrá – ekvivalentní sériový obvod

Na obr. 7 vidíme, že nyní je výsledky uspokojivý.

Závěr:

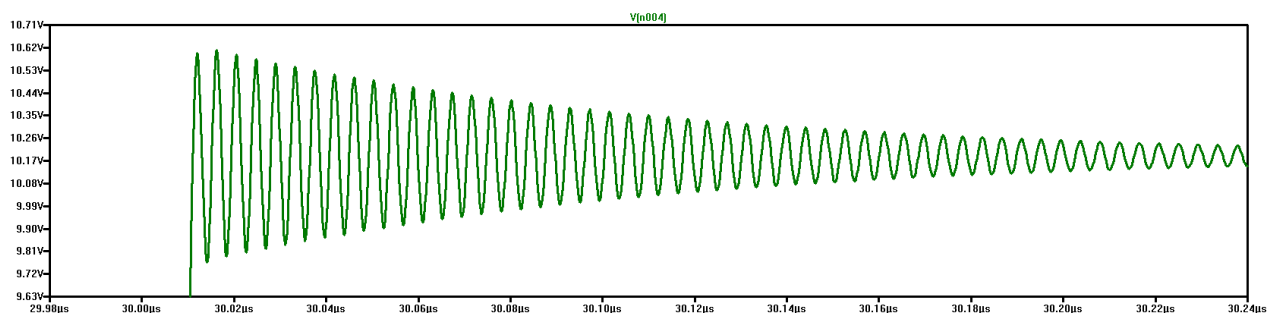
Základem je zjistit velikost parazitní indukčnosti L_S a kapacity C_S . Hodnoty L_S a C_S určíme metodou popsanou výše pomocí vztahů (6) a (7). Pokud to je možné, zvolíme kapacitu kondenzátoru CA snubberu tak velkou, aby bylo možné velikost parazitní kapacity C_S zanedbat, např. $CA = 10C_S$. Velikost odporu R snubberu určíme pomocí vzorce (12). Pokud je však kapacita CA příliš velká, může být ztrátový výkon vyzařovaný odporem R snubberu nepříjemně velký. V tom případě musíme zvolit vhodný kompromis mezi rušivými zákmity a ztrátovým výkonem.

3) Nakonec naši metodu vyzkoušíme pomocí simulace. Na obr. 8 máme experimentální obvod v podobě snižujícího měniče. Hodnoty součástek jsem úmyslně zvolil tak, aby se vytvořily parazitní kmity. Kromě toho jsem do obvodu zařadil parazitní indukčnost L2 o velikosti 10nH.



Obr. 8: Experimentální obvod bez snubberu

V bodě SW mezi L1, L2 a D1 změříme průběh napětí. Po zvětšení průběhu jsou patrné parazitní zákmity:



Obr. 9: Parazitní kmity v bodě SW na obr. 8

1) Frekvence zákmitů je $f_1 = 233,74\text{MHz}$, čemuž odpovídá perioda $T_1 = 4,28\text{ns}$. Nyní paralelně k diodě D1 připojíme kondenzátor $C_A = 200\text{pF}$ a opět změříme frekvenci parazitních kmitů: $f_2 = 110,63\text{MHz}$, $T_2 = 9,04\text{ns}$.

3) Vypočítáme parazitní indukčnost podle vzorce (6):

$$L_S = (T_2^2 - T_1^2) / (4\pi^2 \cdot C_A) = (8,17060 \cdot 10^{-17} - 1,83035 \cdot 10^{-17}) / (4\pi \cdot 200 \cdot 10^{-12}) = 8,03\text{nH}$$

4) Vypočítáme parazitní kapacitu podle vzorce (7):

$$C_S = 1 / (\omega_{r1}^2 \cdot L_S) = 1 / ((2\pi f_1)^2 \cdot L_S) = 1 / ((2\pi \cdot 233,74 \cdot 10^6)^2 \cdot 8,03 \cdot 10^{-9}) = 57,74\text{pF}$$

5) Zvolíme kapacitu kondenzátoru snubberu cca 10x větší než je parazitní kapacita C_S :

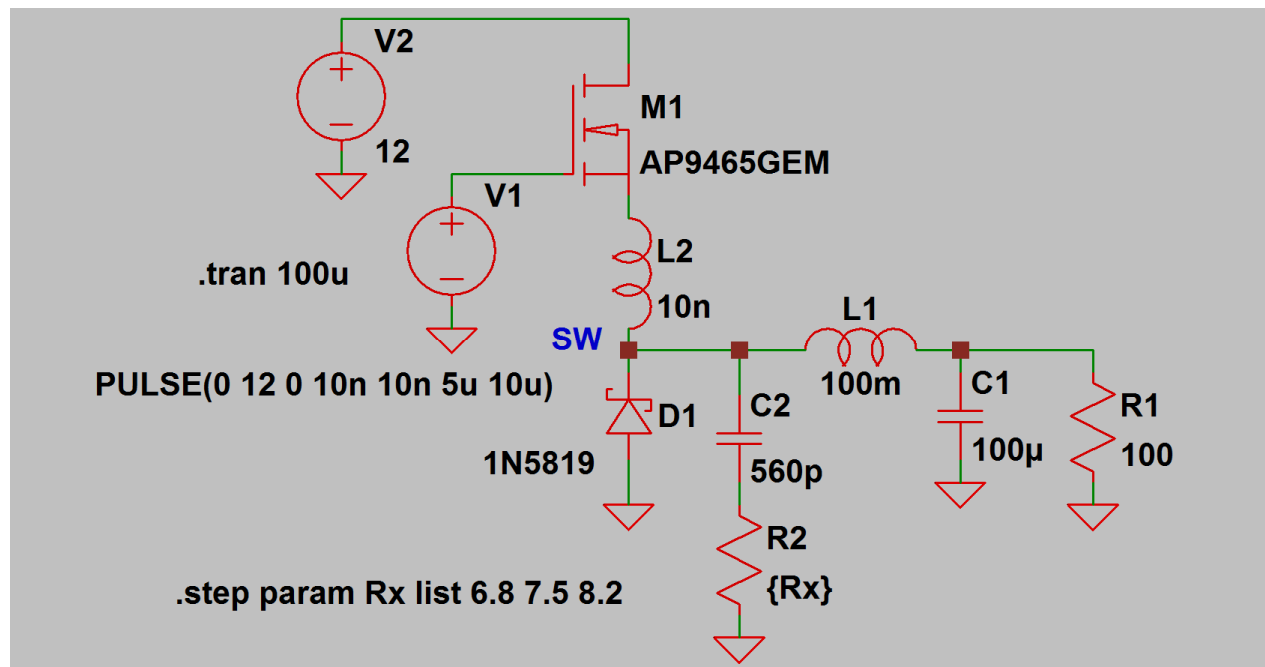
$$C_A \approx C_S \cdot 10 \approx 560\text{pF}$$

6) Vypočítáme hodnotu rezistoru R snubberu podle vzorce (12):

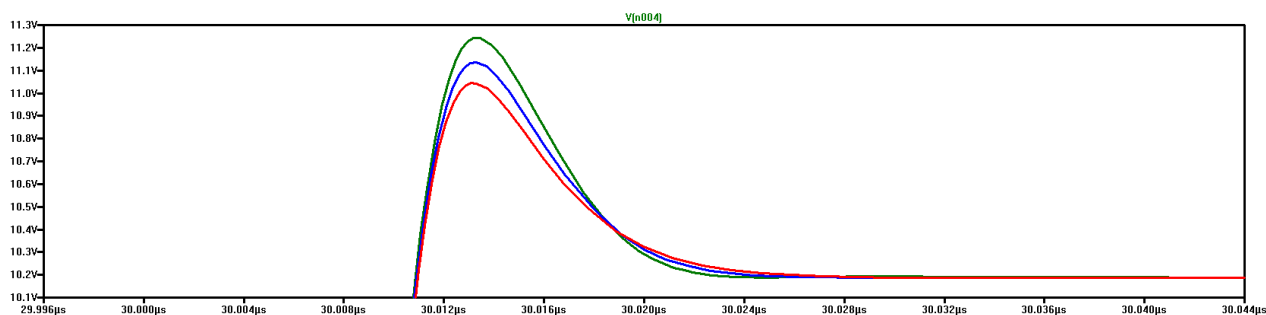
$$R = 2\sqrt{L_S / C_A} = 2\sqrt{8,03 / 0,56} = 7,57\Omega$$

Hodnotu R zvolíme nejbližší v řadě: 6,8 nebo 7,5 nebo 8,2Ω.

Na výsledek se můžeme podívat níže. Na obrázku 10 na schéma a na obr. 11 na výsledek simulace.

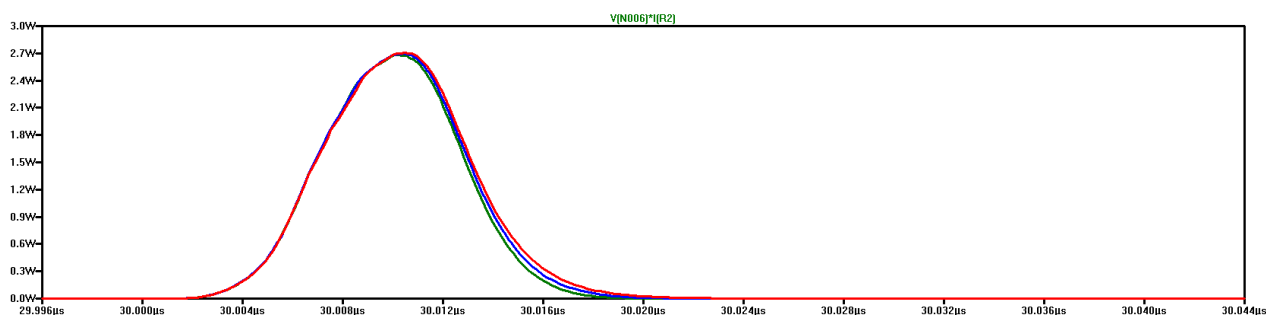


Obr. 10: Experimentální obvod se snubberem



Obr. 11: Výsledek simulace podle obr. 10: detail napětí v bodě SW pro $R = 6,8; 7,5; \text{ a } 8,2\Omega$

Na obr. 12 se ještě můžete podívat na průběhy ztrátového výkonu na odporu R snubberu:



Obr. 12: Průběh ztrátového výkonu na odporu snubberu pro $R = 6,8; 7,5; \text{ a } 8,2\Omega$

Amplituda ztrátového výkonu je cca 2,7W a délka impulzu je asi 15ns. Délka tohoto impulzu je vzhledem k periodě 10 μ s pracovního kmitočtu zanedbatelná. Průměrné výkonové zatížení odporu snubberu je tedy v řádu jednotek mW, takže můžeme s rezervou použít miniaturní odpor o výkonu 1/4W nebo 0,1W.

Zdroj: http://www.ti.com/ww/en/analog/power_management/snubber_circuit_design.html

Reference: https://web.stanford.edu/~boyd/ee102/2nd_order.pdf

(S. Boyd: Natural response of first and second order systems, Stanford University)

Přeložil a doplnil Ing. Ladislav Kopecký